

Le strip-till végétal : Effets sur les propriétés physico-chimiques du sol

Présenté par Rodolphe Soumoy

Promoteur : Prof. Pierre Bertin (UCL/ELI/ELIA)

Lecteurs : Prof. Xavier Draye (UCL/ELI/ELIA)
Ir. Frédéric Muratori (aisbl Regenacterre)

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention
du diplôme de **Bioingénieur : sciences agronomiques**

Remerciements

Je tiens à remercier ici toutes les personnes qui ont rendu possible la réalisation de ce mémoire.

En premier lieu, je tiens à remercier mon promoteur, Pierre Bertin. D'abord pour avoir accepté de me confier ce sujet, et ensuite pour m'avoir guidé et conseillé tout au long de l'année.

Je tiens évidemment à remercier Nicolas Braibant pour avoir fourni la parcelle sur laquelle a eu lieu l'expérimentation.

Un grand merci également à Frédéric Muratori et Sylvain Collienne, de l'aisbl Regenacterre, ainsi qu'à Adrien Boufflette, leur stagiaire présent au moment de l'installation de l'essai, pour l'aide et les conseils qu'ils m'ont fournis.

Merci également au personnel de GreenFarm-Pierard, en particulier Yannick Delvaux, pour avoir réalisé les prestations techniques ayant permis l'installation de l'essai.

Merci à Anne Iserentant et Claudine Givron pour leur aide et leurs conseils pour les analyses de sol.

Merci à Thomas Dagbert, Pierre Van Thorre et Valentine Calay pour l'aide fournie lors des mesures et prélèvements de terrain et également pour l'aide fournie lors des analyses de laboratoire.

Merci à mes compères de l'essai sur les couverts végétaux, en particulier Adeline Lefèvre et Denis Allard, pour l'aide occasionnelle qu'ils m'ont apportée.

Merci à Xavier Draye pour son aide précieuse concernant le traitement statistique des résultats.

Enfin, je voudrais remercier mes parents, Cécile et Freddy, ainsi que Léa et Antoine, Alexandre et Pia, et Louisa pour leur soutien et leurs encouragements lors de la réalisation de ce mémoire. Merci également à Anouk et Gauthier pour leur aide lors de la rédaction.

Résumé

Le strip-till végétal est une technique qui permet de combiner le travail profond de la ligne de semis de la culture suivante (strip-till) avec l'implantation d'un couvert végétal spécifique dans cette même ligne. L'idée est donc d'optimiser les effets des couverts végétaux en les localisant.

Pour ce mémoire, un essai de strip-till végétal a été installé sur la parcelle d'un agriculteur à Vieusart, en utilisant un matériel couramment employé dans les exploitations agricoles. Le semis d'un couvert végétal en plein a été suivi du travail du sol et de l'implantation de différentes espèces localisées aux lignes de la culture suivante. Le développement des couverts végétaux a été suivi et plusieurs paramètres physico-chimiques du sol (teneur en matière organique, stabilité structurale et densité apparente) ont été analysés. L'état de compaction du sol a également été évalué via des mesures de pénétrométrie. L'objectif principal de cette étude était de mettre en évidence une éventuelle différenciation des propriétés chimiques et physiques du sol entre la ligne du strip-till végétal de celles de l'interligne non travaillé.

Les résultats du suivi du développement des couverts ont montré qu'il n'y a pas d'impact négatif du strip-till sur le développement et la croissance du couvert précédemment semé en plein, sur toute la surface du champ. L'analyse des paramètres physico-chimiques n'a pas permis de mettre en évidence une réelle différenciation de ces propriétés entre la ligne du strip-till végétal de celles de l'interligne. Une stratification verticale de la teneur en matière organique et de la stabilité structurale a par contre été observée. Les mesures de pénétrométrie ont mis en évidence la compaction moindre du sol de la ligne comparée à celle du sol de l'interligne. Cet état de compaction moindre offrira aux betteraves qui seront semées dans la ligne un environnement plus favorable pour la croissance de leur système racinaire.

La comparaison des résultats obtenus avec ceux de la littérature, qui concernent principalement la technique du strip-till considérée individuellement, ne permet pas de tirer de conclusion définitive quant à l'intérêt de localiser un couvert végétal dans la future ligne de semis, en même temps que le travail du sol localisé à cette même ligne. L'essai a probablement eu lieu sur une période de temps trop courte pour que les éventuelles différences entre les deux positions apparaissent. En revanche, les résultats montrent que la décompaction localisée à la future ligne de semis permet effectivement d'améliorer la structure du sol à cet endroit.

Table des matières

Table des figures	12
Liste des tableaux.....	14
Introduction.....	16
Première partie : Etat de l'art.....	18
Chapitre 1 : L'agriculture de conservation	20
Chapitre 2 : Travail du sol.....	21
2.1. Définition	21
2.2. Travail du sol en systèmes « conventionnels »	22
2.2.1. Séquence classique	22
2.2.2. Avantages et inconvénients	23
2.3. Travail du sol en agriculture de conservation	24
2.3.1. Diversité des pratiques.....	24
2.3.2. Impacts sur le sol.....	25
2.3.3. Conséquences pour les cultures	26
2.3.4. Autres considérations	28
Chapitre 3 : Travail du sol en bandes ou strip-till	29
3.1. Description de la technique.....	29
3.1.1. Historique et définition	29
3.1.2. Le strip-till en pratique	30
3.2. Impacts du strip-till sur les propriétés physico-chimiques du sol.....	32
3.2.1. Température et humidité.....	32
3.2.2. Matière organique	33
3.2.3. Résistance à la pénétration	33
3.2.4. Densité apparente.....	34
3.2.5. Stabilité structurale	34
3.2.6. Infiltration de l'eau.....	35
3.3. Impacts du strip-till sur la vie biologique du sol.....	35
3.3.1. Populations microbiennes.....	35
3.3.2. Microfaune	36
3.3.3. Macrofaune	36
3.4. Conséquences pour les cultures.....	37

3.4.1.	Implantation et développement des cultures	37
3.4.2.	Disponibilité en éléments nutritifs.....	38
3.4.3.	Dynamique et gestion des adventices	38
3.4.4.	Ravageurs et maladies des cultures.....	39
3.4.5.	Rendement des cultures	39
3.5.	Impacts du strip-till sur l'environnement.....	40
3.5.1.	Séquestration de carbone dans les sols.....	40
3.5.2.	Erosion du sol et ruissellement	40
Chapitre 4 : Couverts végétaux		42
4.1.	Renouvellement de la fertilité dans les systèmes agraires	42
4.2.	Définition et évolution du concept.....	43
4.2.1.	Interculture, cultures intercalaires et couverts végétaux.....	43
4.2.2.	Evolution du concept des couverts végétaux	43
4.3.	Les couverts végétaux en pratique.....	44
4.3.1.	Installation des couverts	44
4.3.2.	Entretien des couverts	46
4.3.3.	Destruction.....	46
4.3.4.	Autres utilisations possibles des couverts	47
4.4.	Services écosystémiques fournis par les couverts végétaux.....	48
4.4.1.	Au niveau des propriétés chimiques du sol	48
4.4.2.	Au niveau des propriétés physiques du sol.....	49
4.4.3.	Au niveau des propriétés biologiques.....	50
4.5.	Bilan économique de l'utilisation des couverts végétaux.....	51
Chapitre 5 : Strip-till végétal.....		52
5.1.	Définition du concept	52
5.2.	Itinéraire technique	52
5.2.1.	Outils	52
5.2.2.	Choix des espèces.....	53
5.3.	Données disponibles.....	53
Chapitre 6 : Objectifs du mémoire		54
Deuxième partie : Matériels et méthodes.....		56
Chapitre 7 : Localisation de l'essai et itinéraire technique		58
Chapitre 8 : Analyses physico-chimiques de sol		61

8.1.	Méthodes de prélèvement et pré-traitements	61
8.2.	Analyses des caractéristiques chimiques	63
8.2.1.	pH	63
8.2.2.	CEC et bases échangeables	63
8.2.3.	Nitrate	64
8.2.4.	Azote total et carbone organique	65
8.2.5.	Phosphore disponible.....	66
8.3.	Analyses des caractéristiques physiques.....	66
8.3.1.	Granulométrie	66
8.3.2.	Stabilité structurale	67
8.3.3.	Densité apparente.....	69
8.3.4.	Pénétrométrie	70
8.3.5.	Profil de sol.....	70
Chapitre 9 : Suivi du développement des couverts végétaux.....		72
9.1.	Couverture foliaire.....	72
9.2.	Densité des plantes	73
9.3.	Production de biomasse	73
Chapitre 10 : Analyses des résultats		75
10.1.	Moyennes et écart-types	75
10.2.	Analyses des sols récoltés en août	75
10.3.	Choix et description des modèles utilisés.....	75
10.3.1.	Résultats du suivi de la croissance des couverts	76
10.3.2.	Analyses comparant la ligne de strip-till et l'interligne.....	77
Troisième partie : Résultats.....		80
Chapitre 11 : Caractérisation initiale.....		82
11.1.	Caractéristiques physiques	82
11.1.1.	Granulométrie	82
11.1.2.	Stabilité structurale	82
11.2.	Caractéristiques chimiques.....	83
11.3.	Remarques concernant la caractérisation initiale	83
Chapitre 12 : Développement des couverts végétaux.....		85
12.1.	Comptage d'espèces	85
12.2.	Couverture foliaire	88

12.3.	Production de biomasse	89
Chapitre 13 : Analyses physico-chimiques de sol		90
13.1.	Matière organique	90
13.1.1.	Facteur « Traitement »	90
13.1.2.	Facteur « Profondeur »	91
13.1.3.	Interaction entre les facteurs « Traitement » et « Position »	91
13.2.	Stabilité structurale	92
13.2.1.	Facteur « Profondeur »	93
13.2.2.	Interaction entre les facteurs « Traitement » et « Profondeur »	93
13.3.	Densité apparente	94
Chapitre 14 : Etat de la structure du sol		96
14.1.	Pénétrométrie	96
14.1.1.	Facteur « Traitement »	96
14.1.2.	Facteur « Position »	97
14.1.3.	Facteur « Date »	97
14.1.4.	Comparaison des profondeurs atteintes en avril pour les différents traitements	97
14.1.5.	Interaction entre les facteurs « Position » et « Date »	98
14.2.	Profil de sol	99
Quatrième partie : Discussion.....		102
Chapitre 15 : Remarques à propos de l'itinéraire technique.....		104
Chapitre 16 : Impact du strip-till sur le développement des couverts		105
Chapitre 17 : Caractéristiques physico-chimiques du sol		107
17.1.	Matière organique	107
17.1.1.	Comparaison entre traitements	107
17.1.2.	Evolution avec la profondeur	107
17.1.3.	Absence d'effet « Position »	108
17.2.	Stabilité structurale	109
17.2.1.	Evolution avec la profondeur	109
17.2.2.	Absence d'effet « Position »	109
17.3.	Densité apparente	110
Chapitre 18 : Etat de compaction du sol		111
18.1.	Comparaison entre la ligne et l'interligne	111
18.2.	Comparaison entre traitement	111

18.3.	Evolution temporelle de la compaction du sol	111
18.4.	Absence d'interaction « Traitement*Position »	114
Chapitre 19 : Critiques de la méthodologie de l'étude		115
19.1.	Disposition de l'essai.....	115
19.2.	Pertinence des analyses réalisées.....	115
Conclusion et perspectives.....		117
Bibliographie		120

Table des figures

Figure 1 : Le strip-till est un système de travail du sol de conservation où moins d'un tiers de la surface du sol est perturbée. Row = rang de la culture, Interrow area = inter-rang (Morrison, 2002).	30
Figure 2 : a : Décompacteur utilisé pour le strip-till dans l'essai étudié dans ce mémoire. b : Outil de strip-till spécialisé de la firme Kuhn.	30
Figure 3 : Principe du strip-till végétal. Un couvert est localisé dans le futur rang de semis de la culture suivante (radis chinois ou féverole ici) et peut être accompagné d'un couvert semé en plein (avoine ou féverole sur la figure) (Brun et Légère, 2016).	52
Figure 4 : Photographie aérienne de la parcelle (entourée en rouge) de l'essai strip-till végétal (SPW - DGARNE, 2016).	58
Figure 5 : Plan expérimental et matériels utilisés pour l'essai de strip-till végétal.	59
Figure 6 : Méthode de prélèvement des sols en août, avec les 5 placettes (en haut, à gauche), les 10 coups de sonde par placette (en haut, au milieu) et les 3 profondeurs par coup de sonde (droite) et en mars, avec les 3 blocs (en bas, à gauche), les 5 prélèvements dans la ligne de strip-till et les 5 prélèvements entre les lignes (en bas, au milieu) et les 3 mêmes profondeurs qu'en août.	61
Figure 7 : Appareil de Féodoroff utilisé pour évaluer la stabilité structurale des sols.	68
Figure 8 : Dispositif utilisé pour mesurer la densité apparente par immersion au pétrole. ...	69
Figure 9 : pénétromètre utilisé pour évaluer la compaction du sol.	70
Figure 10 : Fosse creusée perpendiculairement aux lignes de strip-till pour observer le profil de sol.	71
Figure 11 : Méthode de mesure pour le suivi de la croissance des couverts. En rouge sont représentées les blocs.	72
Figure 12 : Cadre utilisé pour mesurer la couverture foliaire et la densité de plantes.	73
Figure 13 : Fractions et sous-fractions texturales des horizons du champ étudié.	82
Figure 14 : Nombre d'individus observés par mètre carré en moyenne pour les deux dates de comptage et proportions de chacune des espèces au sein des différents traitements. ST, strip-till.	88
Figure 15 : Graphique représentant, pour tous les traitements, la couverture foliaire aux deux dates de mesure.	89
Figure 16 : Graphe montrant l'effet de l'interaction entre les facteurs « Traitement » et « Position » sur la teneur en MO, toutes profondeurs confondues.	92
Figure 17 : Graphe montrant l'interaction entre les facteurs « Traitement » et « Profondeur » sur l'indice d'instabilité I_s , les deux positions étant confondues.	94
Figure 18 : Graphe représentant la valeur de la densité apparente pour chacun des traitements et pour les deux positions.	95
Figure 19 : Graphe représentant la profondeur atteinte par le pénétromètre, tous traitements confondus, pour les quatre dates et pour les deux positions.	99
Figure 20 : Photos des profils de sol obtenus sur une parcelle du Centre de Marbaix régulièrement labourée (gauche) et sur la parcelle du strip-till végétal qui n'est plus labourée	

depuis une dizaine d'année (droite). Les flèches rouges indiquent l'épaisseur de la semelle de labour.	100
Figure 21 : Destruction du couvert végétal par roulage sur gel (à gauche) et état de la terre juste après le semis des betteraves (à droite).	104
Figure 22 : Evolutions au cours de l'essai des conditions climatiques (températures et précipitations) et des mesures de pénétrométrie réalisées aux deux positions (ligne et interligne), tous traitements confondus. Les deux graphiques partagent le même axe des abscisses (date).	112

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification des opérations de travail du sol (Roger-Estrade et al., 2014).....	22
Tableau 2 : Traitements pour lesquels une espèce a été implantée dans la ligne, leur composition, la densité des espèces et leur poids de mille grains (PMG).....	60
Tableau 3 : Classement des sous-fractions texturales en fonction de leur taille (Baize, 2000).	67
Tableau 4 : Indices d'instabilité structurale des différents horizons des échantillons prélevés en août (moyennes et écart-types).....	82
Tableau 5 : Résultats des analyses réalisées sur les échantillons de sol récoltés en août (moyennes et écart-types).	83
Tableau 6 : Résultats des ANOVA 2 des caractéristiques physico-chimiques des sols récoltés en août, expliquées en fonction des facteurs « Placette » et « Profondeur ». Le caractère significatif de la p-valeur se lit comme suit : 0 < *** < 0,001 < ** < 0,01 < * < 0,05. n.s., non significatif.	84
Tableau 7 : Proportions attendues (sur base des doses de semis et des PMG) et observées (en moyenne pour les deux dates d'observation) des différentes espèces pour les deux témoins.....	85
Tableau 8 : Proportions attendues (sur base des doses de semis et des PMG) et observées (en moyenne pour les deux dates d'observation) des différentes espèces pour les 8 traitements pour lesquels une espèce a été implantée dans la ligne de strip-till.....	87
Tableau 9 : Production de biomasse sèche pour les différents traitements (moyennes et écart-types). Des lettres identiques dans la colonne « Groupe » signifient que la quantité de biomasse produite n'est pas significativement différente d'un traitement à l'autre.	89
Tableau 10 : Résultats de l'ANOVA 3 de l'analyse de MO, expliquée en fonction des facteurs « Traitement », « Position » et « Profondeur ». Le caractère significatif de la p-valeur se lit comme suit : 0 < *** < 0,001 < ** < 0,01 < * < 0,05. Covariance du facteur aléatoire : 0,0089.	90
Tableau 11 : Teneur en MO (moyennes et écart-types) pour les différents traitements, positions et profondeurs confondues. Des lettres identiques dans la colonne « Groupe » signifient que la teneur en MO n'est pas significativement différente d'un traitement à l'autre.	91
Tableau 12 : Teneur en MO (moyennes et écart-types) pour les différentes profondeurs, traitements et positions confondus. Des lettres identiques dans la colonne « Groupe » signifient que la teneur en MO n'est pas significativement différente d'une profondeur à l'autre.	91
Tableau 13 : Résultats de l'ANOVA 3 de l'analyse de la stabilité structurale, expliquée en fonction des facteurs « Traitement », « Position » et « Profondeur ». Le caractère significatif de la p-valeur se lit comme suit : 0 < *** < 0,001 < ** < 0,01 < * < 0,05.	93
Tableau 14 : Indice d'instabilité structurale de Hénin (Is, moyennes et écart-types) pour les différentes profondeurs, traitements et positions confondus. Des lettres identiques dans la colonne « Groupe » signifient que l'Is n'est pas significativement différent d'une profondeur à l'autre.	93

Tableau 15 : Résultats de l'ANOVA 2 de l'analyse de la densité apparente, expliquée en fonction des facteurs « Traitement » et « Position ». Le caractère significatif de la p-valeur se lit comme suit : $0 < *** < 0,001 < ** < 0,01 < * < 0,05$	95
Tableau 16 : Résultats de l'ANOVA 3 des mesures de pénétrométrie, expliquées en fonction des facteurs « Traitement », « Position » et « Date ». Le caractère significatif de la p-valeur se lit comme suit : $0 < *** < 0,001 < ** < 0,01 < * < 0,05$. Covariance du facteur aléatoire : 5,75.....	96
Tableau 17 : Profondeur atteinte par le pénétromètre (moyennes et écart-types) aux deux positions, tous traitements confondus et en moyenne sur les quatre dates de mesure. Des lettres identiques dans la colonne « Groupe » signifient que la profondeur n'est pas significativement différente d'une position à l'autre.	97
Tableau 18 : Profondeur atteinte par le pénétromètre (moyennes et écart-types) aux quatre dates, traitement et position confondus. Des lettres identiques dans la colonne « Groupe » signifient que la profondeur n'est pas significativement différente d'une date à l'autre.	97
Tableau 19 : Profondeur atteinte par le pénétromètre (moyennes et écart-types) pour les mesures d'avril, en moyenne pour les deux positions. Des lettres identiques dans la colonne « Groupe » signifient que la profondeur n'est pas significativement différente d'un traitement à l'autre.....	98

Introduction

Depuis la fin de la Seconde Guerre Mondiale, l'utilisation croissante de ressources non renouvelables (engrais de synthèses, pesticides, etc...) et la mécanisation à outrance, qui peut avoir des effets délétères sur le sol, ont mis à mal le bon fonctionnement des agroécosystèmes, au point de menacer leur durabilité. Le maintien durable d'un niveau suffisant de production agricole passe par le changement de certaines habitudes, notamment en ce qui concerne le travail du sol et l'occupation des terres lors de l'interculture. En effet, le travail trop intensif du sol a de nombreux effets négatifs sur ses propriétés physico-chimiques et, *in fine*, sur sa fertilité (entre autres, chute du taux de matière organique, lessivage, érosion). D'autre part, la mauvaise gestion de l'interculture peut également avoir des conséquences néfastes sur l'écosystème cultivé et sur son environnement immédiat (fuite de nutriments hors de l'agroécosystème par exemple).

Le strip-till, une pratique de travail du sol où seule la future ligne de semis est perturbée, peut constituer une alternative aux méthodes classiques de préparation des terres (labour). De plus, les couverts végétaux implantés pour occuper le sol pendant l'interculture, auparavant vus comme une contrainte administrative (CIPAN), constituent désormais pour de nombreux agriculteurs un des moyens assurant le renouvellement de la fertilité de l'agroécosystème. Certains agriculteurs ont poussé ces deux concepts plus loin en les combinant dans une démarche de « strip-till végétal », espérant ainsi optimiser l'effet des couverts végétaux en les localisant dans la ligne de semis. Le strip-till végétal étant encore peu répandu, très peu de données et de résultats d'essais le concernant sont disponibles dans la littérature. Il peut cependant, *a priori*, être considéré comme le résultat de la combinaison de deux pratiques distinctes, l'une portant sur un moyen particulier de travailler le sol (strip-till), l'autre concernant l'occupation des terres pendant l'interculture (couverts végétaux). Ainsi, la partie « Etat de l'art » fait le point sur les connaissances disponibles en rapport avec ces deux pratiques.

La deuxième partie de ce mémoire, intitulée « Matériels et méthodes », décrit l'essai de strip-till végétal qui a été implanté non loin de Louvain-la-Neuve et les mesures et analyses physico-chimiques qui ont été réalisées pour caractériser ses effets sur le développement du couvert végétal et sur les propriétés du sol. Le dernier chapitre de cette partie explique la méthodologie employée pour analyser statistiquement les résultats obtenus.

La partie « Résultats », présentée dans un troisième temps, expose en détail les résultats des mesures du développement des couverts et des analyses physico-chimiques de sol ainsi que les résultats des mesures évaluant l'état physique du sol réalisées sur le terrain.

Finalement, la quatrième partie, « Discussion », interprète les résultats exposés précédemment, à la lumière des connaissances disponibles présentées dans l'état de l'art.

Première partie : Etat de l'art

Chapitre 1 : L'agriculture de conservation

Le sujet de ce mémoire ayant trait à une pratique entrant dans le domaine de l'agriculture de conservation, il paraît approprié de rappeler quels sont les principes définissant ce type d'agriculture.

Selon l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO, 2015), l'agriculture de conservation est une méthode de gestion des agroécosystèmes caractérisée par la combinaison de trois principes fondamentaux, à savoir :

- Un travail minimal du sol et, en particulier, l'arrêt des pratiques de travail du sol entraînant une inversion de celui-ci (principalement le labour). Le sol n'est en général travaillé que sur quelques centimètres de profondeur voire plus du tout dans le cas du semis direct ;
- La couverture permanente du sol par un mulch végétal vivant ou mort. Cette couverture est assurée soit par les résidus de la culture principale laissés au sol pendant l'interculture, soit par un couvert végétal implanté après la récolte d'une culture principale et se développant pendant l'interculture ;
- L'allongement des rotations et la diversification des espèces végétales cultivées.

En pratique, ces trois principes combinés donnent lieu à une multitude de formes d'agriculture allant des techniques culturales simplifiées (TCS) où les terres ne sont plus labourées mais un travail plus ou moins intensif du sol est malgré tout réalisé au semis direct sous couvert végétal où le sol n'est plus du tout travaillé excepté par les éléments travailleurs du semoir permettant de placer les graines en contact avec le sol, en passant au travers de l'importante biomasse végétale présente au niveau du sol, au moment du semis.

Chapitre 2 : Travail du sol

2.1. Définition

Le travail du sol est l'action de préparer la couche superficielle du sol par des moyens mécaniques pour la mise en place des cultures. Ses objectifs sont multiples : améliorer la structure en surface pour favoriser la germination et le développement racinaire, désherber, enfouir les engrais, résidus de cultures et autres amendements, exposer le sol aux agents climatiques (succession gel-dégel et humectation-dessiccation) mais également réaliser d'autres actions spécifiques comme le nivellement du sol ou la création d'un relief particulier (buttes de pommes de terre) (Biielders, 2017). D'après Sébillotte (1974), l'itinéraire technique se définit comme la « combinaison logique et ordonnée d'opérations culturales mises en œuvres pour la conduite d'une culture ». Cette définition prend en compte l'ensemble des opérations culturales mais elle peut, plus spécifiquement, être appliquée aux seules opérations de travail du sol. La combinaison de ces opérations de travail du sol, pratiquées au moyen de divers outils, donne ainsi naissance à une multitude d'itinéraires techniques de travail du sol (Labreuche et al., 2007).

En général, la classification des outils utilisés pour travailler le sol se fait sur base de trois critères (Roger-Estrade et al., 2014). Le premier critère est l'effet que l'outil a sur le sol et sur les résidus de culture. La fragmentation du sol est systématique mais le retournement des horizons, permettant le mélange des résidus avec le sol, n'a lieu qu'en cas de labour. Il est possible de mélanger les résidus avec le sol sans retourner celui-ci (par exemple avec des outils de déchaumage à dents ou à disques). Le second critère permet de classer les outils de travail du sol en fonction de la profondeur à laquelle ils travaillent. Ce critère est important car il détermine en grande partie la dépense énergétique qui sera nécessaire pour réaliser le travail. Finalement, le dernier critère classe les outils en fonction de la proportion de la surface du sol qui est effectivement travaillée. Certains outils, par exemple les équipements de strip-till, qui sont utilisés pour réaliser une décompaction de la ligne de semis, ne travaillent le sol que sur une bande plus ou moins large sur le futur rang de la culture suivante, dans une proportion n'excédant pas 30 % de la surface totale du champ. Tous ces critères sont rassemblés dans le tableau ci-dessous (Tableau 1).

Les pratiques de travail du sol situées dans la colonne bleue du Tableau 1 (Fragmentation + Retournement + Enfouissement) peuvent être considérées comme des opérations conventionnelles régulièrement pratiquées, excepté le labour de défoncement qui n'est pratiqué qu'occasionnellement lors de la mise en culture de nouvelles terres ou lors de la plantation de végétaux à racines profondes comme la vigne ou des arbres fruitiers. Les autres opérations, n'entraînant pas un retournement du sol, peuvent être considérées comme des techniques culturales simplifiées (TCS) et peuvent être utilisées dans le cadre de l'agriculture de conservation.

Tableau 1 : Classification des opérations de travail du sol (Roger-Estrade et al., 2014).

		Fragmentation + Retournement + Enfouissement	Mélange + Enfouissement		Pas de mélange et un minimum d'enfouissement	
			Fragmentation sans retournement			
Profondeur	Pas de travail	semis : 3 cm, reste: 0 cm				Semis direct (sous couvert)
	Superficiel	3-15 cm	Labour très superficiel (≤ 15 cm) Déchaumeur à versoirs	Travail superficiel Dents, disques, chisel, herse, houes, cultivateur, canadien, vibroculteurs	Travail superficiel en bandes Strip tillers Rotasemis	
	Profond	15-40 cm	Labour +/- profond Charrue à versoirs (+rasette)	Pseudo-labour machines à bêchet, charrue à disques, cultivateurs lourds (chisel), pulvérisateurs lourds (disques), charrue Express		Décompactage lames, dents
	Très profond	40-80 cm	Labour très profond, défoncement Charrue « robuste »			Sous-solage dents (+ obus)
		100%	100%	Bandes 30%	100%	Ligne de semis 5%
Zone travaillée (%)						

2.2. Travail du sol en systèmes « conventionnels »

Bien que ce mémoire traite d'une pratique de travail du sol non conventionnel, il paraît utile de rappeler brièvement ce qui se fait classiquement pour préparer les terres pour le semis des cultures et de présenter les avantages et inconvénients de ces pratiques.

2.2.1. Séquence classique

L'approche classique pour préparer les terres en vue du semis fait intervenir, comme outil de travail primaire, la charrue à versoirs. Un labour plus ou moins profond, de 15 à 30 cm de profondeur et entraînant une inversion des horizons du sol, est réalisé. Ce labour permet d'enfouir les amendements organiques, de détruire les repousses et les adventices et d'ameublir le sol sur une certaine profondeur. Un travail secondaire est ensuite réalisé au moyen de plusieurs outils. D'abord un cultivateur à dents, réalisant un travail plus superficiel à 5-15 cm de profondeur, est utilisé pour homogénéiser la terre et détruire les repousses d'adventices germées. Un rouleau brise-mottes est généralement présent à l'arrière de ce cultivateur. Enfin, le passage d'une herse rotative permet de préparer un lit de semences (Morris et al., 2010 ; Bertin, 2017).

Ces opérations de travail du sol peuvent être décalées dans le temps. Le labour a généralement lieu en automne, excepté en terres légères si une culture de printemps y est implantée. Si une culture d'hiver est implantée, le travail secondaire du sol, et le semis, suivent immédiatement le labour. Si une culture de printemps est implantée, la terre labourée à

l'automne est laissée nue, exposée à l'action des agents climatiques jusqu'au printemps. Le travail secondaire a alors lieu et est suivi du semis de la culture.

2.2.2. Avantages et inconvénients

La pratique du labour présente de nombreux avantages. Entre autres, le labour permet d'enfouir les amendements apportés sur la terre, comme la chaux ou le fumier. Il permet d'enfouir les résidus de culture et les résidus de pesticides épandus sur la culture précédente. Il a une action de désherbage très efficace par l'enfouissement des adventices s'étant développées depuis la récolte du précédent. Le labour, en exposant le sol aux agents climatiques, comme les alternances de gel-dégel, permet d'obtenir une structure fine du sol. Le retournement de la terre permet également d'aérer les horizons du sol et donc de favoriser la minéralisation des matières organiques plus exposées à l'oxygène. Enfin, les terres labourées sont ressuyées et se réchauffent plus rapidement, ce qui permet d'intervenir plus tôt au printemps pour le semis de la culture suivante (Morris et al., 2010 ; Bertin, 2017)

Cependant, malgré tous ses avantages et bien qu'encore largement pratiqué, le labour présente de nombreux inconvénients. Il provoque notamment le compactage du sol en profondeur lorsqu'il est réalisé avec des engins lourds (Bertin, 2017). Ce compactage peut avoir pour origine le passage répété de la charrue à la même profondeur. Cette compaction peut être encore accentuée par un travail en condition trop humide, ce qui provoque un lissage en fond de raie, ou encore par le fait que les roues du tracteur soient placées dans la raie labourée pendant l'avancement (Bielders, 2017). Un autre problème majeur du labour tel qu'il est pratiqué dans les systèmes de culture conventionnel (c'est-à-dire dans un système intensif avec une rotation des cultures courte et une faible utilisation des couverts d'interculture) est la minéralisation excessive et donc la perte de matières organiques qu'il peut provoquer (Bertin, 2017). En effet, le labour a souvent lieu en automne, période suffisamment chaude et humide pour permettre une minéralisation importante des matières organiques du sol. Or, dans le cas d'une culture de printemps, le sol restera nu pendant plusieurs mois, jusqu'à l'implantation de la culture. La conséquence est que les nutriments libérés par la minéralisation d'automne sont perdus, en particulier l'azote sous forme de nitrate qui n'est pas retenu par le complexe adsorbant du sol et qui est lessivé vers les eaux de surface ou souterraines (Thomas et Archambeaud, 2016). Le labour, en ramenant en surface des graines d'adventices à longue durée de vie, peut entraîner leur germination et donc favoriser le salissement des parcelles. La consommation de carburant nécessaire pour labourer les terres peut être importante et, en combinaison avec la libération de gaz carbonique provoquée par la minéralisation accrue de la matière organique du sol, le labour a un bilan carbone défavorable en comparaison avec les techniques culturales sans labour. Enfin, en accroissant la perte de matière organique des sols cultivés (érosion de stade 1), le labour peut favoriser les phénomènes de lessivage des nutriments et d'arrachage des particules de sol qui sont alors entraînés en dehors du champs (érosion de stade 2) (Lal et al., 2007 ; Bertin, 2017).

2.3. Travail du sol en agriculture de conservation

La parcelle sur laquelle est implantée l'essai étudié dans ce mémoire étant cultivée en respectant les principes de l'agriculture de conservation, il semble important de décrire en partie les itinéraires techniques de travail du sol entrant en ligne de compte dans ce type d'agriculture ainsi que les impacts que ces itinéraires peuvent avoir sur le sol ou les cultures mises en place.

2.3.1. Diversité des pratiques

L'un des piliers de l'agriculture de conservation, dont la définition est citée plus haut, est donc la réduction du travail du sol et, en particulier, l'abandon des pratiques qui entraînent un retournement des horizons cultivés se traduisant, en pratique, par l'abandon du labour. La simplification du travail du sol engendre l'apparition d'une multitude d'itinéraires techniques en partie décrits dans cette section. En fonction de la profondeur, il est possible de distinguer (Labreuche et al., 2007):

- Les itinéraires avec travail profond sans retournement : le travail profond est généralement réalisé avec un outil de pseudo-labour (décompacteur, machine à bêcher, cultivateur lourd de type chisel ou encore pulvérisateur à disques lourd) qui permet un ameublissement en profondeur du sol (plus de 15 cm de profondeur) mais sans entraîner une inversion des horizons. Le volume de sol travaillé peut être aussi important qu'en labour. Ce travail profond est suivi d'un travail superficiel visant à créer un lit de semences favorable à la croissance des semis.
- Les itinéraires avec travail superficiel : les opérations de travail superficiel (limitées à une profondeur inférieure à 15 cm) ont pour fonctions le déchaumage des parcelles, la réalisation de faux-semis (création d'un lit de semences favorable à la germination des adventices et graines de la culture précédente tombées au sol lors de la récolte et qui seront détruits par un second travail superficiel après quelques jours ou semaines) et la préparation du lit de semences. Des outils de travail superficiel sont, par exemple, les déchaumeuses à disques ou à dents, les pulvérisateurs à disques ou encore les cultivateurs rotatifs. Le semis de la culture suit alors directement le travail superficiel du sol.
- Le semis direct : cette technique permet d'implanter les cultures sans aucun travail du sol ou via un travail superficiel du sol (2 – 3 à 10 cm de profondeur) localisé sur la ligne de semis sans travail profond. Le semis direct peut être réalisé à la volée en utilisant des épandeurs centrifuges comme ceux utilisés pour l'épandage des engrais. Le semis à la volée peut avoir lieu après ou avant la moisson. Dans ce dernier cas le semis est réalisé dans la culture encore en place. La culture (ou le couvert) peut alors, dans un premier temps, se développer à l'abri de la culture précédente et la relayer après qu'elle ait été récoltée. Cette technique convient pour le semis du colza ou des cultures intermédiaires. Le semis direct peut également être réalisé en utilisant des semoirs

spéciaux dits de « semis direct ». Ces semoirs sont caractérisés par la présence de pièces travaillantes (dents ou disques) très pénétrantes et montées sur des engins lourds, ce qui permet de vaincre la résistance du sol et des résidus végétaux laissés en surface.

2.3.2. Impacts sur le sol

Dans ce paragraphe sont passés en revue les impacts des TCS sur les paramètres physico-chimiques et biologiques du sol, sans faire de distinction entre les différentes pratiques de travail du sol. L'arrêt du labour qui peut, comme expliqué au paragraphe précédent, prendre de nombreuses formes, a deux effets directs : l'absence de retournement du sol et la modification des conditions de fragmentation de l'ensemble des couches de sol travaillées. Les propriétés physiques et leurs conséquences vont donc être profondément modifiées (Roger-Estrade et al., 2011).

L'une des premières conséquences de l'adoption des TCS est l'accumulation de matière organique (MO) en surface et dans les premiers centimètres du sol (Roger-Estrade et al., 2011 ; Bronick et Lal, 2005 ; Soane et al., 2012 ; Tebrügge et Düring, 1999). Cette accumulation de MO a de nombreuses conséquences positives, comme la protection physique de la surface du sol, la stabilisation de la structure et la rétention d'eau (Roger-Estrade et al., 2011 ; Olson et al., 2017 ; Al-Kaisi et al., 2014). La matière organique abrite et nourrit les organismes du sol ce qui, en combinaison avec l'absence de perturbation mécanique du sol, contribue à accroître les populations d'habitants du sol et à diversifier les communautés. Cet effet est particulièrement marqué pour les populations de lombrics (Roger-Estrade et al., 2011 ; Kladviko, 2001 ; Morris et al., 2010). L'augmentation de MO dans le sol n'est cependant pas indéfinie et s'arrête lorsqu'un nouvel équilibre entre les apports et les pertes de MO est atteint. Le temps estimé pour atteindre ce nouvel équilibre varie suivant les études de 10 à 100 ans (Roger-Estrade et al., 2011).

L'arrêt du labour a également des conséquences sur la structure du sol. Au niveau de la porosité, d'abord, l'absence de travail du sol permet de maintenir sans discontinuité l'existence d'un volume de pores dans l'ensemble de l'ancienne couche travaillée (Roger-Estrade et al., 2011). Le non-labour permet de plus de conserver la porosité créée par la décomposition des racines de la culture précédente ainsi que celle créée par les lombrics. L'activité de ces derniers, les anéciques en particulier, fait progressivement disparaître l'ancienne semelle de labour (Roger-Estrade et al., 2011 ; Alletto et al., 2010 ; Tebrügge et Düring, 1999). Cependant, la synthèse réalisée par Roger-Estrade et al. (2011) montre qu'une période de transition de quelques années est nécessaire après l'arrêt du labour pour que la structure du sol atteigne progressivement un nouvel état de porosité caractéristique des TCS. Un autre paramètre physique du sol modifié suite à l'abandon du labour est la stabilité structurale. Ce paramètre est influencé directement et indirectement par la matière organique du sol. De manière directe, la matière organique permet de lier ensemble les particules du sol pour former des agrégats stables (Morris et al., 2010 ; Al-Kaisi et al., 2014).

L'augmentation de la teneur en MO dans les sols non labourés entraîne donc une augmentation proportionnelle de la stabilité structurale du sol (Roger-Estrade et al., 2011). De manière indirecte, l'augmentation de la teneur en MO entraîne un accroissement des populations d'organismes du sol ainsi qu'une diversification des communautés, comme expliqué précédemment. Certains de ces organismes participent à l'amélioration de la stabilité du sol. C'est le cas par exemple de certaines bactéries ou champignons qui, en créant un réseau d'hyphes dense et en sécrétant certaines substances dans le milieu environnant (glomaline), favorisent les processus d'agrégation des sols (Roger-Estrade et al., 2011). L'amélioration de la porosité du sol et la stabilisation des agrégats, combinés avec la présence de résidus végétaux laissés en surface, contribuent à réduire les risques de battance et d'érosion du sol (Roger-Estrade et al., 2011 ; Morris et al., 2010).

Outre l'amélioration de la structure du sol, il est prouvé que l'abandon du labour améliore également la biodiversité et l'activité biologique du sol. Comme expliqué ci-dessus, il y a une augmentation de la teneur en MO dans les premiers centimètres du sol en non labour. Cette matière organique offre un abri et de la nourriture aux organismes du sol. Cela, combiné avec la réduction voire l'absence de perturbations mécaniques, favorise le développement des populations des macro-organismes (en particuliers les lombrics mais aussi certains arthropodes) et micro-organismes. L'activité de ces derniers, mesurée par exemple par le taux de respiration du sol, est en plus stimulée en TCS (Soane et al., 2012 ; Kladivko, 2001).

L'amélioration de la structure du sol, qui réduit le risque érosif, et de l'activité biologique résultent *in fine* en une augmentation de la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol et une réduction du lessivage des particules et de la lixiviation des éléments fertilisants et des produits phytopharmaceutiques (Tebrügge et Düring, 1999 ; Bertin, 2017).

2.3.3. Conséquences pour les cultures

L'abandon du labour a d'abord des conséquences sur l'implantation des cultures. La conséquence la plus évidente est la présence de résidus végétaux en surface puisque ceux-ci ne sont plus enfouis par le labour. L'implantation de la culture nécessite donc un semoir adapté, capable de passer au travers des résidus et suffisamment lourd pour assurer un bon contact sol-graine. Ces outils sont donc en général équipés de disques ou de dents montés sur un châssis lourd assurant la pénétration des éléments semeurs (Labreuche et al., 2007). Un autre effet de la présence de résidus en surface, et du fait que le sol n'est plus (ou moins) travaillé, est la température plus basse du sol au printemps. Cette température plus basse s'explique par le fait que les résidus empêchent les rayons solaires d'atteindre le sol, reflètent plus la radiation solaire que le sol nu et réduisent l'évaporation de l'eau du sol ce qui ralentit le réchauffement de celui-ci (Morris et al., 2010 ; Soane et al., 2012). Le réchauffement est encore ralenti par l'absence de l'aération et du soulèvement du sol qui, en labour, permettent un meilleur ressuyage du sol et donc un réchauffement plus rapide de celui-ci. La température du sol plus faible au printemps peut retarder le semis des cultures en cas de non labour comparé à une conduite classique (Soane et al., 2012). En conditions sèches, le contact sol-

graine peut être insuffisant à cause de la proximité des résidus avec les semences et donc retarder la germination. En conditions humides, des problèmes de phytotoxicité fongique peuvent apparaître suite au contact entre les pailles laissées au sol et les graines de la culture nouvellement semée (Soane et al., 2012).

La disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes est également modifiée suite à l'adoption des TCS. Une stratification en surface du phosphore (P) et du potassium (K) disponibles est observée sans que cela ne soit préjudiciable pour la nutrition des plantes. L'accumulation des nutriments en surface peut être due à la décomposition des résidus de culture et à l'augmentation de l'activité biologique (Soane et al., 2012). En ce qui concerne l'azote (N), la situation est plus complexe. Il est généralement observé que la fertilisation azotée nécessaire pour atteindre le même rendement qu'en labour est plus élevée lors des deux ou trois premières années suivant l'adoption des TCS (Morris et al., 2010 ; Soane et al., 2012). Plusieurs raisons peuvent expliquer ce phénomène : perte d'azote disponible par dénitrification (transformation du nitrate en oxyde nitreux en conditions anaérobies) dans les sols non labourés, qui sont généralement plus humides, moins aérés que les sols labourés, ce qui favorise le processus ; minéralisation de la MO plus faible au printemps, en automne et en hiver ; immobilisation de l'azote dans les résidus de culture ; absorption limitée de l'azote du sol due à une croissance réduite des racines (Soane et al., 2012 ; Rochette, 2008). Il est également observé que la minéralisation des résidus de culture près de la surface du sol est plus lente en TCS et que l'immobilisation de l'azote est plus importante qu'en labour. Ces effets ont pour conséquence que les sols non labourés peuvent avoir un plus grand contenu en azote minéral moins susceptible au lessivage permettant ainsi une amélioration de l'efficacité de l'azote à long terme et conduisant potentiellement à une baisse des besoins en fertilisants azotés après quelques années de non labour (Soane et al., 2012). L'accumulation de MO dans les sols conduits en TCS augmente également la quantité d'azote organique potentiellement minéralisable ce qui pourra compenser le plus faible taux de minéralisation (Soane et al., 2012). Enfin en ce qui concerne l'azote, il est admis que le fait de ne pas perturber le sol par un travail d'automne réduit la minéralisation de l'azote à cette période et donc le risque de lessivage de celui-ci durant l'hiver (Morris et al., 2010 ; Soane et al., 2012 ; Thomas et Archambeaud, 2016).

La gestion des adventices, ravageurs et maladies est également différente en TCS qu'en labour. L'incidence des adventices monocotylédones pérennes et des céréales spontanées est plus importante en TCS qu'en labour. En effet, ces plantes sont sensibles aux perturbations mécaniques qui sont de fait absentes ou du moins très réduites en TCS (Morris et al., 2010 ; Soane et al., 2012). Cependant, les cultures conduites sans labour sont moins susceptibles d'être envahies par des espèces adventices dicotylédones car ces espèces produisent des semences caractérisées par une dormance et une longévité plus importante qui sont plus adaptées au labour puisque leur germination et leur mortalité diminue avec l'augmentation de la profondeur du sol. Le labour a également comme désavantage de ramener en surface des graines d'adventices précédemment enfouies qui pourront alors germer (Morris et al., 2010). De plus, en TCS, les résidus de cultures laissés en surface créent un ombrage qui limite la germination des adventices et inhibent la croissance des plantules de certaines espèces d'adventices (Soane et al., 2012). Le maintien d'un mulch de résidus en surface en TCS tend à

augmenter les populations de limaces qui peuvent causer des dégâts importants sur les jeunes semis. L'utilisation de molluscicides peut être une solution mais cela provoque une augmentation des coûts de production et, de plus, ils peuvent également avoir un impact négatif sur les organismes bénéfiques antagonistes des pestes. Les résidus laissés en surface peuvent jouer le rôle de réservoirs de pathogènes et donc contribuer au développement de maladies dans les cultures nouvellement implantées, en particulier lorsqu'une même espèce est cultivée deux années de suite (Soane et al., 2012 ; Morris et al., 2010).

Concernant les performances à la récolte, les TCS permettent d'avoir des rendements similaires à ceux obtenus en labour (marge de 5 %). Cependant, il existe une période de transition de quelques années (1 à 2 ans) après l'abandon du labour durant laquelle les rendements sont significativement plus faibles. Ces pertes de rendement s'expliquent par : la compaction due à la récolte précédente qui a lieu avant que la portance du sol n'ait augmenté ; le temps limité pour l'apparition des facteurs favorables à la structure du sol (accumulation de MO, porosité, ...) ; la disponibilité moindre de l'azote (voir ci-dessus) ; le manque de connaissances des agriculteurs néophytes dans le domaine de l'agriculture de conservation (Soane et al., 2012). La qualité des récoltes est, quant à elle, rarement étudiée dans les recherches concernant les TCS.

2.3.4. Autres considérations

Outre ses impacts sur la structure et la biologie du sol et leurs conséquences pour les cultures, l'arrêt du labour a également des impacts plus directs sur le fonctionnement des exploitations agricoles. En premier lieu, l'adoption des TCS permet de gagner du temps à des périodes importantes comme le semis puisque la préparation du sol est simplifiée comparé à une implantation avec labour. Ce gain de temps peut être mis à profit pour réaliser le semis dans les meilleures conditions possibles (Bertin, 2017). Ensuite, les outils utilisés en TCS demandent une puissance de traction plus faible que la charrue à versoir utilisée en système conventionnel. Ainsi, à long terme, les coûts de mécanisation se réduisent en TCS. La puissance de traction nécessaire étant plus faible en TCS, des économies substantielles de carburant (jusqu'à 60 % de carburant consommé en moins) sont également caractéristiques des systèmes sans labour (Derpsch et al., 2010).

En contrepartie de ces avantages, les systèmes sans labour nécessitent une observation attentive des cultures, notamment en ce qui concerne la gestion des adventices ou l'évaluation de la pression en maladies. La gestion de ces dernières requiert en général un allongement des rotations, ce qui contribue à complexifier le système comparé à des systèmes parfois très simplifiés (monocultures) pratiqués en conventionnel (Bertin, 2017).

Chapitre 3 : Travail du sol en bandes ou strip-till

3.1. Description de la technique

3.1.1. Historique et définition

Historiquement, la technique du strip-till (en français : travail du sol en bande) a été mise au point aux Etats-Unis pour lutter contre les problèmes d'érosion. Utilisant d'abord le semis direct comme alternative au labour, les agriculteurs américains ont constaté une augmentation progressive de la compaction de leur sol, préjudiciable au rendement des cultures. Ils se sont donc rendus compte qu'une certaine décompaction du sol sur la ligne de semis était nécessaire pour garder des rendements acceptables (Roisin et al., 2013). Peu d'études sur le strip-till ont été réalisées en Belgique (Ryken et al., 2018) excepté certaines recherches menées par le Centre wallon de Recherches agronomiques (CRA-W) depuis 2001 en culture de betteraves (Roisin, 2014), c'est pourquoi beaucoup d'articles servant de références ici sont d'origine américaine.

L'objectif du strip-till est donc de concentrer le travail du sol uniquement sur les futures lignes de semis (Bousquet et Brun, 2015). De manière formelle, le strip-till est défini comme n'importe quelle pratique culturale qui restreint les perturbations liées au travail du sol à moins d'un tiers de la surface du champ cultivé, comme illustré à la Figure 1 (Morrison, 2002 ; Roger-Estrade et al., 2014 ; Morris et al., 2007). En fonction de la culture implantée, de l'état de la terre et de l'outil utilisé, le travail du sol sur la bande peut être plus ou moins superficiel ou profond, minimal (un seul passage) ou intensif (Morris et al., 2007). Les cultures pouvant être implantées avec ce type de techniques doivent avoir un écartement entre rangs suffisant, vu la définition, que pour perturber moins d'un tiers de la surface du sol. En Belgique, cela concerne principalement le maïs, le colza et la betterave sucrière mais également, dans une moindre mesure et en supposant qu'elle soit implantée avec un semoir monograine, la féverole (Roisin, 2014 ; Bousquet et Brun, 2015). Le strip-till permet ainsi d'obtenir une ligne de semis travaillée et où les résidus ont été enlevés ou enfouis et un inter-rang intact, couvert par les résidus de culture (Morrison, 2002). L'intérêt du strip-till est donc de combiner la sécurité d'implantation liée à un travail conventionnel du sol, tout en réduisant considérablement la surface travaillée et donc de garder les avantages liés aux TCS (Thomas, 2011).

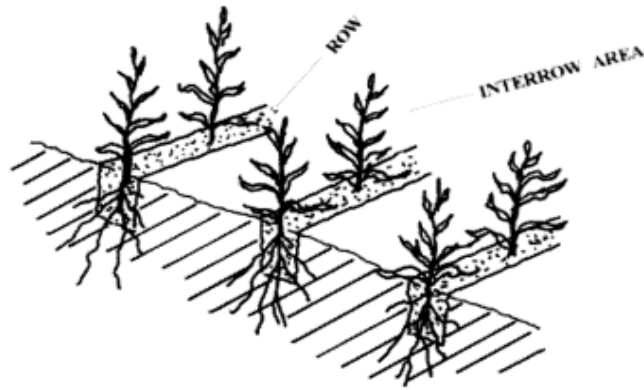


Figure 1 : Le strip-till est un système de travail du sol de conservation où moins d'un tiers de la surface du sol est perturbée.
Row = rang de la culture, Interrow area = inter-rang (Morrison, 2002).

3.1.2. Le strip-till en pratique

Outils

La technique utilisée dans ce mémoire, qui inclut l'utilisation d'un décompacteur (Figure 2a) dont les dents, réglées à un écartement de 45 cm pour correspondre à l'écartement des rangs de betteraves (voir Deuxième partie : Matériels et méthodes), laisse une surface du champ couverte de résidus suffisante, peut donc être considérée comme une technique de strip-till (Raper, 2005). Il existe cependant des outils exclusivement dédiés au strip-till, équipés de roues de jauges contrôlant la profondeur de travail, de disques permettant de couper les résidus et de les enlever de la ligne et de roues de rappui confinant la terre sur la ligne (Figure 2b, Kuhn, 2013).



Figure 2a



Figure 2b

- Roue de rappui avec une pression suffisante pour casser les mottes sèches
- Dent à une profondeur entre 15 et 20 cm
- Disque ouvreuse entre 4 et 6 cm de profondeur
- Disque déflecteurs avec un peu de pression pour foisonner la ligne de semis
- Chasse débris légèrement agressif – pailles légères

Figure 2 : a : Décompacteur utilisé pour le strip-till dans l'essai étudié dans ce mémoire. b : Outil de strip-till spécialisé de la firme Kuhn.

Les outils spécialisés, tels que celui présenté à la Figure 2b, peuvent également être équipés pour placer une fertilisation minérale localisée dans la ligne travaillée. D'autres outils, comme ceux utilisés pour l'incorporation de fertilisants organiques, peuvent également être considérés comme des outils de strip-till, pourvu qu'ils laissent une surface de sol couverte de résidus non perturbés suffisante (Morrison, 2002). La nécessité de devoir semer la culture exactement à l'aplomb des lignes travaillées par l'outil de strip-till rend quasiment indispensable l'utilisation de l'autoguidage GPS-RTK (Real Time Kinematic, permettant de corriger le signal GPS).

Culture de colza

Le colza est la seule culture d'hiver ayant un écartement entre rangs suffisant pour pouvoir être implantée avec la technique du strip-till (Bousquet et Brun, 2015). En fonction de la nature du sol, le passage du strip-till peut avoir lieu à des moments différents. En cas de sols argileux (plus de 35 % d'argile), le travail profond réalisé par le strip-till doit obligatoirement être fait sitôt la parcelle récoltée, 10 jours à trois semaines avant le semis. Une reprise superficielle par passage avec un outil à disque sur le rang peut éventuellement se faire avant le semis pour affiner la terre. Dans cette configuration, il faut adopter une vitesse d'avancement élevée lors du strip-till, de l'ordre de 8 à 12 km/h, pour maximiser l'émiettement. La profondeur de travail est généralement comprise entre 15 et 18 cm, résultat d'un compromis entre humidité du sol, émiettement de la terre, puissance requise et vitesse permise. En cas de sols légers (moins de 20 % d'argile), voire intermédiaire (entre 20 et 35 % d'argile), le strip-till peut précéder le semis de seulement quelques jours ou même être combiné avec celui-ci si l'équipement disponible le permet (Brun et Sauzet, 2017).

Cultures de printemps

Le travail du sol pour les cultures de printemps (maïs et betterave principalement) avec un outil de strip-till suit la même logique que le labour avec une période de travail différenciée en fonction de la texture du sol.

En cas de terres lourdes, dont la teneur en argile est supérieure à 35 %, ou en cas de semis de printemps précoces en sols intermédiaires (taux d'argile entre 20 et 35 %), le strip-till doit de préférence avoir lieu à l'automne (Brun et Légère, 2017 ; Morrison, 2002). Il faut intervenir tôt, dans de bonnes conditions d'humidité du sol pour réaliser un travail satisfaisant. Des conditions de sol semi-plastique, entraînant l'apparition de lissages et favorisant le bourrage des pièces travaillantes, peuvent être rencontrées en cas de passage trop tardif. Fin septembre semble donc être une date limite mais il peut y avoir des exceptions comme c'est le cas pour le semis d'un maïs sur maïs (Brun et Légère, 2017). L'objectif du strip-till à cette période est de créer une butte relativement grossière sur le rang. Cette butte sera alors exposée aux agents climatiques de l'hiver (alternances gel/dégel et humectation/dessication) qui vont la faire évoluer et la raffermir avant le semis (Brun et Légère, 2017 ; Kuhn, 2013). Pour créer cette butte, il faut que la vitesse d'avancement lors du passage soit modérée (6 à

8 km/h), il faut que les chasses débris, si la machine en est équipée, nettoient la ligne des résidus de culture, il faut aussi pincer les disques de canalisation lorsqu'ils sont présents pour guider la terre sur le rang travaillé et, enfin, il faut enlever l'équipement de finition arrière. La profondeur de travail à l'automne peut être de 15 à 30 cm, voire même de 45 cm dans l'essai réalisé ici (Brun et Légère, 2017). Le travail d'automne, réalisé plusieurs mois avant le semis de la culture, interdit la localisation de la fertilisation azotée. Cependant, une fumure de fond peut éventuellement être réalisée à ce moment (Brun et Légère, 2017 ; Kuhn, 2013). Si la terre travaillée au strip-till doit être occupée par un couvert végétal pendant l'interculture, le travail du sol devra avoir lieu juste après le semis du couvert ou dans le couvert vivant développé bien qu'il puisse y avoir un risque de bourrages en cas de fortes biomasses et d'écartement de travail faible (Brun et Légère, 2017). Au printemps, une reprise superficielle de la bande travaillée est possible une semaine à un mois et demi avant le semis pour affiner les premiers centimètres de l'horizon. Cette reprise peut être réalisée avec un outil de strip-till spécialisé, comme celui de la Figure 2b, dont les dents sont réglées pour travailler à une profondeur de 5 à 15 cm et avec une vitesse d'avancement assez rapide (8 à 12 km/h) favorisant l'émiettement de la terre (Kuhn, 2013). Cette reprise n'est cependant pas une obligation puisque le semoir utilisé pour l'implantation de la culture permettra également de créer un lit de germination suffisamment affiné pour favoriser la levée de la culture.

En cas de sols légers, ayant une teneur en argile inférieure à 20 %, le passage du strip-till peut être retardé et avoir lieu au printemps, quelques jours à un mois et demi avant le semis. L'objectif à cette période est essentiellement d'émietter la terre sur la bande travaillée. Dans cette optique, l'outil est réglé pour travailler superficiellement (de 5 à 15 cm de profondeur), les chasses-débris sont enlevés afin de maintenir la terre sur la bande travaillée et la vitesse d'avancement est assez élevée, de l'ordre de 10 à 12 km/h (Brun et Sauzet, 2017 ; Kuhn, 2013). Le passage du strip-till à cette période, peu de temps avant le semis, autorise le placement d'une fertilisation azotée dans la ligne (Kuhn, 2013).

3.2. Impacts du strip-till sur les propriétés physico-chimiques du sol

3.2.1. Température et humidité

Le strip-till permet un réchauffement plus rapide du sol au printemps, dans la ligne travaillée, qu'en cas de semis direct. Cette augmentation de température est due au fait que les résidus de culture sont enlevés de la ligne grâce au travail réalisé par l'outil de strip-till et que ces résidus, lorsqu'ils sont présents, reflètent les rayons solaires et les empêchent d'atteindre le sol (Licht et Al-Kaisi, 2005 ; Morrison, 2002).

Licht et Al-Kaisi (2005) ainsi que Laufer et al. (2016) ont également montré que le strip-till permet de mieux conserver l'humidité du sol qu'en cas de travail conventionnel, où toute la surface du champ est travaillée. Les valeurs d'humidité du sol en strip-till, à faible profondeur, sont similaires à celles obtenues en semis direct. Par ailleurs, l'humidité du sol est plus faible dans le rang travaillé par l'outil de strip-till que dans l'inter-rang non travaillé. La présence de

résidus dans l'inter-rang, qui réduisent l'évaporation et augmentent l'infiltration de l'eau, peut être une des raisons de cette humidité plus importante (Übelhör et al., 2014).

3.2.2. Matière organique

L'étude réalisée par Fernández et al. (2015) montre plusieurs effets du strip-till sur la matière organique du sol. Ils ont remarqué que le taux de MO du sol est plus élevé en strip-till qu'en semis direct. Cette augmentation a également été remarquée, dans une moindre mesure, dans une étude réalisée par Laufer et al. (2016). Deux causes peuvent expliquer cette augmentation de la teneur en MO. D'abord, la température plus élevée du sol (voir section précédente) ainsi que son aération plus importante en strip-till qu'en semis direct peuvent accélérer la vitesse de décomposition des matériaux organiques. Une autre explication provient du fait que le rendement en grain du maïs, dans cette étude, est plus élevé en strip-till qu'en semis direct. Or la quantité de résidus produite par la culture est positivement corrélée au rendement en grain. Un rendement plus élevé en strip-till signifie donc une plus grande quantité de MO de retour vers le sol. De plus, le strip-till, comme les autres TCS, entraîne également une augmentation de la teneur en MO comparé au labour (Laufer et al., 2016).

Un autre effet du strip-till est l'augmentation de la teneur en MO dans l'inter-rang, en comparaison avec la teneur dans la ligne travaillée (Fernández et al., 2015 ; Morris et al., 2010). Cette augmentation s'explique facilement par l'effet que le strip-till a sur la localisation des résidus de culture. En effet, les équipements de strip-till, comme expliqué précédemment, sont équipés de disques qui nettoient la ligne travaillée des résidus et les déplacent dans l'inter-rang. De plus, le strip-till peut entraîner une perte de MO du sol par oxydation dans la ligne travaillée car la température y est plus élevée (Morris et al., 2010).

Enfin, il est observé, aussi bien en strip-till qu'en semis direct, que la teneur en MO est plus élevée dans les horizons de surface du sol que plus en profondeur (Fernández et al., 2015). Cette augmentation du taux de MO est le résultat de l'addition des résidus de culture en surface dans les systèmes de travail du sol de conservation alors qu'en système conventionnel les résidus sont mélangés au sol sur l'ensemble du profil cultivé (voir section 2.2.2).

3.2.3. Résistance à la pénétration

La résistance à la pénétration est un paramètre souvent mesuré dans les études évaluant l'impact du travail du sol sur son état physique, en particulier son état de compaction. Une compaction excessive du sol a en effet des impacts importants sur sa porosité, sa structure ainsi que sur la capacité des racines des plantes à le traverser. Ces impacts ont à leur tour des effets sur le développement de la culture et, au final, sur son rendement (Licht et Al-Kaisi, 2005).

De nombreuses études (Fernández et al., 2015 ; Übelhör et al., 2014 ; Laufer et al., 2016 ; Licht et Al-Kaisi, 2005) ont montré l'effet du strip-till sur la résistance à la pénétration du sol. L'effet le plus marqué, et le plus évident, du strip-till est une diminution de la résistance à la pénétration dans la ligne travaillée par rapport à la résistance dans l'interligne. Ces auteurs ont également mis en évidence une augmentation de la résistance à la pénétration avec la profondeur.

Cette réduction de la résistance du sol dans le rang de la culture est précisément ce que l'on cherche à faire avec la technique du strip-till. En effet, les conditions qui limitent la pénétration des racines dans le sol ainsi que leur élongation ont souvent pour effet de réduire le développement des plantes et donc le rendement final de la culture car les ressources en eau et en nutriments présentes derrière la zone compactée ne sont plus disponibles pour les plantes (Fernández et al., 2015). Travailler le sol uniquement dans la ligne permet ainsi de mettre en place des conditions favorables pour les plantes sans pour autant perturber tout le volume de la couche arable.

3.2.4. Densité apparente

La densité apparente, c'est-à-dire la masse de solide présente dans un certain volume de sol, est fortement impactée par le travail du sol. A long terme, les sols cultivés avec la technique du strip-till ont tendance à avoir des densités apparentes plus faibles qu'en semis direct ou qu'en labour (Fernández et al., 2015 ; Jabro et al., 2011). La réduction de densité apparente s'explique par l'augmentation de la teneur en MO dans les sols cultivés avec le strip-till car la densité des particules de MO est plus faible que celle des particules minérales (Fernández et al., 2015 ; Übelhör et al., 2014).

Il a également été remarqué qu'en strip-till la densité apparente est plus faible dans le rang de la culture que dans l'inter-rang (Fernández et al., 2015 ; Übelhör et al., 2014). Le travail réalisé par la dent de décompaction de l'outil de strip-till ainsi que l'action des racines de la culture, localisées dans le rang précédemment travaillé, sont les principales raisons qui permettent d'expliquer cette diminution de la densité (Fernández et al., 2015).

La diminution de la densité du sol dans la ligne de strip-till reflète une diminution de la compaction du sol à cet endroit (également mise en évidence par la diminution de la résistance à la pénétration, voir section 3.2.3) qui va favoriser l'exploration et l'exploitation du sol par les racines des plantes cultivées (Jabro et al., 2011).

3.2.5. Stabilité structurale

La stabilité structurale est une mesure de la stabilité des agrégats du sol et de leur résistance à la dégradation sous l'action de l'eau (Al-Kaisi et al., 2014). Fernández et al. (2015) ont montré que l'influence du strip-till sur la stabilité des agrégats du sol est contrastée. Ils ont d'abord

remarqué que la stabilité est plus grande dans l'inter-rang que dans le rang de la culture. Cependant, d'après leur résultat, la stabilité dans l'inter-rang est plus faible en strip-till qu'en semis direct. L'augmentation de la stabilité dans l'inter-rang s'explique facilement par l'augmentation de la teneur en MO à cet endroit. En effet, de nombreux auteurs ont montré la corrélation étroite qui existe entre la teneur en MO et la stabilité des agrégats (Chenu et al., 2000 ; Al-Kaisi et al., 2014). Les auteurs n'ont pas été capables d'expliquer pourquoi la stabilité était inférieure en strip-till qu'en semis direct. Dans cette même étude réalisée par Fernández et al. (2015), l'augmentation de la densité apparente dans l'inter-rang devrait plutôt suggérer une diminution plutôt qu'une augmentation de la stabilité structurale.

3.2.6. Infiltration de l'eau

Jabro et al. (2011) ont démontré que le strip-till, comparé à un travail conventionnel, permet d'améliorer l'infiltration de l'eau dans le sol. Cette amélioration semble être une conséquence de la réduction de la compaction du sol qui se traduit par une réduction de la densité apparente et donc une augmentation de la porosité qui permet finalement une meilleure infiltration de l'eau. L'effet positif du strip-till sur l'infiltration de l'eau a également été montré par Laufer et al. (2016) dans un essai réalisé sur un sol de loess en Allemagne.

3.3. Impacts du strip-till sur la vie biologique du sol

3.3.1. Populations microbiennes

Peu d'études ont été réalisées à ce jour concernant l'effet du strip-till sur les populations de microorganismes du sol et sur leur activité. Une étude réalisée en Pologne comparant l'effet de plusieurs itinéraires de travail du sol, dont le strip-till, sur le nombre de microorganismes et sur l'activité de différentes enzymes a été réalisée en 2016 en culture de betteraves sucrières (Niewiadomska et al., 2016). Les résultats de cette étude montrent que le nombre total de bactéries dans le sol est plus élevé en strip-till qu'en travail du sol conventionnel avec labour. Le strip-till semble également augmenter le nombre d'actinobactéries, un groupe de microorganismes indicateur de la fertilité du sol. Une étude, examinant l'effet du strip-till et évaluant la valeur de différents paramètres en rapport avec la vie microbienne du sol en fonction de la position par rapport au rang travaillé, a été réalisée aux Etats-Unis (Overstreet et Hoyt, 2008). Cette étude a montré que la respiration potentielle du sol et la minéralisation de l'azote, reflets de son activité biologique, sont plus élevées dans l'inter-rang que dans la ligne de strip-till. Cette stimulation de l'activité biologique dans l'inter-rang est le résultat de l'accumulation de résidus de culture, source de nourriture et abri pour les microorganismes, à cet endroit. Leur étude montre que la biomasse microbienne est également plus élevée dans l'inter-rang du strip-till.

Les enzymes du sol constituent un bon indicateur de son activité microbienne. Les enzymes les plus souvent étudiées en rapport avec l'activité microbienne du sol sont les déshydrogénases et les phosphomonoestérases. L'activité de la déshydrogénase est plus élevée en strip-till, et de manière générale en TCS, comparé au labour (Niewiadomska et al., 2016). Il semble qu'une augmentation de l'humidité du sol en strip-till (voir section 3.2.1) soit responsable de cette stimulation de l'activité de la déshydrogénase. L'activité de la phosphomonoestérase est plus importante en strip-till que pour les autres techniques de travail du sol, comme le labour (Niewiadomska et al., 2016). L'augmentation de l'activité de la phosphomonoestérase semble être liée à l'augmentation de la masse des racines qui génère une sécrétion plus intense d'enzymes dans la rhizosphère par les racines et par les bactéries s'y développant.

3.3.2. Microfaune

Les nématodes sont une population d'animaux ayant la forme de vers ronds microscopiques jouant un rôle important dans le recyclage des nutriments du sol. Ils peuvent être un bon indicateur des conditions globales des écosystèmes vu leur grande diversité d'habitats, de sources de nourriture et parce que la composition de leur communauté reflète celle de l'environnement dans lequel on les retrouve (Neher, 2001). Une étude réalisée aux États-Unis par Overstreet et al. (2010) a étudié l'effet du strip-till sur les populations de nématodes du sol. Les résultats de cette étude suggèrent que celles-ci semblent être plus importantes en strip-till qu'en labour. Cela pourrait laisser penser que des problèmes dus aux nématodes parasites des plantes sont plus susceptibles d'avoir lieu en strip-till. Cependant, leur étude a également montré que l'abondance de nématodes phytopathogènes n'est pas forcément plus élevée en strip-till qu'en labour (Overstreet et al., 2010).

3.3.3. Macrofaune

De nombreux arthropodes épigés comme les carabes, les staphylins ou certaines araignées sont des prédateurs généralistes qui permettent la régulation des populations d'insectes dans les agroécosystèmes, en particulier les populations d'insectes ravageurs des cultures ou vecteurs de maladies comme les pucerons. Hummel et al. (2002) ont réalisé une étude analysant l'impact de différentes pratiques culturales, dont le strip-till, sur les populations d'arthropodes bénéfiques en culture de légumes. Les résultats de leur étude semblent montrer qu'il y a une augmentation des populations d'arthropodes lorsque la culture est implantée avec la technique du strip-till comparé à une implantation classique avec labour.

Les lombrics sont un autre groupe d'animaux extrêmement importants pour le fonctionnement du sol vu le rôle qu'ils jouent dans la décomposition des résidus de surface, dans la distribution de la matière organique dans le profil de sol et dans la modification des propriétés physiques du sol, comme sa porosité (Overstreet et al., 2010 ; Kladvik, 2001). Le

travail du sol a de nombreux impacts sur les populations de lombrics. Ces impacts peuvent être directs, comme la blessure des lombrics lors du passage des outils, ou indirects en favorisant la prédation par les oiseaux, en augmentant la radiation solaire à la surface du sol ou encore en accélérant la décomposition de la MO du sol. Le strip-till a un effet favorable sur les populations de lombrics comparé au travail conventionnel du sol. En effet, le passage du strip-till laisse un inter-rang non travaillé qui sert de refuge pour certains organismes du sol, dont les lombrics. De plus, les résidus laissés en surface dans l'inter-rang suite au passage de l'outil de strip-till fournissent aux lombrics une source de nourriture alors que ces résidus sont enfouis et potentiellement inaccessibles suite à un labour (Overstreet et al., 2010).

3.4. Conséquences pour les cultures

3.4.1. Implantation et développement des cultures

La préparation des terres avec un outil de strip-till en vue du semis, si elle suit la même logique que pour le labour en ce qui concerne les périodes de travail en fonction de la texture du sol, nécessite cependant un matériel spécifique décrit à la section 3.1.2. Logiquement, que le strip-till soit réalisé avec un décompacteur ou avec un outil spécifique, le semis de la culture doit être réalisé à l'aplomb des lignes travaillées. Le passage de l'outil de strip-till peut également être mis à profit pour placer une fertilisation localisée dans la ligne de semis, ce qui permettra un développement plus rapide de la culture.

En ce qui concerne le développement des cultures, certaines études ont montré une prolongation de la période d'émergence des plantules, notamment les plantules de betteraves, suite à une implantation via un travail du sol au strip-till par rapport à une implantation avec labour (Roisin, 2014 ; Laufer et Koch, 2017 ; Morris et al., 2007) alors que d'autres études ont montré ou suggèrent que la levée est plus rapide après strip-till, particulièrement en culture de maïs (Trevini et al., 2013 ; Fernández et al., 2015 ; Licht et Al-Kaisi, 2005). La prolongation de la période d'émergence des plantules de betteraves peut s'expliquer par l'obtention d'un lit de semences plus grossier et moins rattaché suite à un travail au strip-till comparé à une implantation classique (Roisin, 2014 ; Laufer et Koch, 2017). Ce lit de semences est moins favorable à la germination des graines de betteraves car le contact sol-graines résultant est moins bon qu'en cas de terre fine. Ce retard à la levée est néanmoins sans conséquence sur l'émergence finale des plantules de betteraves (Laufer et Koch, 2017).

L'amélioration des caractéristiques physiques du sol en strip-till (voir paragraphe 3.2), comme la réduction de la résistance à la pénétration ou de la densité apparente, devrait permettre un meilleur développement des racines des plantes, en particulier les racines de betteraves qui sont très sensibles aux défauts de structure du sol (Vandergeten et Roisin, 2004). Un meilleur développement des racines leur permettra d'explorer un volume de sol plus important à la recherche d'éléments nutritifs et d'eau pour satisfaire les besoins de la plante.

3.4.2. Disponibilité en éléments nutritifs

Peu de données sont disponibles en ce qui concerne une éventuelle modification de la disponibilité en éléments minéraux nutritifs pour les plantes suite à l'adoption du strip-till. Une étude réalisée par Gaj et al. (2015) évaluant l'effet de la simplification du travail du sol en culture de betterave sucrière, et notamment l'effet du strip-till, sur le statut nutritionnel des betteraves a entre autres montré que la nutrition des plantes en phosphore (P) peut être insuffisante dans les systèmes simplifiés. En effet, le sol peut avoir une densité plus importante en TCS ce qui freine le développement des racines alors que celles-ci sont essentielles pour la nutrition en P car cet élément est peu mobile dans le sol (Gaj et al., 2015). Cependant les effets que le strip-till a sur le sol amène à penser que la disponibilité en éléments nutritifs peut être aussi importante qu'en système conventionnel car les racines peuvent explorer un grand volume de sol sans rencontrer de résistance grâce à la décompaction sur la ligne. De plus l'aération et le réchauffement du sol dans la ligne cultivée entraînent normalement une minéralisation des matériaux organiques qui les rend disponibles pour les plantes.

3.4.3. Dynamique et gestion des adventices

La dynamique des populations d'adventices en strip-till peut en partie être expliquée par les dynamiques de ces populations en travail conventionnel et en non travail du sol appliquées à la ligne de strip-till et à l'interligne, respectivement (Brainard et al., 2013). Pour plusieurs raisons invoquées ci-après, la dynamique des adventices est cependant plus compliquée que cela. En effet, en strip-till, les propagules des adventices peuvent être déplacées de la zone travaillée à la zone adjacente et vice-versa via notamment le travail du sol ou la dispersion des graines de plantes ayant poussé dans une des zones. Les facteurs biotiques et abiotiques qui influencent la dynamique des populations d'adventices peuvent également être influencés par les zones adjacentes (par ex. : l'humidité plus importante dans la zone non travaillée de l'inter-rang peut influencer l'humidité de la zone travaillée). Enfin, la position de la ligne travaillée peut ou non varier d'une année à l'autre ce qui peut influencer la dynamique de développement des adventices puisque le travail du sol a une influence indirecte sur les adventices via la modification des caractéristiques du sol (Brainard et al., 2013).

Les adventices hivernales, biennuelles et pérennes sont souvent bien établies au moment du strip-till, à l'automne ou au printemps. Si aucune mesure n'est prise pour limiter la croissance et le développement de ces adventices, elles pourront survivre et se reproduire dans l'inter-rang non perturbé (Brainard et al., 2013). La germination des adventices annuelles estivales est souvent moindre dans l'inter-rang non travaillé car la température y est généralement plus faible (voir section 3.2.1) et les graines y sont moins stimulées (pas de perturbations du sol) en comparaison avec la ligne de strip-till (Brainard et al., 2013 ; Hosking et Bloomer, 2006). L'émergence des adventices estivales est généralement moindre en strip-till qu'en travail conventionnel ou qu'en semis direct (Brainard et al., 2013 ; Trevini et al., 2013). La distribution

verticale des propagules d'adventices et leur prédation est également modifiée en strip-till. Les semences situées ou apportées dans l'inter-rang non travaillé sont plus susceptibles de demeurer à la surface ou proche de la surface du sol alors que celles situées dans la ligne travaillée peuvent être enterrées plus profondément suite au passage des éléments travailleurs de l'outil de strip-till (Brainard et al., 2013). La distribution plus superficielle des semences d'adventices en strip-till, en particulier dans l'inter-rang, peut favoriser leur prédation par les auxiliaires des cultures comme les carabes ou les oiseaux (Brainard et al., 2013).

La gestion des adventices en strip-till peut être réalisée via une utilisation judicieuse des couverts végétaux car leurs résidus, localisés dans l'inter-rang, peuvent limiter l'émergence des plantules d'adventices et augmenter leur mortalité via la pénétration moindre de la lumière au travers des résidus, la création d'une barrière physique par ceux-ci et l'augmentation de la prédation, entre autres (Brainard et al., 2013). La modification de la position de la ligne travaillée au strip-till d'une année à l'autre peut également servir à lutter contre les adventices en modifiant la distribution verticale des semences et en augmentant la mortalité des adventices pérennes (Brainard et al., 2013). Les cultures implantées via le strip-till, comme la betterave ou le maïs, ont un écartement entre rangs suffisant pour pouvoir envisager un désherbage mécanique de l'inter-rang de la culture à l'aide d'outils spécialisés comme la bineuse (Bertin, 2017 ; Brainard et al., 2013). La localisation de la fertilisation dans la ligne de la culture, en strip-till, peut également permettre de réduire la compétition des adventices comparé à une fertilisation en plein, sur toute la surface du champ (Brainard et al., 2013).

3.4.4. Ravageurs et maladies des cultures

Comme dans le cas du semis direct (voir section 2.2.3), la présence de résidus en surface, localisés dans l'inter-rang dans les cultures implantées au strip-till, peut avoir des conséquences sur la pression exercée par les maladies et les ravageurs. Les résidus peuvent par exemple constituer un réservoir de pathogènes qui pourront être transmis à la culture ou constituer un refuge pour certains ravageurs, comme les limaces (Hosking et Bloomer, 2006).

3.4.5. Rendement des cultures

La localisation du travail du sol à la bande de semis impacte peu ou pas le rendement des cultures. En culture de maïs, plusieurs études montrent que le rendement en grains en strip-till est similaire à celui obtenu en semis direct ou via un travail du sol simplifié (Trevini et al., 2013 ; Morrison, 2002 ; Licht et Al-Kaisi, 2005).

En culture de betteraves, certaines études montrent une légère diminution du rendement suite à une préparation du sol au strip-till comparé à une implantation classique avec labour ou avec une préparation superficielle (Roisin, 2014 ; Laufer et Koch, 2017) alors que d'autres

études montrent un rendement en strip-till similaire à ceux obtenus en labour ou travail simplifié (Gaj et al., 2015). Le rendement plus faible obtenu en strip-till reporté par Laufer et Koch (2017) s'explique par une moindre croissance précoce des plantules de betteraves due à une période d'émergence prolongée et à la diminution consécutive de l'indice de surface foliaire. Roisin (2014) explique la diminution de rendement observée en strip-till par la production de racines longues mais de faible diamètre à cause de la formation d'un « V » de décompaction trop étroite suite au passage de l'outil de strip-till ainsi que par un affinement insuffisant de la terre qui entraîne un retard de croissance des semis et un manque de pieds de betterave levés. Quoi qu'il en soit, ces auteurs ne reportent pas de différences importantes de rendements obtenus via une préparation du sol limitée à la bande de semis.

3.5. Impacts du strip-till sur l'environnement

3.5.1. Séquestration de carbone dans les sols

Des résultats obtenus par Al-Kaisi et Yin (2005) montrent qu'à court terme adopter des pratiques de travail du sol moins intensives et laissant une quantité importante de résidus de culture ou de couverts végétaux en surface, comme le strip-till, permet de réduire les émissions de dioxyde de carbone des sols cultivés et donc de séquestrer ce carbone dans le sol.

3.5.2. Erosion du sol et ruissellement

Beaucoup d'études ont montré l'effet du strip-till sur la réduction de l'érosion du sol et du ruissellement de l'eau et des particules, comparé au labour (Ryken et al., 2018 ; Laufer et al., 2016 ; Übelhör et al., 2014). Les raisons qui expliquent cette moindre érosion sont multiples. Une première raison est la présence d'une quantité importante de résidus sur une proportion élevée de la surface du champ cultivé via la technique du strip-till. Les résidus protègent le sol de l'impact des gouttes de pluie, protégeant ainsi les agrégats du sol de la dégradation, et ils augmentent la rugosité du sol, ce qui a pour effet de réduire la vitesse d'écoulement de l'eau ainsi que sa capacité à transporter des sédiments (Ryken et al., 2018 ; Laufer et al., 2016). Une autre raison de l'érosion moindre observée en strip-till est la plus grande présence de macropores avec une connectivité importante due à une moindre perturbation du sol par les outils de préparation des terres et par le nombre plus élevé de lombrics (voir section 3.3.3). Ce réseau de macropores interconnectés permet une meilleure infiltration de l'eau dans le sol et donc une moindre érosion et un ruissellement moins important en strip-till qu'en travail conventionnel (Ryken et al., 2018 ; Laufer et al., 2016). Enfin, la teneur plus importante en matière organique, qui agit comme une colle entre les particules minérales, des sols cultivés au strip-till permet la formation d'agrégats stables en proportion plus élevée qu'en labour. Cette stabilité plus importante des agrégats contribue à réduire la concentration en sédiments

dans les eaux de ruissellement, réduisant ainsi également la force érosive de celles-ci (Ryken et al., 2018 ; Laufer et al., 2016).

Chapitre 4 : Couverts végétaux

La plupart des informations présentées dans les trois premières sections de ce chapitre sont issues du livre de Frédéric Thomas et Matthieu Archambeaud : « Les couverts végétaux. Gestion pratique de l'interculture » paru aux éditions France Agricole (2^{ème} édition, 2016). Dans le cas contraire, l'information est référencée de la même manière que précédemment.

4.1. Renouveau de la fertilité dans les systèmes agraires

Historiquement, avant la première révolution agricole des Temps modernes, le renouvellement de la fertilité des terres cultivées était assuré par la présence dans la rotation d'une jachère herbeuse. Le parcage de nuit sur cette jachère des animaux ayant préalablement pâture les prairies situées sur les terres moins fertiles (systèmes agraires à jachère et culture attelée légère des régions tempérées), puis l'épandage sur cette jachère du fumier produit par les animaux logés à l'étable et nourris avec des fourrages récoltés sur des prairies dédiées (systèmes agraires à jachère et culture attelée lourde) assuraient un transfert de fertilité depuis les terres incultes vers les terres cultivées. Après la première révolution agricole des Temps modernes, la jachère est remplacée par une culture (prairie artificielle ou culture sarclée) produisant une biomasse importante et fixant un maximum de matières minérales qui ne sont ainsi plus susceptibles d'être soustraites au sol par le drainage, le lessivage et la dénitrification. La restitution au sol de ces matières organiques et minérales en les enfouissant comme « engrais vert » ou en enfouissant les déjections des animaux les ayant consommées permettait le renouvellement durable de la fertilité des terres cultivées (systèmes agraires sans jachère des régions tempérées). L'essor rapide de l'industrie après la Seconde Guerre mondiale, rejaillissant sur l'agriculture, permet la motorisation et la mécanisation des exploitations ainsi que la fabrication en grandes quantités d'engrais minéraux et le développement d'espèces et de variétés à haut rendement. Le développement de l'industrie permet également la mise au point et la production de produits de protection des cultures efficaces. Simultanément, la révolution des transports permet le désenclavement des zones agricoles qui, mises en concurrence, se spécialisent dans certaines productions (céréaliculture, viticulture, maraîchage, élevage, ...). Le rôle fertilisant des prairies artificielles issues de la première révolution agricole des Temps modernes est devenu obsolète et la nutrition des plantes en vue d'assurer une récolte abondante est réalisée via l'épandage d'engrais minéraux de synthèse dont le prix défie toute concurrence. Cependant, malgré l'énorme gain de productivité réalisé grâce à la deuxième révolution agricole des Temps modernes, les contreparties sont telles que la durabilité des systèmes agraires issus de celle-ci est gravement menacée (Mazoyer et Roudart, 2002).

L'utilisation des couverts végétaux, dont l'utilisation et les impacts sont décrits plus en détails ci-dessous, est un moyen parmi d'autres de rétablir et de conserver la fertilité des sols agricoles mise à mal par les pratiques agricoles contemporaines.

4.2. Définition et évolution du concept

4.2.1. Interculture, cultures intercalaires et couverts végétaux

L'interculture est la période de temps séparant deux cultures principales. Cette période peut être mise à profit pour implanter une culture intercalaire ou intermédiaire, qui occupera le sol entre le moment où une culture principale est récoltée jusqu'au semis de la culture principale suivante. Cette pratique est le plus souvent réalisée entre une culture récoltée tôt et une culture de printemps (Justes et Richard, 2017 ; Bertin, 2017). Ces cultures intercalaires sont souvent appelées « couverts végétaux » dans le cadre de l'agriculture de conservation des sols (Justes et Richard, 2017).

4.2.2. Evolution du concept des couverts végétaux

De la prairie artificielle à la CIPAN

Comme expliqué dans le premier paragraphe de ce chapitre, la prairie artificielle qui, après la première révolution agricole des Temps modernes, permettait le renouvellement de la fertilité des terres cultivées a été supprimée progressivement à partir de la deuxième moitié du 20^{ème} siècle en conséquence de l'accès à des engrais de synthèse bon marché et d'autres facilités apportées par la révolution verte (Mazoyer et Roudart, 2002). Cependant, dès les années 1980, les premiers signes de nuisance des nouvelles pratiques agricoles apparaissent. La plus emblématique de ces nuisances est la pollution des cours d'eau par les nitrates d'origine agricole. Les origines de cette pollution sont multiples. Elles concernent en premier lieu la surfertilisation minérale apportée aux cultures qui a pour causes la dissociation de l'agriculture et de l'élevage, la réduction du coût des engrais de synthèse ainsi que la réduction du coût des carburants qui permet le transport sur de longues distances de ces engrais. La fertilisation en excès des cultures, qui n'est pas valorisée par celles-ci, entraîne une contamination des eaux de surface et souterraine par les anions dissous comme les nitrates et les sulfates qui sont lessivés vers les cours d'eau et les nappes phréatiques lors d'épisodes pluvieux intenses. Une autre origine de la pollution par les nitrates est la mauvaise gestion de la minéralisation d'automne de la matière organique. La période automnale est en effet une période suffisamment chaude et humide pour que la minéralisation de la MO du sol y soit importante. Les éléments libérés par cette minéralisation, dont l'azote, sont peu valorisés car, à cette époque de l'année, les cultures sont soit déjà récoltées (la terre est donc nue), soit peu développées (cultures dérobées) ou soit en fin de cycle et donc peu actives dans l'absorption des minéraux (cultures comme le maïs). Le risque de lessivage des nitrates suivi de la pollution des eaux est donc important à cette période de l'année. En réaction à cette problématique, la législation a donc imposé aux agriculteurs d'implanter dans les parcelles en intercultures des cultures intermédiaires pièges à nitrates (CIPAN, comme la moutarde ou la phacélie) qui permettent d'absorber les reliquats d'azote laissés par les cultures.

De la CIPAN aux couverts végétaux

Cependant, comme il est expliqué par Thomas et Archambeaud (2016), la surfertilisation n'est pas la seule cause du lessivage des nitrates. L'intensification du travail du sol, en particulier l'approfondissement du labour, permise par l'augmentation constante de la puissance des machines agricoles et causant une minéralisation accrue des MO du sol ainsi que la réduction de la fertilisation organique dans bon nombre d'exploitations ont eu pour conséquence une chute de la teneur en matière organique des sols. En parallèle, la simplification des rotations, laissant une part importante des terres nues pendant l'hiver, le tassement des sols, provoqués par l'accroissement du poids des engins circulant sur des sols pauvres en MO, et la diminution de l'activité biologique des sols, causée par l'intensification de l'usage des pesticides, ont conduit à une augmentation des risques de battance et de ruissellement des terres cultivées. Tous ces facteurs favorisent *in fine* le lessivage des nitrates et d'autres éléments comme les sulfates ainsi que l'arrachage de particules de la surface du sol. Face à ces constats, il y a eu une prise de conscience chez beaucoup d'acteurs du monde agricole de l'importance de revenir à une gestion responsable des systèmes de culture, basée sur le fonctionnement des écosystèmes cultivés. Certains agriculteurs envisagent autrement la période d'interculture et considèrent la culture intercalaire bien plus que comme une CIPAN. L'implantation de couverts végétaux adaptés permet, outre de capter les résidus d'azote des cultures précédentes, de fournir de l'humus au sol (engrais vert), d'améliorer la structure du sol et de la protéger de l'érosivité des pluies et de favoriser la vie biologique du sol, notamment les symbioses (mycorhizes, nodules de légumineuses) et les auxiliaires des cultures. Les couverts végétaux, auparavant implantés en réponse à une contrainte législative, font alors partie d'une démarche agronomique ayant des conséquences environnementale et économique positives.

4.3. Les couverts végétaux en pratique

4.3.1. Installation des couverts

Période

Deux types de couverts végétaux sont à distinguer en fonction de leur période d'implantation. Les couverts d'été sont semés après la moisson en juillet et août. Vu les quantités de ressources en lumière, chaleur et eau dont ils disposent pour pousser en automne, ce sont les plus performants au niveau de la production de biomasse et au niveau de la puissance de l'enracinement. Cependant, étant implantés lorsque les conditions sont généralement sèches, ils demandent un soin particulier au moment du semis qui doit être effectué le plus tôt possible après la moisson pour profiter de l'eau résiduelle du sol en vue de la germination des graines. Les couverts hivernaux sont semés en septembre-octobre, après récolte du précédent (en général le maïs dans nos régions). Ils sont moins productifs que les couverts d'été vu l'implantation plus tardive. Si les espèces choisies sont adaptées, le couvert hivernal pourra redémarrer au printemps et occuper la terre jusqu'au moment du semis de la culture suivante.

Malgré tout, la destruction ne devra pas être trop tardive pour ne pas pénaliser celle-ci (manque d'eau, faim d'azote).

Modes d'implantation

Le mode d'implantation des couverts végétaux résulte d'un compromis entre la rapidité et le coût du semis et la qualité de celui-ci. Néanmoins, dans tous les cas, plus la qualité du travail réalisé sera bonne, meilleurs seront le développement du couvert et les bénéfices que celui-ci apportera au sol. Le moyen le plus simple de couvrir le sol pendant l'interculture est d'utiliser les repousses de la culture tout juste récoltée. Le colza est particulièrement adapté à cette pratique vu la facilité avec laquelle les repousses se développent. Cependant, leur densité est généralement trop élevée ce qui les empêche d'explorer correctement le profil de sol. Un travail superficiel permettra d'éclaircir les repousses et éventuellement d'ajouter d'autres plantes au couvert. Un autre désavantage est la remise en culture de plantes déjà cultivées favorisant ainsi les ravageurs et maladies de cette culture. Le semis à la volée est un autre moyen simple et rapide d'implanter un couvert. Il peut être réalisé en utilisant un épandeur centrifuge (par ex. : épandeur d'engrais), une rampe de semis ou en installant un dispositif de semis sur la barre de coupe de la moissonneuse-batteuse. Avec cette stratégie, il est également possible de semer le couvert avant la moisson, dans la culture en cours de maturation. Il faut cependant veiller à ce que la culture soit propre sinon les adventices se développeront en même temps que le couvert, compliquant la lutte par la suite. Le semis accompagné d'un travail superficiel du sol est une autre option envisageable pour l'installation des couverts. Le travail superficiel, réalisé avec un outil à disques ou à dents à une profondeur de 1 à 5 cm maximum, permettra une levée rapide et homogène des semences. La préparation du lit de semence et le placement correct des graines sécurisent l'implantation en comparaison avec un semis à la volée et compensent largement le temps supplémentaire passé sur le chantier de semis. Enfin, le semis direct constitue un excellent moyen, en fait le plus sûr et le moins cher (hors coût du semoir), d'installer les couverts végétaux. Cette technique permet, en utilisant des semoirs spécialisés à disques ou à dents, le placement direct de la semence dans le sol, sans perturbation de celui-ci. Vu le coût de l'équipement, cette technique est surtout utilisée par les agriculteurs déjà en possession de tels semoirs comme ceux engagés dans l'agriculture de conservation.

Choix des espèces

Plusieurs critères doivent être pris en compte au moment de choisir les espèces qui seront utilisées dans le couvert. Les plus importants sont cités ici : capacité du couvert à produire une biomasse importante, à explorer tout le potentiel nutritif du sol, à améliorer la structure du sol, à se développer et à couvrir le sol quelles que soient les conditions (climatique, édaphique, etc...), aptitude à gérer le salissement de la parcelle et à établir un relais entre espèces (permettant de prolonger la durée de couverture), possibilité de réduire le coût des semences (en diluant les espèces coûteuses avec des espèces bon marché ou produites sur l'exploitation) et, enfin, apport de diversité dans les espèces cultivées (espèces et familles

différentes de celles déjà présentes dans la rotation). Il faut en général privilégier l'implantation de couverts multi-spécifiques (quatre espèces semble être un minimum), dont les espèces sont complémentaires l'une de l'autre (concept du biomax, imitation du système forestier). Certaines espèces, ayant un système racinaire pivotant, permettent une structuration profonde du sol (radis chinois) alors que d'autres, avec un système racinaire fasciculé, assurent une meilleure cohésion du sol via le réseau de racines qu'elles créent dans les premiers centimètres de sol (graminées). Il faut systématiquement inclure des légumineuses dans le mélange (25 à 50 %) pour leur capacité à fixer l'azote atmosphérique (symbiose avec les bactéries fixatrices d'azote de genre *Rhizobium*). La présence de différentes espèces, utilisant de manière préférentielle certains éléments (phosphore et soufre chez certaines brassicacées), optimisent l'exploitation des réserves du sol. Ces mêmes espèces, en occupant des niches écologiques différentes, concurrencent le développement des adventices et empêchent le salissement des parcelles.

4.3.2. Entretien des couverts

En cas de sol fortement compacté, les racines du couvert auront du mal à se développer et à remplir leurs fonctions de structuration du sol et d'exploitation des nutriments. Dans ce cas de figure, il peut être intéressant de réaliser une fissuration mécanique du sol avec des outils à dents ne mélangeant pas les horizons et ne créant pas de terre fine (dents courbes, en T ou L inversé). Les racines profiteront des ouvertures ainsi créées pour recoloniser tout le profil de sol.

La fertilisation des couverts, bien qu'elle semble être en contradiction avec leur but premier (captage des éléments nutritifs résiduels), est également possible. Un couvert fertilisé se développera plus vite et assurera mieux son rôle de mobilisation de l'azote qu'un couvert non fertilisé. Dans les exploitations disposant d'effluents d'élevage (exploitations de polyculture-élevage), la fertilisation organique des terres pourra avoir lieu en été ou à l'automne, au moment de l'installation des couverts. L'épandage sera d'autant plus facile qu'à cette période les sols sont plus secs, plus portants qu'au printemps ce qui limitera les risques de compaction. De plus, les engrais de ferme sont mieux valorisés et intégrés au sol lorsqu'ils sont épandus sur des couverts.

4.3.3. Destruction

Laisser le couvert vivant tout l'hiver jusqu'au semis de la culture suivante, au printemps, n'est pas forcément intéressant car ce scénario présente de nombreuses difficultés par la suite comme le risque d'intervention en conditions humides, le risque accru d'attaques de limaces ou encore la possibilité pour la culture suivante de manquer d'azote au stades précoces (faim d'azote). C'est pourquoi il est souvent conseillé de détruire les couverts végétaux en hiver, après qu'ils aient produit le maximum de biomasse possible et, dans tous les cas, avant qu'ils

ne produisent des graines pour éviter les repousses. Pour ce faire, plusieurs moyens de destruction peuvent être envisagés. Le moyen le plus simple et le plus économique est d'implanter dans le couvert des espèces gélives ou des espèces qui arrivent à floraison avant l'hiver devenant ainsi sensibles au froid. Ces plantes seront ainsi détruites dès les premières fortes gelées hivernales. La destruction mécanique est un autre moyen efficace pour stopper le développement d'un couvert. Celle-ci est réalisée via un travail du sol (déchaumage ou labour) ou par d'autres moyens (broyage, roulage). En cas de travail du sol, celui-ci peut être combiné avec d'autres opérations culturales comme la préparation du sol pour le semis ou l'incorporation d'effluents d'élevage. En cas de labour, la profondeur de travail ne devra pas être trop importante (maximum 10-15 cm) sinon la couche de débris végétaux enfouis en fond de raie pourra gêner le développement des racines de la culture à venir et, en subissant une fermentation dans ces conditions d'anaérobiose, libérer des substances toxiques pour les plantules. La destruction mécanique sans travail du sol peut se faire par broyage du couvert ou par roulage de celui-ci. Le broyage est efficace mais il est lent et coûteux. A l'inverse, le roulage du couvert est un moyen rapide et économique de le détruire. Il n'est cependant efficace que sur des plantes suffisamment développées et peu lignifiées (moutarde, légumineuses comme le poids ou la vesce, phacélie, graminées bien développées) alors que les plantes basses (trèfles, graminées en herbe) sont peu sensibles à ce moyen de destruction. La destruction par roulage est encore plus efficace lorsque l'intervention est réalisée en période de gel. La blessure des plantes et la lacération des tissus occasionnées par le passage du rouleau (de type Cambridge ou Croskill) les exposent au froid, facilitant ainsi leur destruction. L'utilisation de rouleau spécialisé (de type rolofaca) permet d'intervenir dans n'importe quelles conditions, y compris au moment du semis. Le rouleau est alors situé à l'avant du tracteur et est suivi directement par le semoir. Enfin un dernier moyen de détruire les couverts végétaux réside dans l'utilisation d'herbicides chimiques. Ce moyen de destruction est encore largement répandu, malgré l'existence de nombreuses alternatives viables, vu le faible coût des produits, la facilité d'intervention et l'efficacité avec laquelle les couverts, mais aussi les adventices et les repousses présentes, sont détruits.

4.3.4. Autres utilisations possibles des couverts

Les couverts végétaux offrent bien d'autres possibilités, non détaillées ici, dans la conduite des systèmes de cultures. Le semis direct sous couvert végétal a déjà été mentionné. Cette pratique consiste à laisser le couvert vivant jusqu'au semis de la culture suivante et à implanter celle-ci, en utilisant un semoir spécialisé, directement au travers du mulch résultant du couchage du couvert. La pratique des cultures associées est une autre possibilité. Le principe est ici de laisser tout ou partie du couvert vivant après le semis de la culture principale (blé accompagné de luzerne ou de trèfle blanc), de semer la culture principale en même temps que le couvert qui sera composé d'espèces gélives ne passant pas l'hiver (colza associé avec de la gesse, des lentilles et/ou du fénugrec) ou encore d'implanter un couvert lorsque la culture s'est déjà bien développée (couverture de l'inter-rang du maïs). Enfin, les couverts

végétaux peuvent être utilisés pour occuper le sol parfois laissé nu dans les cultures pérennes comme la vigne ou en arboriculture.

4.4. Services écosystémiques fournis par les couverts végétaux

Les services écosystémiques sont les avantages que l'Homme retire des écosystèmes (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Ces services incluent notamment la fourniture de nourriture, la production d'oxygène par la photosynthèse, le recyclage des nutriments, etc... Dans cette section, ce concept est appliqué aux couverts végétaux et aux améliorations qu'ils apportent aux propriétés chimiques, physiques et biologiques des sols. Les impacts des couverts sur le système de culture sont également abordés. De nombreuses synthèses ont déjà été réalisées concernant les bénéfices apportés par les couverts végétaux (Thomas et Archambeaud, 2016 ; Justes et Richard, 2017 ; Hartwig et Ammon, 2002 ; Dabney et al., 2001). Les points les plus importants sont présentés dans cette section.

4.4.1. Au niveau des propriétés chimiques du sol

Recyclage des éléments nutritifs

Comme il a déjà été dit précédemment, la présence d'un couvert végétal pendant l'interculture permet de limiter le lessivage des nitrates issus d'une fertilisation excessive des terres cultivées ou de la minéralisation d'automne vers les eaux souterraines ou de surface. Le couvert, ayant capté cet azote pour produire de la biomasse, permet le recyclage et la restitution d'une partie de celui-ci à la culture suivante lors de la décomposition des résidus. La dynamique de restitution de l'azote dépend du rapport carbone sur azote (C/N) du couvert, lui-même influencé par l'âge de la plante, le degré de lignification, etc... Si ce rapport est supérieur à 30, la biomasse consommera de l'azote du sol pour sa décomposition alors que si le rapport est inférieur à 25, la décomposition du couvert libérera de l'azote qui pourra être valorisé par la culture suivante. L'azote n'est pas le seul élément capté par les couverts et un raisonnement similaire peut être appliqué à d'autres nutriments nécessaires à la croissance des plantes comme le phosphore, le potassium ou encore le soufre.

Fixation d'azote

La présence de légumineuses, fixatrices d'azote atmosphérique grâce à leur symbiose avec les bactéries du genre *Rhizobium*, permet non seulement d'accroître la performance du couvert au niveau de la production de biomasse mais également d'enrichir le stock d'azote du sol et donc son autofertilité. La proportion de légumineuses ne doit cependant pas être trop élevée car leurs résidus ont tendance à se décomposer rapidement ce qui peut engendrer des pertes d'azote.

Matière organique

La pratique régulière des couverts végétaux, en produisant une biomasse importante qui retournera au sol après destruction, permet d'augmenter progressivement la teneur en matière organique du sol. Cette matière organique joue un rôle important dans la fertilité chimique du sol en stockant réversiblement des éléments minéraux sur le complexe argilo-humique et en libérant des nutriments après minéralisation de l'humus.

4.4.2. Au niveau des propriétés physiques du sol

Protection de la surface

Le couvert végétal (ou ses résidus), en couvrant la surface du champ pendant l'interculture, permet de protéger le sol de l'érosivité des pluies. L'effet « splash » des gouttes de pluies, qui entraîne la destruction des agrégats de surface, est notamment atténué car le couvert intercepte et ralentit les gouttes avant qu'elles n'atteignent le sol. Cette protection réduit le risque de formation de croûtes de battance imperméables et les problèmes d'érosion et de ruissellement associés.

Structure du sol

Les racines des couverts impactent fortement la structure du sol via leur croissance dans l'épaisseur du profil et la sécrétion de substances dans leur environnement immédiat (rhizosphère). La croissance des racines permet la fissuration du sol et donc, dans une certaine mesure, l'atténuation de la compaction des sols abîmés. Le réseau formé par les racines relie les composants du sol entre eux et les agglomère ce qui améliore la stabilité et la portance des sols. La colonisation du profil en profondeur assure la création d'une porosité continue qui facilite la colonisation par les racines de la culture suivante. L'augmentation de la teneur en MO ainsi que la sécrétion d'une proportion importante des produits de la photosynthèse (de 15 à 30 % de la production photosynthétique se retrouve dans la rhizosphère) améliorent également la structure du sol en améliorant la stabilité des agrégats. L'amélioration de la structure, en plus de rendre le sol moins susceptible aux problèmes d'érosion et de ruissellement, le rend également plus apte à supporter le passage des engins agricoles.

Propriétés hydriques

La porosité continue créée par les racines du couvert favorise l'infiltration et le stockage de l'eau. De plus, les sols riches en MO ont également une plus grande capacité de rétention en eau. La présence de plantes vivantes ou de résidus à la surface du champ limite les pertes d'eau par évaporation. En conséquence, les terres régulièrement occupées par des couverts végétaux ont une plus grande résilience face aux aléas climatiques (sécheresses ou pluies importantes).

4.4.3. Au niveau des propriétés biologiques

Stimulation de la vie biologique du sol

L'occupation de l'interculture par des plantes permet de maintenir et de développer la vie biologique du sol entre deux cultures. L'augmentation de la teneur en matière organique due à la pratique des couverts végétaux et la sécrétion de molécules organiques par leurs racines stimulent fortement l'activité biologique des sols en la nourrissant et en l'abritant. Des organismes particulièrement affectés sont les champignons et les lombrics. Des études ont montré que la biomasse de ces derniers augmente considérablement lorsque le sol est alimenté en matière organique par les couverts végétaux et lorsque le sol est perturbé le moins possible par les outils de préparation du sol. Le réseau d'hyphes créé par les champignons mycorhiziens, qui sont en symbiose avec les plantes, permet une meilleure exploration du profil de sol et améliore l'alimentation des plantes en certains nutriments (phosphore), en contrepartie de quoi les plantes font bénéficier les champignons des produits de la photosynthèse. La vie du sol, ainsi stimulée, assure de nombreuses fonctions comme la fragmentation des débris végétaux, le brassage et le transport des éléments dans le profil de sol ainsi que l'aération et l'organisation de celui-ci. Elle assure également le recyclage et la mise à disposition d'éléments minéraux autrement inaccessibles aux plantes et la solubilisation de la roche-mère par la sécrétion de substances acides.

Gestion des ravageurs et maladies

Pour de nombreux agriculteurs, la gestion des ravageurs, notamment les limaces, semble être un frein à l'adoption plus poussée des couverts végétaux. Cependant, le maintien d'une couverture végétale en surface, lors de l'interculture, offre une source alimentaire qui engendre le développement d'une faune prédatrice nombreuse et diversifiée (carabes, staphylins, araignées). Cette population de prédateur peut alors entrer en action au cours du développement de la culture suivante en cas d'attaque d'un ravageur. En plus de cette action indirecte, certaines espèces utilisées dans les couverts ont des effets directs sur les ravageurs en produisant des substances toxiques pour ceux-ci (cas des brassicacées, comme la moutarde, produisant des glucosinolates).

La diversité apportée dans la rotation suite à l'implantation des couverts végétaux permet de limiter la transmission de certaines maladies d'une culture à la suivante. Dans cette optique, il est essentiel d'intégrer dans les couverts des espèces appartenant à des familles peu présentes dans la rotation des cultures principales. Le meilleur équilibre écologique atteint grâce à la stimulation de la vie biologique du sol permet également de limiter le développement et la propagation des maladies.

Gestion des adventices

Les couverts végétaux, correctement utilisés, sont un bon moyen de prévenir le développement des adventices et le salissement des parcelles. Le couvert peut agir soit de manière indirecte sur la flore adventice, par exemple en entrant en compétition avec celle-ci pour les ressources en lumière, en eau et en éléments minéraux du sol, soit de manière directe, en sécrétant dans son environnement des substances inhibitrices de la croissance des adventices. Ce phénomène est appelé allélopathie et est présent chez des espèces comme l'avoine, le sarrasin ou le sorgho. L'établissement et la production rapide d'une biomasse importante permettra au couvert d'entrer rapidement en compétition avec les adventices et de les étouffer avant qu'elles n'envahissent la parcelle cultivée. Plutôt que de laisser la parcelle nue et s'acharner à la maintenir propre, il faut remplacer la végétation spontanée (difficile à contrôler) par une végétation choisie, facilement maîtrisable. Lorsque le couvert a été détruit, les résidus de certaines espèces (avoine) peuvent également limiter le développement des adventices en agissant comme un paillage.

Augmentation globale de la biodiversité des agroécosystèmes

Les microorganismes et la faune du sol ne sont pas les seuls à bénéficier de l'installation de couverts en interculture. L'inclusion de plantes mellifères qui fleuriront en automne (phacélie, féverole) dans les mélanges utilisés comme couverts fournit aux insectes comme les abeilles une source de nourriture bienvenue en cette période où les ressources alimentaires se font généralement rares. Le couvert peut également servir d'abri à la faune sauvage. De fil en aiguille, depuis les champignons actifs dans le sol jusqu'au oiseaux et mammifères se nourrissant des insectes habitant dans les couverts, c'est toute la biodiversité de l'agroécosystème qui est stimulée suite à l'implantation répétée de cultures intermédiaires.

4.5. Bilan économique de l'utilisation des couverts végétaux

L'amélioration de la fertilité chimique, physique et biologique des sols, engendrée par une utilisation répétée des couverts végétaux, permet de sécuriser les rendements des cultures principales. Elle laisse même entrevoir la possibilité d'un déplafonnement de ceux-ci car, dans bien des cas, ce sont le sol et la vie qu'il abrite qui sont devenus des facteurs limitants de la production agricole (Thomas et Archambeaud, 2016). L'amélioration des caractéristiques chimique, physique et biologique du sol a également des retombées directes sur le coût de conduite des cultures (économie de fertilisants, de pesticides, etc...).

Chapitre 5 : Strip-till végétal

5.1. Définition du concept

Le principe du strip-till végétal est de profiter de la préparation de la terre au strip-till, à l'été, pour semer un couvert exactement à l'aplomb des lignes travaillées par l'outil. Ce couvert est ainsi localisé dans les lignes de la future culture, qui sera implantée au printemps suivant. Un couvert semé en plein, sur toute la surface du champ, peut ou non accompagner le couvert localisé dans les lignes (Figure 3).

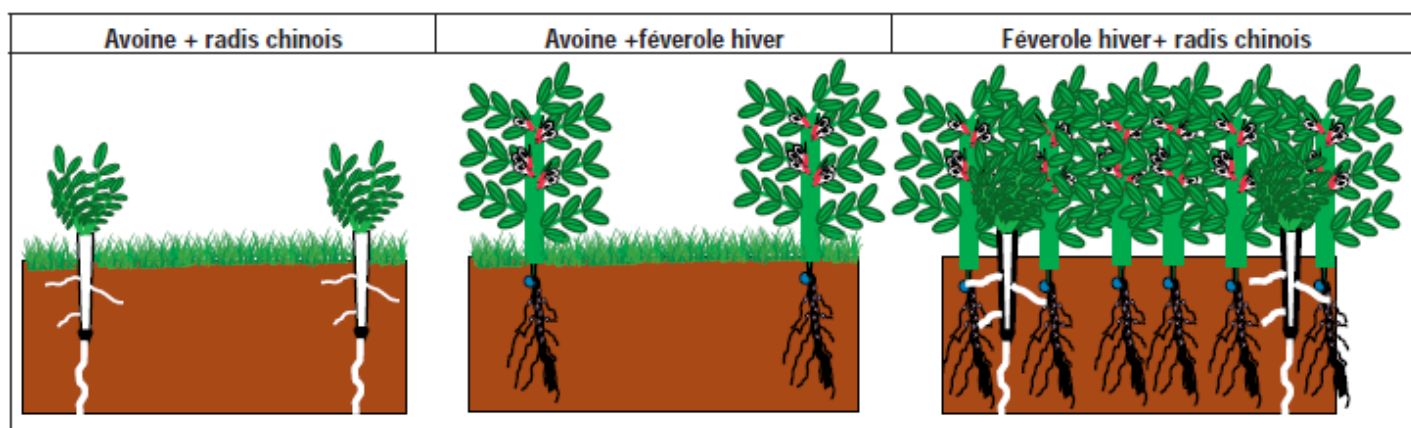


Figure 3 : Principe du strip-till végétal. Un couvert est localisé dans le futur rang de semis de la culture suivante (radis chinois ou féverole ici) et peut être accompagné d'un couvert semé en plein (avoine ou féverole sur la figure) (Brun et Légère, 2016).

Il s'agit d'une pratique peu étudiée et peu répandue adoptée par certains agriculteurs innovants, déjà familiers de l'utilisation des couverts végétaux, parmi lesquels Nicolas Braibant en Belgique ou Steve Groff aux Etats-Unis. Les agriculteurs américains qui la pratique appelle cette technique « bio-strip-till » (Gruver, 2011), et le fait d'implanter un couvert pour « travailler » le sol, alléger les zones compactées, est désigné par le terme « bio-drilling » (Weil et Kremen, 2007 ; Burr-Hersey et al., 2017).

5.2. Itinéraire technique

5.2.1. Outils

De nombreuses combinaisons d'outils sont possibles pour l'implantation du strip-till végétal. Le semis du couvert sur le rang, précédé ou non d'un travail mécanique dudit rang par un équipement de type strip-till, peut être réalisé par un semoir monograine ou par un semoir à céréales dont les éléments semeurs ont été suffisamment écartés pour correspondre à l'écartement des rangs de la future culture. Le semis sur le rang peut également être réalisé

en même temps que le travail sur la ligne, avec un outil de strip-till équipé d'un dispositif de semis. Le couvert en plein, s'il est présent, peut être semé en un autre passage, avec un semoir à céréale ou à la volée, ou en même temps que le couvert localisé dans le rang, avec un semoir à céréale adapté et équipé d'une double trémie. Une reprise du sol au printemps peut précéder le semis de la culture principale, ce qui ajoute encore un passage à l'itinéraire technique. De manière générale, plus le temps consacré à l'implantation du strip-till végétal est important, moins les risques d'échec sont élevés. Un autoguidage peut être indispensable pour être sûr de semer la culture exactement dans les lignes du couvert précédent, bien que celles-ci puissent servir de guidage visuel (Brun et Légère, 2016).

5.2.2. Choix des espèces

Dans le cadre d'une stratégie de strip-till végétal, les caractéristiques des espèces implantées dans le rang et dans l'inter-rang sont différentes. Sur la future ligne de semis, il faut privilégier des espèces capables de fixer l'azote atmosphérique (légumineuses), ayant la capacité de structurer le sol en profondeur par la production d'un pivot racinaire puissant (radis chinois, féverole) ou présentant d'autres propriétés comme la capacité à sécréter des substances toxiques pour les parasites comme c'est le cas de la moutarde et des radis. Dans l'inter-rang, les espèces sont choisies en premier lieu pour leur capacité à limiter le développement des adventices via la production rapide d'une biomasse importante et/ou via la capacité allélopathique des plantes, par exemple le seigle ou l'avoine (Brun et Légère, 2016 ; Brainard et al., 2013).

5.3. Données disponibles

Le strip-till végétal étant une pratique encore peu répandue dans le milieu agricole, peu d'études ont été réalisées le concernant. Peu de données sur les effets de cette technique sur les caractéristiques du sol ou sur le rendement des cultures sont donc disponibles. Néanmoins, en France, des essais ont été menés par ARVALIS entre 2012 et 2015 sur les sites expérimentaux de Boigneville et La Jaillière. Ces essais concernaient principalement l'effet de la localisation de la féverole dans la future ligne de semis du maïs suivant avec un couvert d'avoine ou multi-espèces occupant l'inter-rang. Différents modes d'implantation (avec ou sans reprise de printemps) et niveaux de fertilisation ont été testés. Ces essais ont notamment montré que l'absence de reprise au printemps, avant le semis du maïs, peut entraîner une perte de pieds importante à cause de l'implantation trop superficielle des graines de maïs favorisant les attaques de corbeaux. Dans ces essais, en absence d'attaque de ravageurs, le rendement du maïs ensilage qui suit le strip-till végétal n'est pas significativement différent de celui du témoin qui consistait en un couvert multi-espèces semé en plein (Brun et Légère, 2016).

Chapitre 6 : Objectifs du mémoire

Le peu de données disponibles sur la technique du strip-till végétal motive la conduite d'essais permettant de mesurer les effets de cette pratique sur les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol ainsi que leurs conséquences sur les cultures.

Dans ce but, un essai de strip-till végétal évaluant l'effet de différentes espèces semées dans la ligne travaillée et de deux témoins (un sans espèce implantée dans la ligne et un sans travail du sol) sur les propriétés physiques et chimiques du sol a été mis en place chez un agriculteur adepte de la pratique. La finalité de cet essai est de déterminer si le fait de travailler le sol uniquement sur la future ligne de semis et, éventuellement, d'y implanter un couvert végétal localisé permet d'améliorer les caractéristiques du sol d'une part et l'efficacité du couvert d'autre part.

Les objectifs de ce mémoire sont donc multiples :

- Etudier le développement de différents couverts implantés avec la technique du strip-till végétal, les espèces semées dans les rangs de la future culture (betterave) étant différentes d'une modalité à l'autre.
- Etudier l'effet de ces couverts sur la structure et sur les propriétés physico-chimiques du sol.

Deuxième partie : Matériels et méthodes

Chapitre 7 : Localisation de l'essai et itinéraire technique

L'essai de strip-till végétal a été installé sur un champ de Mr Nicolas Braibant situé à Vieusart. Les coordonnées de la parcelle (Figure 4) sont $50^{\circ}40'48.9''$ et $N 4^{\circ}38'00.4''E$. Il a été précédé de la moisson du blé le 29 juillet 2017, de l'épandage de compost et d'un premier déchaumage le 7 août.



Figure 4 : Photographie aérienne de la parcelle (entourée en rouge) de l'essai strip-till végétal (SPW - DGARNE, 2016).

L'installation de l'essai s'est ensuite faite en deux temps. Un couvert végétal a d'abord été semé en plein sur l'ensemble de la parcelle en même temps que le second déchaumage le 14 août. Ce couvert était composé de cinq espèces (entre crochet figure la dose de semis, en kg/ha) : phacélie (*Phacelia tanacetifolia*) [2], lin (*Linum usitatissimum*) [1,5], tournesol (*Helianthus annuus*) [3], féverole de printemps (*Vicia faba*) [35] et avoine brésilienne (*Avena strigosa*) [30].

Un travail en bandes ou strip-till a, par la suite, été effectué dans le sens Sud-Est Nord-Ouest, dans la partie Est de la parcelle (Figure 5a) le 16 août, sur une longueur de 90 m. Le strip-till a été réalisé avec un décompacteur dont les cinq dents étaient réglées pour travailler à un écartement de 45 cm correspondant à l'écartement de la culture de printemps suivante (betterave sucrière). Ce décompacteur était également équipé d'un semoir, ce qui a permis le semis de différentes espèces de couverts végétaux dans les futures lignes de betteraves (Figure 5c). Ces espèces sont le tournesol, l'avoine brésilienne, le radis chinois type structurator, la vesce de printemps, le fenugrec, la phacélie, un mélange de trèfles (de Perse, de Micheli, renversé, raboteux et de Jamin) et le trèfle incarnat, correspondant

respectivement aux traitements C5, C1, C2, C4, C6, C7, C8 et C3 (Tableau 2). Par ailleurs, comme on peut le voir sur le schéma représentant le dispositif expérimental (Figure 5b), il y a également une bande de traitement correspondant à un passage de l'équipement de strip-till mais sans le semis d'un couvert dans les lignes (témoin T1) et une bande de traitement n'ayant pas été décompactée (témoin T0). Ces témoins sont donc occupés par le couvert semé en plein dont la composition est décrite ci-dessus. On remarque également sur la Figure 5b que tous les traitements sont séparés par des bandes témoins correspondant au traitement T1 (décompactation seule). Un problème est survenu lors du semis de la bande de tournesol (blocage du semoir), il a donc fallu ressemer une bande en début d'essai, d'où la présence de deux bandes de tournesol dans le schéma du dispositif expérimental.

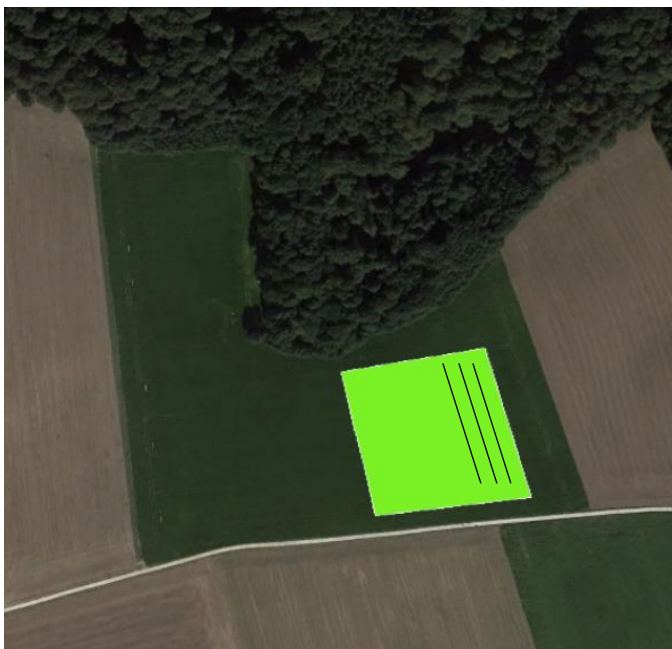


Figure 5a : Disposition de l'essai dans la parcelle et sens du semis des couverts au strip-till (lignes noires).

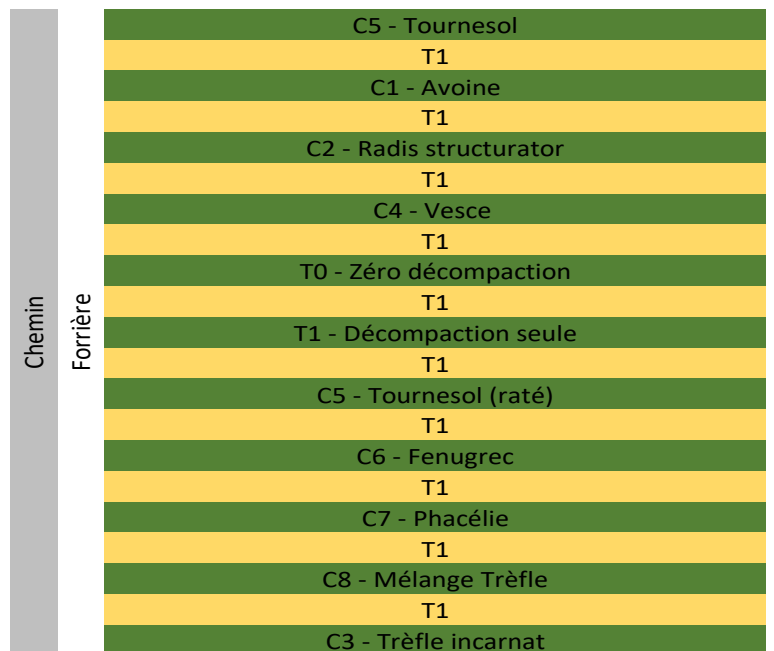


Figure 5b : Disposition des différentes espèces de couverts semées au strip-till (rotation de 90° dans le sens horlogique par rapport à la figure 5a).



Figure 5c : Matériel de strip-till utilisé pour le semis des couverts dans les futures lignes de la betterave.



Figure 5 : Plan expérimental et matériels utilisés pour l'essai de strip-till végétal.

Chaque bande de traitement (C1 à C8 et T1 et T0) a été installée en un aller-retour du décompacteur, elles ont donc une largeur de 4,5 m (10 x 45 cm). Les bandes de contrôle séparant les traitements ont été installées en un seul passage du décompacteur et ont donc une largeur de 2,25 m (5 x 45 cm).

La destruction des couverts a eu lieu le 8 février 2018 par roulage sur gel. Les résidus ont ainsi eu le temps de partiellement se décomposer jusqu'au semis des betteraves, précisément dans les lignes de strip-till, le 9 avril. Le semis des betteraves, à une densité de 110 000 graines/ha, a été réalisé en un passage par un tracteur équipé d'un combiné herse rotative - semoir de précision.

Tableau 2 : Traitements pour lesquels une espèce a été implantée dans la ligne, leur composition, la densité des espèces et leur poids de mille grains (PMG).

Traitement	Espèces		Densité (kg/ha)	PMG
	Nom français	Nom latin		
C1	Avoine brésilienne	<i>Avena strigosa</i>	18,5	16,9
C2	Radis structurator	<i>Raphanus sativus</i> var. <i>longipinnatus</i>	3,8	14
C3	Trèfle incarnat	<i>Trifolium incarnatum</i>	6,2	4,3
C4	Vesce de printemps	<i>Vicia sativa</i>	18,5	45
C5	Tournesol	<i>Helianthus annuus</i>	18,5	47,3
C6	Fenugrec	<i>Trigonella foenum-graecum</i>	6,2	16
C7	Phacélie	<i>Phacelia tanacetifolia</i>	2,5	2
C8	Trèfle de Perse	<i>Trifolium suaveolens</i>	6,2	1
	Trèfle de Micheli	<i>T. michelianum</i>		
	Trèfle renversé	<i>T. resupinatum</i>		
	Trèfle raboteux	<i>T. squarrosum</i>		
	Trèfle de Jamin	<i>T. isthmocarpum</i>		

Dans la suite du mémoire, le nom de l'espèce implantée dans la ligne du strip-till sert de référence pour le traitement correspondant. Le nom « témoin sans ST » est utilisé pour désigner le témoin non décompacté (T0) et le nom « témoin-ST » est utilisé pour désigner le témoin décompacté (T1).

Chapitre 8 : Analyses physico-chimiques de sol

8.1. Méthodes de prélèvement et pré-traitements

Des prélèvements de sol ont été effectués à deux périodes au cours de l'essai. La première fois (8 août 2017), entre le premier déchaumage et le semis du couvert en plein et la seconde fois à la fin de l'hiver (12 mars).

Les premiers prélèvements ont permis de caractériser initialement le champ et de vérifier son homogénéité du point de vue physico-chimique. Ces prélèvements ont été faits sur cinq placettes d'environ 4 m² à différents endroits du champ. Ces placettes étaient disposées de telle manière que les prélèvements soient représentatifs de l'ensemble du champ. Dans chacune des placettes, 10 coups de sonde de 3 cm de diamètre ont été réalisés à trois profondeurs (A : 0-15, B : 15-30 et C : 45-60 cm), tous les prélèvements ayant été effectués dans la même placette et à la même profondeur étant mélangés (Figure 6). On obtient ainsi finalement 15 échantillons de sol (5 placettes x 3 profondeurs) utilisés par la suite pour les analyses physico-chimiques.

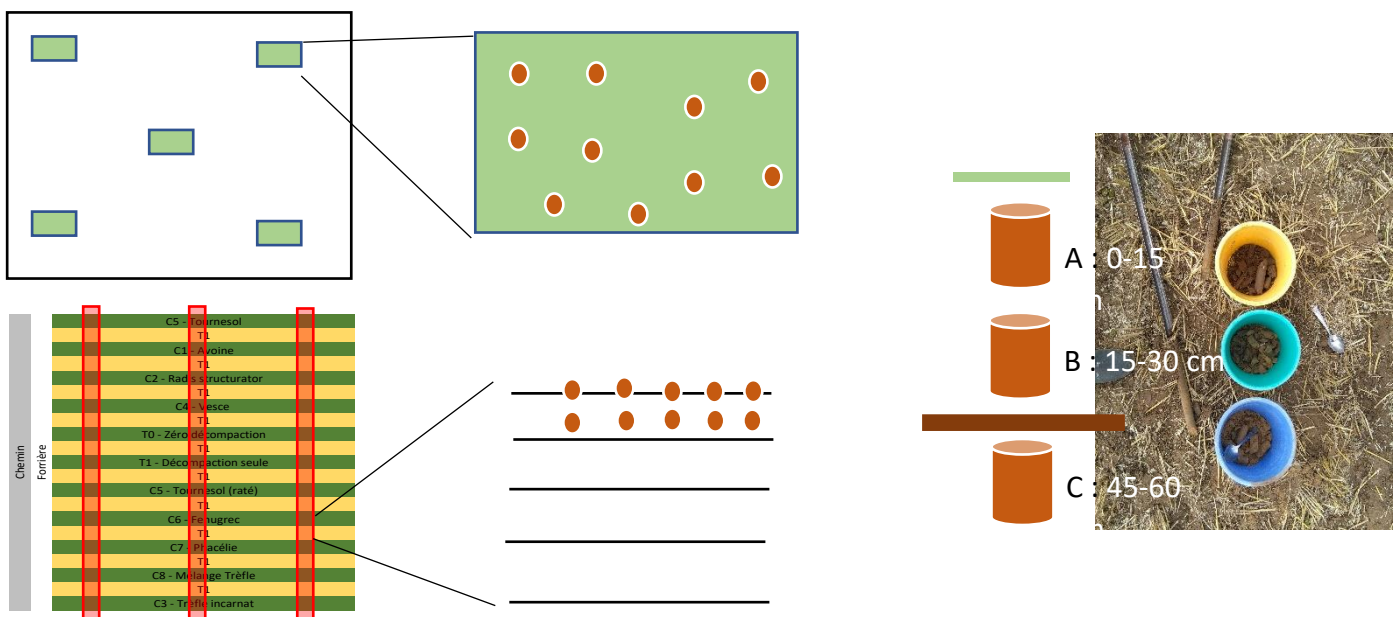


Figure 6 : Méthode de prélèvement des sols en août, avec les 5 placettes (en haut, à gauche), les 10 coups de sonde par placette (en haut, au milieu) et les 3 profondeurs par coup de sonde (droite) et en mars, avec les 3 blocs (en bas, à gauche), les 5 prélèvements dans la ligne de strip-till et les 5 prélèvements entre les lignes (en bas, au milieu) et les 3 mêmes profondeurs qu'en août.

Avant les analyses, les différents échantillons ont été labellisés de manière à pouvoir identifier leur provenance. Chaque échantillon est donc identifié par un code comprenant un chiffre (1 à 5) et une lettre (A, B ou C), par exemple 1A, correspondant respectivement à la placette et à la profondeur.

La seconde série de prélèvement a eu lieu en mars 2018, après la destruction des couverts et après les dernières gelées. Ces prélèvements ont pour but d'évaluer l'éventuel effet des couverts ayant été semés au strip-till. Pour ce faire, trois bandes de prélèvements (appelées blocs), perpendiculaires aux bandes de couverts, sont délimitées. A l'intersection de chacun de ces blocs avec une bande de traitement, 5 prélèvements sont réalisés dans la ligne de strip-till et 5 prélèvements entre deux lignes. Ces prélèvements sont faits aux trois mêmes profondeurs que ceux d'août (0-15, 15-30 et 45-60 cm) (Figure 6). Pour le témoin non décompacté (T0), seulement 5 prélèvements sont réalisés à chaque intersection avec les 3 blocs. Tous les prélèvements effectués dans un même bloc et dans le même traitement et à la même profondeur sont mélangés. On obtient ainsi finalement 171 échantillons (9 traitements passés au strip-till x 2 (ligne et interligne) x 3 blocs x 3 profondeurs + 3 blocs x 3 profondeurs (témoin non décompacté)).

Ces nouveaux prélèvements ont été labellisés. Chaque échantillon a un code composé de 3 chiffres et d'une lettre, correspondant respectivement à la bande de traitement (1 à 8 pour les 8 espèces semées au strip-till, plus les 2 témoins T0 et T1), au bloc (1 à 3), à la position dans la ligne de strip-till (1) ou dans l'interligne (2) et à la profondeur du prélèvement (A : 0-15, B : 15-30 et C : 45-60 cm), par exemple 1-1-1 A.

Préalablement à toutes les analyses, exceptée l'analyse des nitrates qui s'est faite sur les sols fraîchement récoltés en août, les échantillons de sol sont mis à sécher à l'air libre pendant une semaine, broyés puis tamisés à 2 mm.

Une autre méthode de prélèvement qu'à la sonde a été utilisée pour obtenir des échantillons de sol pour déterminer la densité apparente. Dans ce cas, les prélèvements sont effectués avec une bêche dans le but d'obtenir une motte dont la structure est conservée. Ces prélèvements à la bêche ont été effectués au printemps (26 mars), dans le but de mesurer l'effet des couverts semés au strip-till et du strip-till lui-même sur la structure du sol. Dans ce but, 4 bandes de prélèvements (blocs), perpendiculaires aux bandes de traitements, sont délimitées. Dans chaque bloc, à l'intersection avec chacune des bandes de traitement, un prélèvement est réalisé dans la ligne de strip-till et un dans l'interligne. Dans le témoin non décompacté (T0), un seul prélèvement est réalisé à chaque intersection avec un bloc. On obtient ainsi finalement 76 mottes de sol (9 traitements passés au strip-till x 2 (ligne et interligne) x 4 blocs + 4 prélèvements dans le témoin non décompacté).

Ces prélèvements à la bêche ont été labellisés avec un code composé de 3 chiffres, correspondant respectivement à la bande de traitement (1 à 8 pour les 8 espèces semées au strip-till, plus les 2 témoins T0 et T1), au bloc (1 à 4) et à la position dans la ligne de strip-till (1) ou dans l'interligne (2), par exemple 1-1-1.

8.2. Analyses des caractéristiques chimiques

Ce paragraphe fournit des informations sur les analyses des caractéristiques chimiques ayant été effectuées sur les échantillons de sol (quels échantillons, comment l'analyse a été effectuée, ...) ainsi que sur le but de l'analyse.

Comme dit précédemment, la plupart des analyses ont été réalisées sur sol sec, broyé et tamisé à 2 mm, excepté l'analyse des nitrates et celle du carbone total et de l'azote total par combustion flash.

8.2.1. pH

La mesure du pH permet de déterminer la concentration en protons (H^+) d'une solution obtenue à partir d'un sol et donc son acidité. La valeur du pH (adimensionnel) varie de 0 à 14, un pH de 7 étant neutre. Plus la valeur du pH est éloignée de cette valeur neutre, plus la solution est dite acide (si le pH est inférieur à 7) ou basique (si le pH est supérieur à 7).

Cette mesure n'a été faite que sur les 15 échantillons de sol prélevés en août. Le pH_{H_2O} a été mesuré en ajoutant 25 ml d'eau distillée à un échantillon d'environ 5 g de sol (rapport sol : eau de 1 : 5). Le mélange est ensuite vigoureusement agité toutes les 20 minutes (3 fois) et le pH de la solution obtenue est mesuré en plongeant l'électrode d'un pH-mètre dans celle-ci.

8.2.2. CEC et bases échangeables

La capacité d'échange cationique (CEC) d'un sol correspond à sa capacité à retenir, par attraction électrostatique, des cations nutritifs pour la plante. Les charges négatives déterminant la CEC ont deux origines distinctes : les substances organiques et les minéraux argileux. Cette quantité de charge variant avec le pH, la mesure de la CEC se fait à un pH de 7 de manière à standardiser les valeurs obtenues (Delvaux et Delmelle, 2018).

Les bases échangeables correspondent, elles, aux cations non acides (différents de H^+ et Al^{3+}) majoritairement adsorbés sur le complexe d'échange du sol (Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} et Na^+) (Delvaux et Delmelle, 2018).

Le rapport de ces deux mesures permet de déterminer le taux de saturation en base du sol (TSB) :

$$TSB = \frac{BE}{CEC} * 100$$

avec *TSB* le taux de saturation en base [%], *BE* la somme des bases échangeables [még/100g] et *CEC* la capacité d'échange cationique du sol [még/100g] (Baize, 2000).

La mesure de la CEC et des bases échangeables a été réalisée avec la méthode de Metson sur les 15 échantillons de sol prélevés en août. Cette méthode consiste à faire percoler trois solutions différentes au travers de colonnes en verre contenant les échantillons à analyser :

- La première percolation se fait avec une solution d'acétate d'ammonium ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$) 1N et à pH 7. Cette percolation permet de déplacer les bases échangeables des sites d'adsorption et de les recueillir en vue de leur dosage ultérieur.
- La seconde percolation est réalisée avec une solution d'éthanol dénaturé. Elle permet d'éliminer l'excès d'acétate d'ammonium et, donc, de ne conserver que celui qui est fixé aux sites d'échange.
- La troisième percolation est finalement réalisée avec une solution de KCl 10 % de pH 3. Elle permet de déplacer l'ammonium des sites d'échange et de le recueillir en vue de son dosage qui permettra de déterminer la CEC du sol.

Les concentrations en bases échangeables sont par la suite déterminées par spectrométrie d'émission plasma à couplage inductif (ICP-AES) à partir de la solution issue de la première percolation.

La concentration en ammonium de la solution issue de la troisième percolation, qui permet la détermination de la CEC, est mesurée par colorimétrie au bleu d'indophénol.

8.2.3. Nitrate

Le nitrate (NO_3^-) est un composé primordial pour la nutrition azotée des plantes. Dans les sols cultivés, il peut avoir deux origines : la minéralisation de la matière organique en azote ammoniacal et sa nitrification en NO_3^- d'une part et les apports d'engrais minéraux de synthèse d'autre part. La gestion de la fertilisation azotée, et donc la dynamique des nitrates dans les sols, est un enjeu important en agriculture pour éviter les problèmes de pollution des nappes phréatiques et des cours d'eau.

Les nitrates ont été dosés sur les 15 échantillons récoltés en août par la méthode DEVARDA (Adamowicz et al., 1982). Cette méthode consiste à réaliser deux entraînements à la vapeur sur une solution obtenue par extraction au KCl 2 N du nitrate et de l'ammonium présents dans les échantillons de sol frais. Le premier entraînement, réalisé en présence de magnésie, permet de récupérer l'ammonium présent dans la solution puis de le titrer avec de l'acide sulfurique (H_2SO_4) 0,01 N. Après refroidissement, le deuxième entraînement à la vapeur, en présence d'alliage DEVARDA (alliage de cuivre, aluminium et zinc), permet le dosage par titrage à l' H_2SO_4 0,01 N des nitrates ayant été réduits en ammonium.

Les teneurs en azote minéral (nitrique et ammoniacal) sont exprimées en mg/kg de sol sec (notations N- NO_3 et N- NH_4) ou en kg d'azote par hectare (kg N- NO_3 /ha et kg N- NH_4 /ha).

8.2.4. Azote total et carbone organique

Dans le cas du sol analysé ici (sol non calcaire), tout le carbone présent est celui contenu dans les molécules de matière organique. Cette teneur en carbone est d'une grande importance vu les rôles qu'elle joue sur les plans agronomique et environnemental. Il est intéressant de citer, entre autres, son rôle dans l'adsorption et la rétention de l'eau et de nombreux éléments nutritifs essentiels pour les plantes (cations échangeables, azote, phosphore, etc...), dans le maintien de la stabilité structurale des horizons superficiels, dans la nutrition pour les microorganismes du sol et, enfin, dans le cycle biogéochimique du carbone (stockage ou libération du carbone des couches supérieures de la croûte terrestre) (Baize, 2000). Cette teneur en carbone organique est fortement influencée par les pratiques culturales appliquées sur le champ étudié.

Le taux de carbone organique a été déterminé par deux méthodes différentes :

- Estimation du contenu en matière organique (MO) par perte au feu. Cette méthode consiste à mesurer la perte de poids d'un échantillon de sol soumis à une température de 450°C. La combustion qui s'ensuit fait disparaître les matières organiques de l'échantillon et la différence entre le poids initial et le poids après combustion correspond donc à cette teneur en MO, exprimée en pourcentage massique [%]. Cette méthode a été utilisée sur les 15 échantillons de sol récoltés en août ainsi que sur les 171 échantillons récoltés au printemps.
- L'autre méthode utilisée pour déterminer la teneur en carbone organique a été de doser le carbone total par combustion flash avec un analyseur élémentaire ELEMENTAR vario EL CUBE. Cette analyse nécessite de broyer les sols finement avec un mortier et un pilon en agate. Vu les mesures de pH, toutes supérieures à 6,5, la présence de carbone sous forme inorganique était peu probable et donc le carbone total mesuré par combustion flash correspond au carbone présent dans les matières organiques du sol. Le coefficient multiplicateur de 1,72 est par la suite utilisé pour passer du taux de carbone organique au taux de MO, tous deux exprimés en %. Cette méthode a été utilisée uniquement pour déterminer le taux de carbone organique sur les 15 échantillons d'août.

L'azote total correspond à toutes les formes d'azote, minéral et organique, présentes dans l'échantillon de sol. L'azote minéral correspond à la somme des teneurs en azote nitrique (N-NO₃) et ammoniacal (N-NH₄) qui sont présents dans la solution du sol. L'azote organique est celui qui est intégré aux macromolécules organiques (protéines, acides nucléiques, etc...) originaires de la biomasse végétale, animale ou microbienne, vivante ou en décomposition.

La teneur en azote total (exprimée également en %) a été mesurée par combustion flash en même temps que le carbone total sur les 15 échantillons d'août.

La détermination de l'azote total et du carbone organique permet, par la suite, de calculer le rapport C/N d'un sol. Ce rapport est un indicateur de la dynamique des matières organiques présentes dans le sol. En effet, s'il est élevé (supérieur à 12), cela signifie que la minéralisation rencontre des difficultés indiquant une activité microbienne possiblement ralentie (Baize,

2000). Voire, si le rapport est supérieur à 20-24, un contenu en azote des matières organiques trop faible entraînant une consommation de l'azote du sol par les microorganismes pour leurs décompositions et, ainsi, une déficience potentielle en azote pour les plantes (Delvaux et Delmelle, 2018).

8.2.5. Phosphore disponible

Le phosphore disponible ou phosphore assimilable correspond au phosphore pouvant être absorbé par les racines des plantes. Ce phosphore est présent dans le sol sous forme d'anions (PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^-) dissous dans la solution du sol, adsorbés sur les surfaces externes des minéraux argileux ou encore adsorbés sur les oxy-hydroxydes de fer et/ou d'aluminium (Baize, 2000).

La méthode de Olsen, utilisée ici et appliquée sur les 15 échantillons d'août, consiste d'abord à extraire le phosphore disponible au moyen d'une solution de bicarbonate de sodium (NaHCO_3) 0,5 N à pH 8,5. Le phosphore présent dans les extraits est ensuite dosé par ICP-AES. Sa teneur est exprimée en mg/kg de sol sec.

8.3. Analyses des caractéristiques physiques

Cette section décrit les analyses qui ont été effectuées pour caractériser les paramètres physiques du sol. Ces analyses ont été réalisées soit sur des sols récoltés à la tarière (3 cm de diamètre, environ 300 cm³ de sol récolté), séchés, broyés et tamisés à 2 mm (granulométrie et stabilité structurale), soit sur des mottes de sol prélevées à la bêche pour conserver leur structure (densité apparente), soit, enfin, les mesures ont été effectuées sur le terrain (pénétrométrie).

8.3.1. Granulométrie

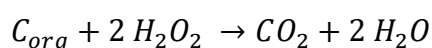
L'analyse granulométrique consiste à classer les différentes particules minérales selon leur taille (Tableau 3), ce qui permet par la suite de caractériser la texture du sol. Dans le cadre de ce mémoire, cela a consisté à déterminer les fractions d'argiles, limons fins, limons grossiers et sables. La détermination de la sous-classe des sables grossiers a également été réalisée car sa connaissance est nécessaire pour calculer la stabilité structurale du sol.

Tableau 3 : Classement des sous-fractions texturales en fonction de leur taille (Baize, 2000).

Fractions et sous fractions texturales	Diamètre
Argiles	< 2 µm
Limons fins	2 – 20 µm
Limons grossiers	20 – 50 µm
Sables fins	50 – 200 µm
Sables grossiers	200 – 2000 µm

Cette analyse a été réalisée sur les 15 échantillons de sol prélevés en août. L'analyse s'est déroulée en trois grandes étapes :

- Destruction des liants organiques. La première étape consiste à détruire les matières organiques, qui peuvent agir comme des colles entre les particules minérales, en traitant les échantillons de sol avec de l'eau oxygénée. La réaction qui se produit est la suivante



- Séparation et tri des sables. La seconde étape permet, grâce à un traitement aux ultrasons des échantillons en phase aqueuse, de séparer les argiles et limons des sables. Ceux-ci sont alors récupérés par tamisage à 50 µm et mis à sécher à l'étuve à 105°C. Une fois secs, les échantillons de sables sont de nouveau triés en sables fins et sables grossiers avec un tamis de 200 µm.
- Sédimentation des limons et des argiles. La dernière étape consiste à déterminer les fractions d'argiles, limons fins et limons grossiers via la méthode à la pipette de Robinson (Baize, 2000). Un traitement dispersant à base d'hexamétophosphate de sodium est utilisé pour assurer l'individualisation des particules. La suspension contenant les particules est placée dans une colonne et, après une dernière agitation homogénéisante, la sédimentation a lieu. Il suffit alors de prélever des aliquotes de suspension à des temps donnés et à des hauteurs données, de les faire sécher et de les peser pour déduire, en utilisant la loi de Stokes, les fractions présentes (Delvaux et Delmelle, 2018).

8.3.2. Stabilité structurale

Le principe du test de stabilité structurale est d'exposer le sol à une attaque à l'eau et de mesurer la taille des agrégats avant et après l'attaque (Delvaux et Delmelle, 2018). Ce test permet de caractériser la stabilité, et donc la sensibilité à la dégradation physique, d'un sol cultivé (Baize, 2000).

La méthode de Hénin qui permet, après manipulations, de calculer l'indice d'instabilité structurale a été appliquée sur les 15 échantillons récoltés en août ainsi que sur 114 échantillons récoltés en mars (tous les échantillons des profondeurs A et B). Cette méthode

(Hénin et al., 1969) a été adaptée et seule l'attaque à l'eau a été réalisée puisque l'on compare des échantillons de sol de texture identique. Le protocole rigoureusement suivi est le suivant :

- Peser un échantillon de terre (environ 5 g) ;
- Le placer dans un erlenmeyer ;
- Verser brusquement 300 ml d'eau dans l'erlenmeyer, attendre 30 min ;
- Boucher l'ouverture et agiter par 20 retournements énergiques successifs, à vitesse constante ;
- Verser le contenu sur un tamis de 200 μm placé dans un cristalliseur et placer le dispositif sur l'appareil de Féodoroff (Figure 7) ;
- Faire 30 mouvements hélicoïdaux en 30 secondes ;
- Récupérer les agrégats restés sur le tamis, les sécher 48h à 105°C et les peser ;

La combinaison de ces résultats avec ceux de la granulométrie permet de calculer l'indice d'instabilité structurale via la formule

$$I_s = \frac{F}{G} = \frac{\text{Argile} + \text{LF maximum}}{\text{Ag} - 0.9 * \text{SG}}$$

avec I_s l'indice d'instabilité structurale, F le pourcentage d'éléments fins (< 20 μm) [%], G la fraction grossière [%], *Argile* la fraction argileuse de l'échantillon [%], *LF maximum* la fraction des limons fins de l'échantillon [%], *Ag* les agrégats stables retenus dans le tamis [%] et *SG* la fraction des sables grossiers (taille > 200 μm) [%]. Le coefficient 0,9 permet de soustraire 90 % des sables grossiers des agrégats stables car ils ne participent pas en totalité à la stabilisation des agrégats.



Figure 7 : Appareil de Féodoroff utilisé pour évaluer la stabilité structurale des sols.

L'indice d'instabilité structurale obtenu via la méthode de Hénin varie de 0,1 à plus de 100. Il est d'autant plus élevé que la structure du sol est moins stable (Hénin et al., 1969).

8.3.3. Densité apparente

La densité apparente d'un sol correspond à la masse de solide présente dans un certain volume de sol. Cette mesure est intéressante car elle permet, si des prélèvements sont réalisés dans des champs différents ou dans différents traitements d'un essai, de savoir si un traitement permet d'améliorer l'état de compaction du sol par rapport à d'autres traitements.

La méthode d'immersion au pétrole de mottes, inspirée de celle développée par Blavet et Fardoux (Blavet et Fardoux, 1993) et utilisant le principe d'Archimède, a ici été utilisée sur 76 échantillons de sol frais récoltés en mars (voir paragraphe sur les méthodes de prélèvements). Les mottes de sol récoltées par prélèvement à la bêche sont d'abord délicatement décomposées. Les agrégats obtenus sont ensuite saturés avec du pétrole (huile de lampe) par immersion pendant 24h, l'immersion étant progressive pour évacuer l'air des agrégats et éviter qu'ils n'éclatent. Lorsque les agrégats sont saturés, ils sont immergés dans un berlin contenant du pétrole et posé sur une balance (Figure 8). La poussée hydrostatique est alors mesurée et les agrégats sont mis à sécher à l'étuve à 105°C. Après 24h de séchage, les agrégats secs sont pesés et la densité apparente est finalement calculée en utilisant la formule

$$\rho_s = \frac{m_s}{V} \text{ or } V = \frac{m_f}{\rho_f} \text{ puisque } P_a = m_f * g = \rho_f * V * g$$

avec P_a la poussée d'Archimède [N], m_f la masse du volume de fluide déplacé [kg], g la gravité terrestre [$m*s^{-2}$], ρ_f la masse volumique du pétrole [$kg*m^{-3}$], V le volume de pétrole déplacé lors de l'immersion équivalent au volume de l'agrégat [m^3] et m_s la masse de l'agrégat sec [kg].

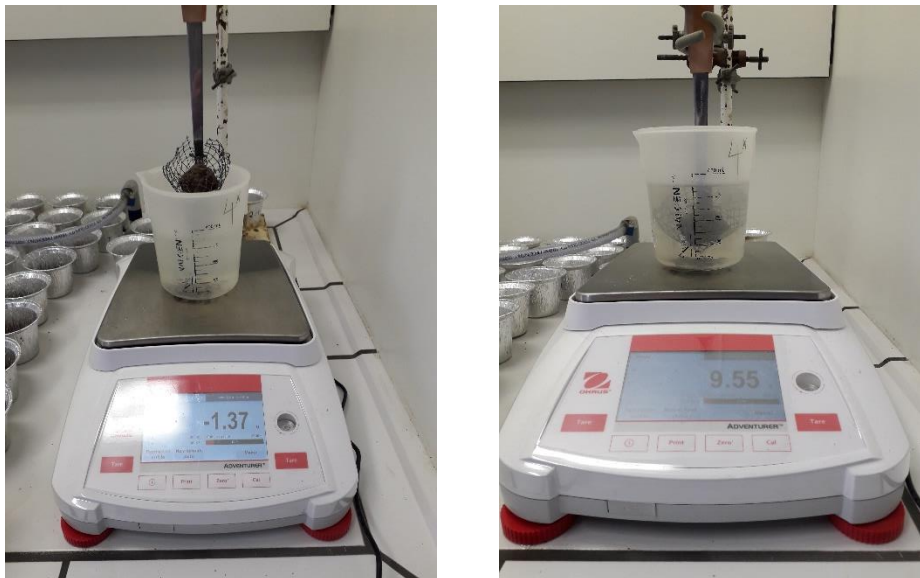


Figure 8 : Dispositif utilisé pour mesurer la densité apparente par immersion au pétrole.

8.3.4. Pénétrométrie

L'état de compaction du sol a été évalué plusieurs fois au cours de l'essai via des mesures de pénétrométrie. Cette mesure consiste à enfoncer la tige métallique d'un pénétromètre (Figure 9) dans le sol jusqu'à atteindre une pression limite maximale. Lorsque cette pression est atteinte, la profondeur atteinte par la tige est notée.



Figure 9 : pénétromètre utilisé pour évaluer la compaction du sol.

La méthode pour réaliser ces mesures consiste à progresser par bandes de mesures (appelées blocs) perpendiculaires aux lignes de strip-till. À chaque intersection entre un de ces blocs et une bande de traitement, 5 mesures sont prises dans une ligne de strip-till et 5 mesures sont prises entre deux lignes (de manière similaire aux prélèvements de sol réalisés en mars). Les mesures ont été prises dans tous les traitements (8 espèces) ainsi que dans le témoin décompacté (témoin-ST). Cinq blocs ont été parcourus à intervalle régulier dans le sens du strip-till. Des mesures de pénétrométrie ont été réalisées 4 fois au cours de l'essai. Une première fois en août 2017, peu après le passage du strip-till, une fois en octobre, une fois en décembre et enfin en avril après le semis des betteraves.

8.3.5. Profil de sol

Un profil de sol, une observation visuelle permettant d'apprécier l'état de la structure du sol, a été réalisé en mars 2018. Cette observation se basant notamment sur l'expérience de l'observateur dans ce domaine, elle reste assez qualitative. Elle fournit malgré tout de bons renseignements sur l'état général de la structure du sol. Cette observation a consisté à creuser une tranchée (Figure 10) d'environ 2 m de profondeur, perpendiculaire aux lignes de strip-till et à observer la structure du sol.



Figure 10 : Fosse creusée perpendiculairement aux lignes de strip-till pour observer le profil de sol.

Pour des raisons pratiques, il n'était pas possible de creuser une fosse sur toute la largeur de l'essai. Il n'y a donc pas moyen de comparer d'éventuels effets de certains couverts sur le profil de sol. Cependant, des observations de profils de sol ont été réalisées sur un essai de mélanges d'espèces prairiales situé sur la ferme expérimentale de l'UCL à Marbaix. Cet essai étant installé sur des terres cultivées de manière conventionnelle avec labour régulier, il sera possible de comparer la structure du sol d'une parcelle cultivée avec labour de la structure obtenue après une dizaine d'années de techniques culturales sans labour.

D'un point de vue pratique, l'observation consiste à repérer l'éventuelle semelle de labour qui peut se créer en cas de passages répétés d'outils de travail du sol en condition trop humides, ce qui provoque un lissage en fond de travail de l'outil (Biielders, 2017). Il est également utile d'observer la forme des agrégats, celle-ci nous renseignant sur l'état de compaction du sol. En effet, des agrégats à structure lamellaire, dont la longueur est plus grande que la hauteur, sont un signe de tassement du sol. Un sol avec une bonne structure présentera plutôt des agrégats granulaires, de forme plus ou moins sphérique, signes de l'activité biologique du sol et de la fragmentation de celui-ci via l'utilisation d'outils dans de bonnes conditions (Delvaux et Delmelle, 2018).

Chapitre 9 : Suivi du développement des couverts végétaux

Au cours de l'essai, plusieurs mesures ont permis de suivre le développement végétatif des différents couverts. La méthode de mesure est la même pour les trois paramètres contrôlés. Le procédé utilisé a consisté à délimiter des blocs (différents des blocs précédemment décrits pour les prélèvements de sol) perpendiculaires aux bandes de traitement et, à chaque intersection entre un bloc et une bande de traitement ou une bande de contrôle, à prendre la mesure (Figure 11).

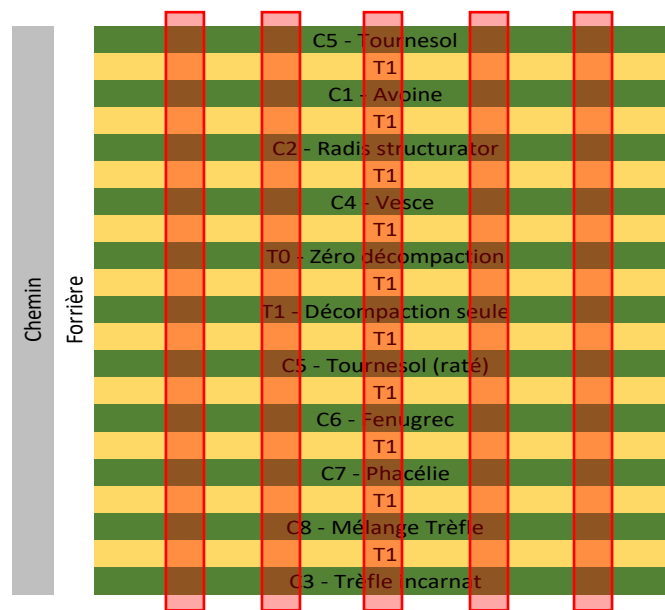


Figure 11 : Méthode de mesure pour le suivi de la croissance des couverts. En rouge sont représentées les blocs.

9.1. Couverture foliaire

La mesure de la couverture foliaire consiste à poser un cadre (Figure 12) de 50 x 50 cm, subdivisé en carrés de 5 x 5 cm, sur le sol ou la végétation et à compter le nombre de subdivisions dont plus de la moitié de la surface est recouverte par de la végétation.

L'évaluation de la couverture foliaire a été réalisée sur 5 blocs répartis à intervalle régulier dans la parcelle. Cette mesure a été effectuée deux fois au cours de l'essai, une première fois le 11 septembre 2017, environ un mois après le semis, et une seconde fois encore un mois plus tard, le 18 octobre, lorsque la canopée approchait de la fermeture.

Cette mesure peut être utile pour savoir si un traitement a une moins bonne capacité à couvrir le sol qu'un autre ou pour savoir si le passage de l'équipement de strip-till a eu un effet négatif sur le couvert précédemment semé en plein.

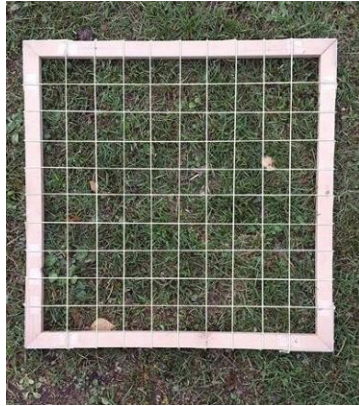


Figure 12 : Cadre utilisé pour mesurer la couverture foliaire et la densité de plantes.

9.2. Densité des plantes

Le principe de cette mesure est le même que pour la mesure de la couverture foliaire. On utilise le même cadre (Figure 12) sauf que, cette fois, on compte le nombre de plantes de chaque espèce, y compris les adventices, dans la surface délimitée par le cadre.

Comme pour la couverture foliaire, 5 blocs ont été délimités à intervalle régulier dans la parcelle. Cette mesure a également été réalisée deux fois au cours de l'essai. La première fois en même temps que la première mesure de couverture foliaire en septembre, et la seconde fois le 23 octobre.

Cette mesure permet de déterminer si les différentes espèces semées ont bien germé et donc si la densité de plantes comptées correspond plus ou moins bien avec la densité de semis. Elle permet également de savoir si certaines espèces ont pris le dessus sur d'autres en empêchant leur germination ou si le passage du strip-till a eu un effet négatif sur les couverts semés en plein.

9.3. Production de biomasse

La dernière mesure permettant d'évaluer le développement végétatif des différents traitements à avoir été effectuée est l'estimation de la production de biomasse sèche le 20 décembre 2017. Pour cette mesure, comme pour les deux précédentes, on procède par blocs perpendiculaires aux bandes de traitements. Vu le temps et la main-d'œuvre que cette mesure exige, la biomasse a été récoltée sur seulement 3 blocs. À chaque intersection entre les blocs et les bandes de traitement ou de contrôle, on prélève manuellement la biomasse aérienne sur une surface de 2 m² et on la pèse. On prélève ensuite une fraction de la biomasse fraîche récoltée pour la mettre à sécher dans une étuve à 105°C. On pèse enfin l'échantillon sec et on peut ainsi déterminer la teneur en matière sèche (MS) du prélèvement initial. Cela

permet d'obtenir une estimation de la quantité de biomasse, en tonnes de MS par hectare, produite par les différents traitements et par les bandes de contrôle.

Cette mesure est très intéressante car elle donne une indication sur la productivité d'un couvert et sur la restitution potentielle d'éléments nutritifs à la culture suivante. En effet, plus un couvert va développer une végétation importante, plus il va capter d'éléments nutritifs du sol – éléments qui auraient pu être lessivés hors d'atteinte pour la culture suivante si le sol avait été laissé nu, en particulier l'azote minéral résiduel de la culture précédente – et plus il va restituer d'éléments nutritifs à la culture suivante lors de sa décomposition si le rapport C/N des résidus n'est pas trop élevé.

Chapitre 10 : Analyses des résultats

L'analyse des résultats a été réalisée en utilisant la syntaxe et le formalisme du cours de biométrie LBIRA 2101 dispensé à la Faculté des bioingénieurs de l'UCL (Govaerts et al., 2017). Les logiciels SAS et Excel ont été utilisés pour les analyses statistiques.

10.1. Moyennes et écart-types

Les résultats des analyses réalisées sur les échantillons de sol récoltés en août sont présentés dans la troisième partie de ce mémoire sous la forme $\mu \pm \sigma$ avec :

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \text{ et } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}}$$

où μ est la moyenne des résultats, σ est l'écart-type lié à la moyenne, x_i est la valeur obtenue à la placette de prélèvement i et n est le nombre de placettes où des prélèvements ont été réalisés. Plus l'écart-type est élevé, c'est-à-dire que les valeurs sont largement distribuées autour de la moyenne, plus la variabilité de la mesure est importante.

10.2. Analyses des sols récoltés en août

Les résultats de ces mesures ont été analysés séparément par des modèles d'ANOVA 2 expliquant les variables quantitatives mesurées (pH, CEC, TSB, etc...) en fonction des facteurs catégoriels « Placette » et « Profondeur ». Les placettes de prélèvement ayant des positions différentes réparties sur tout le champ, l'absence d'effet significatif du facteur « Placette » indique que le champ peut être considéré comme homogène au niveau du paramètre analysé. Les modèles sont à chaque fois caractérisés par le coefficient de détermination R^2_{adj} qui renseigne la qualité de prédiction du modèle.

10.3. Choix et description des modèles utilisés

Les modèles SAS utilisés pour analyser statistiquement les autres résultats font appels à la procédure PROC MIXED. Ce sont des modèles d'analyse de la variance avec un critère de classification aléatoire. Chaque mesure correspond donc à une variable quantitative expliquée par plusieurs facteurs catégoriels et, pour certaines mesures, par un facteur aléatoire. Ce facteur aléatoire correspond au facteur « Bloc », correspondant aux blocs délimités dans l'essai en vue de réaliser les prélèvements ou les mesures, ou son interaction avec un des facteurs catégoriels.

Le choix du facteur aléatoire se fait à partir d'un modèle complet, comportant le facteur bloc et ses interactions avec tous les facteurs catégoriels et caractérisé par une vraisemblance $L(C)$, et en le comparant avec un modèle restreint, qui correspond au modèle complet dont les facteurs aléatoires sont enlevés un à un, de vraisemblance $L(R)$. La comparaison entre le modèle complet et le modèle restreint se fait en utilisant le test du rapport de vraisemblance de modèles emboîtés (Govaerts et al., 2017) :

H_0 : Modèle restreint, de vraisemblance $L(R)$

H_1 : Modèle complet, de vraisemblance $L(C)$

La statistique de test du rapport de vraisemblance est :

$$LRT = -2 \log_e \left[\frac{L(R)}{L(C)} \right] = -2 [\log_e L(R) - \log_e L(C)] \sim \chi^2_{(p)} \text{ sous } H_0$$

avec p le nombre de paramètres soustraits du modèle complet. On rejette l'hypothèse H_0 lorsque $LRT > \chi^2(0,95 ; p)$. Ainsi, les tableaux de résultats d'analyse de la variance comportent une ligne présentant le facteur aléatoire, son degré de liberté, la valeur du Chi-carré pour ce degré de liberté et la valeur du LRT qui permet de déterminer si le modèle restreint est utilisé.

10.3.1. Résultats du suivi de la croissance des couverts

Pour ces mesures, vu la difficulté de différencier la ligne de strip-till de l'interligne et le peu de pertinence d'une telle démarche en ce qui concerne le suivi de la croissance des couverts, des mesures ont à chaque fois été réalisées dans les bandes de contrôle séparant les traitements, en plus des mesures effectuées dans les bandes de traitement elles-mêmes.

Comptage d'espèce et couverture foliaire

Le nombre d'individus de chaque espèce présentes dans les différents traitements, moyenné pour les deux dates d'observation, a été utilisé pour calculer les proportions desdites espèces. Ces proportions observées sont alors comparées aux proportions attendues, calculées sur base de la dose de semis des différentes espèces au sein des différents traitements et de leur poids de mille grains (PMG). La couverture foliaire est présentée sous forme d'un graphique montrant son évolution pour chaque traitement, aux deux dates de mesure. N'avoir des données que pour deux dates différentes empêche de pousser les analyses plus loin.

Biomasse produite

Avant d'être analysées, les mesures de biomasse ont été corrigées vu l'hétérogénéité de la production dans les bandes de contrôles. La correction des données s'est effectuée comme suit :

$$Biomasse\ corrigée(x) = Biomasse(x) - Biomasse\ contrôle(x - 1) + Biomasse\ moyenne\ des\ contrôles$$

avec $Biomasse(x)$, la biomasse produite dans le traitement x , $Biomasse\ contrôle(x-1)$, la biomasse produite dans le contrôle adjacent au traitement x et $Biomasse\ moyenne\ des\ contrôles$, la moyenne de la biomasse produite dans l'ensemble des bandes de contrôles séparant les traitements. Les résultats de cette correction ont été utilisés dans un modèle d'ANOVA 1 expliquant la variable quantitative « Biomasse » par le facteur catégoriel « Traitement ». Le test du rapport de vraisemblance indique que le modèle restreint, sans aucun facteur aléatoire, est pertinent, c'est donc lui qui est utilisé.

10.3.2. Analyses comparant la ligne de strip-till et l'interligne

Matière organique

Pour la matière organique, les résultats ont été analysés via une ANOVA 3 expliquant la variable quantitative « MO » (teneur en matière organique) en fonction des facteurs catégoriels « Traitement », « Position » et « Profondeur ». Le test du rapport de vraisemblance révèle que seul le facteur aléatoire « Bloc*Traitement » est pertinent pour ce modèle

Stabilité structurale

L'indice d'instabilité structurale (Is) est une variable quantitative pouvant être expliquée par les facteurs catégoriels « Traitement », « Position » et « Profondeur ». Le test du rapport de vraisemblance indique que le modèle restreint, sans aucun facteur aléatoire, peut être utilisé à la place du modèle complet.

Densité apparente

La densité apparente, variable quantitative, peut être expliquée en fonction des facteurs « Traitement » et « Position » dans un modèle d'ANOVA 2. Le modèle restreint, sans aucun facteur aléatoire, est pertinent vu le résultat du test du rapport de vraisemblance.

Pénétrométrie

Les résultats des mesures de pénétrométrie correspondent à des profondeurs atteintes par la tige du pénétromètre qui sont des variables quantitatives pouvant être expliquées par les facteurs catégoriels « Traitement », « Position » et « Date ». L'ANOVA 3 contient également un facteur aléatoire, le facteur « Bloc*Date », qui est le seul pertinent d'après le test du rapport de vraisemblance.

Troisième partie : Résultats

Chapitre 11 : Caractérisation initiale

Les résultats présentés dans ce chapitre correspondent aux analyses réalisées sur les échantillons de sol récoltés préalablement à l'installation de l'essai. Ces analyses ont permis de caractériser initialement les propriétés physico-chimiques du sol.

11.1. Caractéristiques physiques

11.1.1. Granulométrie

Tous les horizons présentent la même répartition massique des fractions et sous-fractions texturales (Figure 13). L'analyse granulométrique révèle que le sol du champ sur lequel l'essai a été installé appartient à la classe des limons sableux (Delvaux et Delmelle, 2018).

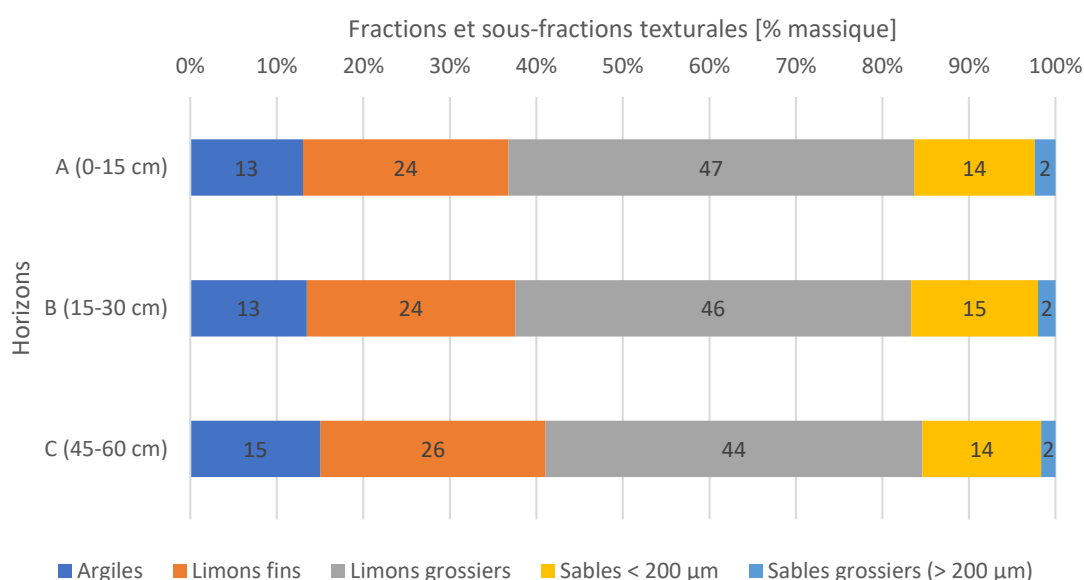


Figure 13 : Fractions et sous-fractions texturales des horizons du champ étudié.

11.1.2. Stabilité structurale

L'indice d'instabilité structurale (Is) a été déterminé en août en utilisant la méthode de Hénin (Tableau 4).

Tableau 4 : Indices d'instabilité structurale des différents horizons des échantillons prélevés en août (moyennes et écart-types).

Horizons	A	B	C
Is	4,92 ± 0,9	7,01 ± 1,75	16,24 ± 4,61

L'indice d'instabilité pouvant varier de 0,1 (sol très stable) à plus de 100 (sol à structure instable), ces résultats montrent que le sol étudié ici est plus stable en surface, ce qui est en accord avec les constatations de Roger-Estrade et al. (2011) concernant la stabilité plus grande des sols non labourés. Cette constatation sera discutée plus en détail dans la quatrième partie.

11.2. Caractéristiques chimiques

Les caractéristiques chimiques analysées sur les échantillons de sol prélevés en août sont le pH, la CEC, les bases échangeables, le taux de saturation en bases (TSB), le contenu en nitrates (N-NO_3^-), l'azote total et le carbone total (N_{tot} et C_{tot}), le rapport C/N, la matière organique (MO) et le phosphore disponible (Tableau 5).

Tableau 5 : Résultats des analyses réalisées sur les échantillons de sol récoltés en août (moyennes et écart-types).

	Horizons			
	A (0-15 cm)	B (15-30 cm)	C (45-60 cm)	
pH	6,9 ± 0,21	7,08 ± 0,29	7,3 ± 0,23	
CEC [méq/100g]	14,89 ± 1,04	14,18 ± 1	13,6 ± 0,42	
Bases échangeables	Na [méq/100g]	0,1 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,04 ± 0,01
	K [méq/100g]	0,89 ± 0,07	0,49 ± 0,18	0,3 ± 0,06
	Mg [méq/100g]	0,77 ± 0,07	0,63 ± 0,08	0,68 ± 0,1
	Ca [méq/100g]	7,52 ± 0,4	8,03 ± 0,25	7,61 ± 0,62
Taux de saturation en bases (TSB) [%]	62 ± 3	65 ± 5	65 ± 4	
Nitrates [kg N-NO₃⁻/ha]	63,13 ± 27,48	59,68 ± 34,72	26,72 ± 28,49	
C_{tot} [%]	1,45 ± 0	0,99 ± 0	0,51 ± 0,07	
N_{tot} [%]	0,15 ± 0,01	0,11 ± 0	0,06 ± 0	
C/N	9,92 ± 1,38	9,34 ± 0,72	8,17 ± 0,25	
Matière organique (MO) [%]	3,3 ± 0,18	2,6 ± 0,15	1,97 ± 0,05	
Phosphore disponible (P) [mg/kg]	57 ± 9	61 ± 8	48 ± 12	

11.3. Remarques concernant la caractérisation initiale

Une analyse statistique rapide des résultats des caractéristiques chimiques des échantillons récoltés en août, via une ANOVA 2 des variables quantitatives expliquées (pH, CEC, TSB, etc...) en fonction des facteurs catégoriels « Placette » et « Profondeur », révèle que seuls le pH, la CEC et le TSB présentent une hétérogénéité au niveau de la parcelle (facteur « Placette » significatif). Pour les autres mesures le facteur « Placette » n'est pas significatif, ce qui permet de supposer que la parcelle sur laquelle s'est déroulée l'essai est homogène au niveau de ces propriétés physico-chimiques (Tableau 6).

Tableau 6 : Résultats des ANOVA 2 des caractéristiques physico-chimiques des sols récoltés en août, expliquées en fonction des facteurs « Placette » et « Profondeur ». Le caractère significatif de la p-valeur se lit comme suit : 0 < *** < 0,001 < ** < 0,01 < * < 0,05. n.s., non significatif.

Effet	pH	CEC	TSB	C _{tot}	N _{tot}	C/N	MO	P	Is
Placette	***	*	**	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Profondeur	***	*	n.s.	***	***	n.s.	***	n.s.	***
R²_{adj}	0,93	0,79	0,87	0,93	0,98	0,52	0,97	0,49	0,88

Il est important de constater que le pH des différents horizons est presque neutre et, dans tous les cas, inférieur à 7,5. Cette caractéristique est importante car un pH supérieur à 7,5 peut être le signe de la présence de carbonates dans le sol, ce qui peut fausser la mesure du C_{tot} et nécessiter sa correction par un dosage des carbonates. Les teneurs en nitrates qui figurent dans le Tableau 5 ne peuvent pas être interprétées et sont probablement erronées vu le peu de fiabilité de la manipulation mise en place pour leur détermination. Plusieurs mesures, comme la teneur en MO ou encore l'indice d'instabilité Is (Tableau 4), montrent une stratification selon un gradient vertical. Cet effet sera encore rencontré pour d'autres mesures et sera expliqué plus en détail dans la quatrième partie de ce mémoire.

Chapitre 12 : Développement des couverts végétaux

12.1. Comptage d'espèces

Le comptage d'espèce permet, pour chaque traitement, de comparer les proportions des individus de différentes espèces observées au cours de l'essai avec les proportions attendues de ces mêmes individus, compte tenu de la dose de semis qui a été appliquée par hectare et le poids de mille grains (PMG). Les informations concernant les doses de semis et le PMG des différentes espèces ont été présentées dans la deuxième partie du mémoire (Tableau 2). Les résultats obtenus pour les deux témoins (moyenne des deux dates de comptage) figurent dans le Tableau 7. Pour rappel, le couvert occupant ces deux témoins correspond au mélange d'espèces semé en plein sur toute la surface du champ, avant le passage du strip-till. La seule différence entre les deux témoins est, qu'après le semis en plein, le témoin-ST a été passé au strip-till (mais sans le semis d'une espèce dans la ligne travaillée), alors que le témoin sans ST ne l'a pas été. Les proportions attendues des différentes espèces sont donc les mêmes pour les deux témoins. En comparant les proportions observées avec celles attendues, il semble que l'avoine brésilienne et la féverole soient un peu en-dessous de ce qui était prévu. La phacélie et le tournesol sont, eux, au-dessus des attentes. Des repousses de froment ont également été observées lors des comptages. Les proportions des espèces observées sont similaires entre les deux témoins, excepté pour la phacélie qui est proportionnellement moins présente dans le témoin-ST. Les repousses de blé sont également plus présentes dans ce témoin comparé au témoin sans ST.

Tableau 7 : Proportions attendues (sur base des doses de semis et des PMG) et observées (en moyenne pour les deux dates d'observation) des différentes espèces pour les deux témoins.

Espèces	% Attendu	% Observé	
		Témoin sans ST	Témoin-ST
Avoine brésilienne	52,35	30,46	28,21
Féverole	10,29	5,61	6,94
Lin	6,18	7,37	6,05
Phacélie	29,41	45,13	33,88
Tournesol	1,76	3,56	5,44
Froment	0	7,87	15,28

Les résultats des comptages (moyenne des deux dates) pour les traitements dans lesquels une espèce a été implantée dans la ligne en même temps que le strip-till figurent dans le Tableau 8. De manière générale, plus ou moins les mêmes tendances que pour les témoins sont observées. C'est-à-dire que les proportions observées d'avoine et de féverole sont en-dessous des attentes, excepté pour le traitement « mélange de trèfles » (trèfles dans le tableau) qui présente une proportion d'avoine brésilienne bien au-dessus de ce qui était attendu. Pour les autres espèces du mélange semé en plein (lin, phacélie et tournesol), les traitements pour

lesquels aucune de ces espèces n'a été en plus implantée dans la ligne montre des proportions observées similaires à celles attendues, avec quelques fluctuations d'un traitement à l'autre. Pour les traitements radis structurador (Radis struct.), vesce de printemps (Vesce print.) et fenugrec les proportions des espèces semées dans la ligne passée au strip-till sont bien au-delà des attentes alors que pour les traitements avoine brésilienne (Avoine brés.) et mélange de trèfles, les proportions observées sont inférieures à celles attendues. Les traitements trèfle incarnat, tournesol et phacélie montrent des proportions d'espèces implantées dans la ligne conformes aux attentes. D'autres adventices que les repousses de blé ont pu être observées lors des comptages, en particulier des chénopodes blanc (*Chenopodium album*).

Tableau 8 : Proportions attendues (sur base des doses de semis et des PMG) et observées (en moyenne pour les deux dates d'observation) des différentes espèces pour les 8 traitements pour lesquels une espèce a été implantée dans la ligne de strip-till.

Espèces	Traitement															
	Avoine brés.		Radis struct.		Trèfle incarnat		Vesce print.		Tournesol		Fenugrec		Phacélie		Trèfles	
	% Attendu	% Observé	% Attendu	% Observé	% Attendu	% Observé	% Attendu	% Observé	% Attendu	% Observé	% Attendu	% Observé	% Attendu	% Observé	% Attendu	% Observé
Avoine brésilienne	63,92	41,82	48,50	35,80	36,78	25,71	46,72	27,58	46,97	38,94	46,97	29,94	38,28	31,85	18,54	24,56
Féverole	7,80	3,46	9,54	4,14	7,23	4,16	9,19	7,46	9,23	6,11	9,23	2,20	7,53	3,89	3,65	3,86
Lin	4,68	5,45	5,72	6,31	4,34	4,49	5,51	6,40	5,54	5,47	5,54	2,76	4,52	7,22	2,19	2,51
Phacélie	22,27	31,27	27,25	26,15	20,66	26,99	26,25	24,17	26,39	28,72	26,39	30,88	48,39	46,85	10,42	23,50
Tournesol	1,34	0,57	1,63	3,21	1,24	2,88	1,57	3,45	11,87	13,48	1,58	2,41	1,29	1,85	0,63	2,04
Radis structurator	/	/	7,36	18,37	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Trèfle incarnat	/	/	/	/	29,75	27,90	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Vesce de printemps	/	/	/	/	/	/	10,76	24,96	/	/	/	/	/	/	/	/
Fenugrec	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	10,29	21,97	/	/	/	/
Trèfles	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	64,58	39,20
Froment	0	17,43	0	6,01	0	7,87	0	5,98	0	7,28	0	9,49	0	8,33	0	4,32

La Figure 14 montre le nombre d'individus observés en moyenne pour les deux dates de comptage ainsi que la proportion de chaque espèce au sein des différents traitements. Le traitement trèfles est celui présentant le plus grand nombre d'individus au mètre carré.

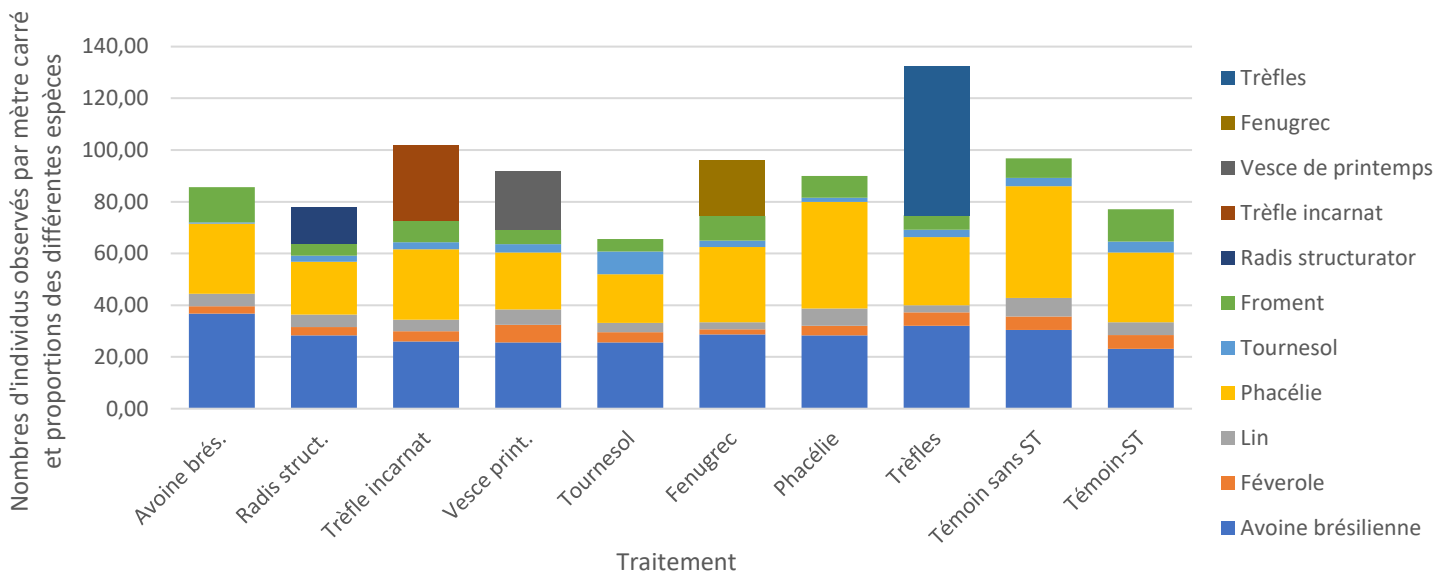


Figure 14 : Nombre d'individus observés par mètre carré en moyenne pour les deux dates de comptage et proportions de chacune des espèces au sein des différents traitements. ST, strip-till.

12.2. Couverture foliaire

Les résultats des mesures de la couverture foliaire sont présentés sous forme de graphique à la Figure 15. A la date du 11 septembre, un mois après le semis, le témoin sans ST est, parmi tous les traitements, celui qui couvre la plus grande surface de sol (environ 50 % de la surface du sol est couverte par la végétation du couvert). Le traitement tournesol est celui qui a eu le développement le plus lent d'après les résultats figurant sur le graphique. Au 18 octobre, deux mois après le semis, tous les traitements ont atteint 100 % de couverture foliaire (fermeture de la canopée).

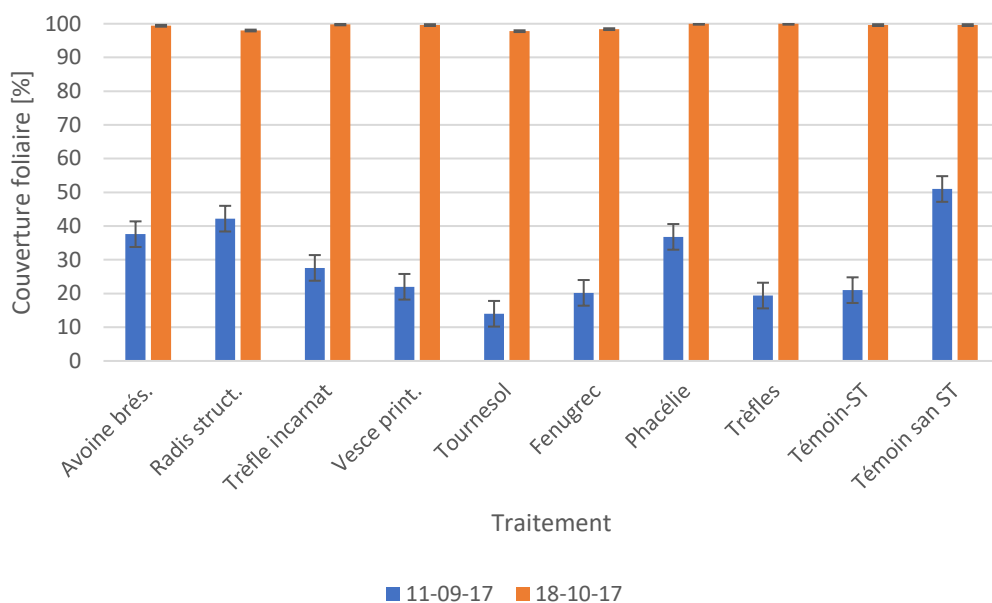


Figure 15 : Graphique représentant, pour tous les traitements, la couverture foliaire aux deux dates de mesure.

12.3. Production de biomasse

La biomasse aérienne produite par les différents couverts est une variable quantitative pouvant être analysée par un modèle d'ANOVA 1 en fonction du facteur catégoriel « Traitement ». Les résultats (Tableau 9) montrent que la production de biomasse varie de 3,09 T de MS/ha pour le traitement avoine brésilienne à 4,39 T de MS/ha pour le témoin-ST. Le test de Tukey révèle que le témoin-ST a produit significativement plus de biomasse que les traitements avoine brésilienne et radis structurator. La production de biomasse des autres traitements n'est pas significativement différente du témoin-ST ni des traitements avoine et radis.

Tableau 9 : Production de biomasse sèche pour les différents traitements (moyennes et écart-types). Des lettres identiques dans la colonne « Groupe » signifient que la quantité de biomasse produite n'est pas significativement différente d'un traitement à l'autre.

Traitement	Biomasse [T de MS/ha] ($\mu \pm \sigma$)	Groupe
Avoine brés.	3,09 ± 0,39	A
Radis struct.	2,97 ± 0,39	A
Trèfle incarnat	3,21 ± 0,47	AB
Vesce print.	3,65 ± 0,39	AB
Tournesol	3,29 ± 0,39	AB
Fenugrec	3,80 ± 0,39	AB
Phacélie	3,51 ± 0,39	AB
Trèfles	3,88 ± 0,39	AB
Témoin-ST	4,39 ± 0,39	B
Témoin sans ST	3,49 ± 0,39	AB

Chapitre 13 : Analyses physico-chimiques de sol

Comme il a été expliqué dans la deuxième partie (Matériels et méthodes), des échantillons de sol ont été prélevés, pour chaque traitement, dans la ligne de strip-till et dans l'interligne après l'hiver, en mars 2018. Ces échantillons ont été analysés pour comparer certaines propriétés physiques et chimiques du sol de la ligne travaillée et occupée par un couvert végétal spécifique de celles de l'interligne non travaillé.

13.1. Matière organique

La matière organique (MO) a été mesurée pour tous les traitements, dans la ligne et dans l'interligne, et à trois profondeurs. Trois facteurs catégoriels peuvent donc expliquer la variable quantitative MO : le facteur « Traitement », le facteur « Position » et le facteur « Profondeur ». L'ANOVA 3 de la teneur en MO en fonction de ces trois facteurs révèle que deux de ceux-ci sont significatifs (p -valeur $< 0,05$), à savoir les facteurs « Traitement » et « Profondeur » (Tableau 9). L'interaction entre les facteurs « Traitement » et « Position » est également significative.

Tableau 10 : Résultats de l'ANOVA 3 de l'analyse de MO, expliquée en fonction des facteurs « Traitement », « Position » et « Profondeur ». Le caractère significatif de la p -valeur se lit comme suit : $0 < *** < 0,001 < ** < 0,01 < * < 0,05$. Covariance du facteur aléatoire : 0,0089.

Effet	DDL	F	p-valeur
Traitement	9	3,1	0,0023 **
Position	1	0,67	0,414
Profondeur	2	173,1	$< 0,0001$ ***
Traitement*Position	9	2,15	0,0305 *
Traitement*Profondeur	18	1,21	0,2684
Position*Profondeur	2	2,43	0,0922
Traitement*Position*Profondeur	18	0,66	0,8416
Facteur aléatoire	DDL	χ^2	LRT
Bloc*Profondeur	3	7,82	2,4

13.1.1. Facteur « Traitement »

Le test de Tukey appliqué au facteur « Traitement » montre que le témoin sans ST a une teneur en MO (moyenne sur les deux positions et les trois profondeurs) significativement plus grande que les autres traitements (Tableau 11). Le traitement trèfle incarnat a également une teneur en MO significativement plus faible que le traitement phacélie.

Tableau 11 : Teneur en MO (moyennes et écart-types) pour les différents traitements, positions et profondeurs confondues. Des lettres identiques dans la colonne « Groupe » signifient que la teneur en MO n'est pas significativement différente d'un traitement à l'autre.

Traitement	MO [%] ($\mu \pm \sigma$)	Groupe
Avoine brés.	2,61 \pm 0,06	AB
Radis struct.	2,5 \pm 0,06	AB
Trèfle incarnat	2,48 \pm 0,06	B
Vesce print.	2,55 \pm 0,06	AB
Tournesol	2,53 \pm 0,06	AB
Fenugrec	2,57 \pm 0,06	AB
Phacélie	2,63 \pm 0,06	A
Trèfles	2,55 \pm 0,06	AB
Témoin-ST	2,6 \pm 0,06	AB
Témoin sans ST	2,79 \pm 0,06	C

13.1.2. Facteur « Profondeur »

La comparaison des teneurs en MO pour les trois profondeurs analysées (test de Tukey appliqué au facteur « Profondeur »), tous traitements et positions confondus, montre une stratification verticale de la MO (Tableau 12). Plus la profondeur augmente, plus la teneur en MO décroît.

Tableau 12 : Teneur en MO (moyennes et écart-types) pour les différentes profondeurs, traitements et positions confondus. Des lettres identiques dans la colonne « Groupe » signifient que la teneur en MO n'est pas significativement différente d'une profondeur à l'autre.

Profondeur	MO [%] ($\mu \pm \sigma$)	Groupe
A (0-15 cm)	3,44 \pm 0,06	A
B (15-30 cm)	2,44 \pm 0,06	B
C (45-60 cm)	1,86 \pm 0,06	C

13.1.3. Interaction entre les facteurs « Traitement » et « Position »

Le graphique de la Figure 16 montre, pour chaque traitement et pour les trois profondeurs confondues, la teneur en MO dans la ligne et celle dans l'interligne. Le test de Tukey appliqué au facteur d'interaction « Traitement*Position » révèle que la teneur en MO dans la ligne et/ou dans l'interligne peut différer d'un traitement à l'autre. Cependant, ce qu'il est intéressant de constater ici, c'est que seul le traitement trèfles a une teneur en MO significativement différente entre la ligne et l'interligne. Pour ce traitement, la teneur en MO

est plus élevée dans l'interligne (2,69 %) que dans la ligne (2,41 %). Il n'y a pas de différence significative entre la ligne et l'interligne pour les autres traitements.

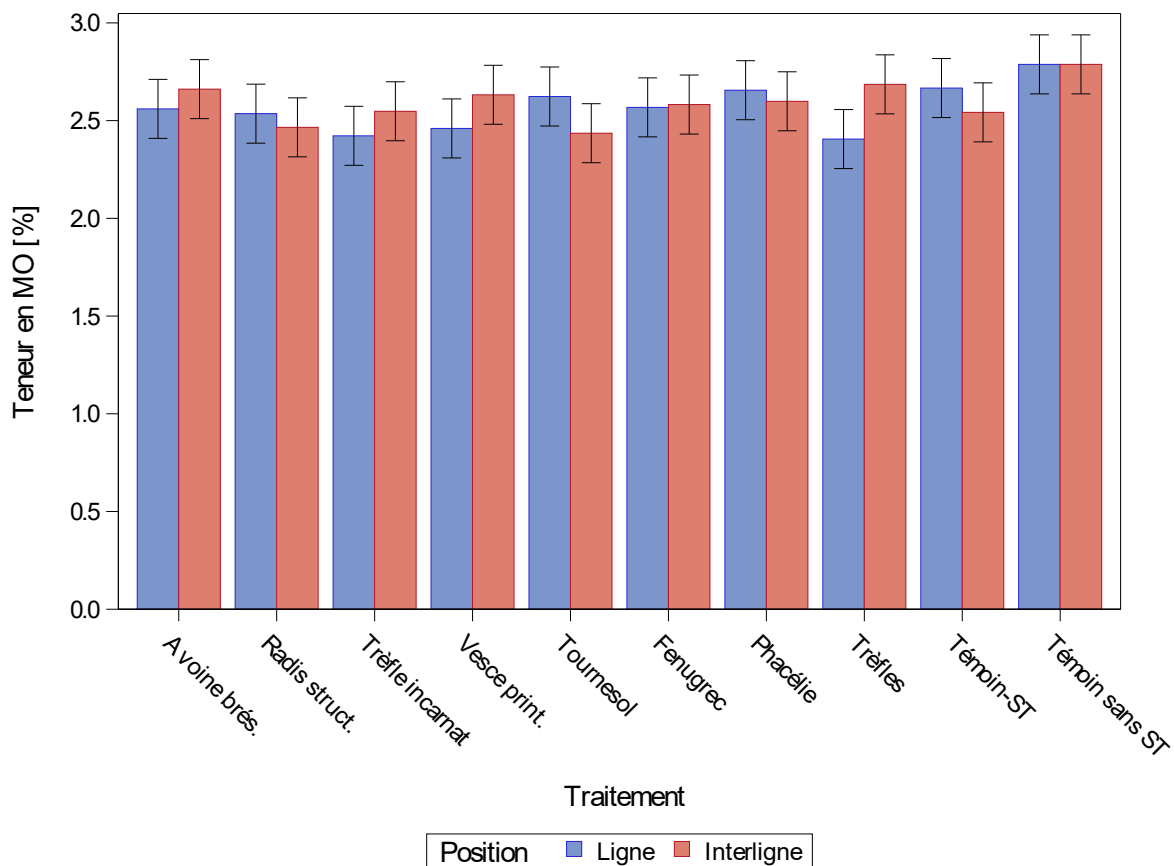


Figure 16 : Graphe montrant l'effet de l'interaction entre les facteurs « Traitement » et « Position » sur la teneur en MO, toutes profondeurs confondues.

13.2. Stabilité structurale

La stabilité structurale a été mesurée dans tous les traitements, dans la ligne et dans l'interligne, et à deux profondeurs (0-15 et 15-30 cm), via la méthode de Hénin. Comme pour la matière organique, trois facteurs catégoriels peuvent donc expliquer la variable quantitative « Stabilité structurale » : les facteurs « Traitement », « Position » et « Profondeur ». L'ANOVA 3 (Tableau 13) révèle que le facteur « Profondeur » ainsi que le facteur d'interaction « Traitement*Profondeur » sont significatifs (p-valeur < 0,05).

Tableau 13 : Résultats de l'ANOVA 3 de l'analyse de la stabilité structurale, expliquée en fonction des facteurs « Traitement », « Position » et « Profondeur ». Le caractère significatif de la p-valeur se lit comme suit : 0 < *** < 0,001 < ** < 0,01 < * < 0,05.

Effet	DDL	F	p-valeur
Traitement	9	1,11	0,3652
Position	1	0,82	0,3686
Profondeur	1	14,92	0,0002 ***
Traitement*Position	9	0,78	0,6311
Traitement*Profondeur	9	2,55	0,0124 *
Position*Profondeur	1	0,09	0,7617
Traitement*Position*Profondeur	9	1,12	0,3579
Facteur aléatoire	DDL	χ^2	LRT
Aucun	4	9,49	0,9

13.2.1. Facteur « Profondeur »

En moyenne, pour tous les traitements et pour les deux positions, l'indice d'instabilité structurale de Hénin (Is) est significativement plus faible à la profondeur A (0-15 cm) qu'à la profondeur B (15-30 cm). L'indice d'instabilité augmente avec la profondeur ou, autrement dit, plus la profondeur est grande, moins la structure du sol est stable.

Tableau 14 : Indice d'instabilité structurale de Hénin (Is, moyennes et écart-types) pour les différentes profondeurs, traitements et positions confondus. Des lettres identiques dans la colonne « Groupe » signifient que l'Is n'est pas significativement différent d'une profondeur à l'autre.

Profondeur	Is ($\mu \pm \sigma$)	Groupe
A (0-15 cm)	10,74 \pm 0,93	A
B (15-30 cm)	15,82 \pm 0,93	B

13.2.2. Interaction entre les facteurs « Traitement » et « Profondeur »

Le graphe de la Figure 17 montre, pour tous les traitements et en moyenne pour les deux positions, la valeur de l'indice d'instabilité Is à chacune des profondeurs. Ce graphique montre que, à une même profondeur, l'indice Is peut varier d'un traitement à l'autre. Le test de Tukey appliqué au facteur d'interaction « Traitement*Profondeur » révèle que seuls les traitements radis structurador, trèfle incarnat et trèfles ont des valeurs d'Is significativement différentes entre les deux profondeurs pour lesquelles des analyses ont été réalisées. Pour ces traitements, l'indice d'instabilité est significativement plus élevé à la profondeur B qu'à la profondeur A. Cela signifie que le sol, pour ces traitements, a une structure plus stable en surface qu'en profondeur. Néanmoins, le graphique montre que l'Is est, de manière générale, plus élevé à la profondeur B qu'à la profondeur A, même si la différence n'est pas significative.

Seul le traitement vesce de printemps présente un indice d'instabilité plus élevé dans les 15 premiers centimètres que dans les 15 centimètres suivants.

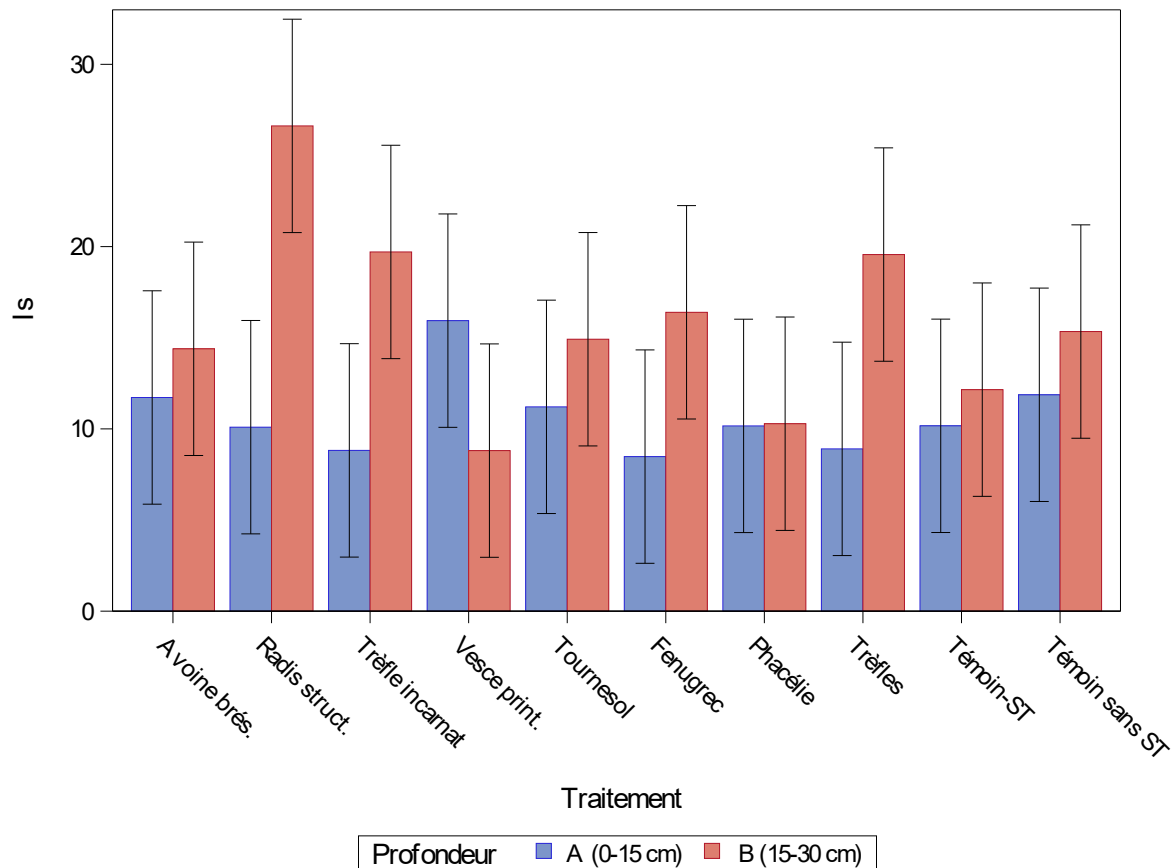


Figure 17 : Graphe montrant l'interaction entre les facteurs « Traitement » et « Profondeur » sur l'indice d'instabilité Is, les deux positions étant confondues.

13.3. Densité apparente

La densité apparente a été mesurée sur des échantillons de sol prélevés dans tous les traitements et à deux positions. La densité apparente est une variable quantitative qui peut être expliquée par deux facteurs catégoriels, le facteur « Traitement » et le facteur « Position ». Le résultat de l'ANOVA 2 (Tableau 15) montre qu'il n'y a pas d'effet significatif des facteurs « Traitement » et « Position », ni de leur interaction, sur la valeur de la densité apparente.

Tableau 15 : Résultats de l'ANOVA 2 de l'analyse de la densité apparente, expliquée en fonction des facteurs « Traitement » et « Position ». Le caractère significatif de la p-valeur se lit comme suit : 0 < *** < 0,001 < ** < 0,01 < * < 0,05.

Effet	DDL	F	p-valeur
Traitement	9	0,52	0,8576
Position	1	0,47	0,4937
Traitement*Position	9	1,11	0,372
Facteur aléatoire	DDL	χ^2	LRT
Aucun	3	7,82	-3,6

Le graphique de la Figure 18 montre bien qu'il n'y a pas de différence de valeur de densité apparente entre les traitements et entre les positions, avec une variation de la densité de 1,3 à 1,46 g/cm³.

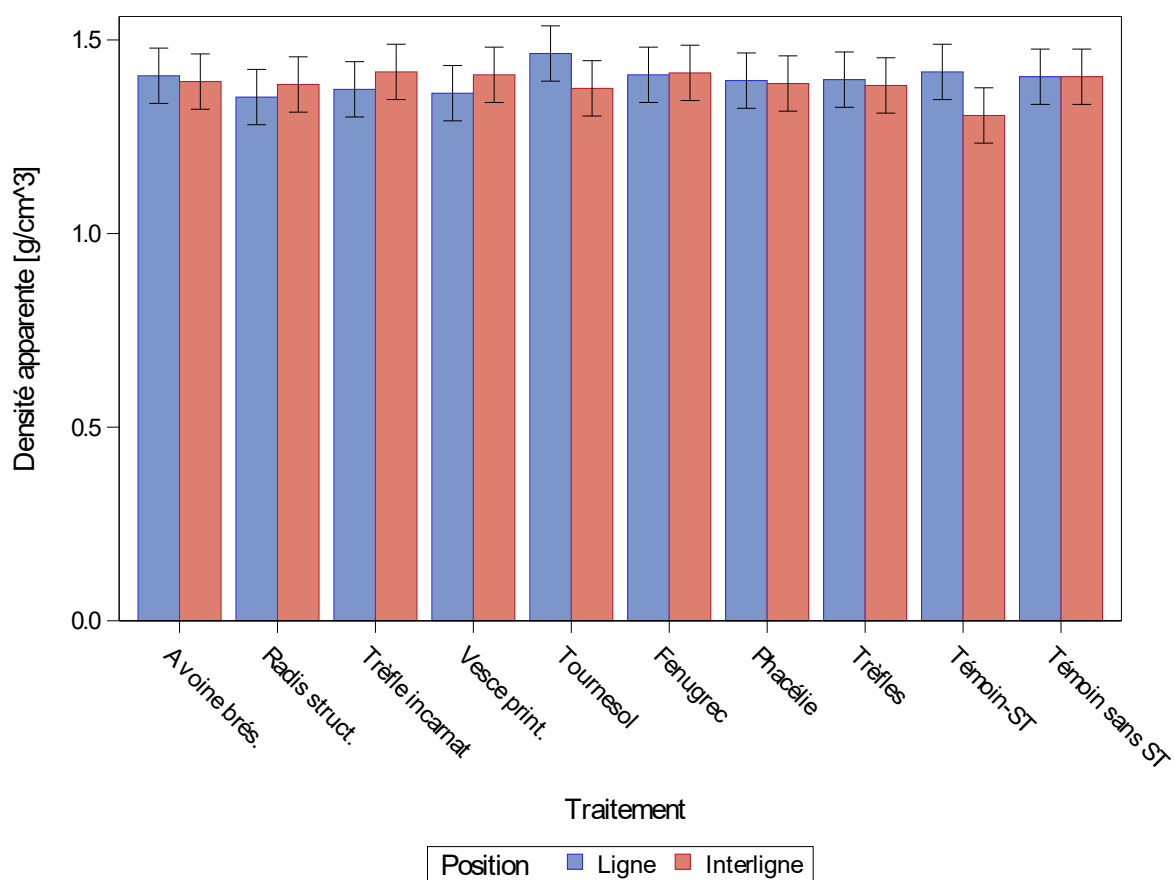


Figure 18 : Graphe représentant la valeur de la densité apparente pour chacun des traitements et pour les deux positions.

Chapitre 14 : Etat de la structure du sol

14.1. Pénétrométrie

Des mesures de pénétrométrie ont été réalisées quatre fois au cours de l'essai. Par soucis de clarté et de facilité d'utilisation des jeux de données, les résultats de ces mesures sont présentés sans prendre en compte le témoin-ST. En effet, aucune mesure n'a été réalisée dans celui-ci en août et en octobre et l'analyse des résultats obtenus en décembre et en avril, périodes pour lesquelles des mesures ont été réalisées dans ce témoin, montre qu'il n'est pas significativement différent des autres traitements. Le résultat d'une mesure de pénétrométrie correspond à une profondeur atteinte par la tige de l'outil de mesure (pénétromètre) à une position déterminée, dans un traitement donné. La variable quantitative « Profondeur atteinte » peut donc être expliquée dans un modèle d'ANOVA 3 intégrant les facteurs catégoriels « Traitement », « Position » et « Date ». Le résultat de cette ANOVA 3 (Tableau 16) montre que les facteurs « Traitement », « Position » et « Date » sont significatifs. Les interactions « Traitement*Date », « Position*Date » et « Traitement*Position*Date » sont également significatives.

Tableau 16 : Résultats de l'ANOVA 3 des mesures de pénétrométrie, expliquées en fonction des facteurs « Traitement », « Position » et « Date ». Le caractère significatif de la p-valeur se lit comme suit : 0 < *** < 0,001 < ** < 0,01 < * < 0,05.
Covariance du facteur aléatoire : 5,75.

Effet	DDL	F	p-valeur
Traitement	7	2,8	0,0068 **
Position	1	366,76	< 0,0001 ***
Date	3	13,21	0,0001 ***
Traitement*Position	7	0,59	0,7638
Traitement*Date	21	1,95	0,0061 **
Position*Date	3	24,69	< 0,0001 ***
Traitement*Position*Date	21	1,6	0,0416 *
Facteur aléatoire	DDL	χ^2	LRT
Bloc*Date	3	7,82	0,3

14.1.1. Facteur « Traitement »

Traiter ce facteur sans considérer la date à laquelle la mesure a été réalisée n'ayant pas beaucoup de sens, ce facteur sera analysé après pour les mesures d'avril (section 14.1.4).

14.1.2. Facteur « Position »

La comparaison des profondeurs atteintes aux deux positions, tous traitements confondus et en moyenne pour les quatre périodes de mesures, réalisée via un test de Tukey appliqué au facteur « Position » montre que la profondeur atteinte est toujours plus importante à la position 1 (ligne) qu'à la position 2 (interligne). En moyenne, la tige du pénétromètre s'enfonce 7 cm plus profondément dans la ligne que dans l'interligne (Tableau 17).

Tableau 17 : Profondeur atteinte par le pénétromètre (moyennes et écart-types) aux deux positions, tous traitements confondus et en moyenne sur les quatre dates de mesure. Des lettres identiques dans la colonne « Groupe » signifient que la profondeur n'est pas significativement différente d'une position à l'autre.

Position	Profondeur atteinte [cm] ($\mu \pm \sigma$)	Groupe
1 (Ligne)	37,29 \pm 0,61	A
2 (Interligne)	30,84 \pm 0,56	B

14.1.3. Facteur « Date »

La comparaison deux à deux des profondeurs atteintes, moyennées pour tous les traitements et pour les deux positions, montre des variations significatives entre dates (Tableau 18). La profondeur atteinte diminue d'août à octobre, augmente pour atteindre son maximum en décembre, puis diminue de nouveau en avril où elle atteint le minimum de sa valeur.

Tableau 18 : Profondeur atteinte par le pénétromètre (moyennes et écart-types) aux quatre dates, traitement et position confondus. Des lettres identiques dans la colonne « Groupe » signifient que la profondeur n'est pas significativement différente d'une date à l'autre.

Date	Profondeur atteinte [cm] ($\mu \pm \sigma$)	Groupe
Août 2017	36,14 \pm 1,12	A
Octobre 2017	32,13 \pm 1,12	B
Décembre 2017	38,58 \pm 1,12	A
Avril 2018	29,41 \pm 1,12	B

14.1.4. Comparaison des profondeurs atteintes en avril pour les différents traitements

Les résultats présentés ici concernent les mesures réalisées en avril car c'est à ce moment que l'effet de la décompaction sur l'état de la structure du sol est le plus intéressant pour la culture suivante. Le fait d'avoir un sol moins compacté pour un certain traitement comparé à un autre en décembre ne veut en effet pas dire que la culture suivante pourra profiter de cette décompaction pour développer un système racinaire plus puissant. Les mesures d'avril ont

été réalisées juste après le semis des betteraves, celles-ci pourront donc éventuellement profiter de cette décompaction si les conditions demeurent plus ou moins semblables. Le Tableau 19 présente les profondeurs atteintes lors des mesures réalisées en avril, en moyenne pour les deux positions, pour chacun des traitements. Parmi ces traitements, celui composé du mélange de trèfles est celui pour lequel la profondeur atteinte est la plus importante, suivi des traitements trèfle incarnat et phacélie.

Tableau 19 : Profondeur atteinte par le pénétromètre (moyennes et écart-types) pour les mesures d'avril, en moyenne pour les deux positions. Des lettres identiques dans la colonne « Groupe » signifient que la profondeur n'est pas significativement différente d'un traitement à l'autre.

Traitement	Profondeur atteinte [cm] ($\mu \pm \sigma$)	Groupe
Avoine brés.	27,48 \pm 1,43	A
Radis struct.	28,56 \pm 1,43	AB
Trèfle incarnat	30,26 \pm 1,43	BC
Vesce print.	28,78 \pm 1,43	AB
Tournesol	28,22 \pm 1,43	AB
Fenugrec	28,8 \pm 1,43	AB
Phacélie	30,76 \pm 1,43	BC
Trèfles	32,42 \pm 1,43	C

14.1.5. Interaction entre les facteurs « Position » et « Date »

Le graphique de la Figure 19 montre que l'écart entre la profondeur atteinte dans la ligne et celle atteinte dans l'interligne diminue entre août et octobre puis ne cesse d'augmenter jusqu'en décembre. A cette période, l'écart est maximal et est d'environ 11 cm. A partir de décembre et jusqu'en avril, la profondeur atteinte dans la ligne diminue plus rapidement que celle dans l'interligne et donc l'écart de profondeur entre les deux positions diminue pour atteindre 5,4 cm lors des dernières mesures. Les mesures réalisées en avril sont de nouveau les plus intéressantes car elles indiquent si une différence existe encore entre la ligne où se développeront les betteraves et l'interligne. Le test de Tukey révèle qu'il y a une différence significative entre la profondeur atteinte dans la ligne (32,12 \pm 1,22 cm) et l'interligne (26,7 \pm 1,22 cm) lors des mesures d'avril.

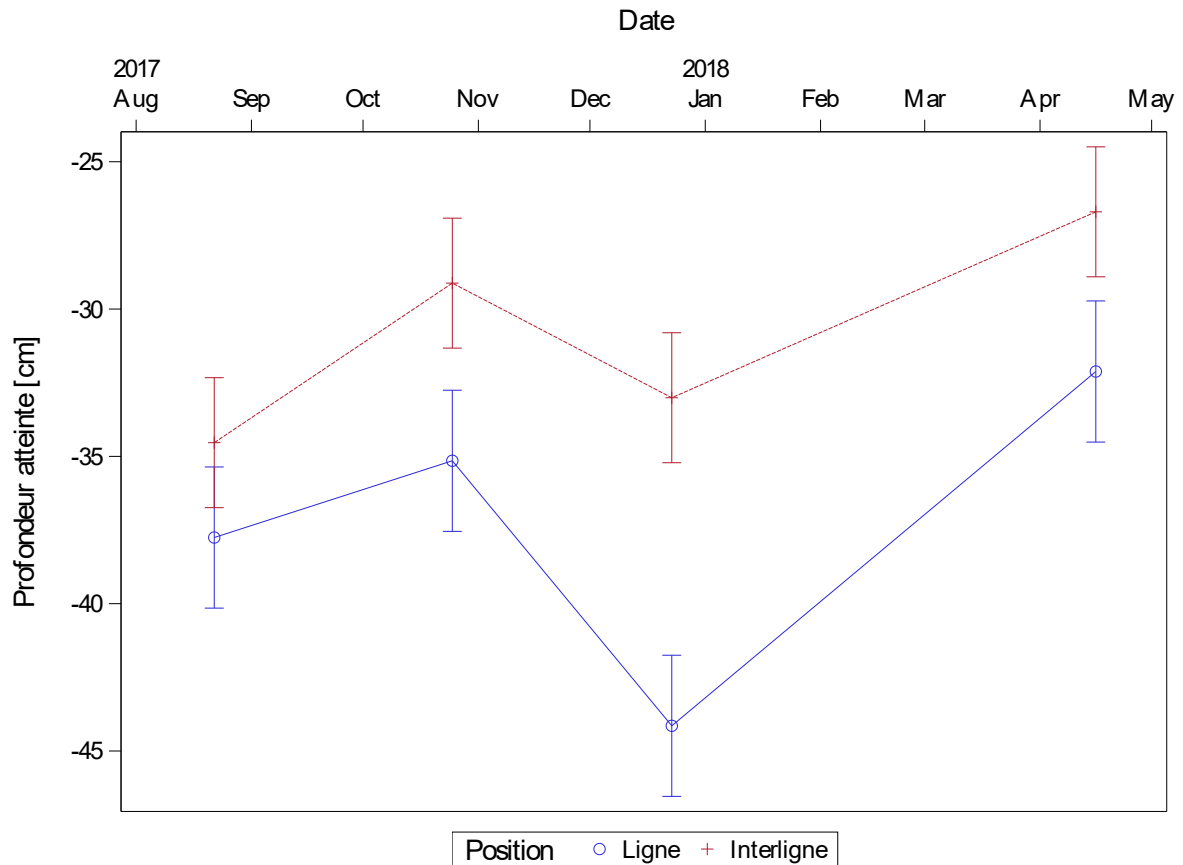


Figure 19 : Graphe représentant la profondeur atteinte par le pénétromètre, tous traitements confondus, pour les quatre dates et pour les deux positions.

14.2. Profil de sol

Il a été expliqué dans la deuxième partie du mémoire qu'un profil de sol a été réalisé sur la parcelle de l'essai de strip-till végétal. Un autre profil de sol a également été réalisé sur une parcelle du Centre de Marbaix. D'après la carte numérique des sols de Wallonie, les sols de ces deux parcelles appartiennent au même groupe (SPW - D'GARNE, 2016). Bien que les deux parcelles puissent être différentes au niveau de leurs autres caractéristiques physico-chimiques, il est possible malgré tout de comparer l'effet des pratiques culturales appliquées sur ces terres sur la structure du sol. Pour rappel, la parcelle où s'est déroulé l'essai de strip-till végétal n'est plus labourée depuis une dizaine d'années. La parcelle du Centre de Marbaix est cultivée conventionnellement, avec labour régulier. La Figure 20 montre deux photos, l'une du profil de sol observé sur la parcelle labourée, l'autre du profil de la parcelle cultivée en TCS. Il est facilement constatable que la semelle de labour est beaucoup plus épaisse sur la parcelle cultivée conventionnellement que sur la parcelle cultivée en TCS. La présence de cette semelle de labour s'explique par le passage répété de la charrue à une même profondeur et parfois dans des conditions de sol trop humide, ce qui provoque un lissage et une compaction du sol en fond de raie. Cette semelle constitue pour les racines des plantes cultivées un obstacle quasiment infranchissable qui pourra éventuellement être pénalisant pour le

rendement car les ressources situées en deçà de la zone compactée ne sont pas disponibles pour les plantes. Malgré le fait qu'elle ne soit plus labourée depuis plus de dix ans, la parcelle en TCS présente aussi une semelle de labour. Cependant, cette semelle est beaucoup moins importante que pour la parcelle labourée. Elle est même en voie de résorption grâce à l'activité accrue des lombrics et des racines de couverts végétaux qui occupent la parcelle lors de l'interculture.

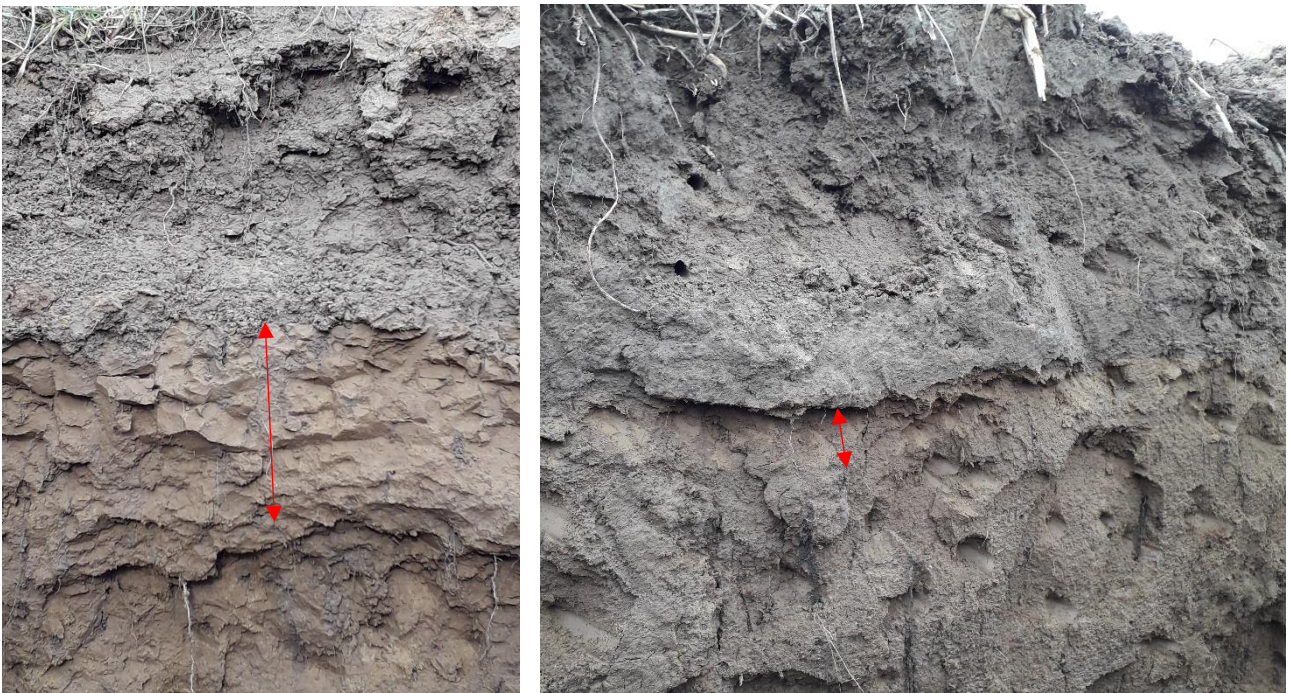


Figure 20 : Photos des profils de sol obtenus sur une parcelle du Centre de Marbaix régulièrement labourée (gauche) et sur la parcelle du strip-till végétal qui n'est plus labourée depuis une dizaine d'année (droite). Les flèches rouges indiquent l'épaisseur de la semelle de labour.

La structure des agrégats peut également servir d'indicateur de la structure du sol. Les agrégats visibles sur la photo de gauche de la Figure 20 ont une structure anguleuse et sont plus larges que hauts, ce qui constitue encore une preuve que le sol de la parcelle labourée est compacté. Les agrégats issus de la parcelle cultivée en TCS ont une structure plus grumeleuse et se détachent plus facilement ce qui est un signe de l'amélioration de la structure du sol due notamment à l'augmentation de l'activité biologique de ce sol non labouré.

Quatrième partie : Discussion

Chapitre 15 : Remarques à propos de l'itinéraire technique

Deux pratiques couramment rencontrées lorsqu'il s'agit de l'itinéraire d'implantation et de destruction des couverts végétaux sont discutées dans ce chapitre, la technique du faux semis et la destruction des couverts par roulage sur gel.

La technique du faux semis consiste à réaliser un travail du sol superficiel (déchaumage) juste après la récolte dans le but de créer un lit de semence favorable à la levée des adventices et des repousses de la culture précédente. Un second travail superficiel, quelques jours ou semaines plus tard, permet alors de détruire les adventices et repousses ayant germé (Labreuche et al., 2007). Un faux semis a été réalisé avant l'implantation de l'essai de strip-till végétal. En effet, un premier déchaumage a été réalisé juste après la moisson du précédent blé, le 7 août, et un second déchaumage a eu lieu une semaine plus tard, en même temps que le semis du couvert en plein. L'efficacité de cette technique est visible dans les résultats de comptage d'espèces (section 12.1) qui montrent que la proportion des repousses de froment est en moyenne (tous traitements confondus) de seulement 9 % des individus observés.

Comme il a été expliqué à la section 4.3.3, plusieurs méthodes peuvent être mises en œuvre pour détruire les couverts végétaux. La technique utilisée ici a consisté à rouler les couverts lors d'une période de fortes gelées. Les plantes, dont les tissus sont ainsi exposés au froid, deviennent alors plus sensibles et sont détruites sans autres interventions mécanique ou chimique.



Figure 21 : Destruction du couvert végétal par roulage sur gel (à gauche) et état de la terre juste après le semis des betteraves (à droite).

Les photos de la Figure 21 montrent bien que le roulage sur gel est un moyen efficace de détruire un couvert, sans utilisation d'herbicide ou de travail mécanique supplémentaire. La terre, juste après le semis des betteraves, est exempte de repousses et les débris végétaux sont bien répartis à la surface du champ.

Chapitre 16 : Impact du strip-till sur le développement des couverts

Logiquement, le passage du strip-till, s'il a lieu en été ou en automne en vue de l'implantation d'une culture de printemps, doit avoir lieu après le semis des couverts d'interculture (Brun et Légère, 2017). En effet, agir en ordre inverse risque d'annuler ou du moins de réduire l'effet de décompaction créé par le strip-till à cause du passage de l'équipement de semis. Cependant, réaliser une opération de travail du sol profonde après le semis en plein d'un couvert, même si elle est limitée aux rangs de la future culture, pourrait avoir un effet négatif sur l'émergence, la capacité de couverture et, finalement, sur la production de biomasse de ce couvert. En effet, les dents de l'outil de strip-till peuvent entraîner dans leur sillage les graines du couvert nouvellement semé et les enfouir en profondeur dans le sol, où elles seront incapables de germer. Les mesures réalisées au cours de l'essai pour évaluer le développement des couverts dans les différents traitements tendent à montrer qu'il n'y a pas d'effet négatif du passage de l'outil de strip-till après le semis du couvert en plein.

En ce qui concerne le nombre d'individus et la proportion des différentes espèces, le graphique de la Figure 14 semble montrer qu'il n'y a pas de différences excessives entre les traitements qui pourraient être dues à un effet pénalisant du strip-till. Le témoin sans ST, correspondant au couvert semé en plein sans strip-till, est effectivement celui pour lequel le plus grand nombre d'espèces du mélange de départ a été observé mais les autres traitements, pour lesquels il y a eu un passage au strip-till, présentent un nombre d'individus et une proportion d'espèces du mélange de départ observés qui ne sont pas excessivement inférieurs à ceux du témoin sans ST.

En ce qui concerne la couverture foliaire, le graphique de la Figure 15 montre que le témoin sans ST est, comparé aux autres traitements, celui qui se développe le plus rapidement. En effet, un mois après le semis, il couvre déjà 50 % de la surface du sol. Certains traitements (trèfle incarnat, vesce de printemps, tournesol, fenugrec, trèfles et témoin-ST) ne couvrent d'ailleurs pas encore 30 % de la surface du sol un mois après le semis. Ce retard dans le développement de la canopée peut éventuellement être préjudiciable à la fonction de protection du sol des couverts végétaux impliqués. En effet, d'après Thomas et Archambeaud (2016), il faut au minimum que 30 % de la surface soit couverte pour protéger efficacement le sol des phénomènes d'érosion. La Figure 15 montre cependant que les traitements ne sont en retard que par rapport au témoin sans ST car, deux mois après le semis, tous les traitements ont atteints 100 % de couverture foliaire.

Le passage du strip-till après le semis du couvert en plein n'affecte pas la production de biomasse des couverts. Le Tableau 9, qui présente la production de biomasse sèche des différents traitements, montre que c'est le témoin-ST, celui occupé par le mélange semé en plein et dont les lignes ont été décompactées, qui a produit la plus grande quantité de biomasse (4,39 T de MS/ha). C'est plus que ce qu'a produit le témoin sans ST (3,49 T de MS/ha). Les autres traitements n'ont pas produit significativement moins de biomasse que le témoin sans ST (variation de 2,97 à 3,88 T de MS/ha).

La conclusion de ces observations est que le passage de l'outil de strip-till après le semis du couvert en plein ne semble pas préjudiciable au développement de celui-ci. Une légère perte d'individus composant le mélange est possible ainsi qu'un retard dans le développement de la couverture du sol mais ces effets n'ont pas d'impact sur le taux de couverture final du sol ni sur la production de biomasse des couverts. Un changement de l'itinéraire technique de l'implantation du strip-till végétal pourrait permettre d'atténuer le retard dans le développement du couvert semé en plein lorsqu'il est suivi du strip-till. Il est possible de semer le couvert en plein simultanément au strip-till et au semis des couverts localisés dans le rang (Brun et Légère, 2016). Cet itinéraire tout en un nécessite cependant un matériel ou une combinaison d'outils spécifiques ayant des coûts de mise en œuvre à mettre en balance avec les gains potentiels du strip-till végétal. Ces considérations économiques n'ont pas été prises en compte dans ce mémoire et ne seront pas explorées plus en détail, faute de données disponibles.

Chapitre 17 : Caractéristiques physico-chimiques du sol

17.1. Matière organique

17.1.1. Comparaison entre traitements

Le résultat de l'analyse statistique des teneurs en MO des échantillons de sol récoltés en août semble indiquer que ce paramètre est homogène sur l'ensemble de la parcelle où l'essai de strip-till végétal a été installé (Tableau 6). Cette constatation autorise la comparaison des teneurs en MO mesurées dans les différents traitements. L'analyse statistique de ces mesures a montré que le témoin sans ST est, parmi tous les traitements, celui qui a la teneur en MO la plus élevée (Tableau 11). Cette teneur plus élevée en MO du témoin qui n'a pas subi de travail du sol profond, contrairement aux autres traitements qui, eux, ont été passés au strip-till, peut avoir plusieurs origines. La production de biomasse aérienne du témoin sans ST étant similaire à celle des autres traitements, excepté celle du témoin-ST (Tableau 9), l'hypothèse d'une plus grande teneur en MO de ce témoin due à un apport plus important de débris végétaux après la destruction du couvert semble être écartée. La teneur en MO plus faible des autres traitements comparé à celle du témoin sans ST peut avoir été causée par le travail du sol supplémentaire que ces traitements ont subi. En effet, il est bien connu que le travail du sol, même s'il est limité à la bande de semis, provoque une minéralisation accrue de la MO, suite à l'aération et au réchauffement du sol (Balesdent et al., 2000). Les résultats obtenus lors de cet essai sont en contradiction avec ceux obtenus par Laufer et al. (2016). Ces auteurs ont constaté que la teneur en MO du sol est similaire voire légèrement supérieure en strip-till qu'en semis direct. Or le témoin sans ST correspond en fait à un couvert (et à une culture) implanté en semis direct. Le travail plus profond du strip-till (45 cm) dans l'essai étudié ici comparé à la profondeur du strip-till dans l'étude de Laufer et al. (17 à 22 cm) peut peut-être expliquer cette apparente contradiction.

17.1.2. Evolution avec la profondeur

Les mesures de MO (section 13.1.2) montrent qu'il y a une stratification verticale de celle-ci dans le profil de sol. La teneur en MO est plus importante en surface et diminue avec la profondeur. Cette caractéristique des sols cultivés en TCS, dont le strip-till fait partie, est bien connue et abondamment documentée dans la littérature (Roger-Estrade et al., 2011 ; Bronick et Lal, 2005 ; Soane et al., 2012 ; Tebrügge et Düring, 1999). Les résultats présentés dans ce mémoire mettent encore en évidence cet effet de stratification. La stratification de la teneur en MO dans les sols non labourés est due à l'accumulation de matériaux organiques en surface alors que ceux-ci sont enfouis et mélangés dans toute l'épaisseur du profil dans les systèmes de travail du sol conventionnels. Cette accumulation de MO en surface a de nombreuses conséquences sur les propriétés chimiques et physiques du sol. La CEC, par exemple, suit en

général la même distribution que celle de la MO car celle-ci est porteuse de nombreuses charges négatives contribuant à l'établissement de la CEC (Delvaux et Delmelle, 2018). Cet effet de la MO peut être observé pour les analyses de sol faites en août. Une stratification de la MO était déjà visible à ce moment et un effet similaire peut être observé pour les valeurs de la CEC (Tableau 5). La stratification de la MO entraîne donc également une stratification de la CEC dans le sol. Un lien existe également entre la teneur en MO et l'indice d'instabilité structurale de Hénin mais il sera discuté plus en détail à la section 17.2.1.

17.1.3. Absence d'effet « Position »

L'analyse statistique des résultats des mesures de la teneur en MO a montré qu'il n'y a pas d'effet significatif du facteur « Position » (Tableau 10). Cela veut dire que, excepté pour le traitement trèfles, la teneur en MO dans ligne de strip-till n'est pas différente de celle dans l'interligne. Ce constat peut paraître surprenant puisque, dans la première partie de ce mémoire, plusieurs études ont été citées disant que la teneur en MO est généralement plus faible dans la ligne à cause notamment de la localisation des résidus dans l'interligne suite à l'action des pièces travaillantes de l'outil de strip-till (Fernández et al., 2015 ; Morris et al., 2010). Cependant, il ne faut pas oublier que l'essai mis en place dans le cadre de ce mémoire est un essai de strip-till végétal. Les lignes n'ont pas seulement été décompactées par le passage du strip-till mais un couvert a également été localisé dans cette même ligne. Ce couvert constitue un apport direct de MO dans la ligne qui entraîne une atténuation de l'écart qui aurait pu exister entre les deux positions si aucun couvert n'avait été semé. De plus, les études citées ici ont été conduites sur des périodes de temps beaucoup plus longues que celle étudiée dans ce mémoire, dans des conditions climatiques différentes et des systèmes de culture également différents. L'étude de Fernández et al. (2015), par exemple, concerne une rotation de maïs et soja, tous deux implantés au strip-till, les rangs de maïs, sur lesquels l'étude se concentre dans ce cas, étant d'année en année localisés à la même position, le tout sur une période de cinq ans. Il est compréhensible qu'après cinq ans, et en localisant les rangs de maïs à la même position d'année en année, une différence dans la teneur en MO apparaisse entre la ligne et l'interligne non travaillé. Notre essai de strip-till végétal n'a été suivi que sur une période d'un an. Une période aussi courte rend difficile l'apparition de différences nettes entre les deux positions. En outre, la rotation culturale appliquée sur la parcelle de l'essai n'implique pas uniquement des cultures implantées au strip-till, ni la mise en place chaque année de couverts localisés. La préparation du sol pour l'implantation des autres cultures de la rotation (par exemple le blé ou l'escourgeon) implique l'utilisation d'outils de travail superficiel (déchaumeur, herse rotative, etc...) qui, même s'ils ne travaillent pas le sol à une grande profondeur, entraînent un brassage et une répartition des résidus végétaux, et donc de la MO, sur toute la surface du champ.

Le traitement trèfles est le seul qui présente une différence significative entre la ligne et l'interligne, avec une teneur plus élevée dans l'interligne (Figure 16). Une explication possible est que, comparé aux autres traitements, le couvert implanté dans la ligne, composé ici d'un mélange de différentes espèces de trèfles, ait produit moins de biomasse que les autres

couverts localisés. Il n'est malheureusement pas possible de vérifier cette hypothèse car, lors de la récolte de biomasse, les espèces n'ont pas été séparées et pesées individuellement. Une autre explication est que les parties aériennes de ces trèfles ne soient pas restées confinées à la ligne de strip-till lors de leur croissance. L'observation visuelle des trèfles au cours de l'une des nombreuses mesures a montré que ceux-ci peuvent avoir un port bas, presque rampant, qui peut, au moins en partie, expliquer la teneur en MO plus élevée de l'interligne. D'ailleurs, le traitement vesce de printemps, une espèce à port rampant qui empêche le développement et le confinement de la végétation du couvert uniquement dans la ligne de strip-till, montre également une différence (non significative) de teneur en matière organique en faveur de l'interligne.

17.2. Stabilité structurale

17.2.1. Evolution avec la profondeur

Les résultats présentés à la section 13.2.1 montrent qu'il y a une stratification verticale de la valeur de l'indice d'instabilité structurale (Is). L'Is est plus faible en surface qu'en profondeur (Tableau 14), les agrégats du sol sont donc plus stables en surface. Cette particularité est à mettre en parallèle avec la stratification de la MO discutée précédemment. Il est bien connu que la stabilité structurale du sol est directement proportionnelle à sa teneur en MO (Balesdent et al., 2000 ; Chenu et al., 2000 ; Al-Kaisi et al., 2014). La MO favorise la stabilité des agrégats en agissant comme une colle entre les particules du sol et en stimulant l'activité des microorganismes (champignons et bactéries) qui favorisent eux-mêmes la stabilisation de la structure en formant un mucilage reliant les particules du sol entre elles (Balesdent et al., 2000 ; Roger-Estrade et al., 2011). Il n'est donc pas étonnant de constater dans les résultats des analyses de sol que sa stabilité est plus grande en surface, là où la teneur en MO est la plus élevée, que plus en profondeur.

17.2.2. Absence d'effet « Position »

Contrairement à ce qui a été observé par Fernández et al. (2015), la stabilité structurale de la ligne de strip-till n'est pas différente de celle de l'interligne dans l'essai étudié ici. La stabilité structurale du sol étant directement proportionnelle à sa teneur en MO (voir paragraphe ci-dessus), l'absence de différence de teneur en MO entre la ligne et l'interligne explique l'absence de différence de stabilité structurale entre les deux positions.

17.3. Densité apparente

Comme il a été exposé dans la troisième partie du mémoire, la densité apparente n'est pas différente entre la ligne du strip-till végétal de celle de l'interligne. Certains auteurs ont pourtant mis en évidence que le strip-till entraîne une réduction de la densité du sol dans la ligne travaillée, grâce notamment à l'action de la dent de décompaction de l'outil de strip-till et à la colonisation de la ligne par les racines des plantes cultivées (Fernández et al., 2015 ; Übelhör et al., 2014). Le fait que toute la surface du champ soit occupée par un couvert et pas uniquement la ligne travaillée (qui est occupée par les cultures dans les études citées ci-avant, avec un inter-rang nu) peut constituer une explication concernant l'absence de différence de densité entre les deux positions dans l'essai étudié ici. Les mesures de pénétrométrie ont pourtant montré que la compaction est moins importante dans la ligne du strip-till végétal que dans l'interligne (voir section 14.1). Une réduction de la compaction dans la ligne devrait être le signe d'une réduction de la densité du sol à cet endroit. La méthode de récolte des échantillons de sol pour la mesure de la densité apparente explique peut-être que la réduction de la compaction ne transparaisse pas dans les résultats de mesure de densité. En effet, les échantillons ont été récoltés à la bêche, à une seule profondeur, dans le but d'obtenir une motte dont la structure était conservée. Lors de la prise de l'échantillon dans la ligne, il arrivait que la motte se défasse, rendant impossible la suite des mesures. Les échantillons finalement analysés étaient ceux pour lesquels il avait été possible de sortir une motte intacte, dont le sol était probablement plus dense que celui composant les mottes se désagrégeant.

Chapitre 18 : Etat de compaction du sol

18.1. Comparaison entre la ligne et l'interligne

Les résultats présentés dans le Tableau 17 montrent que la résistance à la pénétration est plus importante dans l'interligne non travaillé que dans la ligne passée au strip-till. Cette constatation est en accord avec celles de nombreuses études évaluant l'impact du strip-till sur l'état de compaction du sol (Laufer et al., 2016 ; Übelhör et al., 2014 ; Licht et Al-Kaisi, 2005 ; Fernández et al., 2015). La compaction du sol est plus faible dans la ligne travaillée grâce à l'action de la dent de décompactage de l'outil de strip-till qui traverse les zones plus compactées du profil. La pression limite maximale au moment où la profondeur atteinte par le pénétromètre est mesurée est de 2,06 MPa (Mégapascal). Or, le seuil critique de résistance à la pénétration, au-delà duquel la croissance racinaire des plantes et le rendement des cultures sont réduits, varie de 2,5 à 3 MPa (Übelhör et al., 2014). Le seuil limite de pression n'est jamais franchi ici, puisque la mesure est prise avant qu'il ne soit atteint, les profondeurs atteintes par le pénétromètre ne correspondent donc pas forcément à l'entièreté de la zone du profil qui pourra être explorée sans difficulté par les racines des plantes.

18.2. Comparaison entre traitement

Pour les mesures de pénétrométrie réalisées en avril, le traitement trèfles est celui qui présente la valeur de profondeur atteinte, en moyenne pour les deux positions, la plus élevée (Tableau 19). Cette différence entre le traitement trèfles et les autres peut laisser penser que ce traitement est celui qui permet de mieux garder l'effet de décompactation créé par le passage du strip-till. Cependant, une analyse plus fine des résultats montre que la profondeur moyenne a augmenté grâce à l'augmentation de la profondeur atteinte dans l'interligne qui, pour ce traitement, n'est pas très différente de celle atteinte dans la ligne (environ 32 cm). Les autres traitements présentent des profondeurs atteintes dans la ligne similaires à celle du traitement trèfles ce qui est l'essentiel puisque c'est dans la ligne que se développeront les betteraves.

18.3. Evolution temporelle de la compaction du sol

La Figure 22 reproduit le graphique de l'évolution temporelle de la profondeur atteinte par le pénétromètre aux deux positions, tous traitements confondus, déjà présenté à la section 14.1.5. Un graphique représentant les conditions climatiques rencontrées au cours de l'essai y est adjoint. Ces données climatiques (températures et précipitations) ont été récoltées par la station PAMESEB présente au Centre de Marbaix, non loin de l'endroit de l'essai de strip-till végétal.

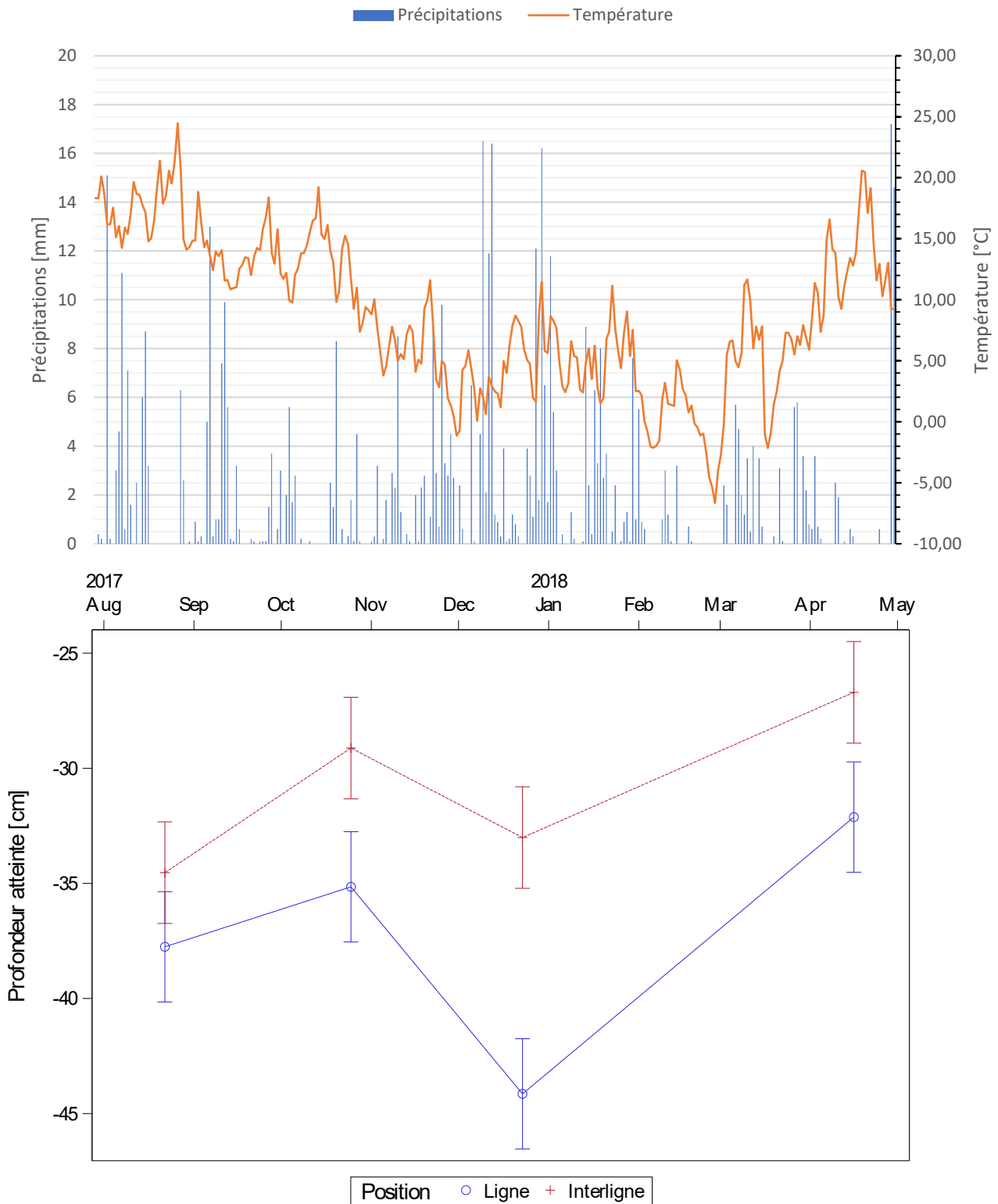


Figure 22 : Evolutions au cours de l'essai des conditions climatiques (températures et précipitations) et des mesures de pénétrométrie réalisées aux deux positions (ligne et interligne), tous traitements confondus. Les deux graphiques partagent le même axe des abscisses (date).

La mise en parallèle de ces deux graphiques peut permettre d'expliquer les variations rencontrées dans les mesures évaluant l'état de compaction du sol au cours de l'essai car les conditions climatiques peuvent avoir une grande influence sur la structure du sol.

Les mesures de pénétrométrie réalisées en août permettent en quelque sorte de visualiser l'état de la structure obtenue juste après le strip-till. Le graphique de la page précédente montre que c'est à ce moment que la différence entre la ligne et l'interligne est la moins marquée, bien qu'elle soit quand même significative. Le faible écart entre les mesures prises dans la ligne de celles prises dans l'interligne peut peut-être s'expliquer par le fait que les dents de l'outil de strip-till était équipées de « pattes d'oie » qui perturbent un plus grand volume de sol comparé à des dents droites (Biielders, 2017), atténuant ainsi les différences qui auraient pu exister entre les deux positions.

Entre août et octobre, la profondeur atteinte diminue, et ce, plus rapidement dans l'interligne que dans la ligne, entraînant un accroissement de l'écart entre les deux positions. Les conditions climatiques prévalant avant la prise des mesures peuvent en partie expliquer cette évolution. En effet, Licht et Al-Kaisi (2005) ont montré que la résistance à la pénétration est grandement affectée par l'humidité du sol, plus celle-ci étant élevée, moins forte est la résistance. Les conditions climatiques relativement sèches du mois précédant les mesures peuvent expliquer qu'il y ait une diminution de la profondeur atteinte pour les deux positions. La diminution est cependant plus forte dans l'interligne que dans la ligne. Une hypothèse explicative de cette observation est que la ligne de strip-till constitue un chemin préférentiel pour l'écoulement de l'eau, ce qui, combiné avec le fait qu'il y ait eu des précipitations dans les jours précédant les mesures, veut dire que la ligne était plus humide que l'interligne à ce moment. L'humidité plus importante de la ligne aurait donc facilité l'enfoncement de la tige du pénétromètre à cette position.

Entre octobre et décembre, les profondeurs atteintes augmentent pour les deux positions mais plus rapidement dans la ligne que dans l'interligne. L'importance des précipitations de la fin du mois de novembre et du début du mois de décembre a entraîné une augmentation de l'humidité du sol qui explique probablement cette augmentation de profondeur de pénétration. La courte période de gel de début décembre peut peut-être expliquer l'augmentation plus importante de la profondeur atteinte dans la ligne. En effet, si l'hypothèse expliquée ci-dessus stipulant que la ligne de strip-till constitue un chemin d'écoulement préférentiel de l'eau est valable, le gel de début décembre a pu engendrer un travail plus intense et une modification de la structure du sol plus importante dans la ligne, gorgée d'eau, que dans l'interligne. La réduction de densité faisant suite à ce « travail du sol » réalisé par l'alternance gel/dégel a, en fin de compte, pu accroître l'écart dans l'état de compaction du sol entre les deux positions.

Enfin, le printemps 2018 relativement sec explique peut-être la réduction de profondeur atteinte par le pénétromètre lors des mesures réalisées en avril. L'écart entre les deux positions est plus faible qu'en décembre mais la différence est quand même plus marquée que pour les mesures de début d'essai. Les betteraves se développant dans la ligne de strip-till disposeront d'environ 7 cm de sol facilement colonisable de plus que si elles étaient implantées dans l'interligne.

18.4. Absence d'interaction « Traitement*Position »

Le Tableau 16, présenté dans la troisième partie, montre qu'il n'y a pas d'effet significatif du facteur « Traitement*Position » permettant d'expliquer les variations observées dans les mesures de pénétrométrie. Cela signifie que les espèces implantées dans la ligne, en même temps que le strip-till, n'influencent pas la manière avec laquelle va évoluer l'état de compaction du sol.

Cette observation peut sembler en contradiction avec celles réalisées par différents auteurs qui ont observé que les racines de certaines espèces utilisées comme couverts végétaux, notamment le radis chinois, ont la capacité de traverser les zones compactées du profil, réduisant ainsi la compaction du sol dans leur environnement immédiat (Burr-Hersey et al., 2017 ; Chen and Weil, 2010). Néanmoins, cette absence d'effet des espèces implantées dans la ligne est logique puisque ces espèces ont été implantées juste après le passage d'une dent de décompactation, dans la ligne travaillée par l'outil de strip-till. Elles disposaient donc probablement d'une épaisseur de sol non compactée suffisante pour assurer un bon développement de leurs racines. Les racines des plantes colonisent en effet en priorité les zones du sol facilement accessibles, ayant une porosité suffisante (Hamza et Anderson, 2005).

Chapitre 19 : Critique de la méthodologie de l'étude

19.1. Disposition de l'essai

La disposition particulière de l'essai rend un peu plus difficile le traitement des données récoltées et leur interprétation. La très grande majorité des essais conduits en plein champ reportés dans la littérature impliquent une disposition sous forme de blocs aléatoires complets, avec une orientation des blocs dans le sens du gradient d'hétérogénéité éventuel de la parcelle expérimental et une répartition aléatoire de tous les traitements dans chaque bloc. Un tel dispositif permet de ne pas avoir besoin de prendre en compte les hétérogénéités inhérentes à la parcelle et de se concentrer sur l'observation des différents traitements. La mise en place de l'essai étudié ici, dans des conditions similaires à ce qui est réellement fait dans le milieu agricole et avec des outils utilisés par les agriculteurs, rend très difficile la mise en œuvre d'une disposition en blocs aléatoires complets, qui nécessite l'implantation des différents traitements sur des petites parcelles dont la taille est incompatible avec les dimensions des machines utilisées. La longueur des bandes semées est cependant suffisante (environ 100 m) pour pouvoir réaliser plusieurs répétitions d'une même mesure par traitement. Ces répétitions permettent ainsi de prendre en compte l'éventuelle hétérogénéité de la parcelle.

19.2. Pertinence des analyses réalisées

Le temps disponible au cours de l'année pour réaliser des analyses étant limité, il n'a pas été possible de mesurer tous les paramètres qui auraient pu être pertinents dans le cadre de cet essai. Par exemple, il aurait pu être intéressant de comparer la teneur en phosphore disponible (P) entre les deux positions et entre les différents traitements car il est connu que certaines espèces, notamment celles de la famille des brassicacées (radis chinois), ont une forte capacité de mobilisation de cet élément (White et Weil, 2011). Ces espèces pourraient donc éventuellement servir à enrichir en P disponible la future ligne de semis. L'observation et la quantification du taux de mycorhizes aurait également pu fournir des informations utiles sur la capacité de certaines espèces à promouvoir la mise en place de symbioses avec les champignons du sol.

Une analyse économique du strip-till végétal pourrait également être intéressante. Cependant, cette analyse est extrêmement compliquée à mettre en œuvre car il est impossible de quantifier réellement les retombées économiques de l'utilisation des couverts végétaux. En effet, il est peut-être possible de mesurer une éventuelle économie de fertilisants mais comment quantifier, du point de vue économique, la pollution moindre des cours d'eau par les nitrates d'origine agricole ou encore l'augmentation de biodiversité subséquentes à l'utilisation des couverts ? Il sera éventuellement possible d'observer une variation du rendement des betteraves suite à une implantation via la technique du strip-till

végétal mais cela dépasse le cadre de ce mémoire et d'autres se chargeront de réaliser ces observations.

Les analyses réalisées ici (teneur en MO, stabilité structurale, densité apparente et pénétrométrie) sont en fin de compte celles qui sont le plus souvent mentionnées dans les articles traitant du strip-till, facilitant ainsi la comparaison des résultats obtenus avec ceux de la littérature.

Conclusion et perspectives

Les défis, aussi bien économiques qu'environnementaux, auxquels fait face le monde agricole actuellement ont poussé de nombreux agriculteurs à repenser leur manière de cultiver. En effet, de plus en plus d'études montrent que les systèmes de culture conventionnels, avec travail du sol intensif, rotation des cultures courtes et utilisant de grandes quantités d'intrants extérieurs au système (comme les pesticides et les engrais de synthèse), non seulement peuvent être néfastes pour l'environnement en général, et pour le milieu agricole en particulier (perte de carbone des sols, érosion, compaction, perte de biodiversité, etc...) mais, de surcroît, ne permettent pas forcément aux agriculteurs de recevoir une rémunération décente assurant la pérennité de leur exploitation (Labreuche et al., 2007 ; Mazoyer et Roudart, 2002 ; Bertin, 2017). L'agriculture de conservation, dont les trois piliers sont l'arrêt du travail intensif du sol (en particulier l'arrêt du labour), la couverture permanente du sol et l'allongement des rotations, est une voie empruntée par une proportion de plus en plus importante d'agriculteurs (Soane et al., 2012 ; Derpsch et al., 2010) qui, bien que peut-être attirés au départ par les économies de mécanisation rendues possibles par ce type d'agriculture, sont de plus en plus soucieux des conséquences environnementales de leurs pratiques. La technique du strip-till végétal étudiée ici fait partie du domaine de l'agriculture de conservation.

Cette technique qui combine deux pratiques distinctes, à savoir un mode particulier de travail du sol (strip-till) et l'occupation des terres pendant l'interculture (couverts végétaux), a été utilisée pour implanter un essai à Vieusart, sur la parcelle d'un agriculteur adepte de la technique. Plusieurs espèces de plantes ont été semées dans les futures lignes de la culture suivante (betterave sucrière) et leurs effets sur les propriétés physico-chimiques et sur la structure du sol ont été mesurés. L'objectif de ce mémoire était de déterminer si le fait de limiter le travail du sol à la bande de semis et, éventuellement, d'y implanter un couvert localisé permet d'améliorer les propriétés du sol à cet endroit.

Trois paramètres physico-chimiques du sol ont été analysés pour comparer la ligne du strip-till végétal de l'interligne : la teneur en matière organique, la stabilité structurale et la densité apparente. Avant ces mesures, qui ont été réalisées sur des échantillons de sols récoltés en mars 2018, le développement des couverts a été suivi depuis leur semis en août 2017 jusqu'à leur destruction pendant l'hiver. L'état de la structure du sol a également été évalué via des mesures de pénétrométrie réalisées aux deux positions et à quatre périodes au cours de l'essai, depuis le semis des couverts jusqu'au semis des betteraves au printemps 2018.

Les résultats du suivi de la croissance des couverts (densité des différentes espèces, couverture foliaire et production de biomasse) ont montré que réaliser un travail du sol profond dans la future ligne de semis après l'implantation d'un couvert d'interculture sur toute la surface du champ n'est pas fortement pénalisant pour celui-ci. Une légère perte d'individus du mélange semé en plein et un retard dans le développement de la couverture foliaire sont observés dans les traitements pour lesquels un passage au strip-till a été réalisé, comparé au témoin n'ayant pas été travaillé dans les lignes de semis. Cependant, ces effets

n'ont pas de répercussions sur la couverture foliaire finale, qui atteint 100 % pour tous les traitements deux mois près le semis, ni sur la production de biomasse sèche, qui n'est pas différente entre les traitements passés au strip-till et le témoin qui ne l'a pas été.

L'analyse des caractéristiques physico-chimiques a montré que le strip-till végétal n'entraîne pas l'apparition de différences nettes entre les caractéristiques de la ligne et celles de l'interligne non travaillé. Une stratification de la teneur en MO et de l'indice d'instabilité structurale a par contre été observée.

Enfin, les mesures de pénétrométrie ont permis de mettre en évidence la compaction moindre du sol dans la ligne comparée à celle du sol de l'interligne. Cet état de compaction moindre, s'il persiste suffisamment longtemps, va offrir aux betteraves un environnement favorable pour leur croissance racinaire. Aucun effet des traitements sur l'état de compaction du sol n'a été observé car les espèces implantées dans la ligne ont probablement profité de la structure du sol favorable créée après le passage du strip-till pour se développer, sans avoir besoin d'explorer des zones plus compactées du profil.

En plus des mesures effectuées au cours de l'essai énumérées ci-dessus, d'autres analyses auraient pu fournir des informations intéressantes à propos des effets du strip-till végétal sur les caractéristiques chimiques et physiques du sol. Le dosage de certains éléments, par exemple, et la comparaison de leur teneur dans la ligne et dans l'interligne auraient pu mettre en évidence le rôle éventuel de certaines espèces implantées dans la ligne sur la mobilisation desdits éléments (cas du phosphore chez les brassicacées). La mesure de certaines propriétés biologiques du sol comme le taux de mycorhization aurait également pu être intéressante. Cependant, un mémoire ne se réalise normalement que sur une année, il est donc difficile de réaliser toutes les analyses et mesures qui semblent pertinentes. Il est également difficile dans un essai tel que celui-ci, où deux positions spatialement très proches sont comparées (la ligne et l'interligne), de sélectionner les paramètres à analyser qui pourraient être différents d'une position à l'autre. Cette caractéristique rend également obligatoire la prise d'échantillons et de mesures aux deux positions, ce qui double le temps de travail et le nombre d'échantillons à analyser. L'inclusion dans le dispositif expérimental d'un traitement non travaillé au strip-till mais incluant le semis d'un couvert dans la future ligne de la culture aurait également pu être intéressant pour visualiser la capacité potentielle de ce couvert à améliorer de lui-même la structure du sol. Cependant, le choix de l'espèce à planter dans une telle situation est problématique. En effet, faut-il répéter tous les traitements pour lesquels une espèce a été implantée dans la ligne mais, cette fois, semer celles-ci sans travail du sol localisé ? ou faut-il choisir arbitrairement une des espèces d'un des traitements et l'implanter sans travail du sol ? et, dans ce cas, comment comparer ce traitement avec ceux composés d'espèces différentes ?

Quoi qu'il en soit, il sera intéressant d'évaluer l'effet de la technique du strip-till végétal sur le développement et le rendement final des betteraves sucrières implantées dans les lignes précédemment occupées par les couverts localisés. Il faudra cependant patienter avant d'obtenir ces résultats, qui seront recueillis et présentés par un autre étudiant.

En conclusion, les résultats présentés et discutés dans ce mémoire montrent que le strip-till végétal permet d'améliorer la structure du sol, qui est moins compacté dans les futures lignes

de la culture de betterave que dans l'interligne. Il n'est cependant pas prouvé que la localisation d'un couvert dans la ligne travaillée par le strip-till améliore les propriétés du sol à cet endroit. Il faudrait sans doute utiliser la technique du strip-till végétal plusieurs années de suite pour observer des effets évidents de cette technique sur les caractéristiques chimiques et physiques du sol.

Bibliographie

- Adamowicz, S., Otto, C., Mars, S., Ballino, N., 1982. Comparaison de différentes méthodes de dosage des nitrates dans les extraits de sols. Influence du milieu d'extraction. *Agronomie* 2, 359–364.
- Al-Kaisi, M.M., Douelle, A., Kwaw-Mensah, D., 2014. Soil microaggregate and macroaggregate decay over time and soil carbon change as influenced by different tillage systems. *J. Soil Water Conserv.* 69, 574–580.
- Al-Kaisi, M.M., Yin, X., 2005. Tillage and crop residue effects on soil carbon and carbon dioxide emission in corn–soybean rotations. *J. Environ. Qual.* 34, 437–445.
- Alletto, L., Coquet, Y., Roger-Estrade, J., 2010. Two-dimensional spatial variation of soil physical properties in two tillage systems. *Soil Use Manag.* 26, 432–444.
- Baize, D., 2000. Guide des analyses en pédologie : choix - expression - présentation - interprétation, 2e édition revue et augmentée. ed. INRA, Paris.
- Balesdent, J., Chenu, C., Balabane, M., 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Tillage Res.* 53, 215–230.
- Bertin, P., 2017. LBRAI 2106 : Phytotechnie. Partim A.
- Bielders, C., 2017. LBRAI 2106 : Phytotechnie. Partim B : Mécanisation agricole.
- Blavet, D., Fardoux, J., 1993. Méthode densimétrique simplifiée pour l'estimation sur mottes de terre de la porosité totale et de caractéristiques associées (masse volumique apparente, masse volumique pseudo réelle sèche). Protocole. Evaluation des biais et des incertitudes. *Lab. Comport. Sols Cultiv. LCSC Cent. ORSTOM Montp.* 35.
- Bousquet, N., Brun, D., 2015. Le strip till : décryptage de la technique. ARVALIS-Infosfr. URL <https://www.arvalis-infos.fr/le-strip-till-decryptage-de-la-technique-@/view-14781-arvarticle.html> (accessed 6.7.18).
- Brainard, D.C., Peachey, R.E., Haramoto, E.R., Luna, J.M., Rangarajan, A., 2013. Weed ecology and nonchemical management under strip-tillage : Implications for northern U.S. vegetable cropping systems. *Weed Technol.* 27, 218–230.
- Bronick, C.J., Lal, R., 2005. Soil structure and management : a review. *Geoderma* 124, 3–22.
- Brun, D., Légère, R., 2016. Strip-till végétal : Optimiser les effets des couverts en les localisant. *Perspectives Agric.* 40–44.
- Brun, D., Légère, R., 2017. Sols argileux : le strip-till s'anticipe dès l'automne. Arvalis-Infosfr. URL <https://www.arvalis-infos.fr/strip-till-n-attendez-pas-pour-travailler-les-sols-lourds-en-vue-des-semis-de-printemps-@/view-19801-arvarticle.html> (accessed 3.10.18).
- Brun, D., Sauzet, G., 2017. Strip-till : les réglages à privilégier avant un colza. ARVALIS-Infosfr. URL <https://www.arvalis-infos.fr/strip-till-avant-le-semis-du-colza-les-bons-reglages-@/view-19648-arvarticle.html> (accessed 6.8.18).
- Burr-Hersey, J.E., Mooney, S.J., Bengough, A.G., Mairhofer, S., Ritz, K., 2017. Developmental morphology of cover crop species exhibit contrasting behaviour to changes in soil bulk density, revealed by X-ray computed tomography. *PLoS ONE* 12, e0181872.
- Chen, G., Weil, R.R., 2010. Penetration of cover crop roots through compacted soils. *Plant Soil* 331, 31–43.
- Chenu, C., Le Bissonnais, Y., Arrouays, D., 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 1479–1486.

- Dabney, S.M., Delgado, J.A., Reeves, D.W., 2001. Using winter cover crops to improve soil and water quality. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32, 1221–1250.
- Delvaux, B., Delmelle, P., 2018. LBIR 1336 : Sciences du sol, cours et laboratoires.
- Derpsch, R., Friedrich, T., Kassam, A., Hongwen, L., 2010. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. *Int. J. Agric. Biol. Eng.* 3, 1–25.
- FAO, 2015. FAO:AG:Agriculture de conservation. fao.org. URL <http://www.fao.org/ag/ca/fr/1a.html> (accessed 5.8.18).
- Fernández, F.G., Sorensen, B.A., Villamil, M.B., 2015. A comparison of soil properties after five years of no-till and strip-till. *Agron. J.* 107, 1339–1346.
- Gaj, R., Przybył, J., Budka, A., Niewiadomska, A., Mioduszewska, N., 2015. Effect of different tillage methods on the nutritional status, yield and quality of sugar beets. *J. Elem.* 20, 571–584.
- Govaerts, B., Draye, X., El Gouch, A., 2017. LBIRA 2101 : Biométrie.
- Gruver, J., 2011. Cover crops : At the Crossroads.
- Hamza, M.A., Anderson, W.K., 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Tillage Res.* 82, 121–145.
- Hartwig, N.L., Ammon, H.U., 2002. Cover crops and living mulches. *Weed Sci.* 50, 688–699.
- Hénin, S., Gras, R., Monnier, G., 1969. Le profil cultural. L'état physique du sol et ses conséquences agronomiques. Masson, Paris.
- Hosking, W., Bloomer, D., 2006. Strip-tillage : A reduced-cultivation system for field crop production.
- Hummel, R.L., Walgenbach, J.F., Hoyt, G.D., Kennedy, G.G., 2002. Effects of vegetable production system on epigeal arthropod populations. *Agric. Ecosyst. Environ.* 93, 177–188.
- Jabro, J.D., Stevens, W.B., Iversen, W.M., Evans, R.G., 2011. Bulk density, water content, and hydraulic properties of a sandy loam soil following conventional or strip tillage. *Appl. Eng. Agric.* 27, 765–768.
- Justes, E., Richard, G., 2017. Contexte, concepts et définition des cultures intermédiaires multi-services. *Innov. Agron. INRA* 62, 1–15.
- Kladivko, E.J., 2001. Tillage systems and soil ecology. *Soil Tillage Res.* 61, 61–76.
- Kuhn, 2013. Guide agronomique : Le strip-till.
- 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 Culturelles Sans Labour en France. ADEME-ARVALIS Institut du végétal-INRA-APCA-AREAS-ITB-CETIOM-IFVV.
- Lal, R., Reicosky, D.C., Hanson, J.D., 2007. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil Tillage Res.* 93, 1–12.
- Laufer, D., Koch, H.-J., 2017. Growth and yield formation of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under strip tillage compared to full width tillage on silt loam soil in Central Europe. *Eur. J. Agron.* 82, 182–189.
- Laufer, D., Loibl, B., Märlander, B., Koch, H.-J., 2016. Soil erosion and surface runoff under strip tillage for sugar beet (*Beta vulgaris* L.) in Central Europe. *Soil Tillage Res.* 162, 1–7.
- Licht, M.A., Al-Kaisi, M., 2005. Strip-tillage effect on seedbed soil temperature and other soil physical properties. *Soil Tillage Res.* 80, 233–249.
- Mazoyer, M., Roudart, L., 2002. Histoire des agricultures du monde. Du néolithique à la crise contemporaine, 2e édition. ed. Editions Seuil.

- Millennium Ecosystem Assessment (Ed.), 2005. Ecosystems and human well-being: synthesis. Island Press, Washington, DC.
- Morris, N.L., Miller, P.C.H., J.H.Orson, Froud-Williams, R.J., 2010. The adoption of non-inversion tillage systems in the United Kingdom and the agronomic impact on soil, crops and the environment—A review. *Soil Tillage Res.* 108, 1–15.
- Morris, N.L., Miller, P.C.H., Orson, J.H., Froud-Williams, R.J., 2007. Soil disturbed using a strip tillage implement on a range of soil types and the effects on sugar beet establishment. *Soil Use Manag.* 23, 428–436.
- Morrison, J.E., 2002. Strip tillage for “no-till” row crop production. *Appl. Eng. Agric.* 18, 277–284.
- Neher, D., 2001. Role of nematodes in soil health and their use as indicators. *J. Nematol.* 33, 161–168.
- Niewiadomska, A., Gaj, R., Przybył, J., Budka, A., Mioduszevska, N., Wolna-Maruwka, A., 2016. Analysis of microbial parameters of soil in different tillage systems under sugar beets (*Beta vulgaris* L.). *Pol. J. Environ. Stud.* 25, 1803–1812.
- Olson, K.R., Al-Kaisi, M., Lal, R., Morton, L.W., 2017. Soil ecosystem services and intensified cropping systems. *J. Soil Water Conserv.* 72, 64A–69A.
- Overstreet, L.F., Hoyt, G.D., 2008. Effects of strip tillage and production inputs on soil biology across a spatial gradient. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72, 1454–1463.
- Overstreet, L.F., Hoyt, G.D., Imbriani, J., 2010. Comparing nematode and earthworm communities under combinations of conventional and conservation vegetable production practices. *Soil Tillage Res.* 110, 42–50.
- Raper, R.L., 2005. Subsoiling. In : *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Daniel Hillel, pp. 69–76.
- Rochette, P., 2008. No-till only increases N₂O emissions in poorly-aerated soils. *Soil Tillage Res.* 101, 97–100.
- Roger-Estrade, J., Labreuche, J., Boizard, H., 2014. Importance du travail du sol : typologie des modes de mise en oeuvre et effets sur le rendement des cultures. In : *Faut-Il Travailler Le Sol ?* Quae (ARVALIS - Institut du végétal), Paris, pp. 11–25.
- Roger-Estrade, J., Labreuche, J., Richard, G., 2011. Effets de l’adoption des techniques culturales sans labour (TCSL) sur l’état physique des sols : conséquences sur la protection contre l’érosion hydrique en milieu tempéré. *Cah. Agric.* 20, 186–193.
- Roisin, C., 2014. Le Strip-Till ou le travail du sol limité à la bande de semis. Application à la betterave sucrière.
- Roisin, C., 2014. Le strip-till en betteraves sucrières : expérience dans la région limoneuse en Belgique. Presented at the *Implantation des cultures : place à l’innovation !*, CRA-W, Fleury-les-Aubrais, p. 24.
- Roisin, C., Olivier, C., Vandergeten, J.-P., 2013. Technique Strip-Till et ses implications pour la betterave sucrière. *Le Betteravier* 6–7.
- Ryken, N., Vanden Nest, T., Al-Barri, B., Blake, W., Taylor, A., Bodé, S., Ruyschaert, G., Boeckx, P., Verdoodt, A., 2018. Soil erosion rates under different tillage practices in central Belgium : New perspectives from a combined approach of rainfall simulations and 7 Be measurements. *Soil Tillage Res.* 179, 29–37.
- Sébillotte, M., 1974. *Agronomie et agriculture : essai d’analyse des tâches de l’agronome*. Cah. ORSTOM Sér. Biol. 3, 3–25.

- Soane, B.D., Ball, B.C., Arvidsson, J., Basch, G., Moreno, F., Roger-Estrade, J., 2012. No-till in northern, western and south-western Europe : A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil Tillage Res.* 118, 66–87.
- SPW - DGARNE, 2016. Vue générale sur l'environnement. geoapps.wallonie.be. URL <http://geoapps.wallonie.be/CigaleInter/#BBOX=168519.02611971914,169855.17462534946,151992.87532808402,152701.96007958686> (accessed 4.10.18).
- Tebrügge, F., Düring, R.-A., 1999. Reducing tillage intensity - a review of results from a long-term study in Germany. *Soil Tillage Res.* 53, 15–28.
- Thomas, F., 2011. C'est le "Strip-till" qui va sonner le déploiement de l'agriculture de conservation en France. *Tech. Cult. Simpl.* 3.
- Thomas, F., Archambeaud, M., 2016. Les couverts végétaux. *Gestion pratique de l'interculture*, 2e édition. ed. Editions France agricole.
- Trevini, M., Benincasa, P., Guiducci, M., 2013. Strip tillage effect on seedbed tilth and maize production in Northern Italy as case-study for the Southern Europe environment. *Eur. J. Agron.* 48, 50–56.
- Übelhör, A., Witte, I., Billen, N., Gruber, S., Hermann, W., Morhard, J., Claupein, W., 2014. Feasibility of strip-tillage for field grown vegetables. *J. Für Kult.* 66, 365–377.
- Vandergeten, J.-P., Roisin, C., 2004. Techniques culturales sans labour en culture de betterave sucrière, *Les Guides techniques de l'IRBAB*. IRBAB.
- Weil, R., Kremen, A., 2007. Thinking across and beyond disciplines to make cover crops pay. *J. Sci. Food Agric.* 87, 551–557.
- White, C.M., Weil, R.R., 2011. Forage radish cover crops increase soil test phosphorus surrounding radish taproot holes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75, 121–130.

Le strip-till végétal : Effets sur les propriétés physico-chimiques du sol

Présenté par Rodolphe Soumoy

Résumé

Le strip-till végétal est une technique qui permet de combiner le travail profond de la ligne de semis de la culture suivante (strip-till) avec l'implantation d'un couvert végétal spécifique dans cette même ligne. L'idée est donc d'optimiser les effets des couverts végétaux en les localisant.

Pour ce mémoire, un essai de strip-till végétal a été installé sur la parcelle d'un agriculteur à Vieusart, en utilisant un matériel couramment employé dans les exploitations agricoles. Le semis d'un couvert végétal en plein a été suivi du travail du sol et de l'implantation de différentes espèces localisées aux lignes de la culture suivante. Le développement des couverts végétaux a été suivi et plusieurs paramètres physico-chimiques du sol (teneur en matière organique, stabilité structurale et densité apparente) ont été analysés. L'état de compaction du sol a également été évalué via des mesures de pénétrométrie. L'objectif principal de cette étude était de mettre en évidence une éventuelle différenciation des propriétés chimiques et physiques du sol entre la ligne du strip-till végétal de celles de l'interligne non travaillé.

Les résultats du suivi du développement des couverts ont montré qu'il n'y a pas d'impact négatif du strip-till sur le développement et la croissance du couvert précédemment semé en plein, sur toute la surface du champ. L'analyse des paramètres physico-chimiques n'a pas permis de mettre en évidence une réelle différenciation de ces propriétés entre la ligne du strip-till végétal de celles de l'interligne. Une stratification verticale de la teneur en matière organique et de la stabilité structurale a par contre été observée. Les mesures de pénétrométrie ont mis en évidence la compaction moindre du sol de la ligne comparée à celle du sol de l'interligne. Cet état de compaction moindre offrira aux betteraves qui seront semées dans la ligne un environnement plus favorable pour la croissance de leur système racinaire.

La comparaison des résultats obtenus avec ceux de la littérature, qui concernent principalement la technique du strip-till considérée individuellement, ne permet pas de tirer de conclusion définitive quant à l'intérêt de localiser un couvert végétal dans la future ligne de semis, en même temps que le travail du sol localisé à cette même ligne. L'essai a probablement eu lieu sur une période de temps trop courte pour que les éventuelles différences entre les deux positions apparaissent. En revanche, les résultats montrent que la décompaction localisée à la future ligne de semis permet effectivement d'améliorer la structure du sol à cet endroit.