

VetAgro Sup

Mémoire de fin d'études d'ingénieur

Impact des techniques culturales sans labour sur les cultures en contexte breton

Chloé Roussat
Option APVE
2014

VetAgro Sup

Mémoire de fin d'études d'ingénieur

Impact des techniques culturales sans labour sur les cultures en contexte breton

Chloé Roussat
Option APVE
2014

Maître de stage : Djilali Heddadj
Tutrice pédagogique : Nathalie Vassal

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 aucun cas, seul ou avec des tiers, appeler en garantie VetAgro Sup.

Résumé

L'essai travail du sol de la station de Kerguéhennec (Morbihan) a pour but la collecte de références locales sur les techniques culturales sans labour afin de mieux conseiller les agriculteurs bretons sur ces pratiques. Cet essai est en place depuis 2000, et étudie l'impact du non-labour, associé à différents fertilisants organiques, sur l'état du sol et le développement de la culture. Les fertilisants utilisés sont le fumier de volailles, le fumier de bovins et le lisier de porcs, ainsi que l'ammonitrate. Le présent rapport s'intéresse à l'aspect culture de l'essai. Deux périodes sont étudiées : la culture en place en 2013-2014 (colza), et l'ensemble des cultures depuis 2000.

Le colza 2014 est caractérisé par un échec de levée en semis direct principalement dû à la présence de ravageurs (limaces), et par un rendement plus dépendant de la fertilisation azotée que du travail du sol.

Depuis le début de l'essai, un plus grand nombre d'adventices est présent en labour en sortie d'hiver, sans qu'une sélection de la flore par le travail du sol ne soit visible. Le labour favorise également les maladies fongiques du pied du blé, particulièrement le piétin-verse. La levée des cultures est moins bonne en semis direct, mais les capacités de compensation du blé et du colza permettent souvent d'obtenir un rendement équivalent au labour. La présence de mycotoxines déoxynivalénol (DON) dans les grains de blé est plus importante sur le semis direct.

Abstract

Kerguéhennec (Morbihan, France) station's trial aims to collect local references about reduced tillage in order to be able to offer better advices to farmers about those practices. This trial began in 2000 and studies the impact of no-tillage, shallow tillage or ploughing, associated with several organic fertilizers, on soil state and crop growth. The fertilizers are poultry manure, cowshed manure, liquid pig manure and nitrate of ammonia. The present report focuses on the crop aspect of this trial. Two different periods are studied: the culturing period of 2013-2014 (rapeseed), and every crop since 2000.

2014's cultural year is characterized by an emergence failure on zero-tillage plots, mostly because of the presence of slugs, and by a yield more dependent of fertilization than tillage.

Since the beginning of the trial, a higher number of weeds is present on tilled modalities during winter's end, but no special flora seems to be selected. Tillage also favors wheat fungal diseases, especially cereal eyespot. Crops emergence is lower in zero-tillage plots, but its capacity of compensation leads to a similar yield as in tillage system. Wheat grains also contain a higher concentration of deoxynivalenol (DON) when cultivated in zero-tillage.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon maître de stage, Djilali Heddadj, pour son encadrement, sa sympathie et ses conseils. Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble des membres de SUSTAIN et particulièrement à Guénola Pérès et Vincent Hallaire pour leur aide.

Merci également à Anne Guezengar pour ses conseils.

Je remercie également les membres de la Chambre d'Agriculture du site de Kerguéhennec, Patrice Cotinet, David Meallet et Jean-Luc Giteau, pour leur accueil, leurs conseils et leur bonne humeur communicative.

Un grand merci également aux voisins d'Arvalis, permanents et temporaires, sans qui les pauses repas n'auraient pas eu le même goût.

Pour terminer, je remercie mes collègues stagiaires, Maëva Bourgeois, Cyril Le Roux et Vincent Salou, pour ces six mois mémorables passés ensemble « au grenier ».

Table des Matières

Introduction	1
I-Etat des connaissances	2
1. Définition des termes	2
2. Rendement et élaboration du rendement.....	2
2.1. Rendements	2
2.2. Elaboration du rendement	3
3. Maladies fongiques.....	4
3.1. Maladies du blé	4
3.2. Maladies du colza.....	5
3.3. Généralités	5
4. -Ravageurs	6
4.1. Limaces	6
4.2. Autres ravageurs	6
5. Adventices	6
5.1. Capacité de germination.....	7
5.2. Evolution du stock semencier	7
5.3. Sélection de la flore.....	8
5.4. Méthodes de lutte	8
5.5. Effet du travail du sol sur l'activité des herbicides	9
6. Nutrition azotée	9
6.1. Effet du travail du sol sur le cycle de l'azote	9
6.2. Valorisation de l'azote par la culture	10
6.3. Aspect technique	11
II-Matériels et méthodes.....	11
1. Présentation du dispositif expérimental.....	11
1.1. Site d'étude	11
1.2. Contexte pédoclimatique.....	11
1.3. Dispositif expérimental	11
2. Paramètres étudiés	12
2.1. Protection des cultures	12
2.2. Enracinement	13

2.3. Nutrition azotée et bilan hydrique.....	13
2.4. Rendements et composantes, vigueur et qualité	14
3. Analyses statistiques et représentations graphiques.....	15
III-Résultats et discussions	16
1. Maladies et ravageurs	16
1.1. Colza 2014	16
1.2. Synthèse pluriannuelle	16
2. Adventices	19
2.1. Colza 2014	19
2.2. Synthèse pluriannuelle	19
3. Enracinement	23
3.1. Colza 2014	23
3.2. Synthèse pluriannuelle	23
4. Nutrition azotée	24
4.1. Colza 2014	24
4.2. Synthèse pluriannuelle	26
5. Composantes du rendement.....	29
5.1. Colza 2014	29
5.2. Synthèse pluriannuelle	30
6. Rendement	32
6.1. Colza 2014	32
6.2. Synthèse pluriannuelle	32
7. Qualité.....	33
7.1. Colza 2014	33
7.2. Synthèse pluriannuelle	34
8. Discussion générale	35
8.1. Un fort impact du travail du sol sur la protection des cultures	35
8.2. Développement de la culture.....	37
IV-Limites et perspectives.....	38
Conclusion	39
Table des abréviations.....	41
Bibliographie	42
Annexes.....	46

Table des Figures

Figure 1: Part de surface de grandes cultures sans labour (Source : Agreste, 2011).....	1
Figure 2: Part de surface implantée sans labour par culture (Source : Agreste, 2011).....	1
Figure 3: Charrue (Source: Alain Cottais, Chambre d'Agriculture du Morbihan)	2
Figure 4: Chisel (Source: Alain Cottais, Chambre d'Agriculture du Morbihan)	2
Figure 5: Rendements en labour et en non-labour (source : AGRESTE, 2008).....	3
Figure 6 : Rendements moyens en 2011 (Source : Enquêtes pratiques culturales 2011, AGRESTE) 3	
Figure 7: Effet des résidus de culture (précédent cultural x travail du sol) sur les teneurs en DON (valeurs médianes en ug/kg) du blé en 2003 (Barrier-Guillot et al., 2007)	5
Figure 8 : Grille d'évaluation du risque DON sur blé tendre (Source : Gourdain, 2008).....	5
Figure 9: Diagramme ombrothermique 1993-2013 (source: Météo France, données de la station météorologique de Kerguéhennec)	11
Figure 10 : Plan de l'essai travail du sol de Kerguéhennec	11
Figure 11 : Semoir SD 3000 (Kuhn).....	12
Figure 12 : Pourcentage de pieds atteints par le piétin-verse en fonction du travail du sol.....	16
Figure 13 : Pourcentage de surface caulinaire atteinte par le piétin-verse en fonction du travail du sol.....	17
Figure 14 : Pourcentage de surface caulinaire atteinte par le piétin-verse en fonction de la fertilisation azotée.....	17
Figure 15 : Pourcentage de pieds atteints par la fusariose du pied en fonction du travail du sol	17
Figure 16 : Pourcentage de pieds atteints par la fusariose du pied en fonction de la fertilisation azotée	18
Figure 17 : Pourcentage de pieds atteints par le rhizoctone en fonction du travail du sol.....	18
Figure 18 : Pourcentage de pieds atteints par le rhizoctone en fonction de la fertilisation azotée	18
Figure 19 : Pourcentage de pieds atteints par l'oïdium en 2009 en fonction de la fertilisation azotée	18
Figure 20 : Pourcentage de pieds atteints par la septoriose en fonction du travail du sol	19
Figure 21 : Surface foliaire atteinte par la septoriose en fonction du travail du sol	19
Figure 22 : Surface foliaire atteinte par la septoriose en fonction de la fertilisation azotée.....	19
Figure 23 : Densité d'adventices, mars 2014.....	19
Figure 24 : Densité d'adventices en sortie d'hiver en fonction du travail du sol	20
Figure 25 : Densité d'adventices post-herbicide en fonction du travail du sol.....	20
Figure 26 : Densité d'adventices en post-récolte en fonction du travail du sol.....	20
Figure 27 : Evolution des populations d'adventices en fonction du travail du sol (2009)	20
Figure 28 : Densité d'adventices en fonction du travail du sol (2011).....	21
Figure 29 : Densité d'adventices en fonction du travail du sol (2013).....	21
Figure 30 : Nombre d'adventices monocotylédones et dicotylédones	21
Figure 31 : Densité de pâturin annuel en fonction du travail du sol.....	21
Figure 32 : Principales espèces de dicotylédones présentes sur l'essai	22
Figure 33 : Nombre d'adventices vivaces et annuelles en fonction du travail du sol.....	22
Figure 34 : Densité d'adventices en fonction du type de fertilisation azotée	22
Figure 35: Taux de pivots déformés en fonction du travail du sol	23

Figure 36: Longueur des pivots en sortie d'hiver en fonction du travail du sol	23
Figure 37: Taux de pivots déformés en fonction de la fertilisation azotée	23
Figure 38: Longueur des pivots en sortie d'hiver en fonction de la fertilisation azotée	23
Figure 39: Taux de pivots déformés, avril 2010	23
Figure 40: Densité racinaire du colza en fonction du travail du sol	23
Figure 41: Densité racinaire du maïs en fonction du travail du sol	24
Figure 42: Densité racinaire du blé en fonction du travail du sol	24
Figure 43 : Biomasse aérienne du colza en fonction du travail du sol.....	24
Figure 44 : Quantité d'azote absorbée par le colza en fonction du travail du sol.....	24
Figure 45 : Biomasse aérienne du colza en fonction de la fertilisation azotée	25
Figure 46 : Quantité d'azote absorbée par le colza en fonction de la fertilisation azotée	25
Figure 47 : Quantité totale d'azote absorbée par le blé en fonction de la fertilisation azotée	26
Figure 48 : Quantité d'eau en excès entre les dates de mesure du RSH et du RR.....	28
Figure 49: Valeurs du terme (2) en fonction du travail du sol.....	28
Figure 50: Densité du colza en sortie d'hiver 2014	29
Figure 51: Nombre de siliques par pied (2014)	29
Figure 52 : Densité de population du blé à la levée en fonction du travail du sol	30
Figure 53 : Densité du colza en sortie d'hiver en 2006 et 2010 en fonction du travail du sol.....	30
Figure 54: Densité du maïs en fonction du travail du sol	30
Figure 55 : Nombre d'épis par pied en fonction du travail du sol	30
Figure 56 : Relation entre le nombre de pieds par m ² et le nombre d'épis par pied	30
Figure 57 : Nombre d'épis par m ² en fonction du travail du sol.....	31
Figure 58: Nombre de siliques par pied en fonction du travail du sol (2010)	31
Figure 59 : PMG du blé en fonction du travail du sol en 2005 et 2007	31
Figure 60 : PMG à 15% d'humidité du blé en fonction de la fertilisation azotée	31
Figure 61 : Rendement 2014 ramené à 9% d'humidité en fonction de la fertilisation azotée	32
Figure 62 : Rendement 2014 ramené à 9% d'humidité en fonction du travail du sol	32
Figure 63: Rendements du colza en fonction du travail du sol.....	32
Figure 64: Rendements du maïs en fonction du travail du sol.....	33
Figure 65 : Rendements du blé en fonction du travail du sol	33
Figure 66 : Rendements du blé en fonction de la fertilisation azotée	33
Figure 67 : Taux d'impuretés à la récolte, colza 2014.....	33
Figure 68 : Teneur azotée des grains à la récolte en fonction de la fertilisation azotée	34
Figure 69 : Teneur azotée des grains à la récolte en fonction du travail du sol.....	34
Figure 70 : Teneur en DON du grain en fonction du travail du sol en 2007 et 2009	34

Table des Tableaux

Tableau 1: Espèces favorisées/non favorisées par le non-labour en céréales d'hiver (adapté de Fourbet et al. (1979), Aibar (2006) et Viaux (2013))	8
Tableau 2 : Coefficients K1 et K2 du modèle AMG (Andriulo, Mary et Guérif, 2001) calculés sur l'essai « travail du sol » de Boigneville (Schvartz et al., 2005).....	10
Tableau 3 : Taux de matière organique dans les horizons 0-5 et 5-15 cm (2009).....	11
Tableau 4: Indice de nutrition azotée du colza au stade début de floraison.....	25
Tableau 5: Quantités d'azote sous forme minérale et organique apportées (Source : analyses des effluents)	26

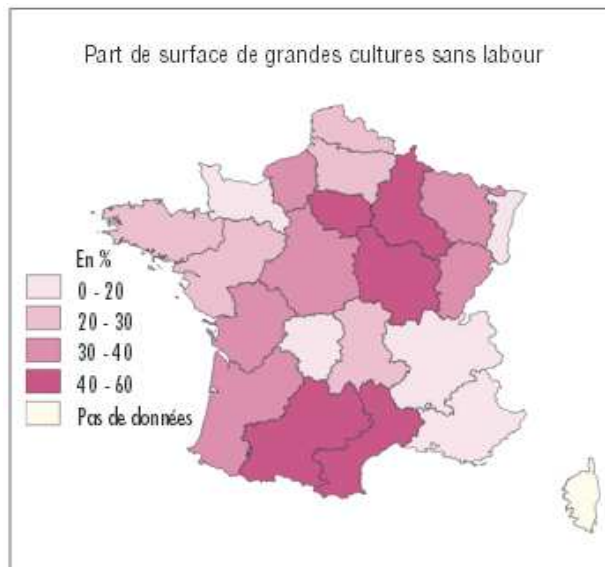


Figure 1: Part de surface de grandes cultures sans labour (Source : Agreste, 2011)

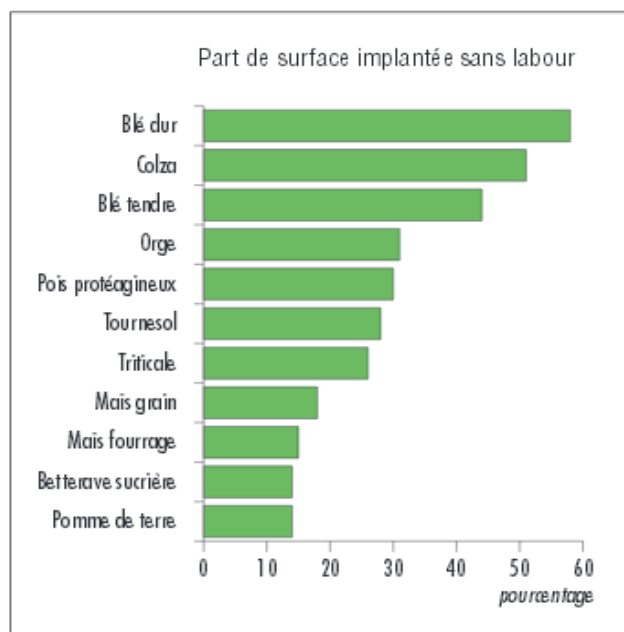


Figure 2: Part de surface implantée sans labour par culture (Source : Agreste, 2011)

Introduction

Depuis le développement de la mécanisation, qui a permis aux agriculteurs de s'affranchir des contraintes du travail animal, la pratique du labour s'est fortement développée, au point de devenir le travail du sol de référence dans l'agriculture occidentale.

Les techniques culturales sans labour (TCSL) apparaissent dans les années 30 aux Etats-Unis suite à l'épisode du « Dust Bowl », une série de tempêtes de poussière déclenchées par un labour trop intensif des terres agricoles. Le but premier des TCSL est alors de limiter l'érosion des sols.

Ces techniques commencent à se développer en France dans les années 70 dans les régions de grandes cultures, principalement pour les céréales d'hiver. Ce développement reste toutefois relativement faible jusqu'aux années 90, notamment du fait des coûts élevés des matériels spécifiques et du désherbage chimique, d'un manque de connaissances et d'un souci esthétique et social (Coronel, 2001). En France, les surfaces cultivées en non-labour représentent en 2011 35% des surfaces nationales en grande culture (AGRESTE, 2014). Les régions les plus concernées par le non-labour sont situées dans le Nord-Est et le Sud-Ouest du pays (Figure 1).

Toutes les cultures ne sont pas concernées de la même façon par le non-labour (Figure 2). Les céréales à paille et le colza sont, au niveau national, les cultures les plus souvent cultivées sans labour. Certaines cultures très exigeantes vis-à-vis de la structure du sol ne sont quasiment jamais cultivées sans labour. C'est le cas de la betterave ou de la pomme de terre (AGRESTE, 2014).

Les motivations les plus souvent évoquées aujourd'hui pour justifier le passage en travail superficiel ou en semis direct sont un gain de temps, une meilleure organisation du travail, une diminution des charges de mécanisation, et dans une moindre mesure les aspects agronomie et innovation (Heddadj et al., 2008). Le gain de temps est souvent cité comme motivation principale. En effet, le semis direct réduit le nombre de passages sur la parcelle cultivée, tandis que le travail superficiel permet de rouler plus vite lors du travail du sol.

L'augmentation de la surface cultivée sans labour se heurte toutefois à un manque de références locales. C'est pourquoi la Chambre d'Agriculture de Bretagne a mis en place en 2000 un essai visant à estimer l'impact à long terme du travail simplifié sur le sol et sur les cultures dans le contexte pédoclimatique breton. Ces références sont nécessaires afin de conseiller au mieux les agriculteurs de la région sur les pratiques de travail du sol les plus adaptées.

Cet essai s'inscrit depuis 2012 dans le cadre du projet européen SUSTAIN (Soil Functional Biodiversity and Ecosystem Services, a Transdisciplinary Approach), animé par l'Université de Rennes en collaboration avec des organisations françaises (INRA, Chambre d'Agriculture de Bretagne) et néerlandaises, et dont le but est la compréhension des impacts du non-labour sur le fonctionnement et la biodiversité du sol et sur ses services écosystémiques. Une base de données regroupant l'ensemble des résultats des essais participant au projet a notamment été créée au cours de cette année.

Ce travail se concentrera sur l'étude des effets des TCSL sur les cultures : leurs rendements, développement et qualité à la récolte, ainsi que sur la présence au cours du cycle cultural de parasites et d'adventices, afin de déterminer l'impact du non labour associé à différents fertilisants organiques sur le développement et la protection des cultures en contexte breton. Pour cela, une synthèse des résultats obtenus depuis le début de l'essai jusqu'à l'année 2014 sera réalisée.



Figure 3: Charrue (Source: Alain Cottais, Chambre d'Agriculture du Morbihan)



Figure 4: Chisel (Source: Alain Cottais, Chambre d'Agriculture du Morbihan)

I-Etat des connaissances

1. Définition des termes

Il existe une grande diversité de techniques de travail du sol, mises en œuvre avec des outils variés. On peut toutefois regrouper ces techniques en plusieurs catégories.

Le labour s'effectue sur 20 à 30 cm de profondeur, et entraîne un retournement des couches du sol. Il permet d'homogénéiser le sol, d'enfouir les résidus de culture, de contrôler les adventices en les détruisant en enfouissant leurs semences, de détruire des cultures intermédiaires, d'ameublir le sol et d'améliorer le ressuyage. Il est effectué à l'aide d'une charrue (Figure 3).

Le pseudo-labour concerne une profondeur équivalente à celle du labour, mais ne retourne pas les couches du sol. Il est également utilisé pour ameublir le sol et incorporer les résidus de culture et les adventices, même si cette incorporation est limitée par le fait que le sol ne soit pas retourné. Plusieurs outils sont possibles, dont les cultivateurs lourds.

Les Techniques Culturelles Sans Labour (TCSL), aussi appelées Techniques Sans Labour (TSL) ou Techniques Culturelles Simplifiées (TCS), peuvent désigner un travail profond ou un travail plus superficiel.

-**Les TCSL en travail profond** (supérieur à 15 cm) fissurent le sol mais ne perturbent pas la disposition des couches de sol. Elles sont effectuées à l'aide de chisels (Figure 4) ou de cover crops.

-**Les TCSL en travail superficiel** (de 5 à 15 cm de profondeur) mélangent les résidus de culture aux premiers horizons de sol. Plus ces opérations sont proches de la surface, plus la quantité de résidus restant en surface est importante. Les matériels utilisés sont divers : herse rotative, chisel, vibroculteur...

- **Le Semis Direct (SD)** implique un travail de 2 à 5cm de profondeur sur la ligne de semis uniquement. Il permet une couverture maximale du sol par les résidus de culture. Le travail n'est effectué que sur la ligne de semis, le plus souvent par des semoirs à disque (Heddadj et al., 2008).

2. Rendement et élaboration du rendement

2.1. Rendements

Un essai réalisé sur 3 ans dans l'Iowa (Etats-Unis) ne révèle pas de différence significative de rendement en maïs sur des parcelles en labour et en TCSL (Kanwar et al., 1988). Pour l'essai travail du sol réalisé à Changins (Suisse) les rendements sont aussi élevés pour les TCSL que pour le labour, à condition que le sol soit correctement drainé, sans compactage, que l'implantation de la culture soit correcte et les adventices maîtrisées (Vullioud et Vez, 2008).

Un autre essai en République Tchèque montre que pour une forte fertilisation azotée, les rendements de blé d'hiver en TCSL sont supérieurs à ceux en labour. En cas d'apport azoté faible, par contre, c'est au contraire le labour qui est favorisé (Sip et al., 2013).

Un rendement un peu inférieur quand le non-labour se perpétue Rendement des grandes cultures en 2005-2006 (q/ha)			
	Parcelles sans labour depuis 2000-2001	Parcelles avec labour annuel	Écart (%)
Blé tendre	69	72	- 4
Orge	61	67	- 9
Maïs grain	86	92	- 7
Colza	29	30	- 3
Tournesol	22	23	- 4
Betterave industrielle ¹	78	78	0

1. Rendement en tonne par hectare.

Figure 5: Rendements en labour et en non-labour (Source : AGRESTE, 2008)

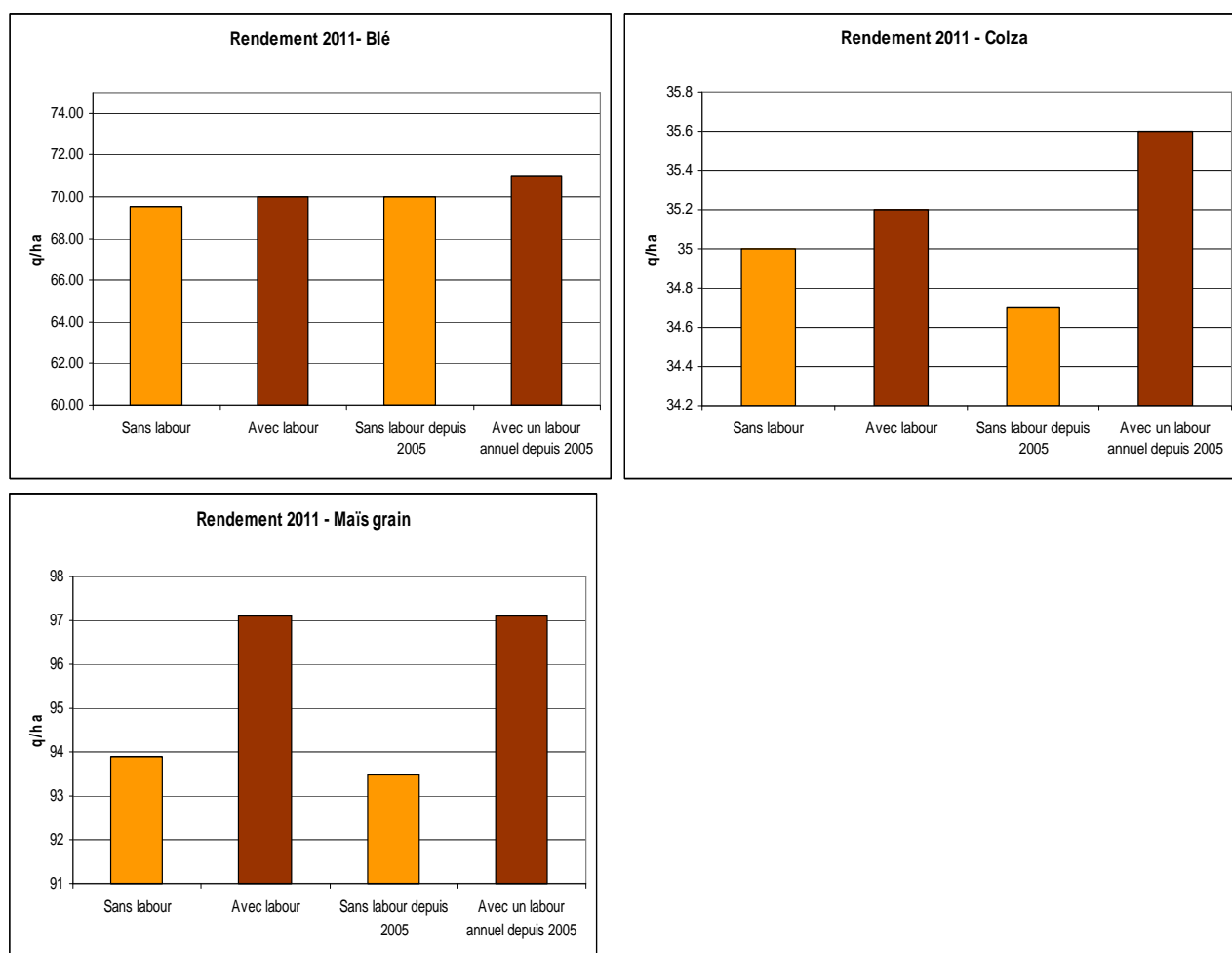


Figure 6 : Rendements moyens en 2011 (Source : Enquêtes pratiques culturales 2011, AGRESTE)

A Zollikofen (Suisse), une autre expérimentation sur le travail du sol montre que le blé d'hiver (en précédent betteraves ou pommes de terre) a, sur 5 ans, un rendement plus élevé de 5,5% en semis direct qu'en labour. Le même essai, quelques années plus tard, montre des rendements en augmentation constante en semis direct pour les cultures de maïs ensilage et de blé d'hiver. Ces augmentations peuvent être expliquées par une adaptation du sol en semis direct, mais également par une évolution des équipements utilisés depuis le début de l'essai, ainsi que par un manque initial de connaissances (Chervet et al., 2005).

En France, l'enquête sur les pratiques culturales d'Agreste réalisée en 2006 montre des rendements moyens pour le non-labour légèrement inférieurs à ceux obtenus en labour (Figure 5) (AGRESTE, 2008).

Les rendements obtenus en labour et non-labour pour l'année culturale 2010-2011 montrent la même tendance, avec une diminution du rendement légèrement plus importante en non-labour pour le maïs grain et le colza que pour le blé tendre (Figure 6).

2.2. Elaboration du rendement

2.2.1. Enracinement

La capacité d'enracinement des cultures est directement liée aux caractéristiques du sol, elles-mêmes fortement impactées par le travail du sol. Le développement racinaire est un facteur important pour le développement des cultures, dont il permet notamment l'alimentation en eau et en nutriments.

En SD, la couche non travaillée étant plus compacte, elle a tendance à gêner le développement racinaire, qui sera au final moins important qu'en labour (Caneill, 1994; Guerif, 1994).

La profondeur de l'enracinement ne semble pas dépendre du travail du sol : elle est en effet similaire en labour et en TCSL (Caneill, 1994). L'enracinement observé en TCSL est par contre plus hétérogène, du fait d'une compaction irrégulière du sol, qui crée à la fois des zones trop denses pour être colonisées et des fissures (Guerif, 1994).

Toutes les cultures ne sont pas impactées de la même façon par des difficultés d'enracinement : si le maïs conserve un enracinement hétérogène au cours de son développement, ce qui peut influencer son rendement, le blé par contre est capable de compenser ces difficultés par la suite (Caneill, 1994).

2.2.2. Implantation et levée

La germination des semences nécessite de l'eau, de l'oxygène et une température seuil, en dessous de laquelle la germination est fortement ralentie. La qualité du contact sol-graine est donc un facteur décisif pour la germination de la plante.

Le non-labour a tendance à maintenir un sol plus humide, qui se réchauffe plus lentement. De plus, le contact terre-graine est moins important en non-labour. Les résidus de culture non enfouis, particulièrement en semis direct, peuvent gêner les outils de semis et limiter le contact sol-graine en diminuant la profondeur du sillon ou en s'interposant entre le sol et la graine (Labreuche et al., 2001). Les conditions dans lesquelles s'effectue le semis influencent cet effet. Si les résidus de culture sont secs, ils se cassent facilement lors du semis et sont donc peu gênants. Si au contraire,

les conditions sont humides, les résidus sont plus souples et ont plus tendance à limiter le contact graine-sol (Chervet et al., 2005).

Ces résidus peuvent également servir d'abris aux ravageurs et diminuer l'efficacité de certains herbicides, ce qui peut limiter la levée de la culture. Un travail superficiel peut réduire ces inconvénients, en incorporant partiellement les résidus (Labreuche et al., 2001).

La vitesse de germination peut aussi varier. Un essai réalisé à Zollikofen (Suisse) montre qu'en semis direct, le développement des plantules de maïs ensilage est plus lent qu'en labour (Reinhard et al., 2001). De plus, la germination en semis direct sur cet essai est moins bonne, notamment du fait des dégâts de limaces. Toutefois, les céréales à paille présentent de bonnes capacités de compensation, ce qui aboutit à un rendement équivalent voire supérieur en SD (Chervet et al., 2005).

Le colza est particulièrement sensible à l'état de la surface du sol. Sa germination peut en effet être notablement impactée par la présence de pailles, qui forment un mulch et donc une couche supérieure à traverser au moment de la germination. Ce mulch peut entraîner une élongation de l'hypocotyle, qui sera par la suite plus vulnérable aux blessures mécaniques et au gel (Labreuche et al., 2007).

2.2.3. Qualité du blé

Un essai réalisé en république Tchèque met en évidence que l'effet du travail du sol sur le taux protéique du grain est faible. La fertilisation azotée, et dans une moindre mesure la protection des cultures, sont les paramètres décisifs pour le taux azoté du grain (Sip et al., 2013). Toutefois (Carlotti, 1992) et (Martin, 1987) montrent que le taux protéique du grain n'est pas directement lié à la qualité boulangère de la farine obtenue. En effet, (Martin, 1987) met en évidence que pour une même teneur en azote des grains, la qualité boulangère peut varier de façon significative.

3. Maladies fongiques

Les résidus de culture sont une source importante de contamination des cultures pour les maladies fongiques, qui survivent et se maintiennent sur ces résidus. La flore adventice peut également faire office de réservoir pour les maladies. Cette flore étant souvent plus nombreuse en TCS, les risques de contamination des cultures pas ce biais est donc accru (Jullien et Bodilis, 1999).

3.1. Maladies du blé

3.1.1. Maladies du pied et de l'épi: piétin-verse, piétin-échaudage, rhizoctone, fusariose

Un essai a été effectué à l'INRA de Rennes sur l'effet du travail du sol sur les maladies fongiques du pied et des racines du blé tendre d'hiver : piétin-verse, piétin-échaudage, fusariose du pied et rhizoctone. La présence de ces maladies et leur gravité sont fortement liées au devenir des résidus de culture. Lorsque le précédent est une culture hôte, comme un autre blé, le labour réduit les niveaux d'infestation en enfouissant les résidus potentiellement infectés. Au contraire, si la culture implantée deux ans auparavant était une culture-hôte, le labour peut remonter à la surface ces résidus infectés et donc augmenter la pression des maladies fongiques (Colbach et al., 1997).

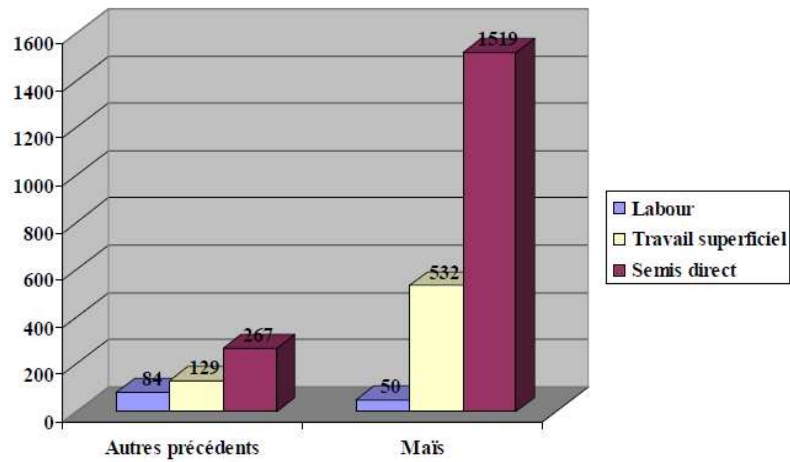


Figure 7: Effet des résidus de culture (précédent culturel x travail du sol) sur les teneurs en DON (valeurs médianes en ug/kg) du blé en 2003 (Barrier-Guillot et al., 2007)

Grille d'évaluation du risque DON sur blé tendre (tab. 1)			
Système de culture	Sensibilité variétale	Niveaux de risque (1 = le plus faible)	
Céréales à pailles, colza, lin, pois, féverole, tournesol	Labour	Peu sensibles	1
		Moyennement sensibles	1
		Sensibles	2b
	Techniques sans labour	Peu sensibles	2a
		Moyennement sensibles	2a
		Sensibles	2b
Betteraves, pomme de terre, soja, autres	Labour	Peu sensibles	2a
		Moyennement sensibles	2a
		Sensibles	2b
	Techniques sans labour	Peu sensibles	2a
		Moyennement sensibles	2a
		Sensibles	3
Maïs, sorgho, (fourrages)	Labour	Peu sensibles	2a
		Moyennement sensibles	(2a) 2b
		Sensibles	3
	Techniques sans labour	Peu sensibles	(3) 4
		Moyennement sensibles	(4) 5
		Sensibles	(5) 6

() : précédent maïs fourrage

Figure 8 : Grille d'évaluation du risque DON sur blé tendre (Source : Gourdain, 2008)

En TCSL, le non-retournement du sol permet de réduire la présence de piétin-verse. Pour (Janusauskaite et Ciuberkis, 2010), l'infestation des cultures par le piétin-verse en non-labour est importante les premières années, mais diminue après quelques années. Cette diminution peut être expliquée par la plus forte présence en TCSL de microorganismes susceptibles d'être antagonistes de ce pathogène (Leake, 2003).

Le piétin-échaudage est relativement sensible au gaz carbonique, un sol aéré réduit donc sa présence (Caron, 2000). Les sols en SD, dont la densité apparente est généralement plus importante qu'en labour, lui sont donc plus favorables.

Une synthèse effectuée par Barrier-Guillot et al. En 2007 traite la quantité de déoxynivalénol (DON) produite sur des parcelles de blé. Les résultats sont présentés par la figure 7.

Plus le travail du sol est réduit, plus la production de DON est importante, ce qui montre une présence supérieure de la fusariose sur la culture en place. De plus, cette différence s'accroît lorsque le blé est précédé par un maïs, dont les résidus de culture maintiennent la fusariose sur la parcelle (Dill-Macky et Jones, 2000; Barrier-Guillot et al., 2007). En effet, pour Dill-Macky et Jones (2000), le taux de DON à la récolte est directement corrélé à l'importance de la présence de fusariose de l'épi.

Pour Gourdain (2008), le risque d'une accumulation de DON dans les organes récoltés est relativement limité dans les rotations contenant des céréales à paille ou du colza, à condition d'implanter des variétés résistantes à la fusariose. La présence de maïs dans la rotation augmente par contre fortement niveau le risque. Dans tous les cas, ce risque est augmenté en TCSL (Figure 8).

3.1.2. Maladies foliaires

Les maladies fongiques des feuilles et des épis du blé, comme la septoriose ou l'helminthosporiose, peuvent également être favorisées par la présence en surface de résidus de culture infectés. La présence de résidus de maïs peut également favoriser la fusariose des épis sur le blé (Jouy et Munier-Jolain, 2001). Jullien et Bodilis (1999) affirment également que le labour semble favoriser l'infection du maître-brin, contrairement aux TCSL qui ont tendance à stimuler le tallage du blé. Pour Cure (1991) toutefois, le travail du sol n'impacte pas le développement de la septoriose.

L'essai en non-labour réalisé à Changins (Suisse) ne montre quant à lui aucun effet du type de travail du sol sur l'ensemble des maladies fongiques du blé après 35 ans d'essai (Vullioud et al., 2006).

3.2. Maladies du colza

Le passage en TCSL sur colza ne semble pas avoir de forte influence sur les maladies fongiques. Sur l'essai de Changins, la présence de sclérotinia sur colza est favorisée par les TCSL, mais ne se traduit par aucune perte de rendement. Le phoma quant à lui ne semble pas influencé par le travail du sol (Vullioud et al., 2006; Labreuche et al., 2007).

3.3. Généralités

Pour limiter la présence des maladies fongiques, un non-labour systématique nécessite une adaptation des rotations, un choix de variétés cultivées résistantes, et/ou une augmentation des traitements fongicides (Colbach et al., 1997). De manière générale, la fréquence de retour d'une

espèce dans une rotation a plus d'influence sur la présence de maladies que le travail du sol (Jullien et Bodilis, 1999).

La fertilisation azotée joue également un rôle dans le développement des maladies fongiques : un apport plus important d'azote aura tendance à favoriser ces maladies, du fait d'un meilleur développement et d'une plus grande vigueur de la plante (Arvalis, 2014).

4. -Ravageurs

4.1. Limaces

Les limaces nécessitent un milieu de vie stable, comprenant notamment des abris, et une humidité suffisante pour le maintien de leurs œufs. Un labour en sol argileux peut s'avérer favorable aux populations de limaces en leur créant des abris, tandis qu'un labour en sol limoneux effrite plus le sol et donc perturbe les mollusques. Un travail du sol, qu'il soit profond ou superficiel, peut également avoir un effet direct sur les populations en blessant les limaces (Arvalis, 2009).

De façon générale toutefois, les limaces sont favorisées par un non retournement du sol et la présence de résidus de culture sur le sol, plus importante en non-labour et tout particulièrement en semis direct (Jouy et Munier-Jolain, 2001). En effet, l'augmentation de résidus organiques en surface maintient l'humidité de surface, qui profite aux limaces, et leur fournit un abri (mulch). Ces conditions peuvent également favoriser la présence de carabes, qui sont des auxiliaires prédateurs des limaces, mais cette présence n'est généralement pas suffisante pour réguler efficacement les populations de limaces (Jullien et Bodilis, 1999).

4.2. Autres ravageurs

Les TCSL entraînent une augmentation de la destruction mécanique des cultures par des ravageurs tels que les vers blancs, taupins, taupes et campagnols. Toutefois, elles favorisent également la présence d'auxiliaires permettant de lutter contre certaines de ces espèces (Vullioud et Vez, 2008).

L'absence de labour a tendance à favoriser la pyrale du maïs à Changins (Suisse) (Vullioud et al., 2006; Vullioud, 2008), tandis qu'à Zollikofen (Suisse), les attaques de pyrales sont moins fréquentes en SD (Sturny et al., 2007).

La présence d'un couvert ou d'un mulch est également favorable à la reproduction des diptères (oscinies, tipules, mouches des semis...) (Jullien et Bodilis, 1999), mais leur effet est réduit : les larves se nourrissent plus des substances végétales en décomposition que de la culture elle-même. Elles peuvent toutefois s'attaquer aux racines si le sol est pauvre en humus (Bonnemaison, 1962).

Labreuche et al. (2007) estiment quant à eux que la présence de sésamies et de tipules n'est pas influencée par le travail du sol.

5. Adventices

Le travail du sol influe sur la position des graines dans le sol. Le labour enfouit profondément les semences d'adventices, ce qui réduit leur capacité de germination : en effet, les levées sont majoritairement possibles quand une graine d'adventice est située dans la couche superficielle du

sol, peu de plantules émergeant au-delà de 5cm de profondeur. Mais il peut également remonter à la surface des semences anciennes (Jouy et Munier-Jolain, 2001).

Les semences enfouies profondément ont un taux de survie supérieur si le sol n'est pas travaillé. Par conséquent, un labour après une période en semis direct peut entraîner une infestation de la parcelle par des espèces résistant à l'enfouissement, comme la folle-avoine ou le vulpin (Debaeke et Orlando, 1991).

En non-labour, la distribution verticale des semences change : elles restent majoritairement à la surface. Les semences de petite taille sont alors favorisées car, plus légères, elles se situent plus près de la surface que les semences de grosse taille (Aibar, 2006).

Les organes susceptibles d'entraîner une reproduction végétative des adventices, comme les rhizomes, sont également affectés par le travail du sol choisi. L'utilisation d'outils à disques pour un travail superficiel du sol peut par exemple fragmenter les organes de réserve et donc augmenter leur multiplication (Jullien et Bodilis, 1999). Au contraire, l'utilisation d'outils à dents, toujours pour un travail superficiel, peut ramener les rhizomes en surface et entraîner leur dessiccation. Le semis direct, quant à lui, limite la dispersion des rhizomes dans le sol mais pas leur croissance, ce qui forme des foyers d'adventices plus faciles à éliminer (Debaeke et Orlando, 1991).

5.1. Capacité de germination

Certaines espèces, comme le gaillet, le vulpin ou le brome, ont des semences relativement fragiles, et un enfouissement profond pendant une ou deux années suffit à diminuer leur capacité de germination. Pour diminuer la pression de ces espèces, un labour peut donc s'avérer plus avantageux que les TCSL. Les espèces dont les semences sont plus résistantes ont par contre tendance à être favorisées par le labour, qui peut les remonter en surface alors que leur capacité germinative est intacte (Jouy et Munier-Jolain, 2001).

5.2. Evolution du stock semencier

Les différentes techniques de travail du sol jouent sur la population d'adventices en modifiant la nature et l'importance du stock semencier dans le sol. Celui-ci inclut les graines capables de germer, ainsi que les organes végétatifs.

Ce stock semencier dépend de la conduite de la parcelle (rotation, travail du sol, désherbage) ainsi que de ses caractéristiques physiques (type de sol), mais également de paramètres extérieurs comme les conditions climatiques ou l'environnement (végétation proche, région).

Le stock semencier peut être augmenté par une production de graines ou d'organes de reproduction végétative par les plantes déjà présentes sur la parcelle, ou par une arrivée de semences extérieures, qui dépend fortement de l'environnement proche. Ce stock peut aussi être diminué par différents processus : diminution de la capacité de germination des graines présentes dans le sol, destruction par l'agriculteur des plantes déjà développées, consommation des graines par la faune...

Un essai réalisé sur une rotation blé-sorgho-tournesol, associé à un désherbage chimique, conclut que le labour entraîne une diminution du stock semencier plus rapide qu'en TCSL. En effet, le labour peut mettre en bonnes conditions de levée des graines jusque là enfouies, ce qui permet de les détruire ensuite plus efficacement. Au contraire, en TCSL, les graines enfouies ne sont pas ramenées à la surface, et les espèces résistant à l'enfouissement restent dans le stock semencier

Augmentation de population en TCSL	Diminution de population en TCSL
<p>Vulpin des champs (<i>Alopecurus myosuroides</i>) Bromes (<i>Bromus spp.</i>) Alpistes (<i>Phalaris spp.</i>) Pâturin annuel (<i>Poa annua</i>) Ivraie raide (<i>Lolium rigidum</i>) Ray-grass d'Italie (<i>Lolium multiflorum</i>) Sétaire (<i>Setaria spp.</i>) Panic (<i>Panicum spp.</i>) Gaillet gratteron (<i>Galium aparine</i>) Geranium (<i>Geranium spp.</i>) (Viaux, 2013) Amarantes (<i>Amaranthus spp.</i>) Passerage drave (<i>Cardaria draba</i>) Cirse des champs (<i>Cirsium arvensis</i>) Mauves (<i>Malva spp.</i>) Pissenlits (<i>Taraxacum officinalis</i>) Alchémilles (<i>Alchemilla spp.</i>) Céraistes (<i>Cerastium spp.</i>) Épilobes (<i>Epilobium spp.</i>) Laiterons (<i>Sonchus spp.</i>) Matricaires (<i>Matricaria spp.</i>) Séneçon (<i>Senecio spp.</i>)</p>	<p>Folle-avoine (<i>Avena fatua</i>) Moutarde des champs (<i>Sinapis arvensis</i>) Mouren des champs (<i>Anagallis arvensis</i>) Stellaire intermédiaire (<i>Stellaria media</i>) Capselle bourse à pasteur (<i>Capsella bursa pastoris</i>) Fumeterre officinale (<i>Fumaria officinalis</i>) Ravenelle (<i>Raphanus raphanistrum</i>) Chénopodes (<i>Chenopodium spp.</i>) Coquelicot (<i>Papaver rhoeas</i>) Geranium (<i>Geranium spp.</i>) (Fourbet et al., 1979; Aibar, 2006) Pensée (<i>Viola arvensis</i>)</p>

Tableau 1: Espèces favorisées/non favorisées par le non-labour en céréales d'hiver (adapté de Fourbet et al. (1979), Aibar (2006) et Viaux (2013))

(Verdier, 1990). Un autre essai, réalisé à Changins (Suisse), montre après une trentaine d'années un stock semencier comparable entre labour et non-labour, avec toutefois légèrement plus de diversité dans le stock des parcelles en non-labour (Delabays, 2008). Le stock semencier de toutes les modalités était également en augmentation, Vullioud et al. (2006) concluent que l'évolution du stock d'adventices n'est pas liée au travail du sol, sauf dans le cas des repousses de colza et de la moutarde, qui diminuent pour le travail superficiel.

5.3. Sélection de la flore

Toutes les espèces d'adventices ne sont pas affectées de la même manière par le travail du sol. En semis direct, on observe une évolution progressive de la flore d'adventices. Dans un premier temps, le petit nombre d'espèces qui ne sont pas détruites par un herbicide de pré-levée sont sélectionnées, puis les plantes favorisées par des sols peu modifiés par l'homme se développent. C'est le cas du brome, dont les graines doivent rester en surface pour se développer (Aibar, 2006).

Plus généralement, les TCSL ont tendance à favoriser les adventices vivaces, particulièrement dans des conditions humides (Jouy et Munier-Jolain, 2001), ainsi que les bisannuelle et les pluriannuelles (rumex, mauves...) (Mamarot, 2004). Cette augmentation des adventices vivaces en TCSL peut notamment être expliquée par une moindre pression mécanique sur les organes végétatifs tels que les racines ou les stolons (Delabays, 2008), ainsi que par une résistance partielle aux herbicides utilisés en interculture (Jullien et Bodilis, 1999).

La présence de graminées annuelles, comme le vulpin, le pâturin, la folle-avoine ou le brome, augmente également avec la simplification du travail du sol (Sturny et al., 2007). En effet, ces espèces émettent des graines de faible longévité et de courte dormance. Si le désherbage est insuffisant, leur position à la surface leur permet de germer facilement (Jullien et Bodilis, 1999). La présence des graminées annuelles et des adventices vivaces est également augmentée en TCSL en cas de monoculture ou de semis précoce de céréales (Debaeke et Orlando, 1991).

Enfin, certaines dicotylédones annuelles sont favorisées en TCSL par leur plus forte concentration à la surface et la moindre efficacité des herbicides racinaires lorsque des résidus de culture sont présents. Ces dicotylédones annuelles concernées ont la particularité d'être pas ou peu dormantes et de germer à l'automne, et d'être donc déjà bien installées lors du traitement herbicide. Il peut également s'agir d'espèces à levée tardive, qui lèvent après le traitement et ne sont donc pas impactées par celui-ci (Debaeke et Orlando, 1991). Toutefois, en ce qui concerne les dicotylédones annuelles, les différences sont peu nettes entre le labour et les TCSL.

Le tableau suivant, adapté des travaux de Fourbet et al. (1979), Aibar (2006), et Viaux (2013), met en évidence l'effet du non-labour sur la population d'adventices (Tableau 1).

On peut noter que les TCSL favorisent principalement des graminées (à l'exception de la folle-avoine, dont la présence est au contraire défavorisée par ces pratiques) et des espèces vivaces.

5.4. Méthodes de lutte

Dans le cas du semis direct, et plus généralement des TCSL, la lutte chimique est très largement recommandée, avec notamment l'application d'un herbicide total avant la levée de la culture (Verdier, 1990; Mamarot, 2004).

En effet, un désherbage chimique efficace diminue fortement la présence d'adventices. Toutefois en cas d'échec, l'infestation peut être importante car toutes les graines produites par les adventices non désherbées restent à la surface et sont donc plus susceptibles de germer (Verdier, 1990).

D'autres méthodes agronomiques peuvent également être appliquées pour limiter la présence d'adventices, comme un allongement des rotations (Mamarot, 2004), l'utilisation de cultures intermédiaires pour concurrencer les adventices (Chervet et al., 2005), le semis plus tardif des céréales (Debaeke et Orlando, 1991).

5.5. Effet du travail du sol sur l'activité des herbicides

En non-labour, la persistance des herbicides dans le sol est sensiblement allongée, du fait d'une absence de retournement du sol. Il est donc possible qu'un produit appliqué en interculture ou même sur la culture précédente ait une influence sur la culture suivante. Jouy et Munier-Jolain (2001) conseillent donc de s'assurer que le produit appliqué n'ait pas d'effet potentiel sur la culture suivante. Une implantation trop en surface de la culture peut également mettre celle-ci en contact avec les herbicides de pré-levée (Jullien et Bodilis, 1999). De même, si la profondeur de semis est irrégulière, les herbicides à action racinaire peuvent s'avérer toxiques pour la culture en place (Jouy et Munier-Jolain, 2001).

L'efficacité des herbicides appliqués peut également être compromise. Dans le cas des produits à action racinaire, une grande quantité de résidus de culture à la surface peut diminuer leur effet, particulièrement pour les températures supérieures à 20°C (pour les produits volatils) ou en cas d'absence de pluie (tous produits). L'isoproturon, herbicide fortement utilisé en France notamment sur le blé tendre, est par exemple moins efficace dans les parcelles non-labourées du fait des résidus végétaux (Delabays, 2008). La présence de résidus augmente en effet le risque d'adsorption des herbicides, qui ne sont alors plus capables d'agir sur les adventices. Cet effet est observé pour les herbicides racinaires, dont l'efficacité est réduite ; l'impact sur l'efficacité des herbicides foliaires semble toutefois moindre (Jullien et Bodilis, 1999).

6. Nutrition azotée

La nutrition azotée est un autre paramètre crucial pour le développement des cultures. Elle dépend beaucoup du cycle de l'azote, dont les différentes étapes sont fortement influencées par les conditions pédoclimatiques et la conduite de la culture (fertilisation et travail du sol).

6.1. Effet du travail du sol sur le cycle de l'azote

6.1.1. Dénitrification

La dénitrification est un ensemble de processus par lesquels des bactéries transforment l'ion nitrate NO_3^- en diazote N_2 . Cette transformation s'effectue lorsque les bactéries dénitrifiantes manquent de dioxygène O_2 , nécessaire à leur respiration.

Linn et Doran (1984) ont montré que la présence de microorganismes aérobies et anaérobies était significativement supérieure dans les 75 premiers millimètres des sols non-labourés, ce qui entraîne une dénitrification plus importante, notamment lorsque le sol est saturé d'eau. Pour Gilliam et Hoyt (1987), le potentiel de dénitrification est également supérieur en sol non-labouré. La dénitrification, qui diminue la quantité d'azote minéral potentiellement disponible pour la culture, est plus

Traitement	K ₁ (Coefficient isohumique)	K ₂ (Coefficient de minéralisation)
L ₀ : Labour	0,21	0,046
L ₁ : Travail superficiel	0,20	0,032
L ₂ : Semis direct	0,13	0,017

Tableau 2 : Coefficients K1 et K2 du modèle AMG (Andriulo, Mary et Guérif, 2001) calculés sur l'essai « travail du sol » de Boigneville (Schvartz et al., 2005)

importante dans les sols susceptibles de retenir un excès d'eau. Ces sols sont donc moins adaptés à une culture en semis direct, qui risque d'accentuer le phénomène.

6.1.2. Minéralisation et organisation

La minéralisation de l'azote est la transformation d'azote organique en azote minéral (NO_3^- , NH_4^+), qui sera alors exploitable par la culture. Cette transformation se déroule sous l'effet de plusieurs microorganismes du sol. Les conditions du sol jouent fortement sur la minéralisation de l'azote : celle-ci est favorisée par la présence d'oxygène, un sol humide et une température élevée (Vale et al., 2007).

En TCSL, la densité apparente des sols augmente et la présence de résidus de culture forme un mulch à sa surface. Le taux d'humidité augmente, tandis que la température et l'oxygène du sol diminuent (Hammel, 1989). La minéralisation est donc généralement moindre, ce qui entraîne une augmentation du stock de matières organiques dans les premiers centimètres du sol (Gilliam et Hoyt, 1987). Le fait de ne pas enfouir les résidus de culture diminue également la quantité d'azote potentiellement minéralisable dans le sol.

Le labour, par opposition, aère le sol et en favorise le réchauffement, tout en enfouissant les résidus de culture, ce qui a tendance à augmenter la minéralisation (Wolfgang et Adres, 1990). Plus généralement, un travail du sol même superficiel est plus favorable à la minéralisation de l'azote qu'une conduite en semis direct.

Pour Schvartz et al. (2005), la minéralisation de l'azote est plus faible en semis direct, du fait notamment d'un moindre contact entre les résidus de culture et le sol. Le tableau 2 donne les valeurs des coefficients K_1 et K_2 mesurés sur l'essai travail du sol de Boigneville (91) avec des résidus de blé et maïs.

L'organisation de l'azote est la transformation de l'azote minéral en azote organique. Sous cultures annuelles, l'organisation est principalement microbienne. L'azote nitrique est utilisé par les microorganismes pour leur multiplication. L'organisation peut être favorisée par une plus grande disponibilité d'azote minéral dans le sol (Lemaire et Nicolardot, 1997).

6.1.3. Lixiviation

Pour Carlotti (1992), la lixiviation des nitrates est déclenchée par une saturation du sol en eau. La lixiviation commence lorsque le sol a atteint l'humidité à la capacité au champ. Elle est donc fortement dépendante de la pluviométrie, mais aussi de la capacité de rétention d'eau du sol. Pour Hansel et Djurhuus (1997) et Stoddard et al. (2005), le travail du sol n'a pas d'effet notable sur la quantité d'eau drainée, qui joue sur la quantité d'azote lixiviée.

6.2. Valorisation de l'azote par la culture

Une étude comparant l'absorption d'azote par un blé d'hiver, en conditions de labour et de TCSL, ne montre pas de différence significative de biomasse entre les deux modalités, ni d'absorption d'azote totale ou de répartition de l'azote dans la plante (Rieger, 2001).

Pour Phillips et al. (1980), le semis direct n'est favorisé par rapport au labour que lorsque la quantité d'azote apportée est importante. Ce phénomène est expliqué par une moindre minéralisation, une plus forte dénitrification et une augmentation de la lixiviation de l'azote en semis direct, qui rendent la culture plus dépendante des apports externes.

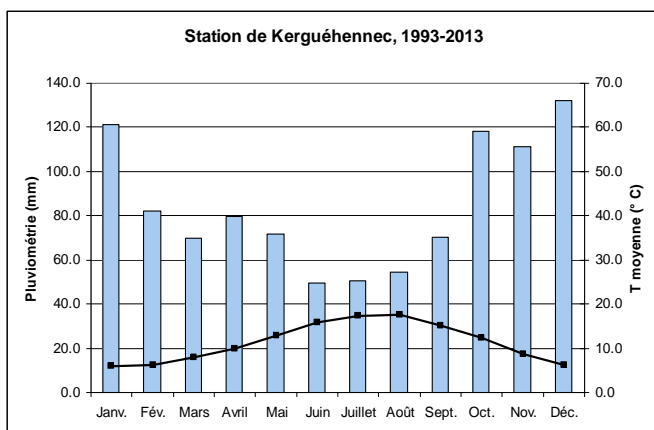


Figure 9: Diagramme ombrothermique 1993-2013 (source: Météo France, données de la station météorologique de Kerguéhennec)

	L	TS	SD
0- 5 cm	3.5	4.2	4.4
5 - 15 cm	3.8	4.2	3.9

Tableau 3 : Taux de matière organique dans les horizons 0-5 et 5-15 cm (2009)

		Sous-essai A: essai « agronomique » L, TS, SD ; M, FV					Sous-essai B: essai « faisabilité » L, TS ; LP, FB-M			
Bloc 1	TS/FV	TS/M	SD/FV	SD/M	L/M	L/FV	L/FB-M	L/LP	TS/FB-M	TS/LP
Bloc 2	L/M	L/FV	TS/M	TS/FV	SD/M	SD/FV	TS/LP	TS/FB-M	L/LP	L/FB-M
Bloc 3	SD/FV	SD/M	L/FV	L/M	TS/FV	TS/M	L/FB-M	L/LP	TS/FB-M	TS/LP

Figure 10 : Plan de l'essai travail du sol de Kerguéhennec

Au contraire, pour Chervet et al. (2005), l'utilisation de l'azote par la culture est sensiblement meilleure en semis direct, après une période d'adaptation au cours de laquelle un apport azoté supérieur est nécessaire pour maintenir un rendement satisfaisant.

6.3. Aspect technique

Les TCSL, du fait de leur profondeur de travail moindre, rendent difficile l'enfouissement du fumier dans le sol (Jullien et Bodilis, 1999). Toutefois, cela ne représente pas obligatoirement un handicap : pour Vullioud et Vez (2008), les engrais organiques ont un effet plus favorable sur les rendements s'ils sont incorporés sans labour.

II-Matériels et méthodes

1. Présentation du dispositif expérimental

1.1. Site d'étude

L'essai est situé dans la station expérimentale de Kerguéhennec à Bignan (Morbihan), qui fait partie du dispositif de recherche appliquée de la Chambre d'Agriculture de Bretagne, au sein du pôle agronomie-production végétale.

1.2. Contexte pédoclimatique

Le climat de la station est de type océanique, avec une faible amplitude thermique (Température moyenne de 5.8°C en janvier à 17,5°C en août) et une pluviométrie importante (1009 mm annuels en moyenne entre 1993 et 2013) (Figure 9).

L'essai travail du sol de Kerguéhennec est situé sur un sol de texture limono-sablo-argileuse avec une forte teneur en matières organiques (Tableau 3).

1.3. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est composé de trois blocs randomisés, et comporte deux sous-essais : un sous-essai A, dit « agronomique », comparant labour, travail superficiel et semis direct en association avec un fertilisant minéral (ammonitrate) ou organique (fumier de volailles), et un sous-essai B « faisabilité », qui inclut d'autres types de fertilisants organiques : fumier de bovins et lisier de porc (Figure 10).

Cet essai a été lancé en 2000. Les rotations étaient initialement différentes pour les deux sous-essais : l'essai A suivait une rotation Maïs-Blé-Colza-Blé, tandis que l'essai B suivait une simple alternance Maïs-Blé. A partir de 2003 toutefois, les assolements sont homogénéisés, pour parvenir à une rotation Maïs-Blé-Colza-Blé sur les deux sous-essais. Dans la pratique, la seule différence aura donc été en 2002, avec du colza implanté sur l'essai A et du maïs sur l'essai B.

Les modalités étudiées sont les suivantes :

- **Travail du sol**

Labour (L): Le sol est travaillé sur une profondeur de 25 cm, avec un retournement qui permet d'enfouir les résidus. Le labour est effectué à l'aide d'une charrue MASTER (Kuhn). Une herse rotative HBR de Kuhn est ensuite utilisée. Le semis est effectué avec un semoir à disque, combiné



Figure 11 : Semoir SD 3000 (Kuhn)

avec la herse rotative dans le cas du blé et du colza, ou non combiné pour le maïs (NG2+ de Monosem).

Travail Superficiel (TS) : Le sol est mélangé sans retournement, sur une profondeur de 15 cm, à l'aide d'un outil à dents de type chisel qui enfouit partiellement les résidus de culture. Le semis est effectué de la même façon que pour les parcelles labourées.

Semis Direct (SD) : Le sol n'est travaillé que sur la ligne de semis. Pour le semis du maïs, un semoir monograine est associé à un rotalabour qui travaille sur une largeur de 20 cm et une profondeur de 8 à 9 cm. Pour le colza et le blé, le semis est effectué à l'aide d'un semoir à semis direct (SD 3000 de Kuhn), qui travaille le sol sur environ 4 cm de largeur (Figure 11).

- **Fertilisation**

Les modalités en **fertilisation minérale (M)** reçoivent plusieurs apports d'ammonitrate au cours du cycle cultural. Afin d'apporter le même nombre d'unités d'azote sur toutes les modalités, les parcelles ayant reçu du **fumier de volailles (FV)**, **fumier de bovins (FB)** ou **lisier de porc (LP)** reçoivent également un complément d'ammonitrate.

Il est également important de noter que les parcelles FB ne reçoivent du fumier de bovins qu'une fois tous les 4 ans, sur maïs. Elles reçoivent, pour les trois autres années, la même fertilisation que les parcelles M. Elles seront donc notées par la suite M-FB.

2. Paramètres étudiés

Depuis le lancement de l'essai en 2000, différentes manipulations ont été réalisées chaque année. Une plus forte priorité ayant été donnée jusqu'à présent au suivi du sol, certaines mesures n'ont pas été effectuées tous les ans. De plus, les protocoles suivis ont parfois évolué depuis le début de l'essai. L'ensemble des mesures effectuées, ainsi que leurs dates, est détaillé en Annexe 3.

2.1. Protection des cultures

La protection des cultures est un enjeu majeur en agriculture. On s'intéresse ici majoritairement à la présence d'adventices ainsi qu'aux maladies fongiques de la plante. En effet, peu d'observations ont été effectuées sur les ravageurs des cultures, particulièrement en blé, ce qui ne permet pas d'étudier l'impact du travail du sol ou de la fertilisation azotée sur ces derniers.

2.1.1. Adventices

La population adventice présente chaque année est déterminée par un dénombrement du nombre d'individus de chaque espèce. La méthode de relevé reste constante au cours des années : trois placettes de 0,25 m² sont placées en diagonale sur chaque parcelle de l'essai. Le nombre d'adventices est ensuite ramené au m². En 2014, le nombre de placettes par parcelle a été ramené à deux, afin de diminuer le temps de mesure.

2.1.2. Maladies fongiques et ravageurs

La présence de maladies fongiques des feuilles ou de la tige du blé est déterminée chaque année en prélevant un nombre donné de plantes par parcelle. Le nombre de plants prélevés et la période de prélèvement varient selon les années (Annexe 3).

La fréquence (nombre de pieds atteints) et/ou l'intensité (pourcentage de surface foliaire ou caulinaire atteint) des maladies sont alors notées. Selon les années, l'intensité des maladies fongiques est notée soit sur la surface des plantes infectées uniquement, soit sur la surface de l'ensemble des plantes, incluant les individus sains. Afin d'homogénéiser les données, le choix a été fait de convertir les valeurs afin d'obtenir systématiquement le taux de surface atteint dans l'ensemble de la population, incluant les plantes saines.

Sur la culture de colza 2014, la présence de maladies et de ravageurs a été notée au stade de remplissage des siliques (fin de floraison + 2 semaines). Les observations ont été effectuées sur 15 pieds par parcelle. Les maladies fongiques recherchées étaient l'alternaria, la cylindrosporiose, l'oïdium, la pseudocercosporia, le sclérotinia et le phoma. La présence de pucerons et de larves de charançons dans les siliques a également été notée.

2.2. Enracinement

Pour les années 2010 et 2014, le développement et la forme des pivots de colza ont été relevés en sortie d'hiver. Les pieds sont prélevés dans 3 quadrats de 0,33 m² par parcelle. Les pivots sont ensuite mesurés, et leur forme (normale, coudée ou fourchue) notée.

L'enracinement des cultures a également été observé tous les ans entre 2000 et 2006 à l'aide de fosses ouvertes sur le bloc 2 du sous-essai A. Après rafraîchissement du profil de sol, des grilles de 1x1m (ou 1x1,5 m pour le maïs), à mailles de 19 x 19 mm, sont placées sur le profil. Pour chaque maille, la présence ou l'absence de racines est notée, afin d'obtenir une densité racinaire pour chaque couche de 19 mm.

2.3. Nutrition azotée et bilan hydrique

2.3.1. Reliquats azotés

Au cours des années en blé, un reliquat sortie hiver et un reliquat post-récolte sont presque systématiquement mesurés. Les prélèvements sont effectués à la tarière ou à la préleveuse automatique sur les profondeurs 0-30cm, 30-60cm et 60-90cm. Les concentrations en azote nitrique et en azote ammoniacal sont analysées en laboratoire.

La valeur du reliquat est calculée de la façon suivante :

$$\text{Reliquat} = [\text{NH}_4^+]_{0-30} + [\text{NO}_3^-]_{0-30} + [\text{NO}_3^-]_{30-60} + [\text{NO}_3^-]_{60-90}$$

2.3.2. Calcul de la quantité d'azote absorbée

La quantité totale d'azote absorbée par la culture de blé est calculée lors de la récolte à partir des teneurs en azote et des masses respectives des différentes parties aériennes de la plante. Il est toutefois à noter que ce calcul ne prend pas en compte les parties racinaires du blé.

Pour le colza en 2014, trois prélèvements de biomasse ont été effectués au cours de la saison culturale : le premier en sortie d'hiver le 06/03/14, le deuxième au début du stade floraison le 09/04/14 et le dernier deux semaines après la fin de floraison, soit le 25/05/14 ou le 02/06/14 selon l'avancement de la culture. Les prélèvements ont été effectués à l'aide de trois quadrats de 0,25 m² en sortie d'hiver, et de deux quadrats de la même taille pour les relevés suivants. Le taux d'azote et de matière sèche des parties aériennes ont également été mesurés en laboratoire lors des deux

derniers relevés. Les valeurs de biomasse et de teneur en azote ont par la suite été utilisées pour calculer la quantité d'azote absorbée à ces deux stades.

2.3.3. Bilan hydrique

Un bilan hydrique est effectué pour chaque année au cours de laquelle un reliquat sortie hiver et un reliquat post-récolte ont été mesurés, ce qui correspond aux années 2001, 2005, 2007, 2009, 2011 et 2013. Ce bilan hydrique est effectué entre les dates des deux reliquats, et a pour but d'estimer la quantité d'eau en excès reçue par la culture sur cette période.

On considère lors de ce bilan hydrique que l'évapotranspiration réelle (ETR) est égale à l'évapotranspiration maximale (ETM). Par conséquent, on considère $ETR = ETP \times Kc$.

Les valeurs de Kc , ainsi que l'estimation des dates des stades de la culture ont été définies par Arvalis- Institut du végétal pour le site de Bignan.

Un calcul journalier de la différence entre les apports d'eau par la pluie (l'essai n'étant pas irrigué) et l'ETR est effectué. Lorsque la différence est positive, l'eau est considérée comme remplissant le sol (représenté par la réserve utile) puis, une fois la RU remplie, comme de l'eau en excès susceptible de ruisseler et/ou lixivier le sol.

La réserve utile (RU) est déterminée par la méthode tarière (Rivière et al., 1992), à l'aide de la formule suivante :

$$RU = \frac{2}{3}RFU = \frac{2}{3} \times 0.1 \times \frac{LF}{2.7} \times \frac{LG}{5.5} \times \frac{MO}{8} \times \frac{A}{10}$$

Avec LF= Limons Fins, LG= Limons Grossiers, MO= Matières Organiques et A=Argile, tous exprimés en %.

2.4. Rendements et composantes, vigueur et qualité

2.4.1. Rendement

Pour la culture de blé, le rendement est mesuré par une pesée lors de la récolte ainsi que par un prélèvement de bottillons peu de temps avant la récolte. Ce prélèvement de bottillons, réalisé sur 1m linéaire ou sur des quadrats de 0,25 ou 0,33 m², a été effectué pour la plupart des années. Seules les années 2001 et 2005 font exception, le rendement ayant été obtenu à l'aide d'une moissonneuse expérimentale (HEGE 125). Un échantillon de grains a toutefois été prélevé en 2001 pour analyse, et en 2005 le nombre de pieds et d'épis/m² est compté sur des quadrats de 0,25m².

Les rendements du colza et du maïs sont quant à eux obtenus par pesée lors de la récolte.

2.4.2. Composantes du rendement

- **Comptages à la levée :**

La méthode de comptage à la levée du blé varie au cours des années : le nombre de pieds par m² est déterminé soit à l'aide de quadrats de 0,25m² ou 0,33m², soit mesuré sur un mètre linéaire (comptage des deux rangs adjacents). Les années 2005 et 2011 utilisent les deux méthodes : en effet, les parcelles en travail superficiel sont alors semées à la volée, tandis qu'en L et SD le blé est semé en rangs. L'utilisation de quadrats est donc nécessaire pour le TS.

Pour la culture de colza, deux méthodes de comptage sont utilisées : en 2002 et 2014, 3 placettes de 0,33 m² sont utilisées sur chaque parcelle, tandis qu'en 2006 et 2010 le comptage s'effectue sur 6 placettes de 0,25m².

- **Autres composantes**

Les autres composantes du rendement du blé sont mesurées juste avant la récolte. Le prélèvement de bottillons à cette période permet, en plus d'estimer le rendement, de mesurer ses composantes. Pour chaque année où ce prélèvement est effectué, le nombre d'épis par pieds, de grains par épi et le PMG sont mesurés. Le PMG est déterminé à l'aide d'un compteur de grains, qui permet de connaître le nombre exact de grains dans un échantillon pesé, et donc d'en déduire le PMG.

En 2005, bien qu'aucun bottillon ne soit effectué, ces composantes sont relevées directement dans les parcelles, sur quatre cadres de 0,25m².

Le nombre de siliques par pied du colza a été relevé pour les années 2010 et 2014. En 2014, le nombre de siliques par pieds est compté lors du prélèvement effectué deux semaines après la fin de la floraison (25/05 et 02/06), sur 15 plantes par parcelle. En 2010, ce comptage est effectué sur 12 plantes par parcelle à la fin du mois de juin.

Afin de mesurer le PMG, un échantillon de grains a été prélevé en 2010 et 2014 lors de la récolte. Après séparation des impuretés, les grains de colza sont passés dans un compteur de grains puis pesés, ce qui permet de calculer le PMG. Enfin, le nombre de grains par siliques a été calculé en 2014 à partir des autres composantes du rendement et du rendement de chaque parcelle.

2.4.3. Qualité à la récolte

Deux paramètres sont ici pris en compte pour estimer la qualité du grain récolté : sa teneur en azote, et la présence de mycotoxines déoxynivalénol (DON) produites par les champignons du genre *Fusarium*.

Le taux protéique du grain est systématiquement mesuré après la récolte, soit en laboratoire soit par la coopérative agricole.

Les mesures de DON sont effectuées plus rarement. Le taux de mycotoxines dans le grain n'a été mesuré sur l'ensemble des parcelles qu'en 2007 et 2009. Des mesures ont également été effectuées par Arvalis – Institut du végétal en 2001, 2003, 2005 et 2011, mais ces mesures étant effectuées dans le cadre d'un réseau national, elles ne concernent à chaque fois qu'une ou deux parcelles sur les 30 que compte l'essai.

Après la récolte, les grains de colza des échantillons prélevés lors de la récolte sont séparés des impuretés par tamisage. Les grains de colza et les impuretés sont alors pesés séparément, afin d'obtenir un pourcentage massique d'impuretés. Pour l'année 2014, la teneur en protéines et en huile des grains de colza est également analysée en laboratoire.

3. Analyses statistiques et représentations graphiques

L'ensemble des analyses statistiques de ce rapport sont effectuées à l'aide du logiciel R.

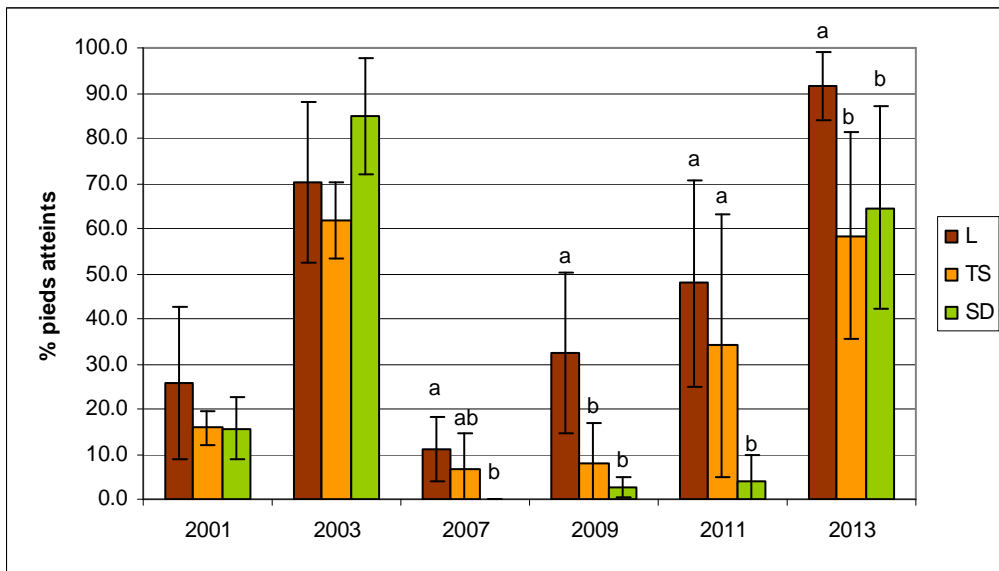


Figure 12 : Pourcentage de pieds atteints par le piétin-verse en fonction du travail du sol

Les analyses de variances (anova), réalisées au seuil de 5% ($p\text{-value}=0,05$), sont suivies des tests de Shapiro et de Bartlett pour vérifier leurs hypothèses de validité : la normalité des résidus et l'homogénéité des variances.

Si ces hypothèses sont validées, un test de comparaison des moyennes de Newman-Keuls est effectué. Les résultats significatifs mis en évidence par cette comparaison sont représentés par des lettres sur les graphiques. Deux modalités ne possédant aucune lettre en commun sont considérées comme significativement différentes.

Les analyses statistiques des données sont réalisées pour chaque année séparément, du fait d'une variabilité interannuelle souvent élevée.

La représentation de la plupart des résultats est effectuée sous forme d'histogramme. La barre d'erreur représente les écarts-types, tandis que la lettre placée au dessus des points représente les résultats du test de Newman-Keuls. Lorsqu'aucune lettre n'est affichée, cela représente soit une absence de différences significatives, soit le fait que les données ne permettent pas une analyse fiable.

III-Résultats et discussions

1. Maladies et ravageurs

1.1. Colza 2014

Le colza a cette année peu souffert des maladies fongiques et des ravageurs du colza. De rares pieds touchés par le sclérotinia ou le phoma ont été observés, sans toutefois être liés à une modalité particulière. Cette faible présence de maladies fongiques peut être due au délai de 4 ans entre deux cultures de colza sur la parcelle, qui permet de réduire la pression des maladies.

De même, plusieurs charançons des siliques et méligèthes ont été observés sur la parcelle, mais sans effet notable sur la culture. La présence de limaces et d'altises a par contre eu un effet notable sur la culture : leur présence sur les modalités en semis direct est un élément explicatif de l'échec de la levée à l'automne.

1.2. Synthèse pluriannuelle

L'ensemble des observations maladies avant 2014 ont été effectuées sur le blé uniquement.

1.2.1. Maladies du pied

i-Piétin-verse

Le piétin-verse est, sur cet essai, impacté par le travail du sol. En effet, un effet significatif du travail du sol sur le nombre de pieds touchés par le piétin-verse apparait en 2007 et reste présent jusqu'en 2013. Les modalités labourées présentent, à partir de cette date, un plus fort taux d'infestation des plants qu'en TS et SD. On observe également que ce taux est en augmentation depuis 2007 sur les trois types de travail du sol (Figure 12).

Cette augmentation de la présence du piétin-verse n'est toutefois pas la même pour toutes les modalités : Lorsque l'on s'intéresse au pourcentage de surface de tige touchée (qui inclut également

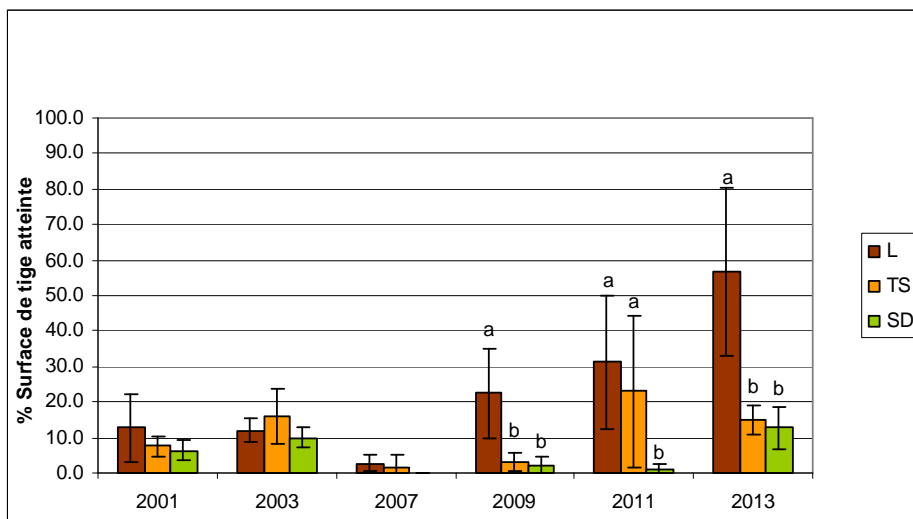


Figure 13 : Pourcentage de surface caillonnaise atteinte par le piétin-verse en fonction du travail du sol

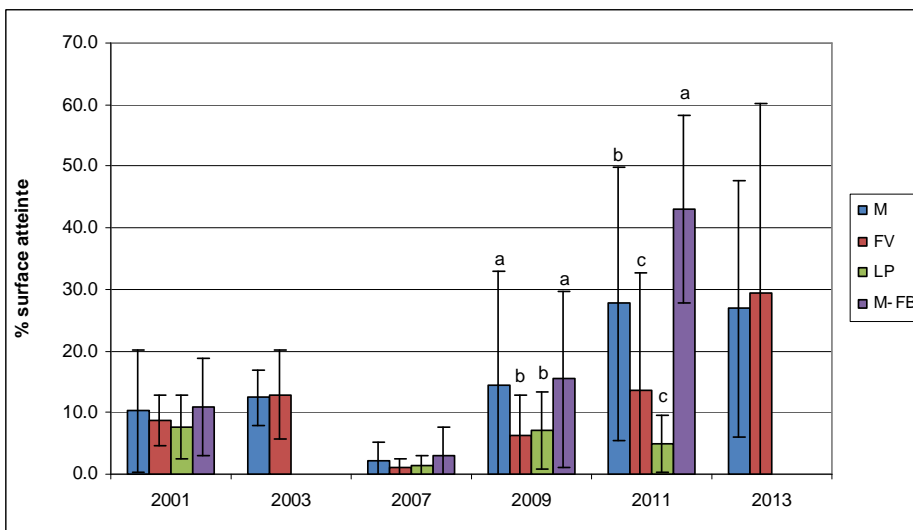


Figure 14 : Pourcentage de surface caillonnaise atteinte par le piétin-verse en fonction de la fertilisation azotée

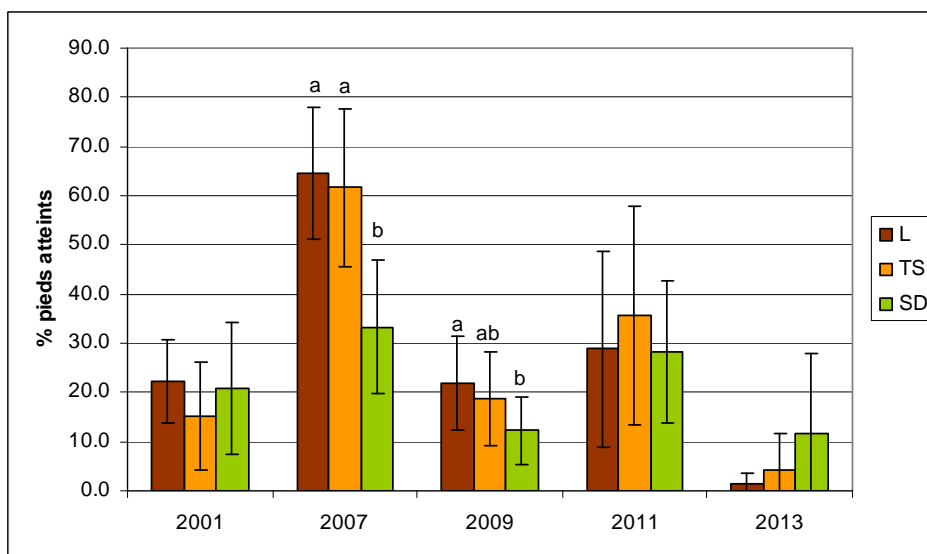


Figure 15 : Pourcentage de pieds atteints par la fusariose du pied en fonction du travail du sol

les pieds sains), on observe que si l'effet du piétin-verse augmente effectivement en labour au cours des années, ce n'est pas aussi clairement le cas pour le travail superficiel et le semis direct (Figure 13).

Ces résultats sont cohérents avec les connaissances actuelles. Pour Colbach et al. (1997), les maladies du pied sont favorisées par la présence en surface de résidus de culture. Or si le labour, et dans une moindre mesure le travail superficiel, enfouit effectivement les résidus de l'année passée, il remonte également à la surface les résidus de la culture présente deux ans auparavant. La rotation de l'essai étant maïs-blé-colza-blé, la culture ante-précédente d'un blé est systématiquement un autre blé, dont les résidus sont susceptibles d'héberger des pathogènes.

Le taux plus important de piétin-verse sur le semis direct en 2001 et 2003, et qui disparaît à partir de 2007, est également en accord avec les observations de Janusauskaite et Ciuberkis (2010), pour qui le piétin-verse est plus présent en non-labour au cours des premières années. En effet, en semis direct l'inoculum reste sur les résidus en surface, tandis qu'en labour aucun résidu contaminé n'est encore susceptible d'être remonté.

Un effet de la fertilisation est également discernable : en 2009 et 2011, les modalités minérales M et M-FB présentent un plus fort taux de contamination que FV et LP (Figure 14). La même tendance est visible en 2001 et en 2007, bien que de façon non statistiquement significative.

Ces différences pourraient être expliquées par un meilleur développement des cultures sur les modalités minérales de ces années. En effet, une plus grande quantité d'azote absorbée implique une vigueur et un développement supérieur de la culture, ce qui favorise le développement de la maladie (Arvalis, 2014).

ii-Fusariose du pied

L'effet du travail du sol est moins marqué dans le cas de la fusariose du pied. On observe une moindre infection en semis direct pour les années 2007 et 2009, mais cette différence ne se retrouve pas les années suivantes, voire est inversée en 2013 (Figure 15).

Cette infection moins importante en sur les parcelles en semis direct en 2007 et 2009 est également en accord avec les travaux de Colbach et al. (1997), pour qui, lorsque la culture implantée deux ans auparavant est un hôte potentiel pour les maladies du pied, le labour a tendance à remonter ses résidus à la surface et donc à augmenter les risques d'infection. C'est le cas dans la rotation étudiée, un blé étant implanté tous les deux ans, dont les résidus sont susceptibles d'héberger les pathogènes *Fusarium sp.* La culture implantée directement avant le blé n'est par contre un hôte potentiel de la fusariose qu'une fois sur deux, lorsqu'il s'agit du maïs.

L'inversion observée en 2013, quant à elle, pourrait être en partie expliquée par l'effet du précédent : en effet, la culture implantée en 2012 est un maïs, plante potentiellement hôte des pathogènes *Fusarium sp.* Le labour et le travail superficiel peuvent avoir réduit l'infestation en enfouissant les résidus de maïs, tandis que les résidus restés en surface en SD peuvent avoir infecté plus facilement la culture suivante (Barrier-Guillot et al., 2007). Cette inversion reste toutefois à nuancer, au vu des faibles valeurs de l'année 2013 et de l'importance des écarts-types sur l'ensemble des modalités.

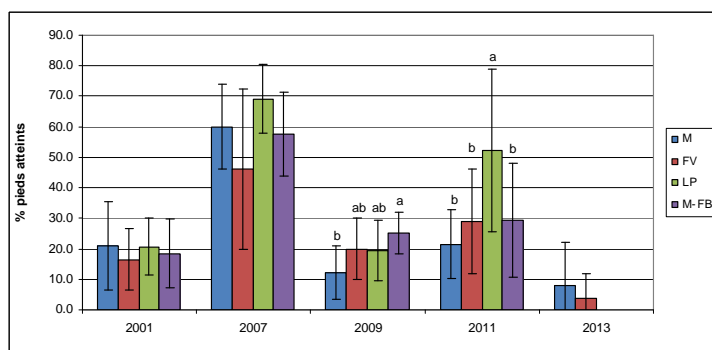


Figure 16 : Pourcentage de pieds atteints par la fusariose du pied en fonction de la fertilisation azotée

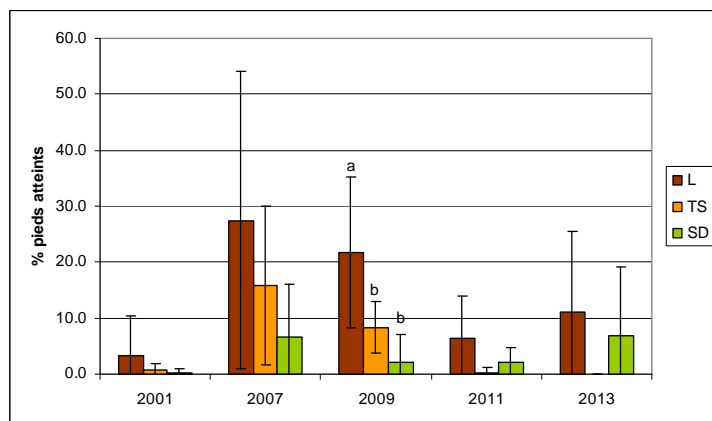


Figure 17 : Pourcentage de pieds atteints par le rhizoctone en fonction du travail du sol

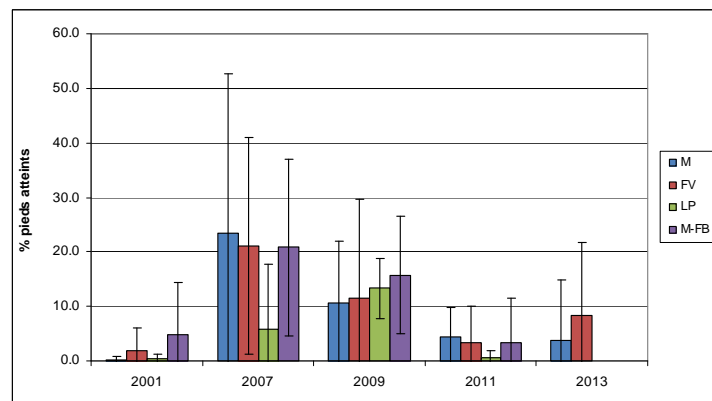


Figure 18 : Pourcentage de pieds atteints par le rhizoctone en fonction de la fertilisation azotée

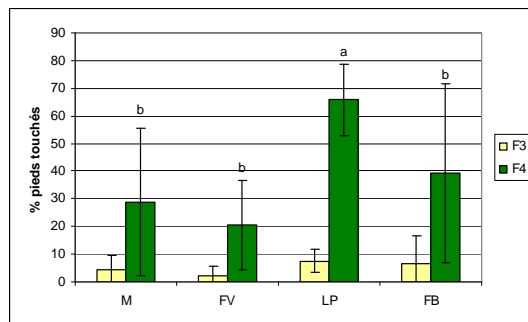


Figure 19 : Pourcentage de pieds atteints par l'oidium en 2009 en fonction de la fertilisation azotée

L'impact de la fertilisation azotée n'est pas non plus constant au cours des ans (Figure 16). En 2009, le M-FB est plus touché que M, ce qui pourrait être dû à un arrière effet du fumier de bovins appliqué l'année précédente sur M-FB : la minéralisation du fumier de bovins aurait favorisé le développement de la culture, ce qui d'après Arvalis, (2014) augmente la présence des maladies fongiques.

En 2011, cette différence n'est pas retrouvée, et c'est le LP qui présente le plus fort taux d'infection. Là encore, un meilleur développement dû à une plus forte absorption d'azote par la culture peut être un facteur explicatif ; en effet en 2011, les modalités LP présentent les plus fortes quantités d'azote absorbées par la plante (voir partie III-4.2.1. Analyse de la quantité totale d'azote absorbée).

Les différences observées ne sont toutefois significatives que deux ans sur les cinq observés, ces résultats sont donc à nuancer.

La fusariose de l'épi n'a été mesurée qu'à une occasion, sur l'essai A en 2013, sans qu'une différence significative entre les modalités de travail du sol ne soit discernable.

iii-Rhizoctone

De même que pour la fusariose, le rhizoctone semble peu influencé par le travail du sol. La seule différence significative observée l'est en 2009, avec un nombre de pieds atteints plus important en labour : 21,8% en L, 8,4% en TS et 2,2% en SD. De façon générale, les modalités en labour ont tendance à être plus touchées par le rhizoctone, mais présentent de forts écarts-types (Figure 17). La rotation de l'essai peut encore une fois être un facteur explicatif de cette différence : le labour peut avoir remonté à la surface les résidus des blés implantés deux ans plus tôt, qui peuvent servir d'hôtes pour les maladies du pied (Colbach et al., 1997).

Le type de fertilisation azotée appliqué ne semble par contre pas jouer sur la présence du rhizoctone : aucune différence significative ou tendance ne sont visibles (Figure 18).

iv-Piétin échaudage

Aucun effet du travail du sol, de la fertilisation ou d'un autre paramètre n'est décelable pour le piétin-échaudage. Toutefois, cette absence de résultat peut être liée au fait que cette maladie n'a été relevée qu'en 2007 et 2011. Une étude à plus long terme pourrait amener plus de résultats, sous réserve bien entendu que la maladie soit présente.

1.2.2. Maladies foliaires

i-Oïdium et rouilles

Aucun effet du travail du sol n'est observé sur la présence d'oïdium ou de rouilles sur blé. La fertilisation ne semble jouer qu'un rôle ponctuel sur l'oïdium, avec un taux de pieds atteints plus important sous lisier de porc en 2009 (Figure 19). Cette tendance n'est toutefois pas retrouvée dans les autres relevés, et aucun autre effet de la fertilisation azotée n'est discernable.

Les résultats de Vullioud et al. (2006) vont dans le sens de ces observations : en effet, sur le site de Changins (Suisse), aucun effet du travail du sol sur les maladies foliaires n'a été détecté.

ii-Septoriose

On observe un effet marqué du travail du sol sur la présence et la gravité des attaques de septoriose. Si l'on s'intéresse à la proportion de pieds touchés par la maladie (quelle que soit l'importance de

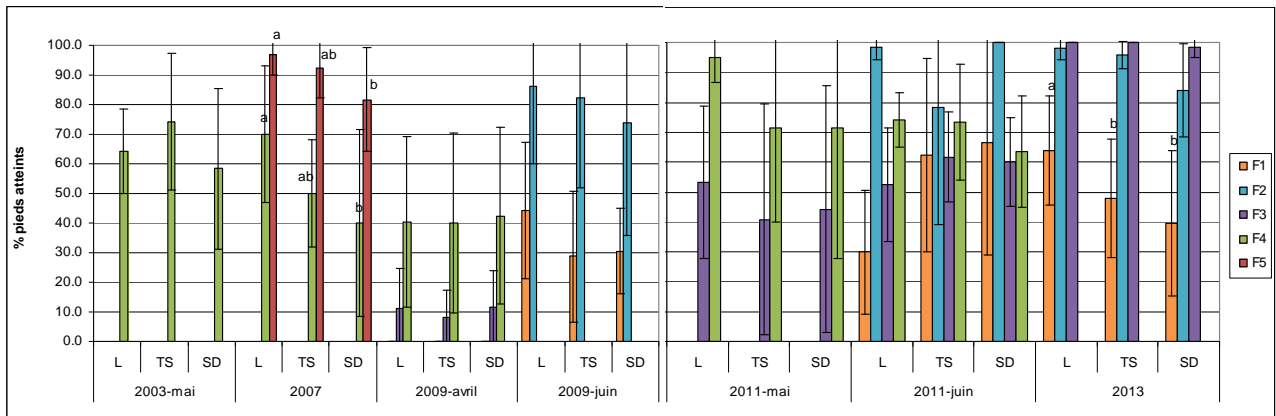


Figure 20 : Pourcentage de pieds atteints par la septoriose en fonction du travail du sol

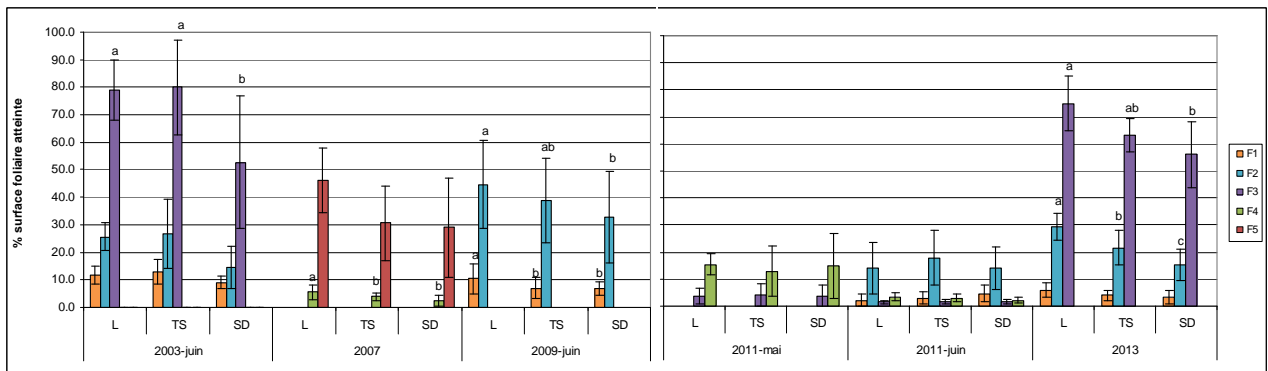


Figure 21 : Surface foliaire atteinte par la septoriose en fonction du travail du sol

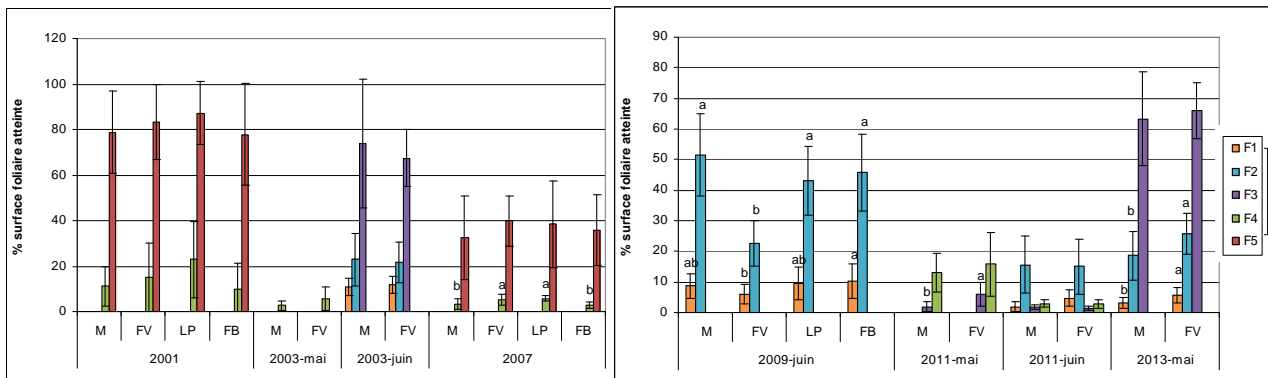


Figure 22 : Surface foliaire atteinte par la septoriose en fonction de la fertilisation azotée

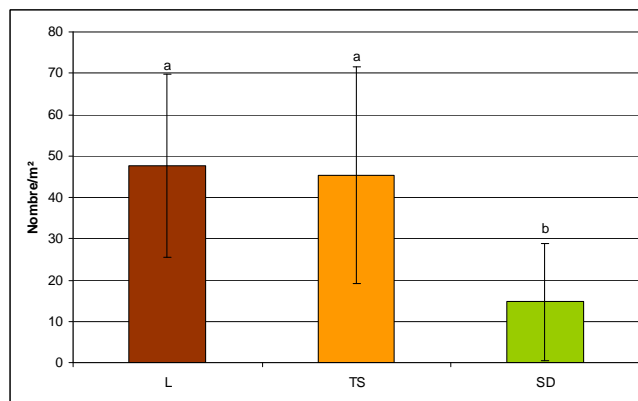


Figure 23 : Densité d'adventives, mars 2014

l'infection), la différence n'est significative qu'en 2007 et 2013, avec une prédominance du L, suivi du TS et enfin du SD. La même tendance est toutefois visible sur la plupart des autres années (Figure 20).

Dans le cas de la surface foliaire totale atteinte (dont le calcul inclut également les plantes saines), des différences significatives sont plus souvent observées : c'est le cas en 2003, 2007, 2009 et 2013. Ces différences montrent là encore des taux d'attaque plus faibles pour le semis direct, intermédiaires pour le travail superficiel et plus forts pour le labour (Figure 21).

Ces résultats sont donc cette fois-ci contraires aux résultats de Vullioud et al. (2006), pour qui le travail du sol n'influence pas l'ensemble des maladies fongiques, ainsi qu'à ceux de Cure (1991), qui cite spécifiquement la septoriose comme n'étant pas impactée par le travail du sol. L'effet du travail du sol étant toutefois significatif pour plus de la moitié des années étudiées, on peut supposer qu'un ou plusieurs paramètres liés à ce travail du sol influent réellement sur la pression de septoriose. La densité de la culture, généralement plus élevée en labour du fait d'une meilleure levée, peut par exemple avoir favorisé la propagation de la maladie. La remontée par le labour des résidus du blé précédent peut également être un facteur explicatif. Un impact significatif de la fertilisation sur la septoriose apparaît en 2007. La tendance la plus marquée est une moindre attaque de la septoriose en fertilisation minérale : les parcelles M sont significativement moins atteintes que les FV et LP en 2007, et que les FV en 2011 et 2013. Les autres fertilisations ont des effets plus variables : le M-FB est par exemple moins touché en 2007 (même tendance en 2001), tandis qu'en 2009 il s'agit d'une des modalités les plus atteintes (Figure 22).

Là encore, les différences observées peuvent être dues à un développement variable des cultures au moment des observations, lié à leur absorption d'azote (Arvalis, 2014).

2. Adventices

2.1. Colza 2014

Un relevé des adventices présentes en sortie d'hiver (au mois de mars) met en évidence une densité de population adventice, toutes espèces confondues, plus importante sur le bloc 3.

Cette densité est également plus faible sur les parcelles en semis direct avec 15 plantes/m² en moyenne, contre 45 en travail superficiel et 48 en labour (Figure 23). Les conditions de levée, fortement défavorables à la culture, ont pu l'être aussi pour les adventices.

La population adventice observée à cette époque n'est toutefois pas celle présente au cours du reste du cycle cultural : un traitement herbicide (Lontrel SG) a été appliqué deux jours après le relevé sur l'ensemble de l'essai.

2.2. Synthèse pluriannuelle

La majorité des relevés adventices a été effectuée sous couvert de blé. Les relevés réalisés en 2008 et 2012 sont quant à eux sous maïs. Les cultures de maïs sont précédées d'un couvert de phacélies, détruit chimiquement en sortie d'hiver.

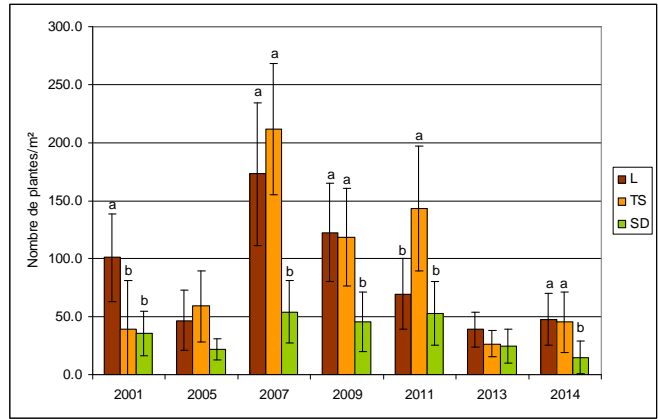


Figure 24 : Densité d'adventices en sortie d'hiver en fonction du travail du sol

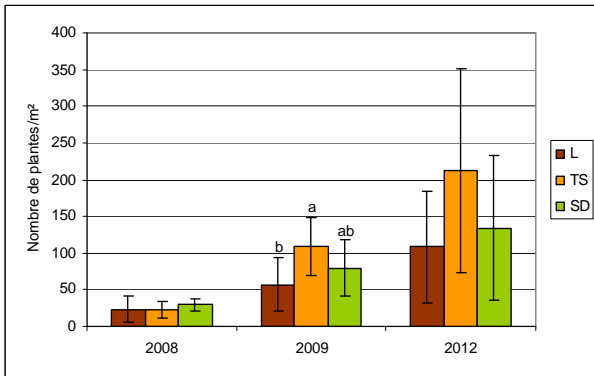


Figure 25 : Densité d'adventices post-herbicide en fonction du travail du sol

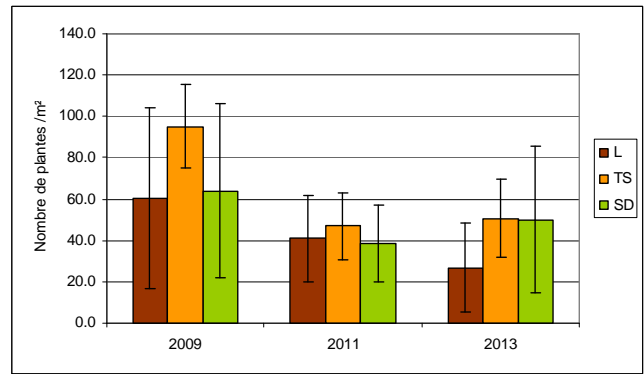


Figure 26 : Densité d'adventices en post-récolte en fonction du travail du sol

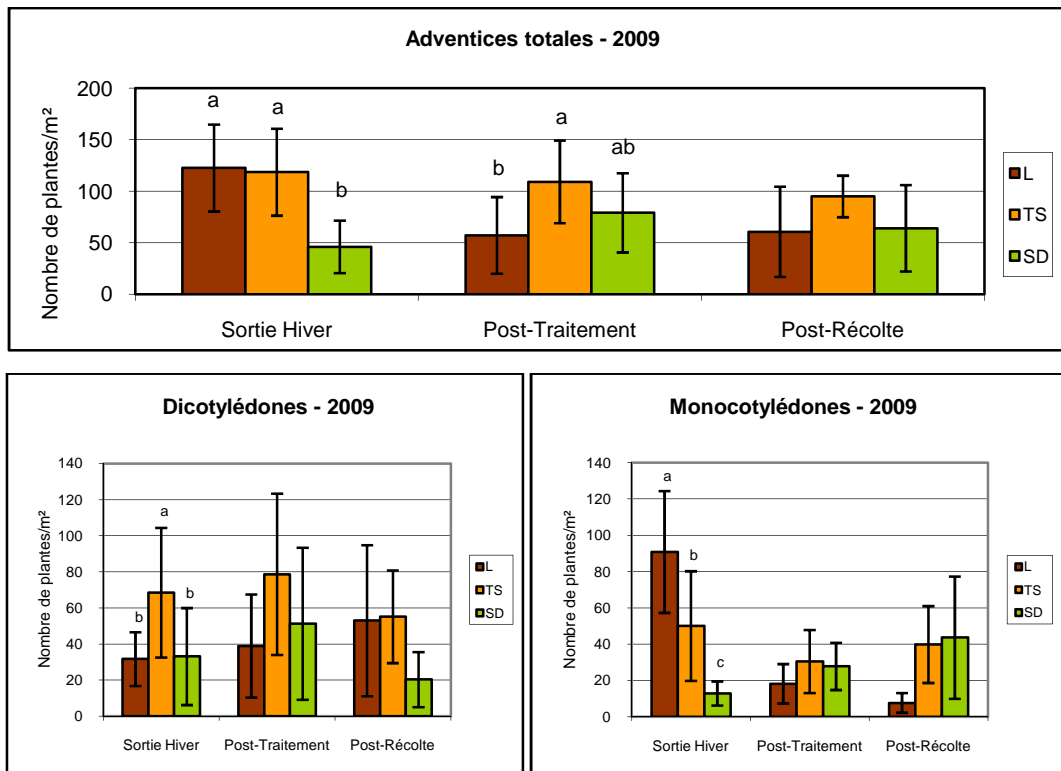


Figure 27 : Evolution des populations d'adventices en fonction du travail du sol (2009)

2.2.1. Effet du travail du sol

i-Influence des pratiques de travail du sol sur les levées en sortie d'hiver

En sortie d'hiver, les modalités en semis direct présentent quasi-systématiquement moins d'adventices que les autres modalités, et ce quel que soit le type d'adventice.

Les modalités en labour et travail superficiel alternent : en février 2001, les parcelles en labour sont significativement plus infestées que celles en travail superficiel, tandis qu'en février 2011 c'est l'inverse qui se produit. En 2007 (février), 2009 (janvier) et 2014 (mars), les modalités TS et L ne sont pas significativement différentes entre elles, mais restent significativement supérieures au SD. (Figure 24)

Ces différences sont principalement dues aux adventices annuelles : les adventices vivaces sont systématiquement très peu présentes, sans différences significatives entre les modalités de travail du sol.

Ces résultats peuvent être expliqués par l'état structural des sols en sortie d'hiver : les sols travaillés en labour ou en travail superficiel se réchauffent plus vite (Wolfgang et Adres, 1990), et présentent une structure moins dense potentiellement plus propice à la germination des adventices annuelles.

ii-Une atténuation des différences au printemps

Sur la période suivant l'application d'un herbicide (relevés effectués aux mois de mai-juin), le nombre total d'adventices n'est significativement impacté par le travail du sol qu'en 2009, avec un taux d'infestation supérieur pour le travail superficiel (109 plants/m², contre 79 en semis direct et 57 en labour), les modalités labourées étant les moins touchées. La même tendance est toutefois observée en mai 2012 (Figure 25).

Les mesures réalisées après la récolte du blé montrent l'état des populations d'adventices à l'issue de la saison culturale.

On note moins de différences entre les modalités : le nombre total d'adventices ne semble pas influencé par le travail du sol à cette période (Figure 26).

Les résultats précédents semblent montrer une évolution au cours de l'année culturale qui tend vers une homogénéisation du nombre total d'adventices sur les différentes modalités de travail du sol.

iii-Evolution intra-annuelle

Pour étudier l'évolution intra-annuelle de la population adventice, on s'intéressera tout d'abord au cas de l'année 2009, au cours de laquelle 3 relevés adventices ont été effectués, le premier en sortie d'hiver (janvier-février), le second au printemps (mai) et le dernier après la récolte (octobre).

Au cours de l'année 2009, les différences de nombre total d'adventices entre les modalités travail du sol s'estompent : la p-value (test anova) du travail du sol passe de 0,001 en sortie hiver à 0,048 au printemps, pour finir à 0,066 à l'automne. L'infestation change de façon plus marquée sur le labour que sur les autres modalités. On observe une tendance à la baisse du nombre d'adventices, sauf pour le semis direct (Figure 27).

Au cours de cette année, les dicotylédones et les monocotylédones évoluent de façon différente. Après une augmentation de population au printemps pour toutes les modalités, les dicotylédones présentes sur le TS et le SD diminuent en post-récolte. En labour par contre, la population de

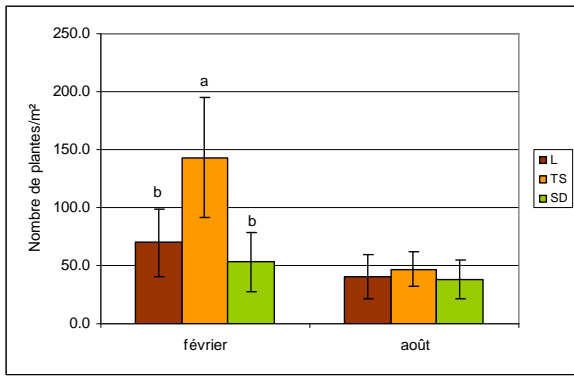


Figure 28 : Densité d'adventices en fonction du travail du sol (2011)

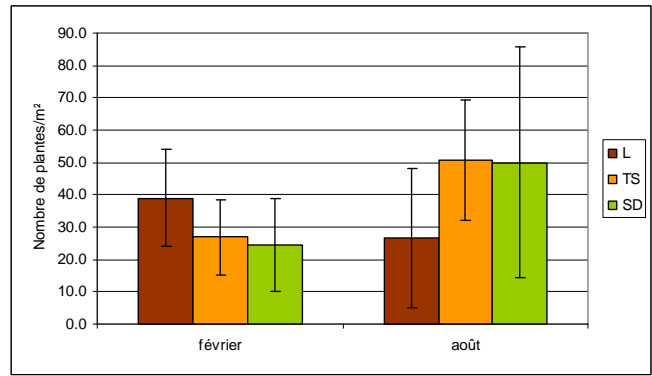


Figure 29 : Densité d'adventices en fonction du travail du sol (2013)

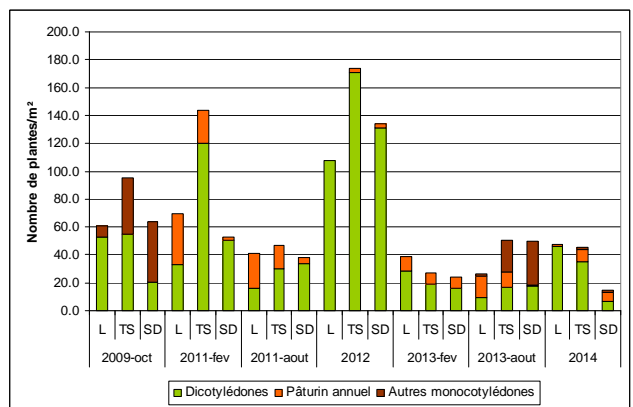
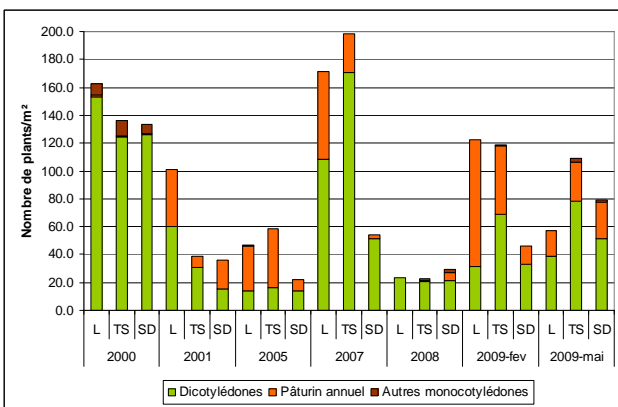


Figure 30 : Nombre d'adventices monocotylédones et dicotylédones

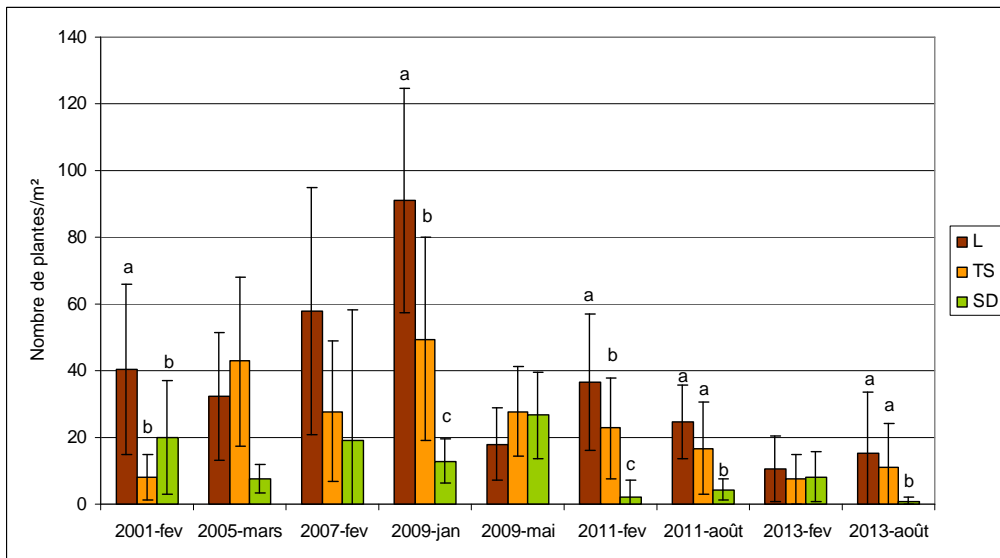


Figure 31: Densité de pâturin annuel en fonction du travail du sol

dicotylédones a tendance à augmenter au cours du temps. Ces observations sont toutefois à nuancer, au vu de l'importance des écarts-types observés. Dans le cas des monocotylédones, les modalités L et SD évoluent dans le sens contraire : la population sur labour diminue fortement au cours de l'année, tandis qu'elle augmente sur le SD, bien que dans une moindre mesure.

Pour expliquer ces évolutions de la population de monocotylédones, on peut émettre l'hypothèse que le sol en semis direct devient de plus en plus favorable au cours de l'année, notamment en se réchauffant (Wolfgang et Adres, 1990). De plus, l'herbicide appliqué juste après le premier relevé a pu affecter plus fortement les premières adventices levées, qui se trouvaient principalement en labour.

Ces résultats peuvent être comparés avec les années 2011 et 2013, seules années au cours desquelles deux relevés adventices ont été effectués, l'un en sortie d'hiver et l'autre après la récolte du blé.

En 2011, on observe une diminution globale de toutes les adventices entre février et août. Les modalités en travail superficiel, dont la population d'adventices était supérieure aux autres modalités en février, ont subi la plus forte diminution de population. (Figure 28) La tendance est la même pour les adventices monocotylédones et dicotylédones, et est probablement due à une bonne efficacité du traitement herbicide qui a suivi le premier relevé.

En 2013, le nombre d'adventices est faible tout au long de l'année. Par conséquent, aucune différence significative n'est observée. On peut toutefois noter une tendance à l'augmentation des populations en TS et SD (Figure 29).

Si l'étude de l'année 2009 montre une évolution différente du nombre d'adventices monocotylédones et dicotylédones, cette évolution n'est pas retrouvée en 2011 et 2013. Un plus grand nombre d'observations au cours d'une même année serait donc nécessaire pour confirmer ou infirmer les tendances observées.

iv-Evolution de la flore

- **Rapport monocotylédones/dicotylédones**

Au cours de la plupart des années de l'essai, la majorité de la population adventice est constituée de dicotylédones (Figure 30). Les monocotylédones ont tendance à représenter une partie de la population plus importante en L qu'en SD, particulièrement pendant les premières années.

On peut noter que dans la majorité des cas, le pâturin annuel représente la plus grande partie, voire l'intégralité, des monocotylédones présentes.

- **Impact sur les espèces d'adventices : cas du pâturin annuel**

A chaque relevé, la présence de certaines adventices est significativement influencée par le type de travail du sol. Mais les espèces concernées sont différentes tous les ans : seul le pâturin annuel (*Poa annua*) est significativement influencé par le travail du sol pendant plusieurs années (Figure 31).

On observe notamment qu'en semis direct, le pâturin est presque systématiquement moins présent qu'en labour et travail superficiel, bien que cette différence ne soit pas significative tous les ans. Le pâturin commun semble donc, dans ces conditions, favorisé par un travail du sol profond ou intermédiaire.

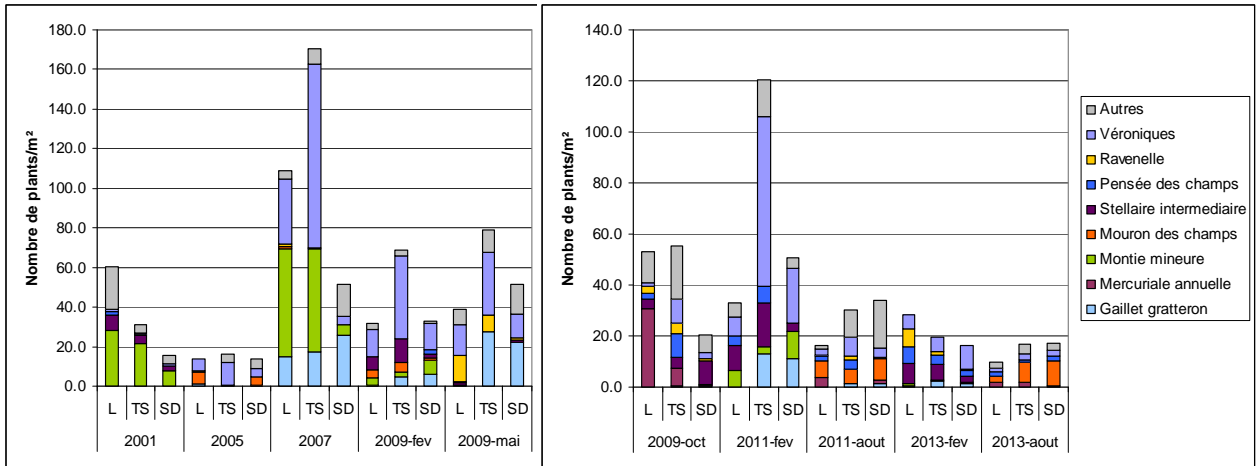


Figure 32 : Principales espèces de dicotylédones présentes sur l'essai

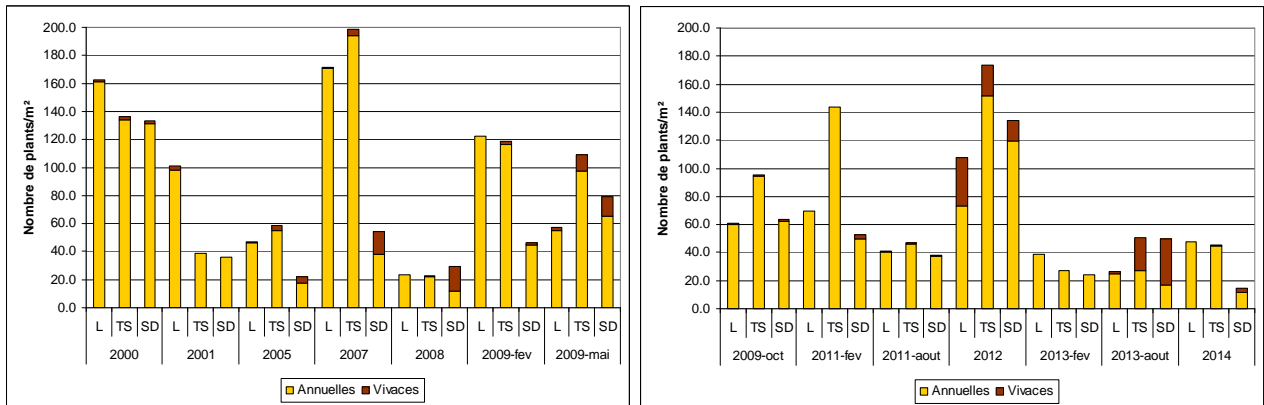


Figure 33 : Nombre d'adventices vivaces et annuelles en fonction du travail du sol

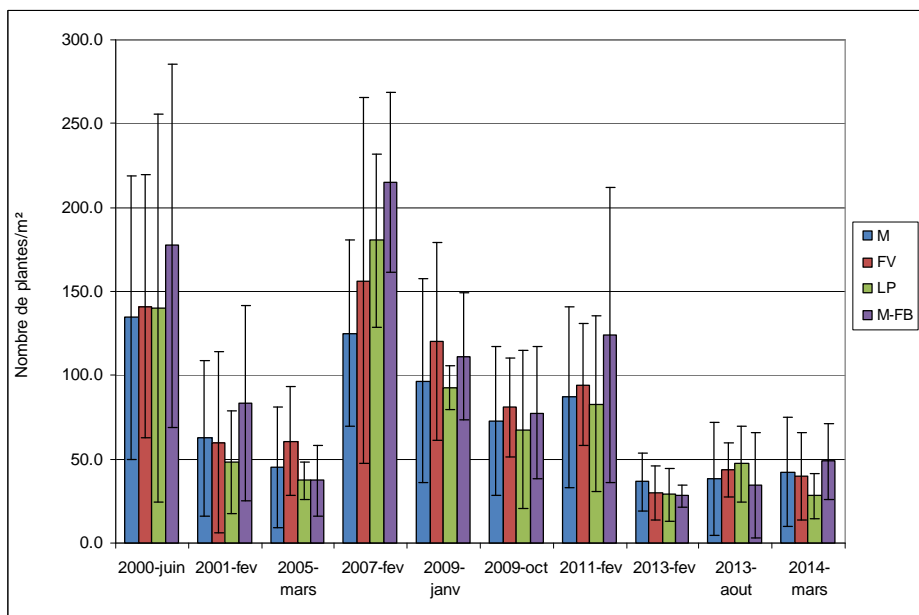


Figure 34 : Densité d'adventices en fonction du type de fertilisation azotée

Ce résultat entre en contradiction avec plusieurs références bibliographiques, notamment avec les conclusions de Sturny et al. (2007), pour qui les graines de faible longévité du pâturin sont détruites par l'enfouissement dû au labour. Aibar (2006) et Fourbet et al. (1979) classent également le pâturin dans les adventices favorisées par le non-labour.

Aucun effet récurrent du travail du sol n'est observé pour d'autres espèces régulièrement présentes sur l'essai, comme la véronique de perse, le gaillet gratteron, la ravenelle, la pensée des champs ou le séneçon vulgaire.

- **Principales espèces de dicotylédones**

Parmi les dicotylédones, aucune espèce ne ressort aussi clairement. On peut toutefois noter la forte présence de véroniques (véronique de perse et véronique à feuilles de lierre), principalement sur TS, en 2007, 2009 et 2011.

De façon générale, les espèces présentes une année donnée le sont sur toutes les modalités. On n'observe pas de réelle différenciation des populations adventices sur les différents types de travail du sol (Figure 32).

- **Rapport vivaces/annuelles**

Les adventices vivaces sont globalement peu présentes sur l'essai, et ne semblent pas impactées par le travail du sol ou la fertilisation (Figure 33). Les principales adventices vivaces rencontrées sont le laiteron des champs (*Sonchus arvensis*), le rumex oseille (*Rumex acetosa*) et l'épilobe à 4 angles (*Epilobium tetragonum*).

2.2.2. Effet de la fertilisation azotée

Le paramètre fertilisation présente globalement peu d'impact sur la présence d'adventices. Les rares différences observées au cours des années ne sont ni constantes, ni suivant une évolution visible (Figure 34).

On notera tout de même que dans le cas des relevés en sortie hiver, les apports de fertilisants n'ont pas toujours été effectués au moment de l'observation, principalement sur les modalités minérales. Les résultats observés ne sont donc dus qu'à l'historique de fertilisation de la parcelle. Cela pourrait potentiellement expliquer l'absence de résultats en sortie hiver au cours des premières années. Toutefois, aucune différence notable n'apparaissant au cours des années suivantes, on peut donc conclure que le type de fertilisation azotée n'impacte pas la population adventice sur cet essai.

2.2.3. Effet bloc : des contaminations externes variables

On peut presque systématiquement observer un effet bloc, sur l'ensemble des adventices ou sur certaines catégories seulement. Toutefois, aucune tendance n'est retrouvée au cours des années, et aucune évolution particulière n'est discernable.

Ces différences inter-blocs peuvent être expliquées par la présence de sources de contamination extérieures qui peuvent varier au fil des ans. En effet, les blocs sont séparés par des bandes enherbées susceptible d'héberger des adventices.

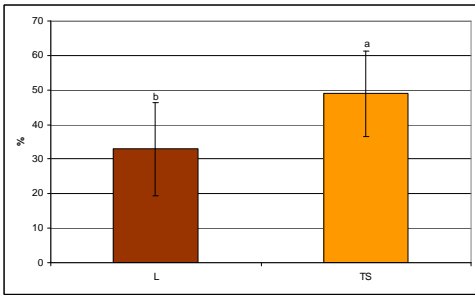


Figure 35 : Taux de pivots déformés en fonction du travail du sol

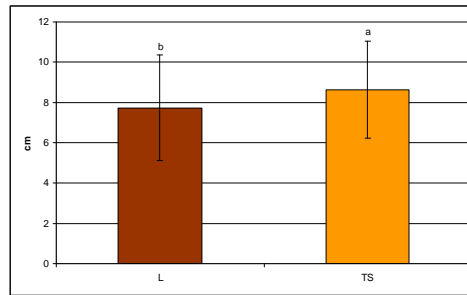


Figure 36: Longueur des pivots en sortie d'hiver en fonction du travail du sol

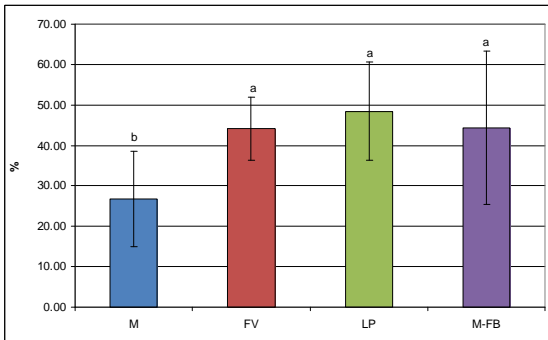


Figure 37 : Taux de pivots déformés en fonction de la fertilisation azotée

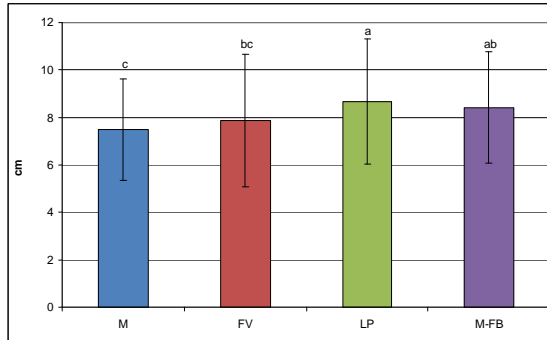


Figure 38: Longueur des pivots en sortie d'hiver en fonction de la fertilisation azotée

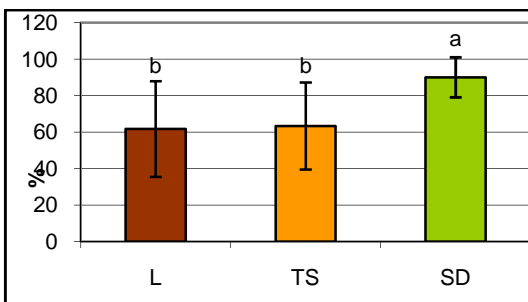


Figure 39: Taux de pivots déformés, avril 2010

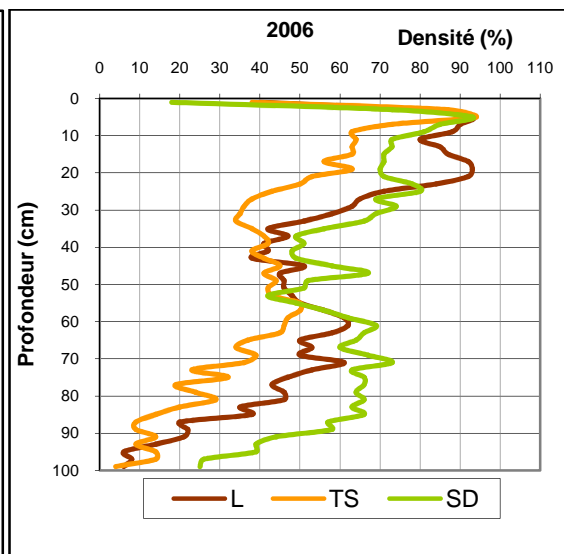
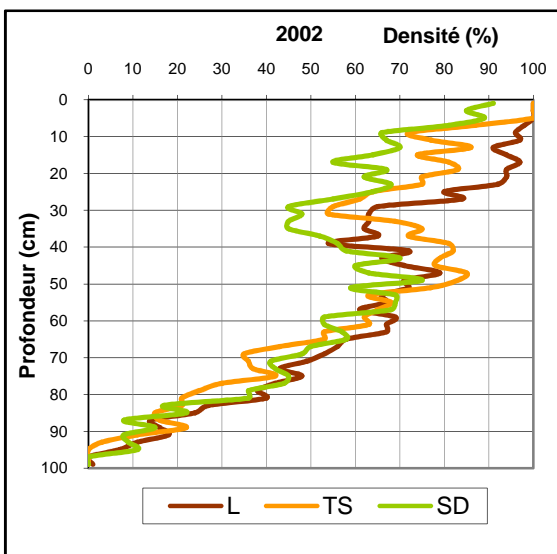


Figure 40: Densité racinaire du colza en fonction du travail du sol

3. Enracinement

3.1. Colza 2014

L'étude de l'état des pivots de colza en sortie d'hiver montre un effet significatif du travail du sol sur le développement racinaire du colza : En effet, la proportion de pivots coudés ou fourchus est plus importante en travail superficiel qu'en labour (Figure 35). Cela peut être lié à un sol plus compact, qui peut donc gêner la progression des pivots.

Cette proportion de pivots déformés plus importante en TS peut également être mise en relation avec leur développement plus important (Figure 36). Les pivots de colza sont significativement plus longs sur les parcelles en travail superficiel, et donc plus susceptibles d'avoir atteint une zone compactée au cours de leur croissance qui aurait causé leur déformation.

La proportion de pivots déformés et la longueur des pivots sont également significativement plus faibles sur les parcelles M (Figures 37 et 38). Une explication possible à ce phénomène est un manque d'azote : en effet, la mesure ayant été effectuée en sortie d'hiver, aucun fertilisant azoté n'a encore été apporté, ce qui peut pénaliser le développement de la culture. Les parcelles M-FB recevant cette année la même fertilisation que les parcelles M ne sont toutefois pas impactées de la même façon, peut-être grâce à un arrière-effet du fumier de bovins appliqué tous les quatre ans sur ces parcelles.

Une autre hypothèse peut également être une moindre homogénéité de la matière organique et donc de l'azote dans le sol. L'incorporation des fertilisants organiques dans le sol par le labour ou le travail superficiel peut avoir créé des zones plus riches et donc susceptibles d'attirer préférentiellement les pivots du colza, causant un plus fort taux de déformation.

Quelle que soit la modalité de travail du sol ou de fertilisation, néanmoins, la longueur des pivots est faible : le CETIOM considère en effet que des pivots mesurant entre 6 et 12 cm en sortie d'hiver sont un facteur limitant pour le développement de la culture, particulièrement en cas d'excès ou de déficit hydrique (Lemaire et Nicolardot, 1997). Ce développement insuffisant des racines peut être expliqué par une date de semis trop tardive : le colza a été semé le 13 septembre, alors que les dates de semis recommandées pour la région sont situées dans la deuxième quinzaine d'août (Giteau et al., 2011).

3.2. Synthèse pluriannuelle

Une mesure du taux de déformation des pivots de colza réalisée en avril 2010 montre un taux de déformation significativement supérieur en SD (90%) qu'en TS (63%) ou SD (62%) (Figure 39). Cette différence peut là encore être due à une structure du sol plus compacte en SD, et donc susceptible de gêner la croissance des pivots.

L'enracinement du colza pour les années précédentes montre des résultats variables (Figure 40). En 2002, l'enracinement sur les 30 premiers centimètres est plus faible en semis direct qu'en labour, le travail superficiel présentant un enracinement intermédiaire. Plus en profondeur, la densité racinaire devient très semblable pour les trois modalités de travail du sol. En 2006 toutefois, si l'enracinement est meilleur en labour sur la couche 0-25 cm, le semis direct présente cette fois-ci une plus grande densité racinaire que le labour plus en profondeur.

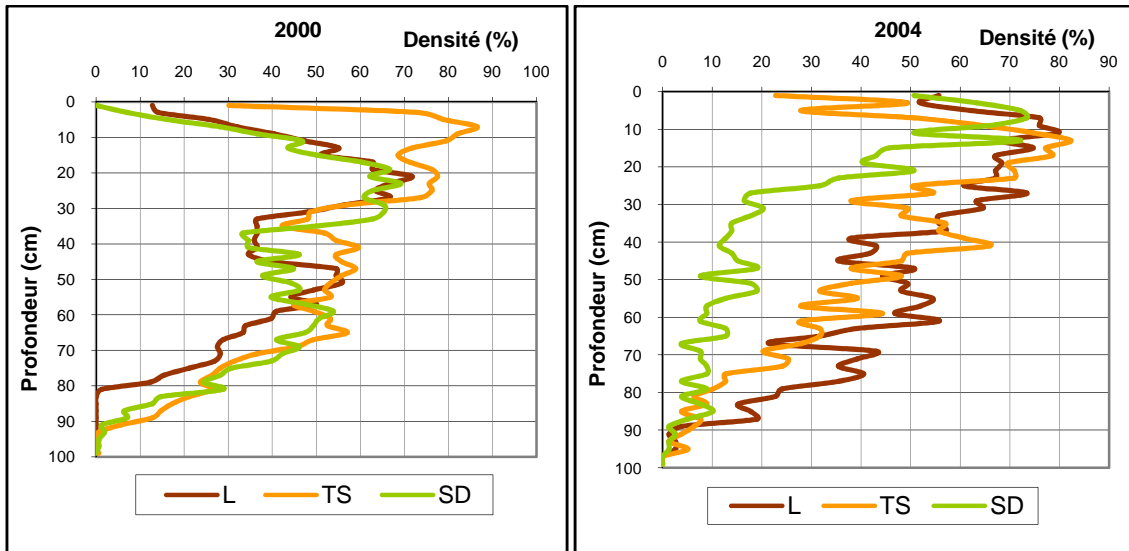


Figure 41: Densité racinaire du maïs en fonction du travail du sol

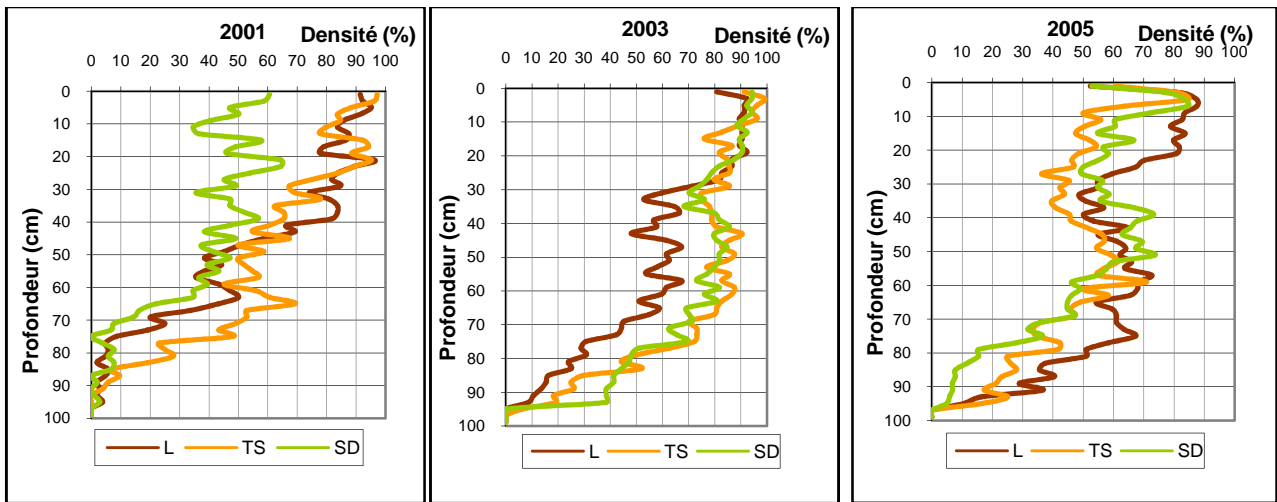


Figure 42: Densité racinaire du blé en fonction du travail du sol

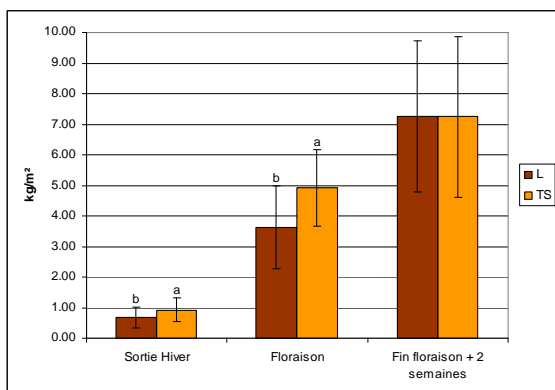


Figure 43 : Biomasse aérienne du colza en fonction du travail du sol

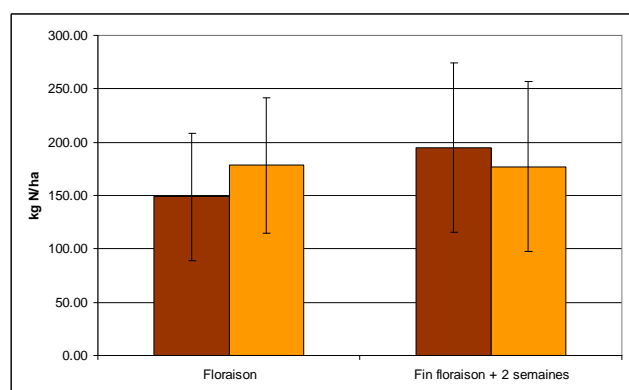


Figure 44: Quantité d'azote absorbée par le colza en fonction du travail du sol

La même observation effectuée sous culture de maïs en 2000 et 2004 montre également des résultats contrastés (Figure 41). En 2000, les modalités SD et L présentent un enracinement similaire, tandis que sous travail superficiel, la densité racinaire est sensiblement plus importante sur les 30 premiers centimètres du sol. En 2004 par contre, l'enracinement en SD devient plus faible qu'en TS et L à partir de 10cm de profondeur.

Enfin, sous culture de blé, l'année 2001 présente un enracinement plus faible en SD sur les 40 premiers centimètres (Figure 42). En 2003, l'enracinement du labour est plus faible que les autres modalités sous 30cm, tandis qu'en 2005 cet enracinement est supérieur à la fois dans les premières couches du sol et en profondeur.

La densité racinaire des cultures entre 2000 et 2006 est donc très variable, et ne semble pas dépendre du type de culture. De façon générale, les modalités labourées et en travail superficiel présentent souvent un meilleur enracinement sur les 30 premiers centimètres du sol. Cette différence est explicable par la facilitation de la colonisation racinaire par le travail du sol à 15 (pour le travail superficiel) ou 25 (pour le labour) cm de profondeur, et est cohérente avec les travaux de Jabro et al. (2009), pour qui la résistance du sol à la pénétration est supérieure en semis direct sur les premières couches du sol.

Plus en profondeur, les tendances sont moins marquées. Pour les premières années notamment, peu de différences sont observables entre les modalités de travail du sol en dessous de 30 cm de profondeur. A partir de 2003, des différences apparaissent mais ne favorisent pas les mêmes modalités selon les années, on ne peut donc pas conclure sur un effet spécifique du travail du sol sur l'enracinement à cette profondeur.

4. Nutrition azotée

4.1. Colza 2014

Afin de suivre la croissance de la culture, trois prélèvements de biomasse ont été réalisés : le premier en sortie d'hiver, le deuxième au stade floraison et le dernier deux semaines après la fin de la floraison, lors du remplissage des siliques. La biomasse totale a été mesurée pour ces trois prélèvements, et les taux de matières sèches et d'azote ont été relevés pour les deux derniers.

4.1.1. Effet du travail du sol sur la production de biomasse

Une étude de la quantité de biomasse par m² montre que cette biomasse est, jusqu'au stade floraison, significativement plus faible pour les modalités labourées que pour celles en travail superficiel (Figure 43).

Toutefois, lors de la période de remplissage des siliques (fin floraison + 2 semaines), cette différence s'estompe et la biomasse du colza est similaire entre le labour et le travail superficiel.

Les différences d'absorption d'azote entre les deux modalités de travail du sol ne sont significatives ni à la floraison ni deux semaines après la fin de la floraison. Toutefois les modalités labourées absorbent, en moyenne, plus d'azote entre ces deux stades (Figure 44).

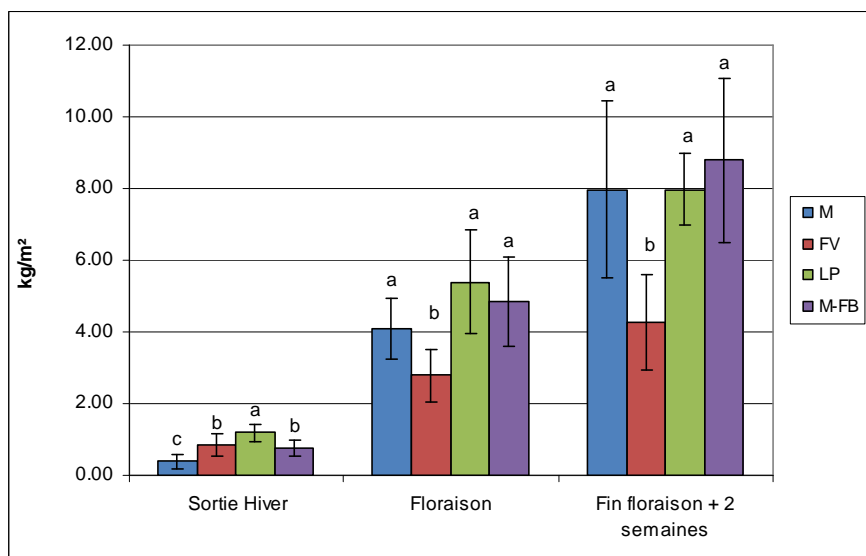


Figure 45 : Biomasse aérienne du colza en fonction de la fertilisation azotée

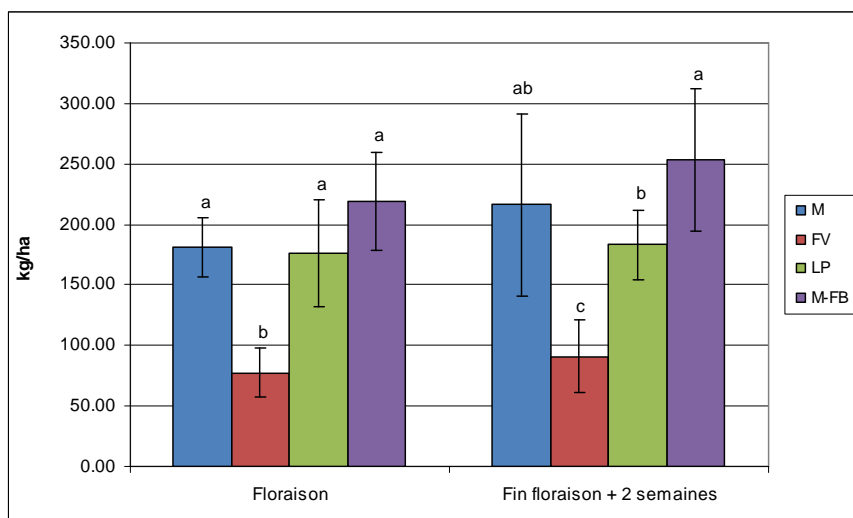


Figure 46: Quantité d'azote absorbée par le colza en fonction de la fertilisation azotée

	M	FV	LP	FB
L	1,81	0,83	1,30	1,85
	1,82	1,16	1,22	1,54
	1,85	0,78	1,42	1,66
TS	1,54	0,78	1,04	1,60
	1,43	0,89	1,25	1,64
	1,69	0,75	1,06	1,93

Tableau 4: Indice de nutrition azotée du colza au stade début de floraison

Les modalités labourées ont donc absorbé moins d'azote et produit moins de biomasse que celles en travail superficiel avant le stade floraison, puis ont connu une croissance accrue entre le stade floraison et le remplissage des siliques qui a permis de compenser leur retard.

L'enracinement est, on l'a vu, plus faible en labour qu'en travail superficiel en sortie d'hiver (Figure 36). Cela a pu être un facteur déterminant pour l'absorption d'azote par la plante, ce qui a conduit à une biomasse plus faible jusqu'au stade floraison. Cette différence est toutefois compensée à partir de ce stade.

L'impact du travail du sol sur la croissance du colza est toutefois limité comparé à l'effet du type de fertilisation azotée apporté.

4.1.2 Effet de la fertilisation

Le type de fertilisation azotée semble être cette année le principal facteur jouant sur le développement de la culture. En effet, la fertilisation a un effet significatif systématique aussi bien sur la production de biomasse que sur le taux de matières sèches et d'azote de la culture, et ce à chaque stade étudié.

En sortie d'hiver, les modalités minérales (M et M-FB) présentent des biomasses plus faibles que les autres modalités, explicables par le fait qu'aucun apport azoté n'a encore été effectué pour cette saison culturale. Les effluents organiques ont quant à eux été appliqués quelques jours avant le semis ; l'azote sous forme minérale qu'ils contiennent est donc déjà disponible pour la culture.

A partir du stade floraison toutefois, ce retard des modalités minérales s'estompe, tandis qu'on observe un développement moins important des modalités ayant reçu du fumier de volailles (Figure 45).

Cette moindre production de biomasse s'accompagne sur les modalités FV d'un taux de matières sèches plus important, ainsi que d'une teneur en azote plus faible. Si l'on calcule à partir de ces mesures la quantité totale d'azote absorbée à ces deux stades, on peut voir que celle-ci est beaucoup plus faible pour les modalités FV (Figure 46).

Ces résultats sont confirmés par le calcul de l'indice de nutrition azotée (INN) au stade floraison. Cet indice est déterminé par la relation suivante (Colnenne et al., 1998).

$$\text{INN} = \frac{\%N \text{ mesuré}}{\%N \text{ critique}}$$

$$\text{Avec } \%N \text{ critique} = 4,48 \times \text{MS}^{-0,25}$$

Au stade floraison, l'INN est considéré satisfaisant s'il est supérieur à 0,95 et moyennement limitant s'il est compris entre 0,8 et 0,95. Un INN inférieur à 0,8 est le signe d'une forte carence en azote.

La carence en azote du colza sur les modalités FV est clairement visible, avec cinq parcelles sur six inférieures à 0,95, dont trois inférieures au seuil de 0,8 (Tableau 5).

La quantité d'azote absorbée par la culture a donc été un fort facteur limitant de la croissance de la plante sur les modalités FV.

Un élément d'explication possible est la faible proportion d'azote ammoniacal dans le fumier de volailles apporté : il représente environ 3% de l'azote total du fumier, contre 80% dans le lisier de

	M et M-FB	LP	FV
09/09/13	/	94 kgN _{minéral} /ha (+ 24 kgN _{organique} /ha)	6,3 kgN _{minéral} /ha (+ 216 kgN _{organique} /ha)
11/03/14	90 kgN _{minéral} /ha	90 kgN _{minéral} /ha	90 kgN _{minéral} /ha
31/03/14	90 kgN _{minéral} /ha	/	/
Total	180 kgN _{minéral} /ha	184 kgN _{minéral} /ha (+ 24 kgN _{organique} /ha)	96,3 kgN _{minéral} /ha (+ 216 kgN _{organique} /ha)

Tableau 5: Quantités d'azote sous forme minérale et organique apportées (Source : analyses des effluents)

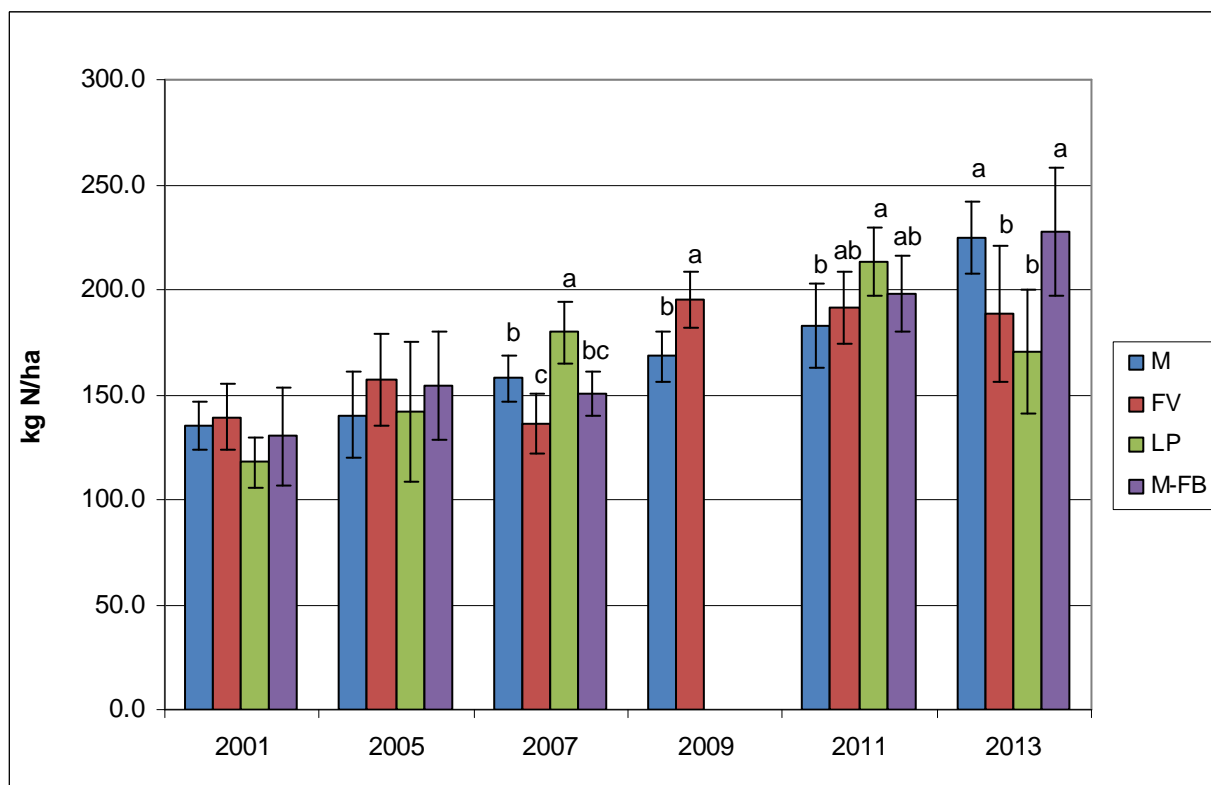


Figure 47 : Quantité totale d'azote absorbée par le blé en fonction de la fertilisation azotée

porc apporté à la même date. Par conséquent, la quantité totale d'azote minéral (NH_4^+) apportée est deux fois moins importante pour le FV (Tableau 6).

La forte quantité d'azote organique apportée par le fumier de volaille au cours de cette année et des années précédentes devrait théoriquement compenser cette moindre quantité d'azote minéral. Ce n'est pourtant pas le cas cette année : la minéralisation de cet azote organique a donc vraisemblablement été limitée par un autre facteur. La très forte pluviométrie de cette année, qui a saturé le sol en eau d'octobre à mars, a pu limiter la minéralisation sur cette période en limitant l'accès des microorganismes à l'oxygène. En effet, les bactéries responsables de la nitrification sont aérobies, un excès d'eau peut donc bloquer le processus (Carlotti, 1992).

Dans une moindre mesure, on peut également voir que les colzas des modalités minérales ont absorbé à chaque stade une plus grande quantité d'azote. Cette différence peut être expliquée par la forme sous laquelle l'azote a été apporté : cette forme étant entièrement minérale, et donc assimilable immédiatement par la plante, elle a été disponible lorsque la culture en avait besoin. Il est également possible que l'arrière effet du fumier de bovins apporté en 2012 sur les parcelles M-FB explique la quantité légèrement supérieure d'azote absorbée sur cette modalité. Cet arrière-effet étant dû à la minéralisation de l'azote organique du fumier, il a toutefois pu être lui aussi ralenti par la saturation du sol en eau.

4.2. Synthèse pluriannuelle

4.2.1. Analyse de la quantité totale d'azote absorbée

Le niveau de nutrition du blé peut être estimé *a posteriori* en calculant la quantité totale d'azote absorbée par la culture au cours de son développement.

Si le type de travail du sol ne semble pas influencer sur la quantité finale absorbée, le type de fertilisation azotée a par contre un fort impact (Figure 47).

On observe un effet significatif du type de fertilisation azotée sur la quantité absorbée à partir de 2007. Toutefois, il est difficile de dégager une tendance constante. Si en 2013, les blés ayant reçu une fertilisation minérale ont absorbé une quantité plus importante d'azote, en 2007 et 2011 ce sont ceux fertilisés avec du lisier de porc qui ont été favorisés.

Ces différences sont vraisemblablement dues aux conditions climatiques de chaque année : de fortes pluies peuvent avoir lixivié l'azote minéral et par conséquent défavorisé les parcelles M et M-FB dont l'intégralité de l'apport azoté est sous cette forme. A l'opposé, une humidité trop faible ou des températures trop fraîches peuvent avoir limité la minéralisation des parts organiques du LP ou du FV. Enfin, la composition des effluents d'élevage varie selon les années, notamment en présentant un ratio azote minéral/azote organique variable.

Cette quantité finale absorbée ne permet toutefois pas d'estimer les éventuelles différences dans la dynamique d'absorption de l'azote par la culture aux différents stades de son développement. Elle peut par contre être un facteur explicatif d'autres différences entre les modalités, comme on le verra par la suite.

4.2.2. Minéralisation de l'azote

On s'intéresse maintenant aux différences de minéralisation de l'azote dans le sol, et donc à l'activité microbienne du sol. Pour cela, il convient d'estimer le taux de minéralisation ou d'organisation nette de l'azote à partir du bilan azoté.

Ce bilan n'est réalisé que pour les parcelles ayant reçu une fertilisation minérale, pour laquelle la quantité d'azote immédiatement utilisable par la culture est connue avec une plus grande précision que pour les autres fertilisants. En effet, il est plus difficile d'estimer la quantité réelle de fertilisants organiques apportés sur le terrain, du fait d'une moindre précision du matériel d'épandage. De plus, les coefficients d'azote efficace fournis par la littérature sont habituellement déterminés à l'aide de mesures effectuées sur des parcelles labourées, leur fiabilité sur d'autres types de travail du sol peut donc être remise en question.

Par conséquent, une seule modalité azotée étant étudiée (M), seul l'effet du travail du sol sur la minéralisation pourra être considéré.

Le bilan initial simplifié utilisé est le suivant :

(RPR+ azote absorbé par la culture) - (RSH+Apports azotés) = minéralisation - organisation - volatilisation et dénitrification - lixiviation

Avec RPR= Reliquat Post Récolte, RSH=Reliquat Sortie Hiver

Tous les termes n'étant pas calculables ou estimables avec précision, il est nécessaire de simplifier encore ce bilan.

Aulakh et al. (1992) ont montré que dans les sols recevant peu d'amendements organiques (moins de 20 kg par hectare et par an), le processus de dénitrification est négligeable. C'est le cas pour les parcelles étudiées, qui n'ont reçu que de la fertilisation minérale depuis le début de l'essai.

De plus, Mills et al. (1974) in Morot-Gaudry (1997) affirment que la volatilisation de l'azote ne devient significative que pour un pH supérieur à 7,2. Les parcelles M ayant un pH de 6 en moyenne, on négligera également ce paramètre. On obtient donc le bilan simplifié suivant.

(RPR+ azote absorbé) - (RSH+Apports azotés) = minéralisation - organisation - lixiviation

(1) = (2)

Il est difficile, sans installation spécifique, de connaître avec précision la quantité d'azote lixiviée chaque année. Un élément indicatif peut toutefois être la quantité d'eau en excès, c'est-à-dire supérieure à la capacité de stockage du sol. Carlotti (1992) affirme que la lixiviation de l'azote commence quand le sol a atteint sa capacité au champ. On considèrera donc ici que plus la quantité d'eau en excès est importante, plus la quantité d'azote lessivée l'est aussi.

La réalisation d'un bilan hydrique permet donc de simplifier le bilan azoté: pour les années au cours desquelles la pluviométrie ne dépasse jamais la capacité de stockage du sol, on considère que la quantité d'azote lessivée est négligeable.

Par conséquent, le terme (2) du bilan entre fin février (RSH) et la récolte peut s'écrire de deux manières :

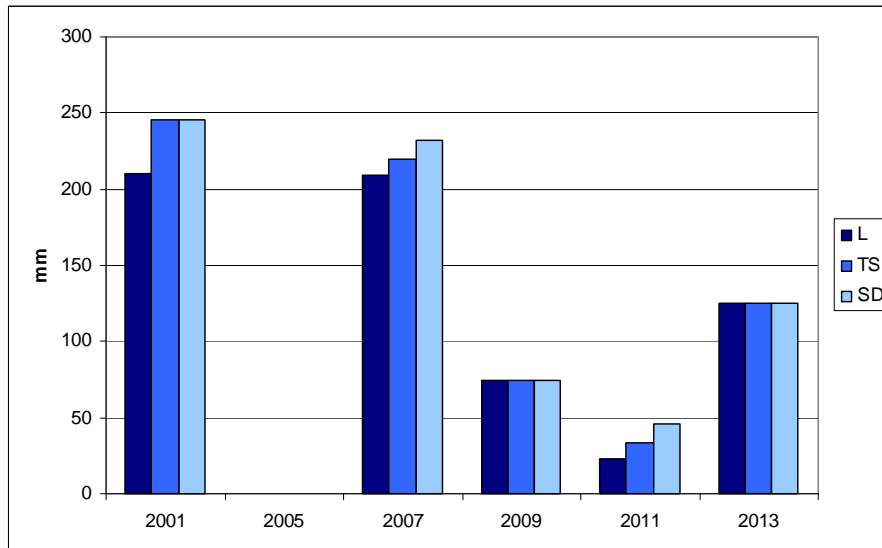


Figure 48 : Quantité d'eau en excès entre les dates de mesure du RSH et du RR

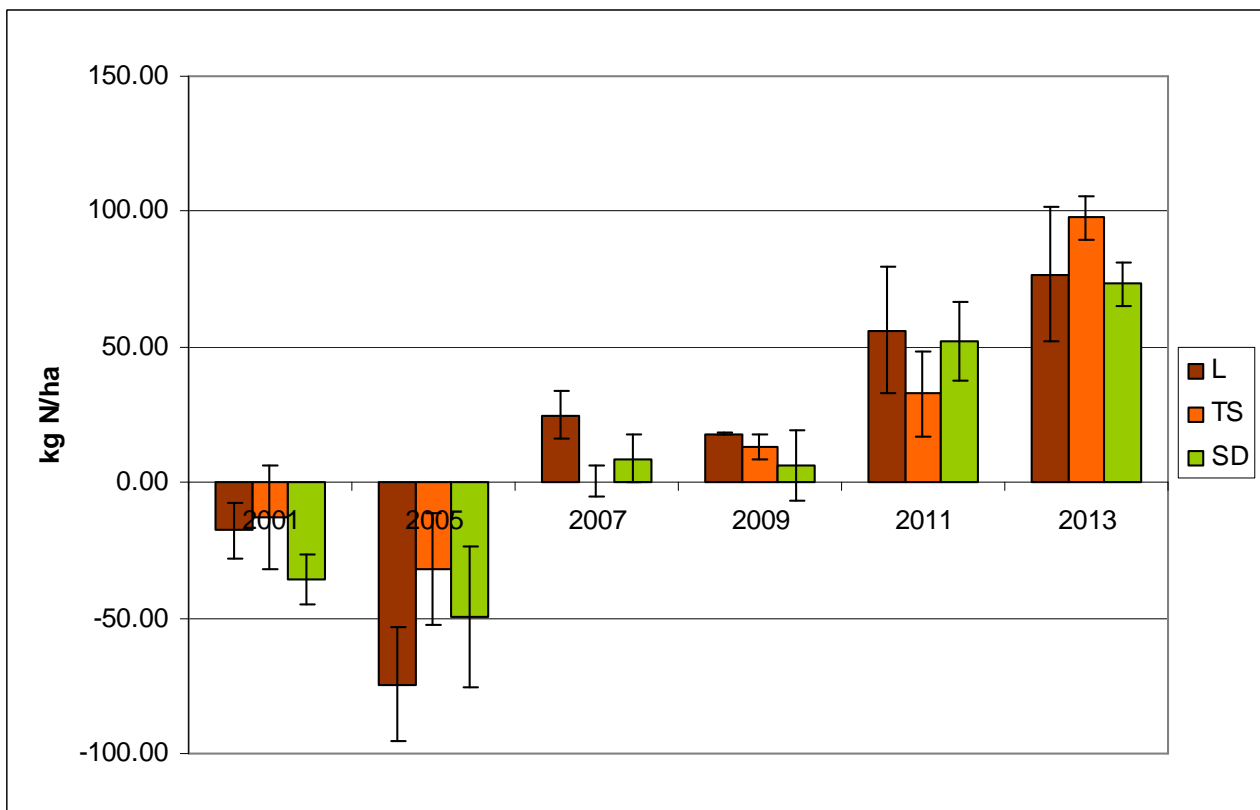


Figure 49: Valeurs du terme (2) en fonction du travail du sol

- Si l'année est caractérisée par un excès d'eau, on ne peut pas négliger la lixiviation de l'azote et donc **(2-a) = minéralisation – organisation – lixiviation**

C'est le cas des années 2001, 2007, et 2009.

-S'il n'y a pas d'excès d'eau, **(2-b) = minéralisation – organisation**

C'est le cas de l'année 2005, voire de 2011 dont l'excès d'eau est faible.

Les quantités d'eau en excès sont liées principalement à la pluviométrie hivernale, qui constitue la plus grande partie de la pluviométrie entre la mesure du RSH et celle du RPR. La figure 48 représente les quantités d'eau en excès, c'est-à-dire n'ayant pas pu être absorbées par le sol.

Pour Phillips et al. (1980), la lixiviation de l'azote est plus importante en SD. C'est probablement le cas sur l'essai de Kerguéhennec : en effet, une quantité de MO plus faible en profondeur sur le semis direct diminue sa RFU, par conséquent l'eau en excès est plus importante.

Les valeurs du terme (2) ((2-a) et (2-b) confondus) obtenues sont représentées sur la Figure 49.

On observe une augmentation progressive du terme (2) depuis 2005. Toutefois, la quantité d'eau en excès suit entre 2007 et 2011 une évolution contraire (Figure 48), on ne peut donc pas conclure avec certitude que la différence minéralisation-organisation augmente réellement. Par contre, les valeurs du terme (2) étant positives à partir de 2007, on peut en déduire que les processus de minéralisation de l'azote sont à cette période plus importants que les processus d'organisation.

En 2005, aucun excès d'eau n'est observé, on considère donc que les valeurs obtenues représentent uniquement la différence minéralisation – organisation, soit dans ce cas l'organisation nette de l'azote. Cette organisation nette peut être signe d'une augmentation de la population de microorganismes, qui consomment de l'azote minéral lors de leur multiplication (Lemaire et Nicolardot, 1997). Toutefois, les valeurs observées en 2005 sont dues en grande partie à des valeurs de RSH particulièrement élevées (de l'ordre de 100 kgN/ha). Ces valeurs peuvent être dues à la très faible pluviométrie, entraînant un faible lessivage de l'azote minéralisé en automne et en hiver avant la mesure du RSH, mais il est également possible qu'un problème de conservation des échantillons ait augmenté la valeur mesurée. Les valeurs obtenues pour cette année 2005 sont donc à interpréter avec précaution.

L'azote présent dans le sol a donc potentiellement subi une organisation importante en 2005, lors d'une augmentation de la population microbienne. Par la suite, de 2007 à 2013, la minéralisation de l'azote est systématiquement supérieure à son organisation. La situation en 2001 est plus difficile à déterminer : les valeurs négatives du terme (2) peuvent être dues à une organisation supérieure à la minéralisation, ou à une forte lixiviation de l'azote minéral.

On n'observe toutefois pas de différences significatives entre les modalités de travail du sol pour une même année. Les valeurs obtenues en labour et en semis direct, notamment, sont généralement proches. Ce résultat est en désaccord avec plusieurs sources (Gilliam et Hoyt, 1987; Schvartz et al., 2005), pour lesquelles la minéralisation est moindre en semis direct.

Le terme (2) est utilisé pour estimer les différences de minéralisation et d'organisation entre les modalités et les années. Toutefois, il ne représente qu'une différence entre les activités de minéralisation et d'organisation de l'azote, et ne donne donc aucune information sur l'importance réelle de chaque processus.

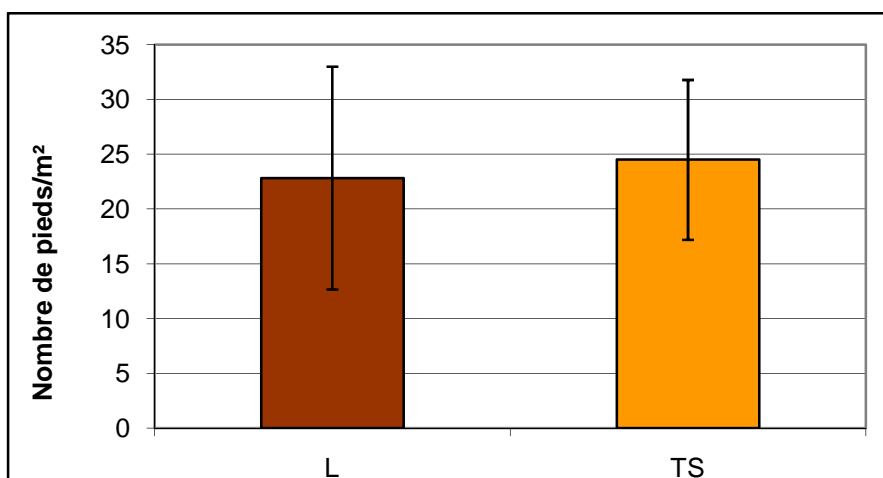


Figure 50: Densité du colza en sortie d'hiver 2014

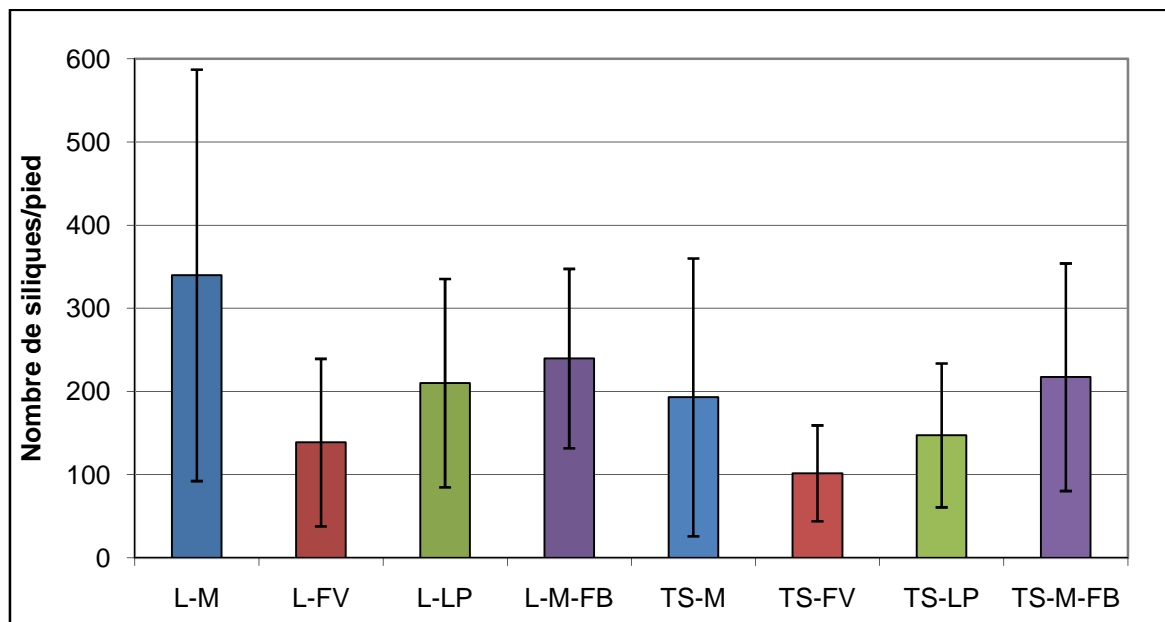


Figure 51: Nombre de siliques par pied (2014)

De plus, l'utilisation de la quantité d'eau en excès pour estimer la lixiviation de l'azote ne donne qu'une valeur relative entre les années. Enfin, le fait de négliger entièrement certains processus du cycle de l'azote est également potentiellement source d'erreur. Le processus de dénitrification en est un exemple :

Pour Linn et Doran, (1984) et Gilliam et Hoyt (1987), ce processus est favorisé en SD, du fait d'une accumulation de matières organiques et donc de microorganismes en surface. Le fait de négliger son effet peut donc fausser les différences observées entre les modalités de travail du sol pour une même année.

5. Composantes du rendement

5.1. Colza 2014

Afin d'expliquer les différences de rendement observées à la récolte, on s'intéresse à ses composantes. Pour le colza, les composantes du rendement sont les suivantes :

$$\text{Rendement} \left(\frac{\text{q}}{\text{ha}} \right) = 0,01 \times \frac{\text{Nombre de pieds}}{\text{m}^2} \times \frac{\text{Nombre de siliques}}{\text{pied}} \times \frac{\text{Nombre de grains}}{\text{silique}} \times \text{PMG}$$

Avec PMG= Poids de Mille Grains (en grammes).

5.1.1. Nombre de pieds/m²

La fertilisation azotée n'a pas cette année d'effet significatif sur la levée du colza (22,8 pieds/m² en L, 24,5 pieds/m² en TS), et donc sur sa densité (Figure 50). Le travail du sol a par contre joué un rôle déterminant, puisqu'aucun colza n'a levé sur les parcelles en semis direct.

Cet échec est en grande partie dû aux attaques de limaces, qui malgré un apport d'antilimaces début octobre sont restées fortement présentes. Les conditions créées par une absence de travail du sol leur sont en effet très favorables : la présence de résidus de culture non enfouis créent des abris et maintiennent une humidité favorable à leur développement (Jouy et Munier-Jolain, 2001). Les attaques d'altises ont également contribué à ce phénomène.

La date de semis tardive est également un facteur explicatif. Les plantes, plus chétives, sont donc plus vulnérables, ce qui a pu accroître l'impact des limaces et des altises (CETIOM, 2013).

Il n'y a par contre pas de différence significative entre le travail superficiel et le labour, bien que le nombre de pieds soit légèrement plus faible en moyenne sur le labour.

Pour Labreuche et al. (2007), le colza est particulièrement sensible au choix de travail du sol, notamment du fait d'un risque d'élongation de l'épicotyle en cas de présence de résidus de culture en surface. Les données acquises jusqu'à présent sur cette culture semblent confirmer cette affirmation.

5.1.2. Nombre de siliques par pied

Le nombre de siliques par pied est influencé à la fois par le travail sol et par la fertilisation. Ce nombre est plus important en moyenne sur les parcelles labourées que sur le travail superficiel. On peut notamment mettre en relation cette différence avec une densité de levée plus faible sur le labour : une moindre concurrence entre les individus a pu améliorer le développement des siliques (Figure 51).

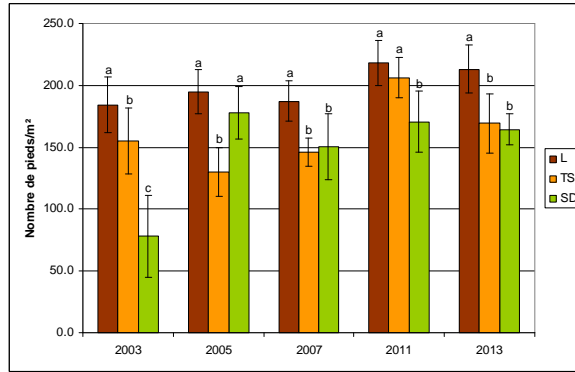


Figure 52 : Densité de population du blé à la levée en fonction du travail du sol

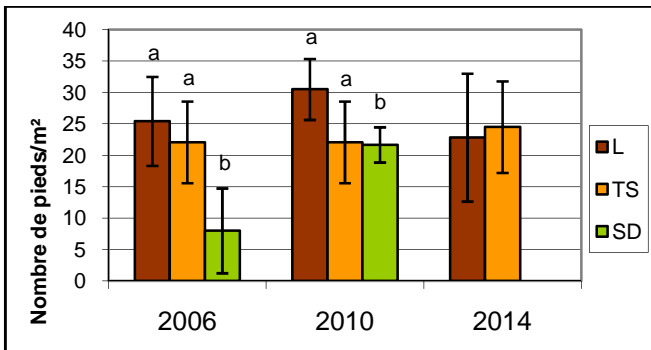


Figure 53 : Densité du colza en sortie d'hiver en 2006 et 2010 en fonction du travail du sol

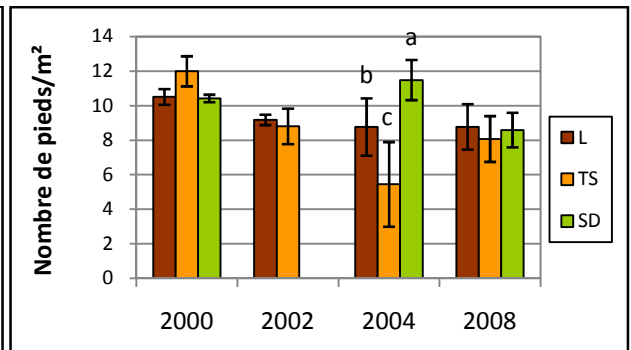


Figure 54 : Densité du maïs en fonction du travail du sol

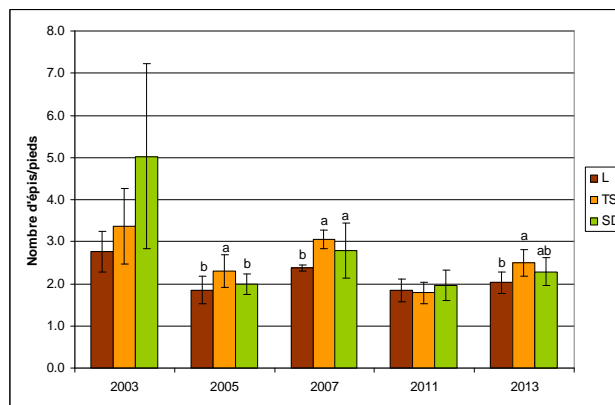


Figure 55 : Nombre d'épis par pied en fonction du travail du sol

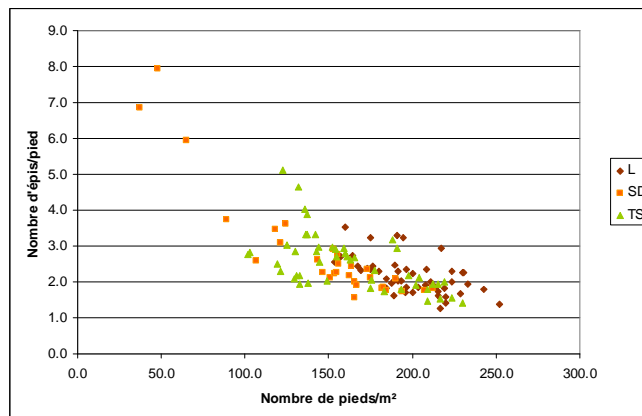


Figure 56 : Relation entre le nombre de pieds par m² et le nombre d'épis par pied

Les modalités minérales M et M-FB présentent également plus de siliques (266 en moyenne pour M et 229 pour M-FB), tandis que celles ayant reçu du fumier de volailles en ont le moins, avec une moyenne de 120 siliques/pied. Cette différence est cohérente avec les différences de nutrition azotée entre les parcelles : les parcelles FV ont en effet absorbé moins d'azote à la floraison, période à laquelle se forment les siliques.

Il faut toutefois noter que la variabilité au sein de chaque parcelle est extrêmement forte, particulièrement en M, bien que les différences globales observées soient significatives.

5.1.3. Nombre de grains par silique et PMG

Le nombre de grains par silique et le poids de mille grains du colza ne sont pas cette année significativement influencés par le travail du sol ou la fertilisation. Les paramètres déterminants pour le rendement sont donc la densité de la culture et le nombre de siliques par pied.

5.2. Synthèse pluriannuelle

5.2.1. Un effet marqué du travail du sol sur la levée

La première composante du rendement pour l'ensemble des cultures est le nombre de pieds présents par m², déterminé par la levée. On observe un effet marqué du travail du sol sur la densité de la culture de blé tous les ans où cette densité a été mesurée (Figure 52). Les modalités en labour ont systématiquement un nombre de pieds supérieur. Les modalités SD et TS sont généralement moins denses que le labour, mais certaines années font exception : en 2005, le SD est équivalent au L, tandis qu'en 2011 c'est le TS qui en est proche.

Au cours des années précédentes, l'effet du travail du sol sur le nombre de pieds de colza par m² est également observable. C'est le cas en 2006 et 2010, avec une densité de population en semis direct significativement inférieure à celles du labour et du travail superficiel (Figure 53).

Ces différences ne sont toutefois pas observées sur les cultures de maïs : en 2000, 2002 (essai B) et 2008, aucune différence significative n'est visible. On observe même en 2004 une plus grande densité de culture en semis direct (11,5 pieds/m² en moyenne, contre 8,8 en labour et 5,4 en travail superficiel) (Figure 54).

Cette densité de culture plus faible en non-labour est régulièrement retrouvée dans la littérature (Kanwar et al., 1988; Chervet et al., 2005). Elle peut être liée à une moins bonne germination, due à une diminution du contact graine-sol par les résidus de culture (Chervet et al., 2005).

5.2.2. Le nombre d'épis par pieds, un mécanisme de compensation pour le blé?

Le nombre d'épis par pieds présente une distribution souvent significative dans le sens inverse du nombre de pieds (Figures 52 et 55). La tendance est la même pour les années pour lesquelles la différence n'est pas significative, notamment en 2003.

Cette tendance inverse de la densité et du nombre d'épis par pieds est observable de façon pluriannuelle (Figure 56).

On observe donc bien un effet de compensation du blé : une faible densité est généralement associée à un nombre d'épis/m² plus important. Cette compensation s'observe plus fréquemment sur les parcelles en semis direct ou en travail superficiel, qui présentent une densité de population généralement plus faible.

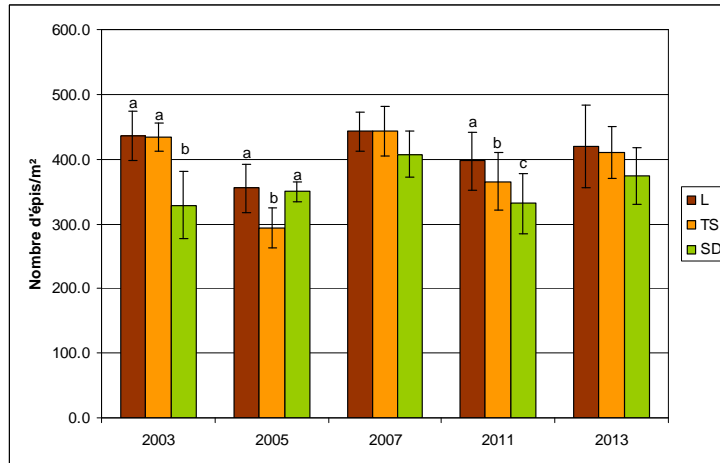


Figure 57 : Nombre d'épis par m² en fonction du travail du sol

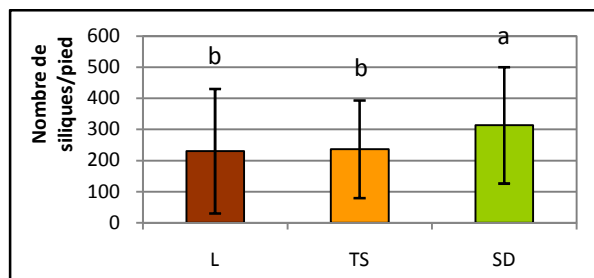


Figure 58 : Nombre de sillques par pied en fonction du travail du sol (2010)

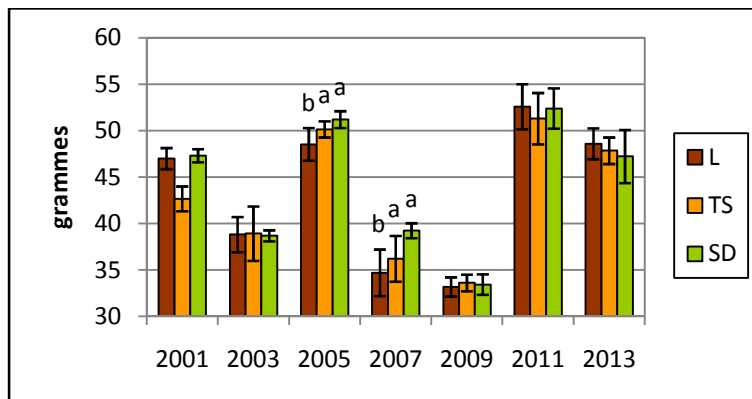


Figure 59 : PMG du blé en fonction du travail du sol en 2005 et 2007

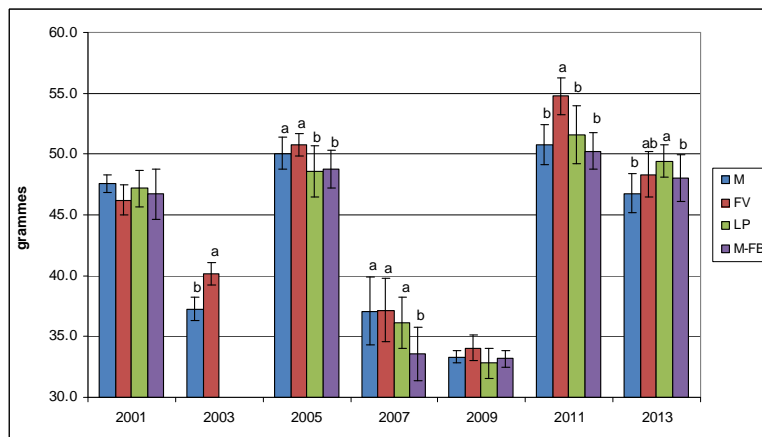


Figure 60 : PMG à 15% d'humidité du blé en fonction de la fertilisation azotée

Cette compensation ne suffit néanmoins pas toujours aux modalités avec une levée trop faible pour rattraper ce décalage. L'étude du nombre d'épis par m² permet de s'en apercevoir : si en 2007 et 2013 les différences significatives observées dans le nombre de pieds/m² ne se retrouvent pas pour le nombre d'épis/m², en 2003, 2005 et 2011 les différences significatives dues à la levée restent présentes (Figure 57).

5.2.3. Nombre de siliques par pied (colza)

En 2014, le nombre de siliques par pied est plus important en labour, modalité présentant une densité de pieds légèrement moindre pour cette année. La même tendance est visible en 2010, avec un nombre de siliques significativement supérieur en SD, modalité pour laquelle le nombre de pieds par m² était le plus faible (Figure 58). La culture de colza est donc également capable de compenser les pertes à la levée.

5.2.4. Grains par épi (blé)

Aucun effet du travail du sol ou de la fertilisation n'est observable sur le nombre de grains par épis, qui n'est pas ici un facteur responsable des différences de rendements.

5.2.5. PMG (blé et colza)

Le PMG n'est significativement influencé par le travail du sol qu'en 2005 et 2007. Au cours de ces deux années, le PMG des blés en semis direct et en travail superficiel est plus important qu'en labour (Figure 59). Les mécanismes de compensation du blé ne suffisent pas à expliquer cette différence : en effet, en 2005 le nombre de plantes est similaire pour le labour et le semis direct, et en 2007 le nombre d'épis par pied a suffi à compenser les pertes à la levée. On peut émettre l'hypothèse que le type de travail du sol a modifié les dynamiques d'absorption de l'azote par la plante lors du remplissage des grains. Toutefois, sans analyse précise des quantités d'azote absorbées par la plante à différents stades, il est impossible de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse.

Le PMG est également influencé par la fertilisation pour la plupart des années (Figure 60).

Les différences significatives observées ne sont pas les mêmes au cours des années.

La fertilisation influence donc bien le PMG, mais ne semble pas avoir un effet direct. Une observation de la quantité totale d'azote absorbée par la plante en fonction de la fertilisation azotée apportée ne permet pas d'expliquer ces variations de PMG : l'azote total absorbé est bien dépendant du type de fertilisation (tests statistiques significatifs en 2007, 2009, 2011 et 2013), mais les différences observées ne sont pas semblables à celles des PMG (Figures 47 et 60).

L'azote absorbé observé ici n'est toutefois qu'une valeur finale. Une étude de la dynamique de l'absorption de l'azote aux différents stades de la culture serait nécessaire pour déterminer l'impact réel du type de fertilisation sur le PMG.

En ce qui concerne la culture de colza, le PMG ne semble pas influencé par la fertilisation azotée ou le travail du sol, aussi bien en 2010 qu'en 2014.

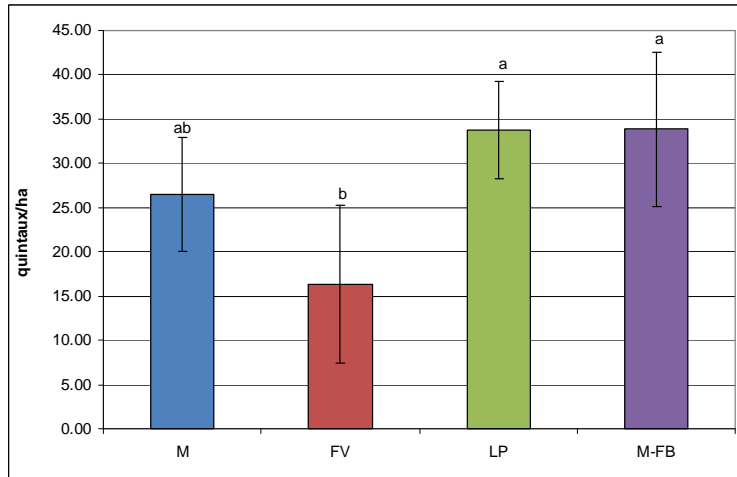


Figure 61 : Rendement 2014 ramené à 9% d'humidité en fonction de la fertilisation azotée

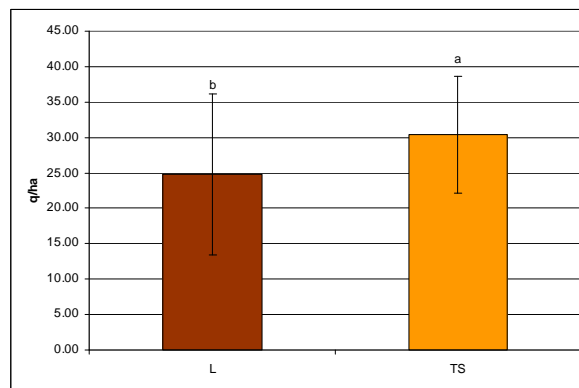


Figure 62 : Rendement 2014 ramené à 9% d'humidité en fonction du travail du sol

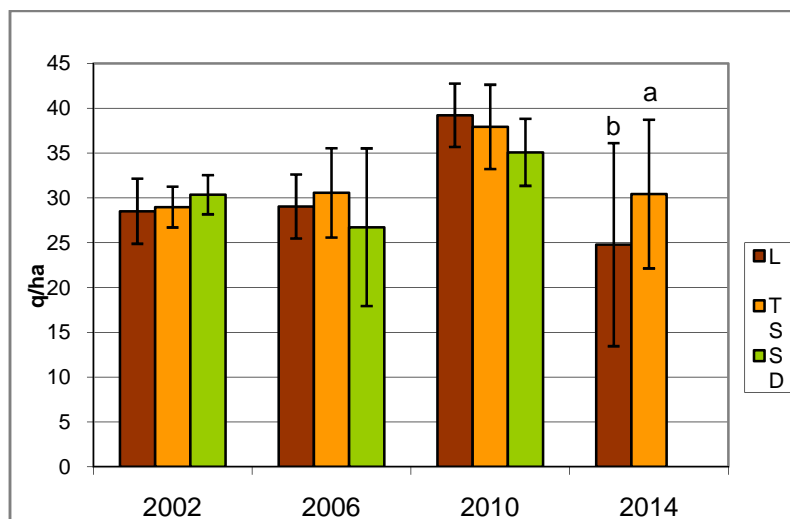


Figure 63: Rendements du colza en fonction du travail du sol

6. Rendement

6.1. Colza 2014

Trois paramètres influent sur le rendement 2014 du colza, avec par ordre d'importance le type de fertilisation azotée, le travail du sol et le bloc.

6.1.1. Effet de la fertilisation azotée

Comme les plus faibles quantités d'azote absorbées au cours de la culture le laissaient présager, le rendement des parcelles ayant reçu du FV est significativement plus faible que celui des autres modalités (Figure 61) : il est de 16,4 q/ha, contre 26,5 q/ha pour M, 33,7 q/ha pour LP et 33,9 q/ha pour M-FB. La moindre absorption d'azote par les modalités ayant reçu du fumier de volailles peut avoir deux origines : une incapacité de la plante elle-même à absorber l'azote, ou une indisponibilité de l'azote dans le sol. L'enracinement du colza n'étant pas significativement plus faible sur ces modalités que sur les autres, l'obstacle réel est donc bien la disponibilité de l'azote. La quantité d'azote minéral plus faible dans le fumier de volailles a donc impacté négativement la croissance de la culture, notamment au moment de la formation des siliques, ce qui conduit à un rendement final significativement plus faible.

6.1.2. Effet du travail du sol

Le rendement est également influencé par le travail du sol : il est supérieur sur les parcelles en travail superficiel (Figure 62), avec 30,4 q/ha en moyenne contre 24,8 q/ha pour le labour.

Ce résultat est cette fois-ci en désaccord avec le nombre moyen de siliques par plante, plus important en labour. Un nombre de pieds légèrement inférieur en L, et un nombre de grains par silique plus faible (bien que, dans les deux cas, de façon non significative) peuvent expliquer cette différence.

6.1.3. Effet bloc

Le rendement est également significativement plus faible dans le bloc 3 que dans les autres blocs. Encore une fois, cette différence n'est pas retrouvée de façon significative dans les composantes du rendement, toutefois plusieurs tendances vont dans le même sens (notamment la densité de peuplement, de 19,6 pieds/m² en moyenne pour le bloc 3 contre 23,5 pour le bloc 1 et 27,9 pour le bloc 2). Leur effet cumulé peut donc entraîner cette différence de rendement.

Une autre explication possible serait une plus forte population adventice sur ce bloc pendant le développement de la culture. C'est effectivement le cas en sortie d'hiver, toutefois le désherbage ayant suivi ce relevé empêche d'estimer la population présente après le mois de mars. L'étude du taux d'impuretés à la récolte permet toutefois d'estimer l'état de la parcelle à cette période.

6.2. Synthèse pluriannuelle

6.2.1. Rendements du colza

En dehors de l'année 2014, le travail du sol semble ne pas avoir eu d'effet notable sur le rendement final des cultures de colza. En 2002, 2006 et 2010, aucune différence significative, ni même tendance, n'est observable dans le rendement (Figure 63).

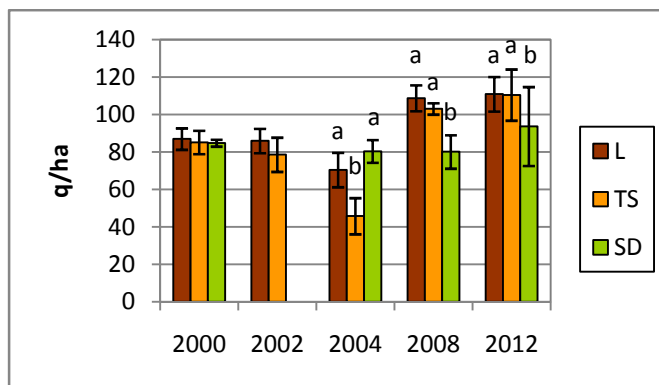


Figure 64: Rendements du maïs en fonction du travail du sol

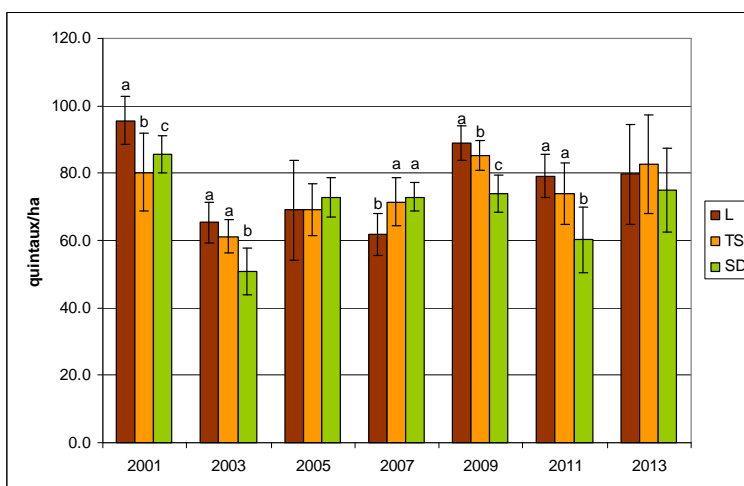


Figure 65 : Rendements du blé en fonction du travail du sol

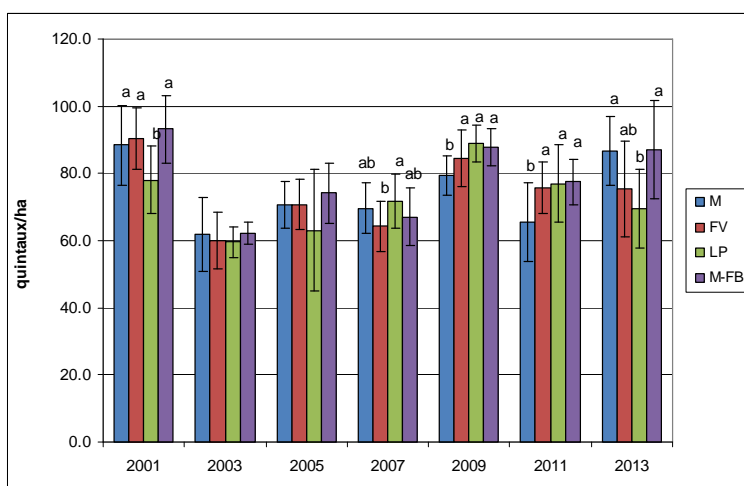


Figure 66 : Rendements du blé en fonction de la fertilisation azotée

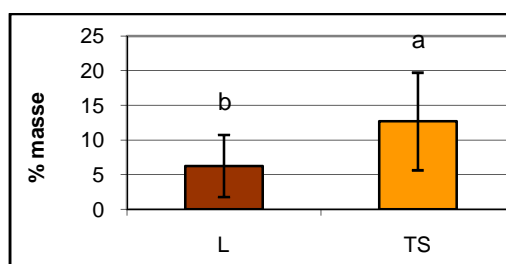


Figure 67 : Taux d'impuretés à la récolte, colza 2014

6.2.2. Rendements du maïs

Un effet plus important du travail du sol est visible sur les cultures de maïs. Si en 2000 et 2002 aucune différence n'apparaît, à partir de 2004 l'impact du travail du sol est significatif chaque année (Figure 64). Les modalités labourées sont systématiquement dans le groupe présentant les meilleurs rendements. Le SD présente un moins bon rendement en 2008 et 2012, toutefois ses rendements sont égaux voire supérieurs au labour en 2000 et 2004.

6.2.3. Rendements du blé

Les rendements de blé sont également significativement influencés par le travail du sol et/ou la fertilisation azotée chaque année.

En ce qui concerne le travail du sol, les modalités en labour sont favorisées la plupart des années, avec quatre années en faveur du labour parmi les cinq années présentant des différences significatives en faveur du labour (Figure 65).

La plus forte densité de culture en labour peut être un facteur explicatif de ces différences. Toutefois, un nombre de pieds/m² important n'est pas systématiquement lié à un rendement plus fort : en 2005 par exemple, les différences de rendement ne sont pas significatives alors que les différences de densité l'étaient. En 2007, on observe même un effet inverse : les rendements en labour, modalités avec le plus de pieds/m², sont plus faibles.

D'autres paramètres jouent donc sur le rendement final : la compensation d'une faible densité de population par un nombre d'épis par plant plus important est un facteur explicatif supplémentaire. Un effet de la fertilisation est également existant, mais encore une fois aucune réelle tendance ne se dégage.

Si l'on compare les rendements obtenus avec la quantité totale d'azote absorbée, on observe que les résultats significatifs visibles à partir de 2007 sont très proches (Figures 47 et 66). Le rendement final est donc fortement lié à la quantité totale d'azote absorbée.

7. Qualité

7.1. Colza 2014

7.1.1. Taux d'impuretés

Lors de la récolte, différents taux d'impureté ont pu être mesurés. Le taux d'impuretés est mesuré en % du poids total.

Les impuretés présentes dans le colza récolté sont majoritairement constituées de graines de gaillet gratteron (*Galium aparine*) et de siliques de ravenelle (*Raphanus raphanistrum*). Le taux d'impuretés est donc fortement lié à la présence de ces deux adventices sur les parcelles. On retrouve un taux d'impuretés supérieur dans le bloc 3, ce qui montre que le peuplement adventice sur ce bloc en sortie d'hiver est resté important même après désherbage, et peut donc avoir impacté négativement le rendement, comme vu dans le paragraphe précédent.

Les impuretés sont également plus fortement présentes en travail superficiel (Figure 67). Or, le rendement est également plus important en TS. Les conditions liées au travail superficiel ont donc vraisemblablement été, cette année, plus favorables à la fois pour la culture et pour les adventices.

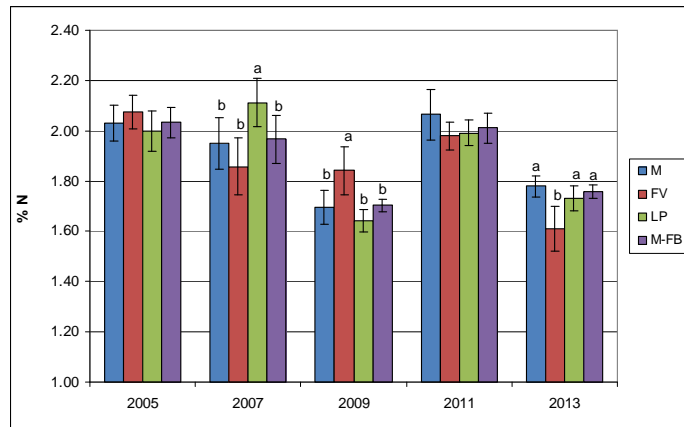


Figure 68: Teneur azotée des grains à la récolte en fonction de la fertilisation azotée

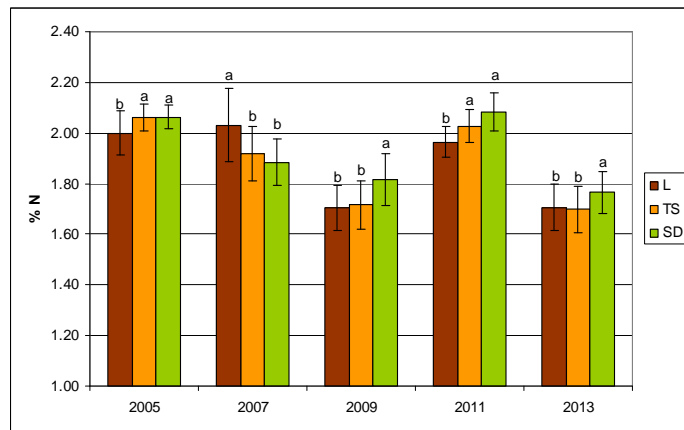


Figure 69: Teneur azotée des grains à la récolte en fonction du travail du sol

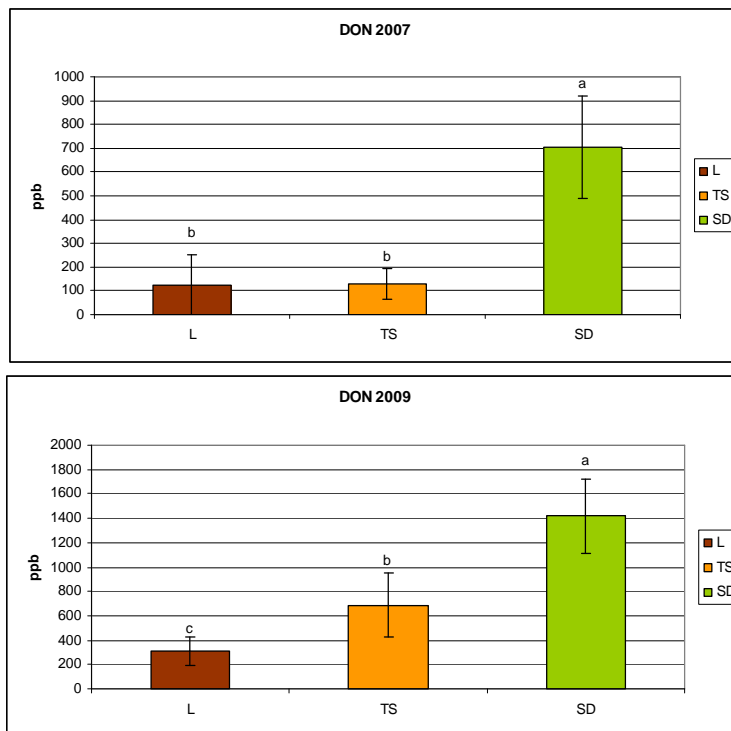


Figure 70 : Teneur en DON du grain en fonction du travail du sol en 2007 et 2009

7.1.2. Taux d'huile

Le taux d'huile contenu dans les grains est assez constant, avec une moyenne de 50,3% de la matière sèche sur l'ensemble de l'essai, et n'est pas significativement impacté par les paramètres étudiés.

7.1.3. Taux de protéines

Le taux de protéines des grains est par contre significativement influencé par le travail du sol, avec un taux d'azote supérieur pour les modalités M-FB : 18% de la matière sèche, contre 17,1% pour M, 16,7% pour FV et 16,9% pour LP. Ce résultat est cohérent avec la quantité d'azote absorbée plus importante pour cette modalité au moment du remplissage.

7.2. Synthèse pluriannuelle

Sur cet essai, seules les cultures de blé ont, avant 2014, été analysées afin d'en déterminer la qualité. Les analyses suivantes ne concernent donc que cette culture.

7.2.1. Teneur en azote du grain

La teneur azotée des grains à la récolte est influencée à la fois par la fertilisation et par le travail du sol de l'essai.

L'effet de la fertilisation azotée, variable d'une année à l'autre, est fortement lié à la quantité globale d'azote absorbée par la plante (Figures 47 et 68). De façon générale, plus la quantité d'azote totale absorbée par le blé est importante, plus le taux azoté des grains l'est aussi (Carlotti, 1992). C'est effectivement le cas de cet essai.

Un effet du travail du sol se dégage également, avec pour la plupart des années un taux d'azote dans le grain significativement supérieur en semis direct (Figure 69). Contrairement à l'effet de la fertilisation, cette tendance n'est pas retrouvée dans l'absorption totale d'azote par la culture. On peut toutefois émettre l'hypothèse que la dynamique d'absorption varie au cours du temps entre les modalités, et qu'une plus grande quantité d'azote a été absorbée par le blé en SD pendant la phase de remplissage des grains.

Cet effet systématique du travail du sol est en contradiction avec (Sip et al., 2013), pour qui le type de travail du sol n'influence pas le taux protéique des grains de blé. Il est par contre fortement lié au rendement : la plus forte teneur azotée est obtenue sur les modalités dont le rendement est le plus faible.

7.2.2. Présence de mycotoxines

Pour les deux années au cours desquelles la teneur en mycotoxines DON a été mesurée pour toutes les modalités, on observe une concentration clairement supérieure pour le semis direct (Figure 70). En 2007, la teneur mesurée est de 702 ppb en SD, soit plus de cinq fois la quantité présente en L (124 ppb) et TS (129 ppb). En 2009, ces valeurs passent à 1418 ppb pour le SD, 688 pour le TS et 306 ppb pour le L.

Cette différence entre les modalités est cohérente avec les résultats de Barrier-Guillot et al. (2007), et peut être due à une présence accrue de résidus de culture en surface susceptible de servir d'hôtes à la maladie.

La plus grande présence de DON en 2009 est vraisemblablement due à la présence de maïs sur la parcelle au cours de l'année précédente, dont les résidus ont également pu servir d'hôtes à la fusariose (Barrier-Guillot et al., 2007).

En 2007 et 2009, le taux de pieds touchés par la fusariose est pourtant significativement plus faible en semis direct. Ces mesures de mycotoxines donnent donc des résultats en apparence contradictoires avec la pression de maladies observée. Toutefois, les relevés maladie et l'analyse des grains ne sont pas effectués à la même date, puisque les observations des pieds touchés sont effectuées en juin pour ces deux années, et les analyses après la récolte. Un développement de la fusariose plus important en semis direct a donc pu avoir lieu après les relevés maladie. De plus, la mesure du nombre de pieds touchés n'est pas forcément parfaitement représentative de la présence de *Fusarium spp.* sur la parcelle, puisqu'elle ne prend pas en compte le degré de gravité de l'attaque sur chaque plante.

A noter que même en semis direct, les quantités de DON dans les grains restent très faibles comparées à la dose journalière tolérable pour cette mycotoxine, qui est de 1µg/kg de poids corporel (Fremy, 2010). Toutefois la réglementation de l'union Européenne 1126/2007 du 28/09/2007 fixe un seuil limite de 1250 ppb de DON dans les grains de blé tendre. La recommandation pour l'alimentation porcine est quant à elle de 900 ppb maximum. Or ces seuils sont dépassés en semis direct pour l'année 2009. Les conséquences économiques d'une trop grande quantité de DON peuvent donc être importantes, même si le rendement n'a pas été fortement impacté par la fusariose.

8. Discussion générale

8.1. Un fort impact du travail du sol sur la protection des cultures

Le travail du sol influe régulièrement sur la présence de maladies fongiques du blé, particulièrement celles du pied. Le piétin-verse est ainsi presque systématiquement plus présent en labour qu'en semis direct. La fusariose du pied, le rhizoctone et la septoriose suivent la même tendance, quoique dans une moindre mesure.

Chacune de ces maladies présente un cycle incluant une phase d'hivernation sur les résidus de culture. Ces résidus sont déterminés à la fois par les pratiques de travail du sol et la rotation des cultures. En effet, un précédent susceptible de servir d'hôte à la maladie entraîne un risque plus important de contamination de la culture suivante, particulièrement si les résidus ne sont pas ou mal enfouis comme c'est le cas en SD et TS (Dill-Macky et Jones, 2000; Barrier-Guillot et al., 2007). Néanmoins aucune différence notable de présence de maladies sur les cultures en SD ou TS n'a été relevée les années suivant une culture de maïs. Les différences observées entre le labour et le semis direct peuvent toutefois être expliquées par un autre phénomène. Le labour ayant tendance à remonter les résidus de la culture anté-précédente, dans le cas présent du blé, il est responsable de la présence à la surface de résidus susceptibles de porter les maladies fongiques présentes deux ans auparavant (Colbach et al., 1997). La teneur en mycotoxines DON dans les grains à la récolte, causée par la fusariose de l'épi, est toutefois en contradiction avec les autres observations effectuées. En effet, pour les deux années au cours desquelles des analyses ont été effectuées, la teneur en DON dans le grain est significativement supérieure en semis direct. Cette tendance se

retrouve dans la bibliographie (Barrier-Guillot et al., 2007; Arvalis, 2014), et implique une plus forte présence de fusariose de l'épi en semis direct qui n'a pourtant pas été relevée au cours des observations parcellaires.

La présence d'adventices sur les parcelles est également très dépendante du travail du sol. En sortie d'hiver, la densité de population adventice est quasi-systématiquement significativement supérieure en labour par rapport au semis direct. Cette plus forte présence est explicable par un état du sol labouré plus favorable à la levée des adventices. L'itinéraire technique peut également jouer sur les différences observées. En effet, en 2009 un herbicide supplémentaire est appliqué sur le semis direct au mois de novembre. En 2005 et 2011, cet herbicide supplémentaire est appliqué sur le semis direct mais également sur le travail superficiel. Pour ces trois années, ces pratiques peuvent contribuer à la moindre présence d'adventices sur le semis direct et le travail superficiel.

Peu de sélection de population adventice par les modalités de travail du sol n'est pour le moment observable : bien que les adventices présentes varient d'une année à l'autre, elles sont systématiquement présentes sur l'ensemble des modalités. La rotation maïs-blé-colza-blé peut être un facteur explicatif : Pour Delos et al. (2003), la présence d'une culture de printemps dans la rotation limite la sélection au fil des ans des espèces adventices, du fait d'une interculture longue. Une résistance de plants d'épilobe à quatre angles (*Epilobium tetragonum*) au glyphosate en TS et SD a toutefois été observée au cours des dernières années.

De par son principe même, le semis direct limite les méthodes de lutte disponibles contre les adventices. En effet, les adventices ne peuvent pas être détruites mécaniquement, ou éliminées à l'aide de faux semis.

La lutte chimique paraît, dans ces conditions, indispensable pour maintenir un degré d'enherbement assez faible pour ne pas impacter la culture en place. Les apports d'herbicides peuvent toutefois être raisonnés à partir d'observations des populations présentes sur la parcelle, comme c'est le cas sur l'essai de Kerguéhennec. D'autres pratiques intégrées peuvent également être mises en place, comme en blé le choix de variétés compétitives ou la réduction de l'écartement des rangs pour « étouffer » au maximum les adventices (Chauvel et al., 2009).

La majorité des relevés adventices ont jusqu'à présent été effectués sous couvert de blé. Au cours des prochaines années, des relevés plus systématiques permettraient d'étudier un effet potentiel de la culture en place. De la même façon, sous blé, l'effet précédent (colza ou maïs) pourrait être étudié.

Les relevés effectués en sortie d'hiver ont systématiquement été effectués avant un traitement herbicide, qu'ils ont souvent permis d'adapter. Par conséquent, les résultats obtenus sur ces périodes est représentatif de la levée des adventices, mais ne donne pas d'information sur la population adventice présente après traitement. Un second relevé effectué plusieurs semaines après le traitement serait donc nécessaire afin de mieux estimer la population d'adventices susceptibles d'avoir un réel effet sur la culture en place.

De plus, les mesures étant effectuées par comptage du nombre de plantes par unité de surface, le taux de recouvrement du sol par les adventices n'est pas pris en compte.

Le travail du sol est donc un paramètre décisif de la protection des cultures, et nécessite une adaptation des pratiques de lutte contre les adventices et les maladies fongiques.

Dans le cas des maladies fongiques, si la résistance variétale reste fondamentale, le choix de la rotation est également un levier important. La rotation actuelle maïs-blé-colza-blé présente l'avantage de varier les familles de culture et d'introduire une culture de printemps tout en restant relativement représentative des pratiques de la région. Toutefois le retour de la culture de blé tous les deux ans semble être un facteur d'augmentation de la pression de maladies sur blé

8.2. Développement de la culture

La quantité totale d'azote absorbée par la culture est calculée à partir d'analyses effectuées à la récolte. Cette quantité absorbée est fortement impactée par le type de fertilisation azotée apporté à la culture, et ce de manière différente selon les années. Ces différences interannuelles sont explicables par des conditions météorologiques différentes, mais également par une variation de la composition des effluents organiques d'année en année.

Les différences d'azote total absorbé se retrouvent dans les différences de rendement entre les modalités de fertilisation, mais également dans le taux protéique des grains à la récolte. Toutefois, bien que la quantité d'azote absorbée soit indiscutablement liée au rendement (le chiffre de 3 unités d'azote nécessaires pour produire un quintal de blé est souvent avancé (Bouas et al., 2014)), il est important de noter que la quantité totale d'azote absorbée a été ici calculée à partir des données du rendement même. Un biais peut donc exister, et contribuer à expliquer les liens observés.

Le type de travail du sol influe fortement sur les composantes du rendement, et particulièrement sur les premières. La levée du blé et du colza, notamment, est impactée et résulte en un nombre de plantes plus faible en semis direct qu'en labour. Un moins bon contact entre la graine et le sol, dû à une plus forte présence de résidus de culture à la surface ou dans les premiers centimètres du sol en semis direct et, dans une moindre mesure en travail superficiel, peut expliquer cette perte à la levée plus importante (Kanwar et al., 1988; Chervet et al., 2005). A noter que la pression adventice, plus importante on l'a vu en labour en sortie d'hiver, ne semble pas impacter de façon significative la levée de ces cultures. La culture de maïs présente quant à elle une moindre sensibilité au type de travail du sol en ce qui concerne la levée.

Les cultures de blé et de colza présentent toutefois des capacités de compensation. Dans le cas de cet essai, une densité de culture plus faible est associée à un nombre accru d'épis ou de siliques par pied. Les cultures compensent donc les pertes à la levée en augmentant le tallage (dans le cas du blé) ou la formation de siliques (pour le colza), probablement du fait d'une moindre concurrence entre les individus pour les nutriments et la lumière.

Les autres composantes du rendement ne présentant pas de réelle différence entre les modalités de travail du sol, ces deux premières étapes sont donc cruciales pour le rendement final.

Les différences de rendement sont variables selon les années et les cultures. En blé, si en 2001, 2003, 2009 et 2011 le rendement est supérieur en labour, en 2007 les parcelles en semis direct et en travail superficiel présentent un meilleur rendement. Un meilleur résultat du labour peut être expliqué par une incapacité du blé à compenser entièrement les pertes à la levée pour ces années. Au contraire, en 2007, la plus forte présence de maladies observées en labour peut expliquer le rendement plus faible sur cette modalité. Les rendements en colza sont quant à eux peu impactés par le type de travail du sol, puisque la seule différence significative de rendement est observée en 2014. La compensation par une augmentation du nombre de siliques par pied est donc efficace sur

cet essai. Enfin, les rendements de maïs sont plus variables : homogènes au début de l'essai, ils sont plus faibles en SD au cours des dernières années. Un plus grand nombre de mesures au cours du cycle cultural serait nécessaire expliquer cette différence, qui n'est pas liée au nombre de pieds par m².

Un autre élément pouvant contribuer à expliquer les différences interannuelles observées est le changement des variétés utilisées. En effet, chaque culture de blé est issue d'une variété différente (hormis en 2001 et 2003, avec la variété Ornicar), ce qui est également le cas pour le maïs et le colza. Ces variétés peuvent avoir des comportements différents, aussi bien en ce qui concerne les besoins azotés, les capacités de compensation ou les résistances aux maladies.

IV-Limites et perspectives

L'essai travail du sol de Kerguéhennec a été mis en place en 2000. Or, depuis cette date, l'analyse des données a été effectuée de façon annuelle. Cela entraîne des différences dans l'organisation et le stockage des données recueillies, voire pour les premières années de l'essai une perte de certaines informations. Cela rend difficile la réalisation d'une synthèse pluriannuelle des données, qui implique un temps non négligeable passé à regrouper les informations nécessaires.

Cette difficulté devrait toutefois être en grande partie résolue par la création cette année d'une base de données, dans le cadre du projet SUSTAIN, regroupant l'ensemble des informations recueillies au fil des ans sous une forme homogène et facilement accessible.

Une autre difficulté rencontrée est la variabilité des observations effectuées chaque année sur l'essai. En effet, toutes les mesures ne sont pas effectuées chaque année. Les protocoles expérimentaux, ainsi que les dates de relevés, peuvent également varier au fil des ans, ce qui rend les comparaisons interannuelles difficiles.

Les délais de retour du maïs et du colza dans la rotation limitent les données disponibles sur ces cultures. En effet, après 15 saisons culturales (2000-2014), ces cultures n'ont été présentes que quatre fois chacune, contre sept fois pour le blé. De plus, les analyses pluriannuelles ayant tendance à être effectuées sur blé, culture pour laquelle le plus grand nombre de données est disponible, un nombre moins important d'observations sont effectuées sur les autres cultures. Une modification de la rotation paraissant, on l'a vu, difficilement envisageable, une possibilité serait de mettre en place une grille constante d'observations, indiquant les relevés à effectuer chaque année pour permettre des comparaisons pluriannuelles. Une telle grille a déjà été créée par Courtois (2007) en ce qui concerne la culture de blé. Afin de compléter ce travail, une grille semblable concernant la culture de colza est proposée en Annexe 5.

Conclusion

L'essai « travail du sol » de la Chambre d'agriculture de Bretagne a été mis en place en 2000 à la station expérimentale de Kerguéhennec. L'objectif de cet essai est d'obtenir des références locales sur l'impact des techniques culturales sans labour sur l'état du sol et le développement de la culture. Pour cela, trois modalités de travail du sol sont étudiées : le semis direct, le travail superficiel et le labour, croisées avec quatre modes de fertilisation azotée représentatifs des pratiques de la région : ammonitrate, fumier de volailles, lisier de porc et fumier de bovins.

Plusieurs objectifs ont été réalisés au cours de ce stage.

Le premier, réalisé dans le cadre du projet européen SUSTAIN, est la participation à la création d'une base de données regroupant les informations recueillies dans le cadre de cet essai et d'autres essais en France et aux Pays-Bas. Un travail de rassemblement et d'homogénéisation des données recueillies depuis le début de l'essai a donc été réalisé, afin de les intégrer dans cette base de données.

L'analyse des données obtenues au cours du cycle cultural 2013-2014, sous culture de colza, a également été réalisée.

Enfin, une analyse pluriannuelle des données depuis 2000 a été effectuée. Les principaux résultats qui ressortent de cette synthèse sont les suivants.

Le travail du sol impacte fortement la levée du blé et du colza: le nombre de plantes levées en sortie d'hiver est presque systématiquement supérieur en labour qu'en semis direct. Cette différence est toutefois régulièrement compensée par un plus fort nombre d'épis ou de siliques par pieds en semis direct. Par conséquent, les rendements obtenus en blé et en colza sont assez proches entre les modalités de travail du sol.

Pour le blé, les modalités labourées ont régulièrement un rendement supérieur à celles en semis direct, mais la tendance peut également être inversée, comme c'est le cas en 2007 avec un rendement en SD significativement supérieur au labour. Les modalités en travail superficiel occupent quant à elles une position intermédiaire, et se comportent tantôt comme le labour, tantôt comme le semis direct. Un effet du type de fertilisation azotée sur le rendement du blé et ses composantes est également régulièrement observé. Toutefois ces différences sont très variables selon les années, et aucune tendance constante ne s'en dégage.

Les rendements obtenus en colza sont quant à eux peu impactés par le choix du travail du sol.

La fertilisation joue également un rôle primordial dans la qualité de la culture à la récolte : le taux protéique des grains de blé est en effet directement lié à la quantité totale d'azote absorbée par la plante. Cette qualité du grain ne semble par contre pas avoir de lien avec le type de travail du sol. Le taux de mycotoxines DON présentes dans le grain est par contre fortement influencée par le travail du sol, avec une concentration significativement supérieure en semis direct qu'en labour.

L'aspect protection des cultures a également été étudié. La présence de ravageurs sur les cultures a rarement été quantifiée, ce qui rend une comparaison entre les modalités des attaques de ravageurs impossible. La présence de maladies fongiques a par contre été assez largement relevée sur blé, ce

qui permet d'observer une plus forte présence de maladies du pied, tout particulièrement le piétin-verse, sur les modalités labourées. L'explication la plus plausible pour cette différence est une remontée à la surface sous l'effet du labour ou du travail superficiel de résidus de culture du blé précédent, susceptibles de servir d'hôtes aux maladies fongiques. Toutefois, le travail du sol semble avoir beaucoup moins d'impact sur les maladies foliaires.

La présence de plantes adventices est elle aussi impactée par le travail du sol, principalement en sortie d'hiver. En effet, la densité de population adventice est, pour la plupart des années, supérieure en labour du fait d'un sol plus rapidement réchauffé dans ces modalités. Ces différences s'estompent toutefois plus tard dans la culture. La faible présence d'adventices vivaces dans l'ensemble des modalités ne permet pas d'étudier l'impact du travail du sol sur leur présence.

La saison culturale 2013-2014 de l'essai se caractérise par un échec de levée du colza en semis direct. Par conséquent, cette modalité n'a pas pu être incluse dans l'analyse de cette année. Autre élément marquant, les parcelles ayant reçu du fumier de volailles présentent une importante carence en azote, qui se traduit par un rendement final fortement diminué.

Table des abréviations

DON : Déoxynivalénol

FB : Fumier de Bovins

FV : Fumier de Volailles

INN: Indice de Nutrition azotée

L: Labour

LP : Lisier de porcs

M: modalité Minérale

M-FB: modalité Minérale et Fumier de Bovins

MS : Matière Sèche

PMG : Poids de Mille Grains

ppb : part per billion (partie par milliard)

RPR : Reliquat Post Récolte

RSH : Reliquat Sortie Hiver

SD: Semis Direct

TCS : Techniques Culturelles Simplifiées

TCSL: Techniques Culturelles sans Labour

TS : Travail Superficiel

Bibliographie

- AGRESTE** (2014) *Enquête pratiques culturales 2011*. Agreste les dossiers
- AGRESTE** (2008) *Dans le sillon du non-labour*. Agreste Primeur
- Aibar J** (2006) *La lutte contre les mauvaises herbes pour les céréales en semis direct: Principaux problèmes*. Options Méditerranéennes pp.19–26
- Arvalis** (2014) *Gestion du risque maladies: activer tous les leviers agronomiques*. Arvalis-infos.fr, www.arvalis-info.fr/view-3819-arvarticle.html
- Arvalis** (2009) *Limaces: combiner les moyens de lutte*.
- Aulakh MS, Doran JW, Mosier A** (1992) *Soil denitrification: significance, measurement and effect of management*. Soil science pp.185–193
- Barrier-Guillot B, Pons B, Delambre M, Gouet H** (2007) *Effet des pratiques culturales sur le niveau de production de DON sur le blé: synthèse de trois années d'enquêtes*.
- Bonnemaison L** (1962) *Les ennemis animaux des plantes cultivées et des forêts*. Société d'édition et de publicité agricoles, industrielles et commerciales
- Bouas A, Helias R, Vallade S, Verdier J-L** (2014) *Estimer les reliquats azotés*.
- Bougel F, Philibert MC, Reau R, Sauzet G** (2010) *Diacol - Guide à la parcelle*.
- Caneill J** (1994) *Simplification du travail du sol et rendements des cultures*. INRA, pp.63–83
- Carlotti B** (1992) *Recueil des bases de préconisation de la fertilisation azotée des cultures*. CORPEN
- Caron D** (2000) *Maladies des blés et des orges*.
- CETIOM** (2013) *Implantation du colza, des difficultés surmontables*. www.cetiom.fr, www.cetiom.fr/espaces-regionaux/messages-techniques/regions-nord-et-est/mypic-implantation-du-colza-des-difficultes-surmontables
- CETIOM** (2005) *Guide de l'expérimentateur colza*, CETIOM.
- Chauvel B, Tschudy C, Munier-Jolain N** (2009) *Travail du sol et mauvaises herbes: quels enjeux pour les Techniques Culturales Sans labour dans le cadre d'une gestion intégrée?* Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France pp.1–12
- Chervet A, Ramseier L, Sturny WG, Tschannen S** (2005) *Comparaison du semis direct et du labour pendant 10 ans*. Revue Suisse d'Agriculture pp.249–256
- Colbach N, Lucas P, Cavelier N, Cavelier A** (1997) *Influence of cropping system on sharp eyespot in winter wheat*. Crop Protection **16**: pp.415–422

- Colnenne C, Meynard J-M, Reau R, Justes E, Merrier A** (1998) *Determination of Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Oilseed Rape*. *Annals of Botany* **81**: pp.311–317
- Coronel A** (2001) *TCS: une révolution lente mais certaine*. Haute-Saône Agricole 6
- Courtois N** (2007) *Comportement des cultures conduites en Techniques Sans labour en condition d'apport d'effluents de ferme, bilan de suivi culture 2000/2007*. 82
- Cure B** (1991) *Simplification du travail du sol et évolution du parasitisme*. Perspectives Agricoles
- Debaeke P, Orlando D** (1991) *Simplification du travail du sol et évolution de la flore adventice: conséquences pour le désherbage à l'échelle de la rotation*. 65
- Delabays N** (2008) *La culture sans labour: aspects malherbologiques*.
- Delos M, Folcher L, Eychenne N, Maumene C, Naïbo B** (2003) *Méthodes alternatives de lutte contre les maladies en grandes cultures par suppression de l'inoculum*.
- Dill-Macky R, Jones RK** (2000) *The effect of previous Crop Residues and Tillage on fusarium Head Blight of Wheat*. *Plant Disease* **84**: pp.71–76
- Fourbet JF, Huet P, Jan P** (1979) *Problèmes posés par la simplification des systèmes de culture dans la lutte contre les mauvaises herbes*. pp.123–133
- Fremy J-M** (2010) *Mycotoxines dans les céréales, évaluation des risques*.
- Gilliam JW, Hoyt GD** (1987) *Effect of conservation tillage on fate and transport of nitrogen*. In TJ Logan, ed, *Effects of conservation tillage on groundwater quality, Nitrates and pesticides*, Lewis Publ. pp.217–240
- Giteau J-L, Guillermou A, Quéré L, Turlin J-P, Raimbault J** (2011) *Conduite du colza en Bretagne*.
- Gourdain E** (2008) *Dossier Mycotoxines: La prévention au champ avant tout*. Perspectives Agricoles pp.32–34
- Guerif J** (1994) *Influence de la simplification du travail sur l'état structural des horizons de surface: conséquences sur leurs propriétés physiques et leurs comportements mécaniques*. INRA, pp.125–154
- Hammel JE** (1989) *Long-term tillage and crop rotation effects on bulk density and soil impedance in Northern Idaho*. *Soil Science Society of America Journal* pp.1515–1519
- Hansel EM, Djurhuus J** (1997) *Nitrate leaching as influenced by soil tillage and catch crop*. *Soil & Tillage Research* pp.203–219
- Heddadj D, Demeure P, Lebosse D, Le Roux L, Munin V, Perche S, Turlin JP, Labreuche J, Masson E, Thierry J** (2008) *Techniques culturales sans labour en Bretagne*.
- Jabro JD, Sainju UM, Stevens WB, A.W. L, R.G. E** (2009) *Long-term tillage on soil physical properties under dryland conditions in northeastern Montana*. **55**: pp.633–640

- Janusauskaite D, Ciuberkis S** (2010) *Effect of different soil tillage and organic fertilizers on winter triticale and spring barley stem base diseases*. *Crop protection* **29**: pp.802–807
- Jouy L, Munier-Jolain N** (2001) *Gestion de l'interculture, désherbage et protection des cultures*.
- Jullien J, Bodilis A-M** (1999) *Techniques culturales simplifiées en grandes cultures*. Phytoma
- Kanwar RS, Baker JL, Baker DG** (1988) *Tillage and Split N-Fertilization Effects on Subsurface Drainage Water Quality and Crop Yields*. *American Society of Agricultural Engineers* 31(2)
- Labreuche J, Düin C, Lajoux P, Laurent F** (2001) *Techniques simplifiées de travail du sol - Maîtrise du peuplement*.
- Labreuche J, Le Souder C, Castillon P, Ouvry J-F, Real B, Germon J-C, De Tourdonnet S** (2007) *Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturales Sans Labour en France*.
- Leake AR** (2003) *Integrated pest management for conservation agriculture. Conservation Agriculture: Environment, farmer experiences, Innovations, Socio-Economy, Policy*. Kluwer Academia Publishers, pp.271–279
- Lemaire G, Nicolardot B** (1997) *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*, INRA.
- Linn DM, Doran JW** (1984) *Aerobic and Anaerobic Microbial Populations in No-till and Plowed Soils*. *Soil Science Society of America Journal* pp.794–799
- Mamarot J** (2004) *La gestion des mauvaises herbes en non labour*.
- Martin G** (1987) *Qualité des blés tendres et fumure azotée*. *Perspectives Agricoles* pp.114–116
- Morot-Gaudry JF** (1997) *Assimilation de l'azote chez les plantes, aspects physiologique, biochimique et moléculaire*. INRA Editions
- Phillips RE, Blevins RL, Thomas GW, Frye WW, Phillips SH** (1980) *No-Tillage Agriculture*. *Science, New Series* **208**: pp.1108–1113
- Reinhard H, Chervet A, Sturny WG, Tschannen S** (2001) *Semis direct en grandes cultures: I- Rendement des cultures*. *Revue Suisse d'Agriculture* pp.7–13
- Rieger SB** (2001) *Impacts of tillage systems and crop rotation on crop development, yield, and nitrogen efficiency*. *Swiss federal Institute of Technology Zürich*
- Rivière J-M, Tico S, Dupont C** (1992) *Méthode Tarière Massif Armoricaïn, caractérisation des sols*. *Chambre d'Agriculture de Bretagne, INRA*
- Schwartz C, Muller J-C, Decroux J** (2005) *Guide de la fertilisation raisonnée: grandes cultures et prairies*, France Agricole.
- Sip V, Vavera R, Chrpova J, Kusa H, Ruzek P** (2013) *Winter wheat yield and quality related to tillage practice, input level and environmental conditions*. *Soil & Tillage Research* **132**: pp.77–85

- Stoddard CS, Grove JH, Coyne MS, Thom WO** (2005) *Fertilizer, tillage, and dairy manure contributions to nitrate and herbicide leaching*. Journal of Environmental Quality **34**: pp.1354–1362
- Sturny WG, Chervet A, Maurer-Troxler C, Ramseier L, Müller M, Schafflützel R, Richner W, Streit B, Weisskopf P, Zihlmann U** (2007) *Comparaison du semis direct et du labour: une synthèse*. Revue Suisse d'Agriculture pp.249–254
- Vale M, Mary B, Justes E** (2007) *Minéralisation de l'azote organique: Effets de la température et de l'humidité du sol*. Perspectives Agricoles
- Verdier J-L** (1990) *Travail du sol, mauvaises herbes et désherbage*. Phytoma pp.13–22
- Viaux P** (2013) *Systèmes intégrés: une troisième voie en grande culture*, France Agricole.
- Vullioud P** (2008) *La culture sans labour dans la rotation*.
- Vullioud P, Delabays N, Frei P, Mercier E** (2006) *Résultats de 35 ans de culture sans labour à Changins: III- mauvaises herbes, maladies fongiques et ravageurs*. Revue Suisse d'Agriculture pp.81–87
- Vullioud P, Vez A** (2008) *Bilan des recherches sur la culture sans labour*.
- Wolfgang GS, Adres M** (1990) *Semis sous litière du maïs*. Rapports FAT

Annexes

Annexe 1: Itinéraires techniques

2000: Maïs		
Date	Parcelles	Interventions
20/02/2000	Toutes	Chisel 10-12 cm (remise en état du sol)
14/03/2000	LP	Epannage LP, 40m ³ , passage de chisel
16/03/2000	FB	Epannage FB, 40 T/ha, passage de chisel
	FV	Epannage FV, 6 T/ha
	FB, FV, M	Chisel (incorporation des effluents)
12/04/2000	Toutes	Apport de zinc, 3,15 kg/ha
02/05/2000	Toutes	Chisel (nivellement)
03/05/2000	L	Labour
04/05/2000	L	Passage de herse rotative, semis
	TS, SD	Semis du maïs
22/05/2000	FB	Ammonitrate, 66 kgN/ha
23/05/2000	M	Ammonitrate, 117 kgN/ha
05/06/2000	Toutes	Désherbage chimique
25/10/2000	Toutes	Récolte
26/10/2000	Toutes	Broyage des cannes de maïs

2000-2001: Blé		
Date	Parcelles	Interventions
27/10/2000	Toutes	Cover-crop, 5 cm de profondeur
	L	Labour
	Toutes	Semis, variété Ornicar (230 gr/m ²)
	L	Semis en combiné (herse rotative + rouleau Packer)
	SD	Semis en ligne, en combiné
17/11/2000	TS	Semis à la volée, en combiné
	Toutes	Antilimaces
23/02/2001	Toutes	Désherbage chimique
05/03/2001	Toutes	Ammonitrate, 40 kgN/ha
02/04/2001	LP	Epannage LP, 25 m ³ /ha
	FV	Epannage FV, 12 T/ha
05/04/2001	M et M-FB	Ammonitrate, 88,4 kg N/ha pour M-FB, 101,8 kg N/ha pour M
04/05/2001	FV	Ammonitrate, 50 kgN/ha
17/05/2001	Toutes	Ammonitrate, 40 kgN/ha
14/05/2001	Toutes	Fongicide
04/08/2001	Toutes	Récolte, pailles broyées

2001-2002: Colza –sous-essai A		
Date	Parcelles	Interventions
04/09/2001	FV L	Epannage FV, 4,5 t/ha Labour
06/09/2001	Toutes	Semis, variété 1-6239, 44 gr/m ² Antilimaces
29/09/2001	Toutes	Désherbage chimique
03/10/2001	Toutes	Insecticide et antilimace
21/02/2002	FV M	Ammonitrate, 40 kgN/ha Ammonitrate, 70 kgN/ha
27/03/2002	M	Ammonitrate, 70 kgN/ha
17/07/2002	Toutes	Récolte
2001-2002: Maïs –sous-essai B		
Date	Parcelles	Interventions
<i>Information manquante</i>	FB	Epannage FB, 40 t/ha Canadien (10cm profondeur)
<i>Information manquante</i>	LP	Epannage LP, 20 m ³ /ha
<i>Information manquante</i>	L	Canadien (10 cm)
<i>Information manquante</i>	Toutes	Semis du maïs
<i>Information manquante</i>	Toutes	Antilimaces
13/06/2002	Toutes	Désherbage chimique
<i>Information manquante</i>	Toutes	Récolte

2002-2003: Blé		
Date	Parcelles	Interventions
05/11/2002	Toutes	Semis, variété Ornicar (230 gr/m ²)
	L	Labour conventionnel et semis en combiné (herse rotative + rouleau packer)
	TS	Semis à la volée et en combiné
	SD	SD 3000 : Travail de la ligne de semis sur 2 cm de large et semis du blé en combiné.
18/03/2003	Toutes	Ammonitrate, 40 kgN/ha
24/03/2003	LP	Epannage LP, 20,6 T/ha
25/03/2003	Toutes	Désherbage chimique
01/04/2003	FV	Epannage FV, 6,5 T/ha
24/04/2003	M et FB	Ammonitrate, 92 kgN/ha
09/05/2003	M et FB	Ammonitrate, 30 kgN/ha
09/05/2003	LP et FV	Ammonitrate, 40 kgN/ha
22/05/2003	Toutes	Fongicide
04/08/2003	Toutes	Récolte

2004: Maïs		
Date	Parcelles	Interventions
10/09/2004	Toutes	Semis de couvert de phacélie
17/03/2004	Toutes	Désherbage chimique
29/03/2004	LP	Epandage LP, 30 m ³ /ha
31/03/2004	FB	Epandage FB, 45 t/ha
	FV	Epandage FV, 9 t/ha
	FB, FV	Canadien
27/04/2004	Toutes	Semis
26/05/2004	FB, M	Ammonitrate, 90 kgN/ha (FB) et 145 kgN/ha (M)
28/05/2004	Toutes	Désherbage: herbicide
04/11/2004	Toutes	Récolte
	Toutes sauf SD	Broyage des cannes de maïs

2004-2005: Blé		
Date	Parcelles	Interventions
04/11/2004	SD	Semis, variété Cap Horn (240 gr/m ²)
05/11/2004	L	Labour et semis combiné herse rotative + semoir (240 gr/m ²)
	TS	Semis avec DP 12 (env 250 gr/m ²) et enfouissement avec rotalabour
05/11/2004	TS et SD	Désherbage chimique
17/02/2005	Toutes	Désherbage chimique
14/03/2005	FV	Epandage FV, 10,5 T/ha
23/03/2005	LP	Epandage LP, 25m ³ /ha
30/03/2005	M et FB	Ammonitrate, 102 kgN/ha
15/04/2005	Toutes	Désherbage chimique
24/05/2005	Toutes	Ammonitrate, 120 kgN/ha
25/05/2005	Toutes	Fongicide
24/06/2005	Toutes	Insecticide
04/08/2005	Toutes	Récolte, pailles broyées

2005-2006: Colza		
Date	Parcelles	Interventions
06/09/2005	FV	Epandage FV, 6,5 t/ha
12/09/2005	L	Labour
14/09/2005	Toutes	Semis, variété Standing, 40 gr/m ²
20/09/2005	Toutes	Antilimace
20/09/2005	Toutes	Désherbage chimique
11/10/2005	Toutes	Insecticide
24/10/2005	Toutes	Antilimace
26/10/2005	Toutes	Désherbage chimique
27/02/2006	LP	Epandage LP, 25m ³ /ha
06/03/2006	M et FB	Ammonitrate : 100 kgN/ha
18/04/2006	M et FB	Ammonitrate : 50 kgN/ha
	FV	Ammonitrate : 30 kgN/ha
	LP	Ammonitrate : 60 kgN/ha
	Toutes	Insecticide
27/04/2006	Toutes	Insecticide
04/05/2006	Toutes	Fongicide

2006-2007: Blé		
Date	Parcelles	Interventions
11/08/2006	Toutes	Désherbage chimique
26/09/2006	Toutes	Déchaumage superficiel
24/10/2006	Toutes	Désherbage chimique
03/11/2006	L et TS	Labour et chisel
06/11/2006	L	Rotalabour
07/11/2006	Toutes	Semis, variété Apache (250gr/m ²)
22/11/2006	Toutes	Antilimace
30/11/2006	Toutes	Désherbage: herbicide
11/10/2005	Toutes	Insecticide
02/02/2007	LP	Epandage LP, 20m ³ /ha
19/02/2007	FV	Epandage FV, 17 T/ha
01/03/2007	M, FB	Ammonitrate, 90 kgN/ha
12/03/2007	Toutes	Régulateur
13/03/2007	M, LP, FB	Ammonitrate, 60 kgN/ha
	FV	Ammonitrate, 50 kgN/ha
17/04/2007	Toutes	Fongicide
03/05/2007	Toutes	Désherbage chimique
22/05/2007	Toutes	Fongicide
25/07/2007	Toutes	Récolte, pailles broyées

2008 : Maïs		
Date	Parcelles	Interventions
28/08/2007	Toutes	Déchaumage chimique
07/09/2007	SD, TS	Déchaumage
12/09/2007	Toutes	Semis phacélie 12 Kg/ha
12/02/2008	Toutes	Destruction chimique Phacélie
18/03/2008	FB	Epannage FB, 45t/ha
25/03/2008	L, TS	Canadien
14/04/2008	FV	Epannage FV, 14 t/ha
	LP	Epannage LP, 17 m3/ha
14/04/2008	L	Labour
TS	TS	Canadien (10-12 cm)
23/04/2008	FB	Ammonitrate, 100 kgN/ha
	LP	Ammonitrate, 40 kgN/ha
	M	Ammonitrate, 130 kgN/ha
25/04/2008	L, TS	Herse rotative
26/04/2008	Toutes	Semis, variété AJAXX (95200 grains/ha)
28/04/2008	Toutes	Désherbage chimique
04/06/2008	Toutes	Désherbage chimique
29/10/2008	Toutes	Récolte, broyage des cannes

2008-2009: Blé		
Date	Parcelles	Interventions
05/11/2008	TS, L	Préparation du sol selon les modalités (labour ou chisel)
	Toutes	Semis, variété Toison dor (250 gr/m ²)
05/11/2008	TS;,L	Semis combiné (herse rotative + Rouleau Packer + semoir Aérosem 300 poettinger)
	SD	Semis avec Khun SD 3000 (SD)
06/11/2008	SD	Désherbage chimique
02/12/2008	SD	Antilimaces
17/02/2009	Toutes	Désherbage chimique
24/02/2009	FV	Epannage FV, 10 T/ha
26/02/2009	M; FB	Ammonitrate, 30 kgN/ha
02/03/2009	LP	Epannage LP, 20 m3/ha
26/03/2009	Toutes	Régulateur
16/04/2009	Toutes	Fongicide
01/04/2009	M, FB	Ammonitrate, 100 kgN/ha
	FV, LP	Epannage 60 UN/ha d'ammonitrate
05/05/2009	M, FB, LP	Ammonitrate, 30 kgN/ha
	FV	Ammonitrate, 60 kgN/ha
15/05/2009	Toutes	Fongicide
28/07/2009	Toutes	Récolte, pailles broyées

2009-2010: Colza		
Date	Parcelles	Interventions
06/08/2009	Toutes	Epandage de 2.5 T/ha de dolomie
02/09/2009	FV	Epandage FV, 7,5 t/ha
02/09/2009	LP	Epandage LP, 20m3/ha
	L	Labour
	TS	Canadien
	SD	Semis
04/09/2009	SD	Semis
05/09/2009	Toutes	Désherbage chimique
09/10/2009	Toutes	Antilimaces
19/10/2009	Toutes	Désherbage: herbicide
04/03/2010	MFB et M	Ammonitrate, 60 kgN/ha
	Toutes	Insecticide
01/04/2010	MFB et LP	Ammonitrate, 60 kgN/ha
	FV	Ammonitrate, 30 kgN/ha
	M	Ammonitrate, 70 kgN/ha
23/04/2010	Toutes	Fongicide
18/07/2010	Toutes	Récolte







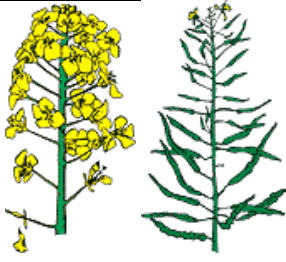
2010-2011: Blé		
Date	Parcelles	Interventions
26/07/2010	Toutes	Désherbage chimique
05/08/2010	L et TS	Déchaumage, cultivateur à dents + rouleau lisse
01/11/2010	SD et TS	Désherbage chimique
02/11/2010	L	Passage charrue
	TS	Passage canadien
	Toutes	Semis, variété Premio (250gr/m ²)
25/02/2011	Toutes	Désherbage chimique
03/03/2011	M /M FB	Ammonitrate: 30 kgN/ha
	LP	Apport LP, 25m3/ha'
07/03/2011	FV	Apport FV, 9T/ha
16/03/2011	Toutes	Régulateur
23/03/2011	FV et LP	Ammonitrate, 30 kgN/ha
	M MFB	Ammonitrate, 90 kgN/ha
08/04/2011	Toutes	Fongicide
06/05/2011	Toutes	Ammonitrate, 30 kgN/ha
24/05/2011	Toutes	Insecticide (contre puçeron)
26/07/2011	Toutes	Récolte, pailles broyées

2012: Maïs		
Date	Parcelles	Interventions
05/09/2011	Toutes	Désherbage chimique
14/09/2011	Toutes	Semis Phacélie, 12kg/ha
07/02/2012	Toutes	Destruction chimique couvert Phacélie
22/03/2012	FB	Epandage FB, 37 t/ha
07/04/2012	SD	Désherbage chimique
11/04/2012	L ,TS	Déchaumage
20/04/2012	FV	Epandage FV, 9 t/ha
02/05/2012	LP	Epandage LP, 20m ³ /ha
02/05/2012	FB	Ammonitrate, 45 kgN/ha
	M	Ammonitrate, 135 kgN/ha
03/05/2012	Toutes	Préparation du sol : charrue sur L, canadien sur TS, rotasemis solo sur SD
03/05/2012	L et TS	Herse rotative
03/05/2012	Toutes	Semis, variété KONFIANS (95000 grains/ha)
22/05/2012	Toutes	Antilimaces
29/05/2012	Toutes	Désherbage chimique
29/10/2012	Toutes	Récolte

2012-2013: Blé		
Date	Parcelles	Interventions
30/10/2012	Toutes	Semis blé, variété Rubisko (250 gr/m ²)
21/02/2013	Toutes	Ammonitrate, 33 kgN/ha
04/03/2013	Toutes	Désherbage chimique
28/03/2013	LP	Epandage de 20m ³ /ha de LP
	FV	Epandage de 9t/ha de FV
02/04/2013	Toutes	Désherbage chimique
04/04/2013	FB, M	Ammonitrate, 100 kgN/ha
22/01/2013	Toutes	Régulateur de croissance
26/04/2013	FV	Ammonitrate, 30 kgN/ha
17/05/2013	FB, LP, M	Ammonitrate, 40kgN/ha pour FB, 50kgN/ha pour LP et M
02/08/2013	Toutes	Récolte, pailles broyées

2013-2014: Colza		
Date	Parcelles	Interventions
09-10/09/2013	LP FV	Epandage LP, 20m3/ha Epandage FV, 9T/ha
10/09/2013	L TS	Labour Canadien (10-12 cm)
13/09/2013	Toutes	Semis, variété Kadore (40gr/m ²)
16/09/2013	Toutes	Désherbage chimique
07/10/2013	Toutes	Insecticide (contre altises)
09/10/2013	Toutes	Antilimaces
14/10/2013	Toutes	Désherbage chimique
11/03/2014	Toutes	Ammonitrate, 90 kgN/ha
19/03/2014	Toutes	Désherbage chimique
24/03/2014	SD	Semis de colza de printemps (5kg/ha) Antilimaces
31/03/2014	M, M-FB	Ammonitrate, 90 kgN/ha
09/04/2014	SD	Antilimaces
17/04/2014	Toutes	Fongicide + Insecticide
23/06/2014	SD	Broyage du colza de printemps
17/07/2014	Toutes sauf SD	Récolte, cannes broyées

Annexe 2: Stades repère du colza (source : CETIOM)

 <p>Stade A</p>	<p>A- Stade cotylédonaire Levée : les jeunes plantes marquent la ligne. Stade A (10) : stade cotylédonaire. Pas de feuilles "vraies". Seuls les deux cotylédons sont visibles (voir ci-contre).</p>
 <p>Stades B1 et B4</p>	<p>B- Formation de la rosette Stade B : apparition des feuilles. Pas d'entre-nœuds entre les pétioles. Absence de vraie tige. Stade B1 (11) : 1 feuille vraie étalée ou déployée (voir ci-contre). Stade B2 (12) : 2 feuilles vraies étalées ou déployées. Stade B3 (13) : 3 feuilles vraies étalées ou déployées. Stade B4 (14) : 4 feuilles vraies étalées ou déployées (voir ci-contre). Stade Bn (1n) : n feuilles vraies étalées ou déployées.</p>
 <p>Stade C2</p>	<p>C- Montaison Stade C1 (31) : reprise de végétation. Apparition de jeunes feuilles. Stade C2 (32) : entre-nœuds visibles. On voit un étranglement vert clair à la base des nouveaux pétioles. C'est la tige (voir ci-contre).</p>
 <p>Stades D1 et D2</p>	<p>D- Boutons accolés Stade D1 (51) : boutons accolés encore cachés par les feuilles terminales (voir ci-contre). Stade D2 (53) : inflorescence principale dégagée. Boutons accolés. Inflorescences secondaires visibles. Au cours de ce stade, la tige atteint et dépasse la hauteur de 20 cm mesurée entre la base de la rosette et les bouquets floraux (voir ci-contre).</p>
 <p>Stade E</p>	<p>E- Boutons séparés Stade E (59) : les pédoncules floraux s'allongent en commençant par ceux de la périphérie (voir ci-contre).</p>
 <p>Stade F1</p>	<p>F- Floraison Stade F1 (60) : premières fleurs ouvertes (voir ci-contre). Stade F2 (61) : allongement de la hampe florale. Nombreuses fleurs ouvertes.</p>
 <p>Stade G1 et G4</p>	<p>G- Formation des siliques Stade G1 (70) : chute des premiers pétales. Les 10 premières siliques ont une longueur inférieure à 2 cm. La floraison des inflorescences secondaires commence à ce stade (voir ci-contre). Stade G2 : les 10 premières siliques ont une longueur comprise entre 2 et 4 cm. Stade G3 : les 10 premières siliques ont une longueur supérieure à 4 cm. Stade G4 (73) : les 10 premières siliques sont bosselées (voir ci-contre). Stade G5 (81) : grains colorés</p>

Annexe 3 : Récapitulatif des mesures effectuées

- Blé

	Maladies fongiques	Adventices	Reliquats azotés
2001	04/04/01, 01/06/01 : 5 pieds /parcelle.	01/02/01 : 3 placettes de 0.25m ² par parcelle (même méthode pour toutes les années)	27/02/01 : RSH 27/08/01 : RPR
2003	27/05/03 : 15 F4 24/06/03 : 20 F1/F2/F3 26/06/03 : 50 tiges+épis	10/03/03	Février 03 : RSH
2005	/	/	28/02/05 : RSH 01/08/05 : RPR
2007	16/04/07 : 10 pieds/parcelle 19/06/07 : 20 pieds/parcelle	Février	07/02/07 : RSH Juillet 07 : RPR
2009	20/04/09 : 30 tiges/parcelle 23/06/09 : 20 pieds/parcelle	06/01/09 et 12/02/09, 14/05/09, 14/10/09	Février 09 : RSH Août 09 : RPR
2011	04/05/11, 07/06/11 : 20 pieds/parcelle	01/02/11, 01/08/11	10/02/11 : RSH Septembre 11 : RPR
2013	24/05/13, 01/07/13 : 20 pieds/parcelle	12/02/13, 20/08/13	19/02/13 : RSH 22/08/13 : RPR

	Mesure DON	Comptages levée	Prélèvement bottillons	Enracinement (grille)
2001	1 parcelle (L)	3 quadrats de 0.33m ² /parcelle	Non	Oui
2003	2 parcelles (L)	3 quadrats de 0.33m ² /parcelle	Oui	Oui
2005	2 parcelles (L et TS)	3 mesures/parcelle : -sur un mètre linéaire (2 rangs) pour les parcelles L et SD -sur un quadrat de 0.25m ² pour le TS, (semis à la volée)	Non : relevés des composantes du rendement sur 4 quadrats de 0.25m ²	Oui
2007	Toutes parcelles	3 mesures/parcelle, quadrats de 0.25m ²	Oui	Non
2009	Toutes parcelles	6 quadrats de 0.125m ² en L et TS, de 0.15m ² en SD	Oui	Non
2011	2 parcelles	3 mesures/parcelle : -sur un mètre linéaire (2 rangs) pour les parcelles L et SD -sur un quadrat de 0.25m ² pour le TS, (semis à la volée)	Oui	Non
2013	/	1 mesure/parcelle : -sur un mètre linéaire (2 rangs)	Oui	Non

- **Colza**

	Maladies fongiques	Adventices	Enracinement	Composantes du Rendement	Qualité
2002	Non	12/06/02: 3 placettes de 0.25m ² par parcelle (même méthode pour toutes les années)	Grille	20/10/02 : Levée	Non
2006	Non	Non	Grille	13/02/06 : Nombre de pieds/m ²	Non
2010	Non	Non	Prélèvements de pivots	14/10/09 : Levée 24/06/10 : Nombre de siliques/plante 18/07/10 : PMG	Non
2014	25/05/14, 02/06/14	14/03/14	Prélèvements de pivots	06/03/14 : Nombre de pieds/m ² 25/05, 02/06/14 : Nombre de siliques/m ² Récolte : PMG, nombre de grains/silique	Récolte : Taux protéique, Teneur en huile, Taux d'impuretés

- **Maïs**

	Adventices	Enracinement	Composantes du Rendement
2000	Non	Grille	13/07/00 : Nombre de pieds/m ²
2002 (sous-essai B)	Non	Grille	Nombre de pieds/m ²
2004	Non	Grille	29/06/04 : Nombre de pieds/m ²
2008	05/06/08 : 3 placettes de 0.25m ² par parcelle (même méthode pour toutes les années)	Non	20/05/08 : Nombre de pieds/m ²
2012	24/05/12	Non	Non

Annexe 4 : Proposition de suivi pour la culture de colza

Les mesures suggérées le sont pour certains stades du colza. Ces stades sont ceux définis par le CETIOM, et sont détaillés en Annexe 2.

- **Observations des maladies**

Les dates d'observation des maladies du colza varient selon la maladie considérée. Toutefois, afin de limiter le nombre de périodes d'observations, les relevés sont regroupés sur deux périodes.

Au stade B (formation de la rosette) : Le relevé des maladies à ce stade nécessite principalement une observation au champ. Le CETIOM conseille d'observer 100 plantes par parcelle pour le mildiou et le phoma (CETIOM, 2005). Toutefois, l'essai comprenant 30 parcelles, cela représente un nombre de plante et donc un temps nécessaire considérables. Effectuer ces observations sur 30 plantes par parcelle permettrait de réduire le temps d'observation, tout en conservant un nombre de 3x30 plantes par modalité, chaque modalité étant répétée sur trois blocs. Le **mildiou** est exprimé en pourcentage de plantes atteintes et en pourcentage de cotylédons atteints, et le **phoma** en pourcentage de plantes atteintes. La **pseudocercosporiose** est quant à elle relevée sur 50 feuilles par parcelle, et exprimée en pourcentage de feuilles atteintes.

Stade fin de floraison/G4 : Il s'agit du stade au cours duquel le plus grand nombre de maladies fongiques sont observables. Cette fois encore, le CETIOM conseille de prélever jusqu'à 100 plantes par parcelle pour l'observation de certaines maladies (CETIOM, 2005). Toutefois, du fait du grand nombre de parcelles élémentaires et de la nécessité de maintenir une population de colza représentative pour la récolte, on conseillera plutôt de prélever 15 plantes par parcelle, ce qui représente 45 plantes par modalité. Le **sclérotinia** est exprimé en pourcentage de pieds atteints, et éventuellement en pourcentage de pieds échaudés. Pour le **phoma**, une note de gravité est utilisée, avec 1 la note attribuée aux pivots sains et 6 pour un pivot entièrement nécrosé. Une note de gravité est également utilisée pour l'oïdium à cette période, sur une échelle de 0 (plante saine) à 9 (coloration gris-noire généralisée). Enfin, la **cylindrosporiose**, la **pseudocercosporiose** et l'**alternariose** sont observées sur 100 siliques prélevées au hasard par parcelle, et exprimées en pourcentage de siliques atteintes (CETIOM, 2005).

Il serait intéressant de conserver si possible la même variété de colza d'une saison culturale à l'autre, afin de minimiser au maximum les différences pluriannuelles.

- **Observations des ravageurs**

La présence de ravageurs est probablement l'un des paramètres les moins étudiés depuis le début de l'essai. Un relevé plus systématique permettrait de mettre en évidence d'éventuels impacts du travail du sol sur les dégâts de ravageurs.

L'observation des **limaces** peut s'effectuer en même temps que le comptage de plantes levées, entre le stade levée et le stade B3-B4. Leur présence est exprimée en pourcentage de plantes attaquées, sur une centaine de plantes par parcelle élémentaire.

La présence d'**altises d'hiver** (ou grosse altise) et de **charançons de la tige** peut être estimée en entrée d'hiver. L'observation s'effectue sur 30 plantes prélevées par parcelle à la recherche de larves de ces deux ravageurs, et le résultat est exprimé en pourcentage de plantes attaquées.

Les **charançons du bourgeon terminal** s'observent au stade C2 du colza, sur 50 plantes par parcelle. On compte le pourcentage de plantes dont le bourgeon terminal est détruit. A noter que si l'observation d'altises d'hiver n'a pas pu être effectuée en entrée d'hiver, elle peut être effectuée à cette période avec la même méthode.

Le comptage des **méligèthes** s'effectue aux stades D1-D2 ou E. Le nombre moyen d'insectes présents par plante est compté sur 25 plantes par parcelle.

Enfin, les dégâts dus aux **charançons des siliques** et aux **cécidomyies** sont mesurés peu avant la récolte, en déterminant le pourcentage de siliques éclatées.

- **Adventices**

Plusieurs **relevés adventices** peuvent être effectués à différents stades de la culture. On conserve la méthode utilisée jusqu'à présent : 3 placettes de 0,25m² sont déposées dans chaque parcelle, et le nombre d'individus adventices de chaque espèce est relevé. Cette mesure est effectuée en sortie d'hiver avant traitement herbicide, puis au printemps (stade D ou E, avant que le colza ne rende les observations difficiles). Une troisième mesure après la récolte serait également intéressante.

Il pourrait être judicieux, à chaque relevé, d'estimer également la part de surface occupée par chaque espèce d'adventice, afin d'intégrer une dimension de nuisibilité.

- **Composantes du rendement**

Le comptage du **nombre de pieds** peut s'effectuer à différents stades. Un premier relevé peut être effectué à la levée, afin de déterminer les pertes à la levée dues aux échecs de germination et aux ravageurs (limaces). Le second relevé, en sortie d'hiver, permet à la fois de déterminer les pertes hivernales et de connaître le nombre de pieds final (les pertes de pieds étant plus rares à partir de ce stade).

Le **nombre de siliques** par plante peut être mesuré au stade G4, au même moment que les relevés de maladies. Le comptage s'effectue alors sur 15 pieds par parcelle. Le **nombre de grains par silique** a jusqu'à présent été calculé à partir des autres composantes du rendement. Il est envisageable, pour plus de précision, de le mesurer directement. Cette mesure peut être effectuée au stade G4, sur 100 siliques prélevées au hasard par parcelle. Le **Poids de Mille Grains** (PMG) peut être déterminé de la même façon que cette année (Voir Matériel et Méthodes), au moment de la récolte.

- **Nutrition**

Les prélèvements de **biomasse** et leur analyse permettent d'estimer l'état nutritionnel de la culture. Ces prélèvements peuvent être effectués sur trois zones de 0,25m² par parcelle. Le **taux protéique** et de **matières sèches** sont alors mesurés en laboratoire. Idéalement, des prélèvements réguliers permettraient de suivre au mieux la croissance et la nutrition de la culture. Toutefois, pour des raisons de temps, de coût et de dégradation de la parcelle, il est nécessaire de se limiter à certaines étapes-clé. Pour Bougel et al. (2010), ces étapes sont l'entrée d'hiver, la sortie d'hiver, le début de la floraison (stade F1) et deux semaines après la fin de floraison (environ G4).

En plus de ces prélèvements de biomasse, la mesure systématique des reliquats azotés en sortie d'hiver et en post-récolte permettrait de connaître les quantités d'azote fournies par le sol.

- **Enracinement**

La mise en place d'une fosse permettant d'observer l'enracinement de la culture présente l'inconvénient de détruire la structure du sol, c'est pourquoi l'enracinement du colza est estimé par la mesure de la **longueur** et de la **forme des pivots**. Cette mesure peut être réalisée en entrée ou en sortie d'hiver (selon le temps disponible), ainsi qu'au stade G4, avant la récolte. Sur 15 pieds prélevés par parcelle, on mesure la longueur des pivots et le pourcentage de pivots déformés, c'est-à-dire coudés ou fourchus.

- **Rendement et qualité**

Lors de la récolte du colza, plusieurs mesures sont nécessaires. Le **taux d'humidité des grains** est mesuré en comparant le poids d'un échantillon prélevé à la récolte et son poids sec une fois passé à l'étuve. Le **rendement** brut est déterminé par pesée au moment de la récolte, et le rendement à 9% d'humidité calculé à partir du rendement brut et de l'humidité. Enfin, le **taux protéique** du grain à la récolte et son **taux d'huile** peuvent être mesurés en laboratoire.

L'ensemble de ces manipulations est résumé sur le tableau suivant.

Période	Stade du colza	Manipulations
Septembre-octobre	Levée (A)	Comptage des pieds levés Limaces : comptage pieds attaqués
Octobre-décembre	B	Observations au champ : mildiou, phoma et pseudocercosporiose Prélèvement 30 plantes : altises d'hiver et charançons de la tige
Entrée d'hiver	B	Prélèvements de biomasse et analyse Mesure des pivots (ou en sortie d'hiver)
Sortie d'hiver (février-mars)	C1	Comptage pieds sortie hiver Prélèvements de biomasse et analyse Mesure des pivots (ou en entrée d'hiver) Relevé adventices
Fin février-début mars	C2	Observations au champ : charançons du bourgeon terminal
Mars	D1-D2, E	Observations au champ : comptage des méligèthes Relevé adventice
Avril	F1	Prélèvements de biomasse et analyse
Mai-juin	Fin floraison/G4	Prélèvements de biomasse et analyse Prélèvement de 15 plantes/parcelle Observation sclérotinia, phoma, cylindrosporiose, pseudocercosporiose, alternariose Dégâts charançons siliques et cécidomyies
Récolte (Juillet)	G5	Mesure du rendement Taux d'humidité Taux protéique Taux d'huile
Post-récolte (Juillet-août)	/	Relevé adventice



ROUSSAT Chloé, 2014, Impact des techniques culturales sans labour sur les cultures en contexte breton, 40 pages, mémoire de fin d'études, soutenu à Lempdes (63), 2014.

STRUCTURE D'ACCUEIL ET INSTITUTIONS ASSOCIEES:

- ♦ Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne

ENCADRANTS :

- ♦ Maître de stage : HEDDADJ Djilali (Chambre Régionale d'Agriculture de Bretagne)
- ♦ Tuteur pédagogique : VASSAL Nathalie

OPTION : Agriculture, Productions Végétales en Environnement

RESUMÉ

L'essai travail du sol de la station de Kerguéhennec (Morbihan) a pour but la collecte de références locales sur les techniques culturales sans labour afin de mieux conseiller les agriculteurs bretons sur ces pratiques. Cet essai est en place depuis 2000, et étudie l'impact du non-labour, associé à différents fertilisants organiques, sur l'état du sol et le développement de la culture. Les fertilisants utilisés sont le fumier de volailles, le fumier de bovins et le lisier de porcs, ainsi que l'ammonitrate. Le présent rapport s'intéresse à l'aspect culture de l'essai. Deux périodes sont étudiées : la culture en place en 2013-2014 (colza), et l'ensemble des cultures depuis 2000.

Le colza 2014 est caractérisé par un échec de levée en semis direct principalement dû à la présence de ravageurs (limaces), et par un rendement plus dépendant de la fertilisation azotée que du travail du sol.

Depuis le début de l'essai, un plus grand nombre d'adventices est présent en labour en sortie d'hiver, sans qu'une sélection de la flore par le travail du sol ne soit visible. Le labour favorise également les maladies fongiques du pied du blé, particulièrement le piétin-verse. La levée des cultures est moins bonne en semis direct, mais la capacité de compensation du blé et du colza permettent souvent d'obtenir un rendement équivalent au labour. La présence de mycotoxines déoxynivalénol (DON) dans les grains de blé est plus importante sur le semis direct.

Mots clés : Travail du sol, Semis direct, Travail superficiel, Labour, Fertilisation organique, colza, blé.