

Faculté des bioingénieurs

Le strip-till végétal : Effets sur la betterave

Auteur : Bughin Pol-Henri

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

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

Année académique 2018-2019

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Bioingénieur : Sciences agronomiques – Agronomie intégrée

Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier mon promoteur, le professeur Pierre Bertin, de m'avoir permis de réaliser ce mémoire au sein du laboratoire ECAV, d'avoir pris de son temps pour suivre l'avancement du projet et de m'avoir conseillé tout au long de l'année.

Egalement un grand merci au professeur Xavier Draye pour m'avoir expliqué l'utilisation du logiciel ImageJ.

Je remercie également Thomas Dagbert de m'avoir aidé lors de l'analyse racinaire des betteraves, ainsi que Pierre Van Thorre, Hugues Falys et le personnel du Centre Alphonse de Marbaix pour leur précieuse aide lors de la récolte des échantillons de betteraves.

Ensuite, je tiens à remercier Frédéric Muratori, de l'asbl Regenacterre, d'avoir permis l'installation de cet essai.

Merci à Nicolas Braibant d'avoir réalisé le suivi cultural durant toute la saison et d'avoir pris de son temps lors de l'arrachage des betteraves.

Aussi, je tiens à remercier l'IRBAB, l'institut royal belge pour l'amélioration de la betterave, de m'avoir fait visiter leur laboratoire d'analyse et d'avoir accepté de réaliser l'analyse des échantillons.

Pour terminer, je tiens à remercier particulièrement mes parents, Jean-Marie et Annick, pour leurs encouragements et pour la relecture de mon travail lors de la rédaction de celui-ci.

Table des matières

Liste des figures	9
Liste des tableaux	11
Introduction.....	15
1. Etat de l'art	17
1.1. Agriculture de conservation	19
1.1.1. Historique	19
1.1.2. Définition de l'agriculture de conservation	19
1.1.3. Les trois piliers de l'agriculture de conservation.....	20
1.1.4. Désavantages de l'agriculture de conservation	23
1.1.5. Lutte contre les adventices en agriculture de conservation	24
1.1.6. Rôles du labour en agriculture conventionnelle	25
1.2. Strip-till : Travail du sol en bande.....	28
1.2.1. Définition du concept	28
1.2.2. Impact du strip-till sur les propriétés physiques du sol.....	29
1.2.3. Impact du strip-till sur l'activité biologique du sol	30
1.2.4. Impact du strip-till sur le rendement.....	32
1.2.5. Application du strip-till à la culture de la betterave.....	33
1.3. Culture intercalaire.....	35
1.3.1. Définition	35
1.3.2. Rôles de la culture intercalaire	36
1.3.3. Mélange d'espèces de couvert végétal	37
1.3.4. Destruction du couvert végétal	38
1.4. Strip-till végétal.....	40
1.4.1. Définition	40
1.4.2. Contraintes liées au strip-till végétal	41
1.4.3. Exemple d'essai « strip-till végétal »	41
2. Objectif	43
3. Matériels et méthodes	45
3.1. Contexte de l'étude	47
3.2. Plan expérimental.....	47
3.3. Analyses.....	50
3.3.1. Analyses de la partie aérienne	50

3.3.2. Analyses de la partie racinaire.....	54
3.4. Analyses statistiques.....	60
3.4.1. Facteur correctif	60
3.4.2. Moyennes et écart-types.....	60
3.4.3. Analyse statistique de l'évolution de la surface foliaire	61
3.4.4. Analyse statistique des racines individuelles.....	62
3.4.5. Analyse statistique avec un facteur « bloc »	62
4. Résultats	65
4.1. Taux de germination.....	67
4.2. Recouvrement foliaire	68
4.3. Evolution du nombre de feuilles.....	69
4.3.1. Sur l'ensemble de la saison.....	69
4.3.2. Nombre de feuilles par date	70
4.4. Evolution de la surface foliaire	72
4.4.1. Sur l'ensemble de la saison.....	72
4.4.2. A la date 1 (1 ^{er} juillet 2018).....	73
4.4.3. A la date 2 (29 juillet 2018).....	73
4.4.4. A la date 3 (4 septembre 2018)	73
4.4.5. A la date 4 (11 octobre 2018)	73
4.5. Relation entre le volume racinaire et la surface foliaire des betteraves	73
4.6. Analyses de récolte.....	74
4.6.1. Rendement	74
4.6.2. Tare terre.....	75
4.6.3. Rendement en sucre.....	75
4.6.4. Teneur en éléments mélassigènes	77
5. Discussion	81
5.1. Taux de germination.....	83
5.2. Recouvrement foliaire	84
5.3. Evolution du nombre de feuilles par betterave.....	85
5.4. Evolution de la surface foliaire	86
5.5. Relation entre le volume racinaire et la surface foliaire des betteraves.....	88
5.6. Analyses de récolte.....	89
5.6.1. Rendement	89
5.6.2. Tare terre	90

5.6.3. Rendement en sucre.....	91
5.6.4. Teneur en éléments mélassigènes	92
5.7. Critique de l'étude	92
5.7.1. Mise en place de l'essai	92
5.7.2. Analyses complémentaires.....	93
Conclusion et perspectives.....	95
Bibliographie	99
Résumé	100

Liste des figures

Figure 1: Perte de sol en fonction du pourcentage de pente et de la quantité en résidus de culture (Cannell et Hawes, 1994).	20
Figure 2: Evolution de la teneur en carbone organique (30 cm de profondeur) sur trois parcelles et à trois dates différentes. Sod = prairie, CT = sol labouré, NT = sol non labouré (Ismail et al., 1994).	22
Figure 3: Mouvement de la terre au cours du labour (Biielders, 2018).	26
Figure 4 : Semelle de labour créée par le labour et identifiée par le couteau (Greenotec, 2012).....	26
Figure 5: Densité de vers de terre dans deux sols différents (Noir = sol sablo-limoneux et gris = sol limono-argilo-sableux) avec DP = labour profond, NP = labour normal, TC = travail superficiel, NT = non travail du sol (de Gerard et Haye en 1979) (Chan, 2001).	27
Figure 6: Schéma général d'un élément du striptiller (Figeac, 2012).	29
Figure 7: Biomasse microbienne mesurée dans le rang (= IN-ROW), sur le bord (=EDGE), et dans l'inter-rang (=INTER-ROW). ORG = Fertilisant organique, SYN = Fertilisant minéral (Overstreet et al., 2008).	31
Figure 8 : Impact du strip-till sur le nombre d'adventices (ITB, 2017).....	33
Figure 9: CIPAN après pois : Reliquats azotés deux mois après le semis (Protect'eau et UCL-ELIA, 2017).....	37
Figure 10: Essai « strip-till végétal » mis en place à La Jaillière (France) en 2013 comprenant de la féverole (lignes hautes) dans la future ligne de semis de la culture suivante et de l'avoine (lignes basses) dans l'inter-rang (Brun et Légère, 2016).	40
Figure 11: Rendement en maïs pour l'essai « strip-till végétal » à Boigneville en fonction de l'année et du traitement. NS = Non-significatif (Brun et Légère, 2016).	42
Figure 12: Photographie aérienne de la zone de l'essai strip-till végétal encadrée en orange. Echelle = 1 :5500 (Google earth, 2019).	47
Figure 13: Décompacteur à 5 dents suivi du semoir dans la ligne décompactée (Soumoy, 2018).....	48
Figure 14: Plan expérimental de l'essai strip-till végétal.	49
Figure 15: Méthode de mesure pour le suivi du taux de germination avec les 10 blocs dans lesquels les mesures ont été effectuées (rectangle rouge).	51

Figure 16: Méthode de mesure pour le suivi du recouvrement foliaire avec les 5 blocs dans lesquels les mesures ont été effectuées (rectangle rouge).	52
Figure 17: Scanner utilisé pour mesurer la surface foliaire des betteraves (Licor, 2012).	53
Figure 18: Photographie des racines de betteraves de la bande C5 (Tournesol).	54
Figure 19: Représentation binaire des racines de la bande C5 (tournesol).....	55
Figure 20: Méthode de récolte des betteraves en 4 blocs dans lesquels l'ensemble des betteraves ont été récoltées (rectangle rouge).	56
Figure 21: Caisses utilisées pour le tri et le transport des échantillons de betteraves.	57
Figure 22: Parmentière pour laver l'échantillon. Figure 23: Table de tri des betteraves.....	58
Figure 24 : Filtration de la solution à analyser.	59
Figure 25: Nombre de feuilles par betterave en fonction du traitement et de la date d'observation. Date 1 = trait bleu (27 juin 2018), Date 2 = trait rouge (29 juillet 2018), Date 3 = trait vert (3 septembre 2018).....	70
Figure 26: Evolution de la surface foliaire par betterave en fonction du traitement et de la date. Date 1 = Trait bleu (1er juillet 2018), Date 2 = Trait rouge (29 juillet 2018), Date 3 = Trait vert (4 septembre 2018) et Date 4 = Trait noir (11 octobre 2018).	72
Figure 27: Relation entre le volume racinaire et la surface foliaire des betteraves en fonction du traitement à la date du 11 octobre 2018.....	74
Figure 28: Teneur en potassium des betteraves en fonction du facteur catégoriel « Traitement ».	78
Figure 29: Teneur en sodium en fonction du facteur catégoriel « Traitement ».	79
Figure 30: Relation entre le rendement en sucre et la teneur en azote α -aminé en fonction du traitement.	80
Figure 31: Quantité de rayonnement intercepté en fonction de la quantité de rayonnement incident et du mois de l'année (Bertin, 2016).....	87
Figure 32: Relation entre la radiation interceptée par le système foliaire et le rendement total, en racine et en sucre (Bertin, 2016).	89

Liste des tableaux

Tableau 1 : Nombre d'hectares en agriculture de conservation dans quelques pays d'Europe en 2011 (FAO, 2011).....	19
Tableau 2: Rendement et paramètres qualitatifs comparant une parcelle en strip-till (ST) et une parcelle en agriculture conventionnelle (CT) sur un sol argilo-limoneux. Les données suivies par une même lettre ne sont pas significativement différentes. (Evans et al., 2009).	34
Tableau 3: Morphologie racinaire dû à l'état de compaction du sol. Cat. 1 = sol non compacté, Cat. 2 = Sol légèrement compacté, Cat. 3 = Sol fortement compacté (Biielders, 2018).....	35
Tableau 4: Date de destruction du couvert végétal en fonction de la culture suivante et du type de sol (Brun et Labreuche, 2018).	38
Tableau 5: Mode de destruction du couvert végétal en fonction de l'espèce présente (Protect'eau, 2017 ; Labreuche, 2011).....	39
Tableau 6: Récapitulatif de l'itinéraire technique.....	50
Tableau 7: Récapitulatif des différentes mesures effectuées.....	60
Tableau 8: Résultat de l'ANOVA 1 pour le taux de germination en fonction du facteur « Traitement ». DF = degré de liberté, Mean Square = Ecart-type, F Value = Valeur du test de Fisher, Pr > F = la P-Valeur associée à F.	67
Tableau 9: Moyenne et écart-type du modèle du taux de germination des betteraves en fonction du traitement. Les traitements appartenant à des groupes identiques signifient que les moyennes ne sont pas significativement différentes.....	68
Tableau 10: Moyenne et écart-type du modèle du recouvrement foliaire des betteraves en fonction du traitement. Les traitements appartenant à des groupes identiques signifient que les moyennes ne sont pas significativement différentes.....	69
Tableau 11: Résultat de l'ANOVA 2 de l'évolution du nombre de feuilles en fonction des facteurs catégoriels « Traitement » et « Date ». DF = degré de liberté, Mean Square = Ecart-type, F Value = Valeur du test de Fisher, Pr > F = la P-Valeur associé à F.	69

Tableau 12: Résultat de l'ANOVA 2 mixte du nombre de feuilles en fonction du facteur catégoriel « Traitement » et du facteur aléatoire « Bloc » à la date 1. DF = degré de liberté, F Value = Valeur du test de Fisher, $Pr > F$ = la P-Valeur associé à F, χ^2 = Test du Chi-carré et LRT = Test du rapport de vraisemblance.	70
Tableau 13: Résultat de l'ANOVA2 mixte du nombre de feuilles en fonction du facteur catégoriel « Traitement » et du facteur aléatoire « Bloc » à la date 2. DF = degré de liberté, F Value = Valeur du test de Fisher, $Pr > F$ = la P-Valeur associée à F, χ^2 = Test du Chi-carré et LRT = Test du rapport de vraisemblance.....	71
Tableau 14: Moyenne et écart-type du nombre de feuilles par betterave en fonction du traitement à la date 3. Les traitements appartenant à des groupes identiques signifient que les moyennes ne sont pas significativement différentes.....	71
Tableau 15: Moyenne des rendements de chaque traitement avec leur écart-type. Les traitements appartenant à des groupes identiques signifient que les moyennes ne sont pas significativement différentes.	75
Tableau 16: Résultat de l'ANOVA 1 de la tare terre en fonction du facteur catégoriel « Traitement ». DF = degré de liberté, F Value = Valeur du test de Fisher, $Pr > F$ = la P-Valeur associée à F.....	75
Tableau 17: Moyenne des rendements en sucre (en kg) de chaque traitement avec leur écart-type. Les traitements appartenant à des groupes identiques signifient que les moyennes ne sont pas significativement différentes.	76
Tableau 18: Résultat du test du rapport de vraisemblance du rendement en sucre pour le facteur aléatoire « Bloc ». DF = degré de liberté, χ^2 = Test du Chi-carré et LRT = Test du rapport de vraisemblance.	76
Tableau 19: Résultat de l'ANOVA 2 mixte de la teneur en potassium en fonction du facteur catégoriel « Traitement » et du facteur aléatoire « Bloc ». DF = degré de liberté, F Value = Valeur du test de Fisher, $Pr > F$ = la P-Valeur associée à F, χ^2 = Test du Chi-carré et LRT = Test du rapport de vraisemblance.	77
Tableau 20: Résultat de l'ANOVA 2 mixte de la teneur en azote en fonction du facteur catégoriel « Traitement » et du facteur aléatoire « Bloc ». DF = degré de liberté, F Value = Valeur du test de Fisher, $Pr > F$ = la P-Valeur associée à F, χ^2 = Test du Chi-carré et LRT = Test du rapport de vraisemblance.	79

Tableau 21: Moyenne des relevés météorologiques du mois de juin 2018 à Uccle (MétéoBelgique, 2019).....	85
--	----

Tableau 22: Moyenne des relevés météorologiques du mois de juillet 2018 à Uccle (MétéoBelgique, 2019).....	85
---	----

Introduction

L'ensemble du système agricole est de plus en plus pointé du doigt quant à son implication dans les problèmes environnementaux rencontrés durant ces dernières années. L'intensification de l'agriculture par l'utilisation d'engrais de synthèses et de pesticides ainsi que la mécanisation sont les principales causes de la perte de qualité de nos sols et de la fragilité de notre agroécosystème.

L'agriculture de conservation est un système d'exploitation reposant sur trois piliers distincts : Couvert organique (semi-)permanent, perturbation minimale du sol et rotation des cultures. Ce type d'agriculture a pour but d'améliorer les propriétés physico-chimiques et l'activité biologique du sol pour accroître la fertilité de celui-ci.

Ce mémoire porte sur l'étude des effets du strip-till végétal sur la culture suivante, la betterave. Le strip-till est un type de travail du sol qui consiste à travailler uniquement la future bande de semis sans retournement, l'inter-rang n'étant pas dérangé. Couplé à ce travail du sol, une espèce de couvert végétal est semée dans le rang travaillé à la fin de l'été ou au début de l'automne pour que celle-ci se développe pendant la période d'interculture. L'association de ces deux techniques est appelé le strip-till végétal. Le semis de la betterave est réalisé à la date classique (fin mars, début avril) avec positionnement GPS.

La première partie de ce mémoire est l'état de l'art qui reprend toutes les informations connues actuellement sur le sujet relatif à l'agriculture de conservation, ainsi que l'utilité des couverts végétaux et du strip-till. S'y trouve également une comparaison avec le labour qui est une technique de travail du sol conventionnelle. Pour l'instant, il existe très peu d'études qui s'intéressent au strip-till végétal. C'est pourquoi ce mémoire permettra d'en apprendre davantage sur cette technique.

Ensuite, la deuxième partie « Matériels et méthodes » explique en détail l'installation de l'essai du strip-till végétal sur une parcelle située à Vieusart, à côté de Louvain-la-Neuve. L'ensemble des méthodes d'échantillonnage et d'analyses y est également présenté, ainsi que la méthode de traitement de données par analyse statistique à l'aide du logiciel SAS.

La troisième partie de ce travail reprend la description et l'analyse des résultats portant sur l'étude de la partie aérienne et racinaire des betteraves.

Pour terminer, la partie « Discussion » présente l'analyse de ces résultats et les conclusions qui en découlent par comparaison des résultats entre eux et avec ceux précédemment obtenus concernant l'analyse physico-chimique du sol.

1. Etat de l'art

1.1. Agriculture de conservation

1.1.1. Historique

La notion d'agriculture de conservation a fait son apparition dans les années 1930 lorsque d'importants nuages de poussières sévissaient le long de la côte Ouest des Etats-Unis (Friedrich et al., 2012). Le labour a été remis en cause et les couverts végétaux se sont développés pour limiter le développement de ce type de dégâts. Dans les années 40, de nouveaux semoirs ont été conçus pour pouvoir semer directement sur le sol sans l'intervention de la charrue. Mais, ce n'est seulement qu'à partir des années 60 que l'agriculture de conservation s'est véritablement développée dans le système d'exploitation des agriculteurs.

En Europe, l'agriculture de conservation a eu plus de difficultés à se développer en comparaison avec les autres continents, à l'exception de l'Afrique. Pour amplifier le mouvement, une fédération a été constituée en 1999, l'ECAF, c'est-à-dire l'European Conservation Agriculture Federation, basée à Bruxelles.

Le but de cette fédération est constitué de trois points majeurs (Basch, n.d.) :

- Promouvoir l'information en ce qui concerne les techniques utilisées en agriculture de conservation envers les agriculteurs, le monde agricole et l'ensemble de la société.
- Encourager le développement et l'apprentissage de ce mode de culture, ainsi que la biodiversité des sols.
- Développer différentes activités et programmes en vue de favoriser le développement de cette agriculture.

Tableau 1 : Nombre d'hectares en agriculture de conservation dans quelques pays d'Europe en 2011 (FAO, 2011).

Country	CA area (ha)
Finland	160,000
France	200,000
Germany	5,000
Hungary	8,000
Ireland	100
Italy	80,000
Netherlands	500
Portugal	32,000
Slovakia	10,000
Spain	650,000
Switzerland	16,300
United Kingdom	150,000
Total	1,311,900

En 2011, l'agriculture de conservation en Europe ne représentait que 1% des surfaces agricoles totales avec plus d'un million d'hectares, sans prendre en compte la Russie (Tableau 1) (Friedrich et al., 2011).

1.1.2. Définition de l'agriculture de conservation

Selon la FAO, l'agriculture de conservation est une agriculture qui maintient un sol couvert de façon permanente ou semi-permanente. Ce couvert peut être vivant ou en décomposition. Sa fonction est de protéger le sol du soleil, de la pluie, du vent et de nourrir la faune du sol. Les micro-organismes du sol remplacent le travail mécanique et permettent un équilibre des éléments nutritifs du sol. Le non-labour et le travail minimum du sol sont des éléments importants car ceux-ci perturbent moins les processus biologiques du sol, au

contraire du labour et du travail profond du sol. La rotation des cultures est également un élément important de l'agriculture de conservation (Hobbs et al., 2008).

1.1.3. Les trois piliers de l'agriculture de conservation

1.1.3.1. Couvert organique permanent ou semi-permanent

Le couvert peut être de différentes formes. Il peut être constitué par les résidus de culture après la récolte, un couvert végétal (légumineuse ou non) en croissance ou en décomposition après avoir été broyé. Du compost ou fumier peuvent également être apportés de l'extérieur, en plus du couvert (Hobbs et al., 2008).

Les résidus de culture ont de nombreux impacts sur le sol. Du point de vue physique, ils limitent l'érosion de surface par le vent et l'eau en formant des obstacles physiques et en modifiant la structure du sol par l'augmentation du taux de matière organique présente dans le sol. Le phénomène d'érosion est particulièrement préoccupant car la perte des 25 premiers centimètres du sol peut entraîner une diminution de rendement de 65 à 75% (Bertin, 2018). Ce constat est d'autant plus observable lorsque le sol est en pente. La quantité de sol érodée augmente avec le pourcentage de pente, mais diminue avec une augmentation de la teneur en résidus (Figure 1) (Cannell et Hawes, 1994).

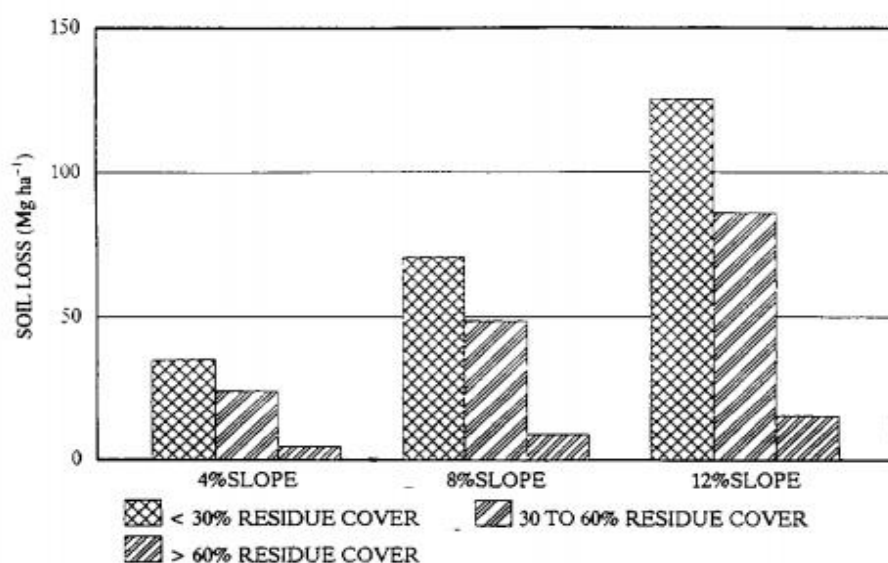


Figure 1: Perte de sol en fonction du pourcentage de pente et de la quantité en résidus de culture (Cannell et Hawes, 1994).

Un second élément est que les résidus de culture permettent la formation de nombreux agrégats dans le sol. Par conséquent, le sol devient plus stable et sa structure en est améliorée (Kumar et al., 1999). Par une meilleure structure de sol, une augmentation du nombre de macropores et une meilleure stabilité des agrégats, la conductivité hydraulique et l'infiltration hydrique dans le sol sont favorisées.

Un dernier facteur physique est l'humidité du sol. L'accumulation de résidus organiques sur le sol permet de diminuer le taux d'évaporation de l'eau du sol. Dans l'autre sens, les résidus présents sur le sol ou légèrement incorporés permettent une meilleure infiltration de l'eau et forment un obstacle à l'érosion (Kumar et al., 1999).

Concernant l'impact des résidus de culture sur les propriétés chimiques du sol, ceux-ci protègent le sol de son acidification. En effet, les microorganismes présents dans le sol ont la capacité de décomposer la matière organique et particulièrement de décarboxyler les anions organiques. Ce phénomène est néanmoins relatif car la quantité d'anions organiques libérés par la culture dépend de l'espèce cultivée. Les légumineuses libèrent effectivement plus d'anions organiques que d'autres cultures comme les graminées.

De plus, comme expliqué précédemment, les résidus de culture permettent d'enrichir le sol en matière organique et donc de maintenir une fertilité correcte dans les sols en termes de biomasse microbienne, de contenu en carbone et de minéralisation de l'azote (Kumar et al., 1999).

Les résidus de culture servent également de nourriture pour une grande diversité de microorganismes dans le sol. D'après Biederbeck et al. (1980), la biomasse microbienne diminue lorsqu'il y a très peu de résidus de culture. Les vers de terre et microarthropodes jouent un grand rôle dans la décomposition de la matière organique. Ils sont présents en plus grand nombre dans un système cultural en agriculture de conservation plutôt qu'en agriculture conventionnelle, de même que les prédateurs, carabes et araignées (Kumar et al., 1999).

Outre les résidus de culture, les effets des couverts végétaux seront plus détaillés dans la suite de ce chapitre.

1.1.3.2. Perturbation minimale du sol

La perturbation minimale du sol est réalisée en utilisant le moins possible des machines travaillant le sol. Le point majeur est l'abandon de la charrue. Campbell et son équipe (1996) ont pu mettre en évidence que les teneurs en carbone et azote dans les 15 premiers centimètres d'un sol sans labour depuis 11 ans étaient plus élevées par rapport à un sol en agriculture conventionnelle où le labour est utilisé. Ce moindre travail du sol doit être couplé à une haute teneur en résidus de culture pour maintenir des teneurs en carbone et azote élevées.

La productivité du sol augmente avec l'augmentation de la teneur en carbone organique lorsque la culture est combinée à un apport optimal en engrais et amendements (Lal, 2006). Ce constat est particulièrement observé dans des sols pauvres à l'origine et devenus plus riches en matière organique par les résidus de culture et l'apport d'engrais organique.

Une autre étude s'est attachée à l'effet du non-labour en comparaison avec le labour sur une période de 20 ans. Concernant la teneur en carbone organique dans le sol, l'étude a pu

démontrer que celle-ci est supérieure dans un sol non labouré par rapport à un sol labouré car la vitesse de minéralisation de la matière organique dans un sol labouré est plus élevée. Cette affirmation peut être constatée sur la figure 2 ci-dessous où la teneur en carbone organique dans les 30 premiers centimètres du sol est plus basse dans le sol labouré par rapport au sol non labouré en comparaison avec un témoin (prairie). La culture implantée sur la parcelle labourée et non-labourée était du maïs (Ismail et al., 1994).

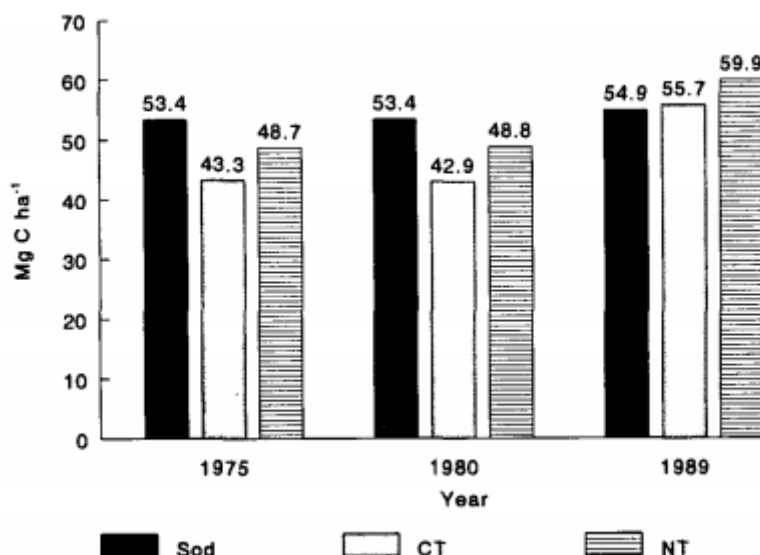


Figure 2: Evolution de la teneur en carbone organique (30 cm de profondeur) sur trois parcelles et à trois dates différentes. Sod = prairie, CT = sol labouré, NT = sol non labouré (Ismail et al., 1994).

La quantité de phosphore soluble dans le sol non labouré est également plus élevée car la solubilité du phosphore est améliorée grâce à une plus grande quantité de matière organique. De plus, le pH dans les premiers centimètres du sol non labouré est plus faible que celui du sol labouré à cause de la minéralisation de l'azote présent dans les résidus de culture en surface couplée à un apport de fertilisant minéral (NH_4NO_3). Néanmoins, l'application de chaux a permis l'augmentation du pH dans les cinq premiers centimètres du sol ayant pour résultat un pH moins acide à cet horizon que pour la parcelle labourée. À l'inverse, le pH dans les horizons plus profonds du sol (5 à 30 cm de profondeur) est plus élevé dans la parcelle labourée car la chaux apportée sur le champ est mieux mélangée et incorporée en profondeur dans le sol par rapport à la parcelle non-labourée (Ismail et al., 1994).

Aussi, le fait de limiter le travail du sol tout en augmentant la quantité de résidus présents à la surface et dans les premiers horizons du sol permet de réduire le phénomène d'érosion de 60 à 90% (Jones et al., 2006).

Outre l'aspect agronomique, un autre avantage de diminuer le travail du sol est que l'agriculteur passe moins d'heures à travailler son sol et diminue donc sa consommation en carburant, ce qui lui permet de diminuer son coût de production et également son

empreinte carbone. De plus, l'agriculteur peut consacrer plus de temps à la réalisation d'autres activités (Hobbs et al., 2008).

1.1.3.3. Rotations

Le principal avantage de la rotation des cultures est une meilleure maîtrise des maladies, ravageurs et adventices des cultures. Cette rotation permet de diminuer la pression des agents phytopathogènes car chaque agent s'attaque en général à une culture bien précise. En effectuant une rotation avec différentes cultures, le cycle de reproduction des agents phytopathogènes sera perturbé et le développement de maladies sur les cultures sera réduit (Howard, 1996).

La rotation de cultures de différentes espèces favorise le développement d'un réseau de canaux créé par la croissance et la décomposition des racines de chaque culture. Cela permet également d'augmenter le nombre de macropores dans le sol. Par conséquent, l'infiltration de l'eau dans le sol en est améliorée. Cette rotation permet également le développement d'une importante diversité microbienne et a donc l'avantage de maintenir la population d'organismes phytopathogènes à un niveau plus faible (Hobbs et al., 2008).

De plus, une alternance entre des cultures d'hiver et de printemps permet de briser le cycle de développement des adventices dont la levée est en automne ou au printemps. Cet impact ne se produit pas sur les adventices qui ont la capacité de germer toute l'année. La rotation des cultures permet également d'éviter la spécialisation de la flore adventice sur une parcelle, ce qui facilite le désherbage. L'introduction de légumineuses dans la rotation a également pour but d'apporter une certaine dose d'azote naturellement dans le sol et donc de diminuer l'apport en azote par l'agriculteur (Bonin L., 2014).

Aussi, la rotation de cultures permet de favoriser le développement de l'activité biologique du sol. Par exemple, une rotation entre le maïs et le blé améliore le développement des mycorhizes par rapport à une monoculture de maïs. Une rotation entre des céréales et des graminées provoque aussi le même phénomène dû à leurs exsudats racinaires différents (Bertin, 2018).

1.1.4. Désavantages de l'agriculture de conservation

Comme toute technique agricole, l'agriculture de conservation possède certains désavantages ou limites par rapport aux autres techniques.

D'après Jones et al. (2006), la terre d'un sol couvert se réchauffe et se ressuie moins vite au printemps par rapport à un sol nu et a donc pour conséquence de réduire la vitesse de germination ainsi que le début de croissance de la culture semée.

De plus, sur un sol non travaillé, les fertilisants, amendements appliqués et résidus de culture sont concentrés à la surface et dans les premiers centimètres du sol, ce qui entraîne une moins bonne efficacité de ces derniers car pour une optimisation de ces applications, un mélange avec le sol doit avoir lieu. Ce phénomène est particulièrement visible les premières

années après le passage de l'agriculture conventionnelle vers l'agriculture de conservation car une partie de l'azote est utilisée par les microorganismes présents dans le sol pendant la décomposition des résidus de culture.

Un autre problème lié aux techniques de l'agriculture de conservation se pose lors du semis des cultures. Une importante quantité de résidus sur le sol peut, en effet, modifier la profondeur de semis et donc empêcher une levée homogène de la parcelle (Jones et al., 2006).

Une méthode de semis pouvant être utilisée en agriculture de conservation est le semis direct, c'est-à-dire sans travail préalable du sol. En Europe, de nombreuses expériences de comparaison de rendement entre le semis après labour et le semis direct ont été effectuées sur des périodes de 10 à 15 ans. Les résultats obtenus sont très aléatoires et ne permettent pas de tirer une conclusion claire quant à l'impact du travail du sol avant semis sur le rendement (Cannell et Hawes, 1994). A l'échelle de la Belgique, une étude d'une durée de 15 ans a été réalisée entre 1967 et 1982. Elle a pu mettre en évidence un rendement légèrement plus élevé pour l'orge d'hiver, le froment et l'avoine en semis direct. A l'inverse, l'étude montre également une diminution de 15% en rendement pour le maïs et l'orge de printemps et de 20% pour la betterave en semis direct en comparaison avec un sol labouré (Cannell et Hawes, 1994). Cette étude est, néanmoins, à prendre avec réserve en raison de son ancienneté.

Un des importants problèmes en agriculture de conservation est la gestion des adventices. A cause de l'arrêt du labour, les adventices ne sont plus enfouies profondément dans le sol et peuvent donc se développer plus rapidement et en plus grande quantité, ce qui pourrait avoir comme conséquence une plus grande concurrence avec la culture implantée et donc, à terme, une perte de rendement.

1.1.5. Lutte contre les adventices en agriculture de conservation

Néanmoins, de nombreuses techniques culturales se sont développées pour contrer au mieux ce phénomène. Les mesures préventives sont généralement plus faciles à mettre en œuvre et moins coûteuses que les mesures curatives appliquées après le développement des adventices.

Naturellement, un sol en agriculture de conservation possèdera une plus importante colonie de prédateurs granivores comme les fourmis capables de dégrader les graines des adventices. L'installation de bandes refuges autour du champ permettra à la faune auxiliaire de favoriser son développement (Chauhan et al., 2012).

Comme expliqué précédemment, les résidus de cultures ont aussi pour rôle de limiter le développement des adventices par leur effet de couverture du sol (Locke et al., 2002), mais, ils peuvent également protéger les adventices en croissance contre les herbicides pulvérisés. Le semis de cultures de couvert entre deux cultures principales permet également de briser

le cycle de développement des adventices en ne laissant pas le temps à celles-ci de se développer durant la rotation entre les cultures principales (Chauhan et al., 2012). Ces cultures de couverts ont également d'autres effets de compétition sur les adventices par leur effet allélopathique, mais aussi en limitant l'accès à l'eau, à la lumière et aux nutriments du sol (Locke et al., 2002).

De plus, effectuer une rotation de cultures assez longues (minimum trois ans) permet d'augmenter la diversité d'adventices et d'éviter l'établissement de quelques espèces bien particulières et plus difficiles à détruire de par leur potentielle acquisition de résistance envers les herbicides (Locke et al., 2002).

Pour terminer, l'emploi d'herbicides en pré ou post-émergence permet également de lutter efficacement contre les adventices. Mais, l'ensemble des techniques culturales précédemment citées couplées au développement de la faune auxiliaire prédatrice de graines permet de limiter l'utilisation des herbicides sur la parcelle (Locke et al., 2002).

1.1.6. Rôles du labour en agriculture conventionnelle

Le labour consiste à découper la surface du sol en bandes parallèles et à les retourner en les émiettant plus ou moins fort. Cet émiettement dépend de la vitesse de travail et de l'état du sol. L'outil de travail utilisé pour effectuer le labour est la charrue (Biielders, 2018). Le rôle principal du labour est d'enfouir les résidus de culture et les adventices en croissance par retournement et mélange, mais aussi d'exposer le sol à l'effet bénéfique du gel sur la structure du sol, d'ameublir le sol et de réchauffer plus rapidement le sol au printemps grâce à l'évacuation de l'eau en quantité excessive (Bertin, 2018 ; Biielders, 2018). Ce type de travail est classé dans le travail primaire du sol au même titre que le sous-solage et le décompactage. A l'inverse, le travail de la couche superficielle du sol en vue du semis se nomme le travail secondaire (Biielders, 2018).

Sur la figure 3, le processus du labour peut être observé. La partie supérieure du sol est renversée et se retrouve au fond de la zone travaillée.

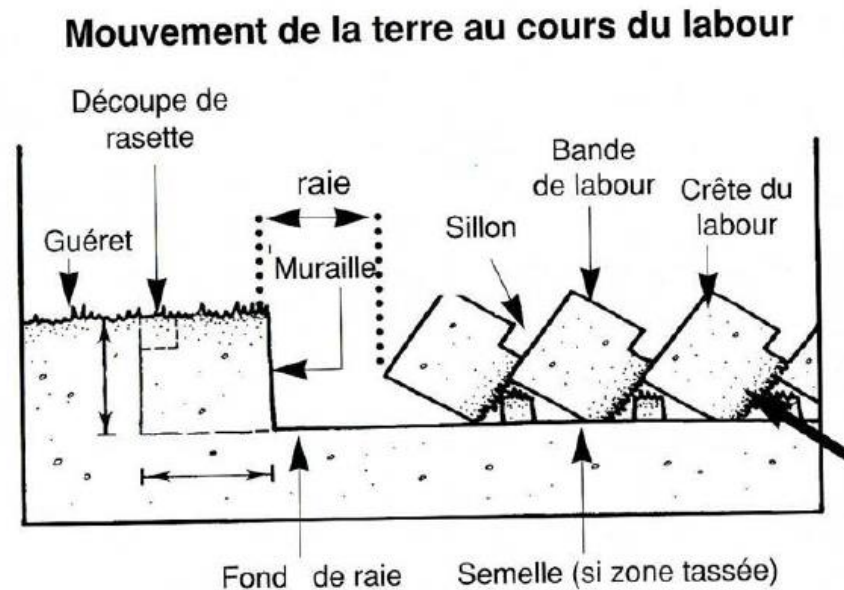


Figure 3: Mouvement de la terre au cours du labour (Biielders, 2018).

Malgré les nombreux avantages du labour au vu de ses actions précédemment citées, ce type de travail est remis en cause depuis de nombreuses années pour plusieurs raisons.

Premièrement, le labour entraîne une diminution du nombre de pores dans le sol puisque la charrue brise les agrégats, les pores et canaux présents dans ce sol. Comme cité ci-avant, il permet d'ameublir le sol en le retournant, mais le fait de façon excessive, ce qui entraîne une aération excessive du sol. Cette aération excessive mène à une importante oxydation de la matière organique et à la libération de CO_2 dans l'atmosphère jusqu'à effacer complètement le stockage du carbone dans le sol par photosynthèse et diminuer drastiquement une grande partie de la matière organique stockée dans le sol depuis plusieurs années (Bertin, 2018).

Un autre impact du labour est le phénomène de compaction du sol sous la partie travaillée par la



charrue. Cette compaction est appelée la semelle de labour (Figure 4). C'est donc une zone compacte faisant obstacle à la pénétration des racines en profondeur et à l'infiltration de l'eau. Cette semelle

Figure 4 : Semelle de labour créée par le labour et identifiée par le couteau (Greenotec, 2012).

est créée de deux façons différentes (Biielders, 2018 ; Greenotec, 2012):

- Lissage du sol par le dessous du soc de charrue.
- Compaction sous la roue du tracteur attelée à la charrue en fond de raie lors du labour en condition humide.

Ce mode de travail expose également le sol aux radiations directes du soleil, ce qui conduit à la dégradation des composés organiques complexes qui sont à la base de la stabilité des agrégats du sol et mène donc à une série de conséquences en cascade qui sont l'affaissement de l'architecture, la perte des pores et la densification du sol.

Comme cité précédemment, l'aération excessive du sol entraîne la perte d'une grande partie du carbone du sol. L'ensemble des mesures mises en place pour stocker le carbone dans le sol, comme l'installation de couverts végétaux et de prairies, devient donc inutile puisque tout le carbone stocké retourne dans l'atmosphère.

Outre la perte de carbone et la compaction du sol, une autre conséquence du labour est son impact sur la biologie du sol. D'après une étude de Gerard et Haye (1979) comparant différents types de travaux du sol sur deux terrains différents en Grande-Bretagne, le nombre de vers de terre présents dans le sol est le plus faible dans le traitement utilisant le labour profond. A l'inverse, la plus grande quantité de vers de terre se trouve dans le sol qui n'a pas été travaillé comme constaté sur la figure 5 (Chan, 2001).

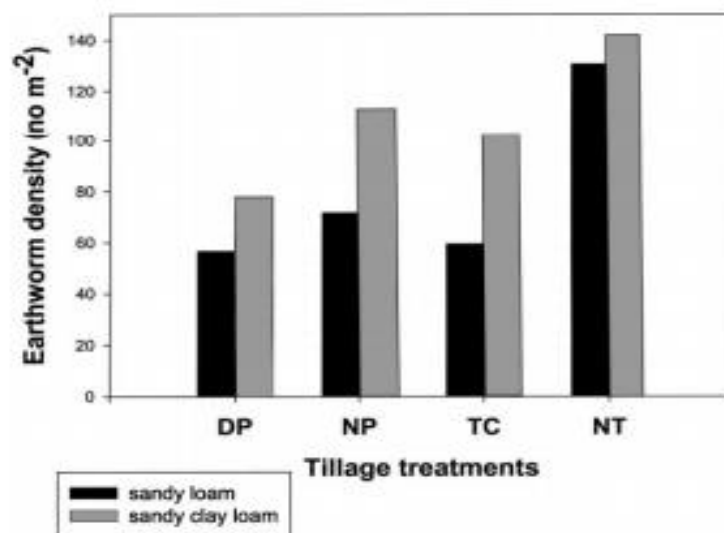


Figure 5: Densité de vers de terre dans deux sols différents (Noir = sol sablo-limoneux et gris = sol limono-argilo-sableux) avec DP = labour profond, NP = labour normal, TC = travail superficiel, NT = non travail du sol (de Gerard et Haye en 1979) (Chan, 2001).

L'activité biologique du sol est améliorée à court terme par le labour grâce à l'aération du sol et à l'incorporation des résidus de culture, mais est affaiblie à plus long terme, la raison principale étant l'importante perte de matière organique dans le sol qui constitue la source

d'alimentation des microorganismes du sol. A l'inverse, les champignons se développent mieux et les bactéries sont affaiblies dans un sol non labouré (Bertin, 2018).

1.2. Strip-till : Travail du sol en bande

1.2.1. Définition du concept

Le strip-till est un type de travail du sol qui consiste à travailler uniquement la future ligne de semis. Dans le cadre de cet essai, la future culture est la betterave sucrière. Le but de ce travail est d'émietter la terre de la future bande de semis pour permettre aux racines en croissance de se développer correctement et en profondeur, mais aussi de réchauffer la ligne de semis. Cette technique est apparue aux USA dans les années 80 pour lutter contre les phénomènes d'érosion et pour favoriser la conservation de l'eau (Kuhn, 2013). La grande différence avec la majorité des autres travaux du sol est que le strip-till ne travaille pas les inter-rangs pour empêcher l'apparition de battance, d'érosion et également pour accroître la portance du sol et maintenir l'eau dans le sol. En théorie, cette technique permet de ne perturber le sol que sur maximum 25% des superficies totales du sol, ce qui a pour conséquence de laisser les résidus de culture à la surface du sol dans l'inter-rang (Brun et Bousquet, 2015 ; Morrison, 2002).

Le strip-till peut être couplé à l'épandage d'engrais localisé sur le rang ou être couplé à un semoir pour semer un couvert végétal dans la future ligne de semis. Cette technique s'appelle le strip-till végétal (Brun et Bousquet, 2015).

Le travail en bande ne peut donc être utilisé que pour des cultures ayant un inter-rang de minimum 45 cm jusqu'à 80 cm, ce qui est le cas pour la betterave sucrière, le maïs ou encore le tournesol. La culture de colza peut également être cultivée en strip-till après une adaptation de l'inter-rang à 45 cm. Il n'est donc pas possible d'appliquer cette technique pour des cultures ayant un inter-rang inférieur à 45 cm.

Sur la figure 6, le schéma général d'un élément composant l'outil strip-tiller est décrit. Dans le sens d'avancement de la machine, le couteur circulaire permet de soulever la terre sur la largeur de bande travaillée. Ensuite, un chasse-débris permet d'écarter les résidus de cultures présents sur la bande et de les éloigner sur l'inter-rang. L'élément principal est la dent qui travaille la bande de semis à une profondeur réglable de 5 à 30 cm. La terre soulevée est remise en place par les disques de billonnement et appuyée par le rouleau.

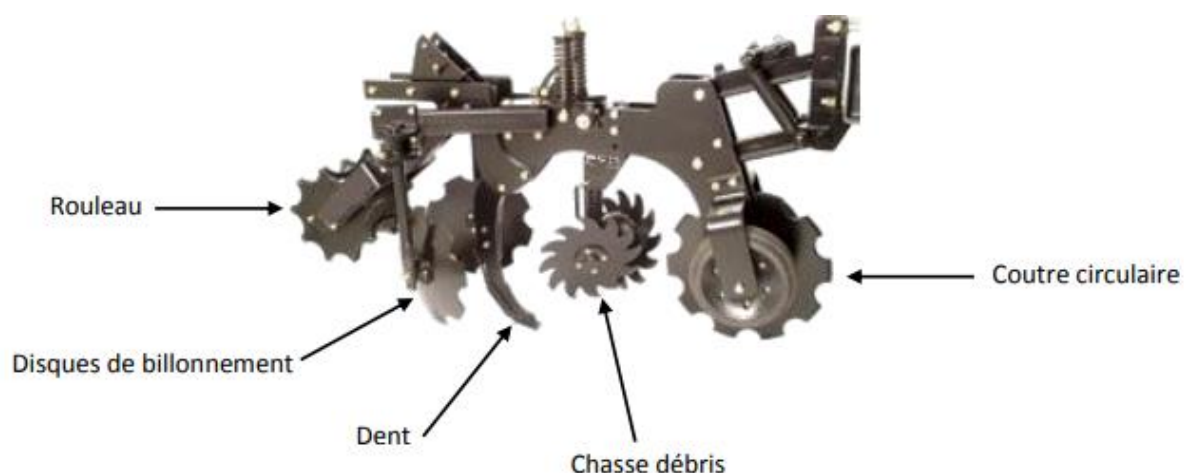


Figure 6: Schéma général d'un élément du striptiller (Figeac, 2012).

De plus, concernant le moment idéal de mise en œuvre de ce travail, le strip-till doit être réalisé en fin d'été ou début d'automne sur des parcelles possédant un taux d'argile supérieur à 35%, mais également sur des sols possédant des taux intermédiaires en argile (entre 25 et 35%) sur lesquels un semis de printemps semi-précoce (mi-mars) sera effectué. Si le sol n'est pas argileux, le strip-till s'effectue généralement au printemps. Ce travail en bande doit être réalisé lorsque les conditions d'humidité du sol sont optimales car une intervention trop tardive en automne pourrait être exposée à des conditions semi-plastiques du sol, ce qui aurait pour conséquence que la terre devienne collante et donc que les pièces de la machine se remplissent de terre (Brun et Légère, 2018). Un sol à l'état plastique est un sol qui se déforme sous une action mécanique, mais sans rupture. La limite de plasticité d'un sol est la teneur en eau ($\text{kg}_{\text{eau}}/\text{kg}_{\text{terre}}$) pour laquelle le sol passe de l'état friable à l'état plastique. Le travail du sol doit donc se faire sous cette limite (Biielders, 2018).

Si la limite de plasticité est dépassée (Biielders, 2018) :

- Collage de la terre sur les outils.
- Risque de lissage avec apparition de la semelle de labour.
- Risque de compaction et d'orniérage.

1.2.2. Impact du strip-till sur les propriétés physiques du sol

Une étude menée en 1991 a prouvé que le passage du strip-tiller sur 40 cm de profondeur permet de garder une plus grande humidité dans le sol et que la densité du sol est plus faible en comparaison avec un travail du sol complet perturbant l'ensemble de la surface de la parcelle car une terre travaillée conduit à une évaporation plus importante. Or, avec la technique du strip-till, seulement 25% maximum de la surface du sol est travaillée. Ce facteur permet donc de lutter plus efficacement contre les périodes de sécheresse. L'indice de pénétrométrie du sol est également plus élevé dans la bande travaillée, ce qui permet au système racinaire de se développer plus facilement en profondeur (Raper et al., 1994). A

l'inverse, cet indice est plus faible dans l'inter-rang puisque le travail de décompaction du sol n'a pas été effectué (Overstreet et al., 2008).

Comme expliqué précédemment, un des avantages du strip-till est que l'inter-rang n'est pas perturbé par le passage de l'outil. La conséquence de cette pratique est l'accumulation des résidus de culture à la surface de l'inter-rang qui mène à limiter l'érosion dans la parcelle lorsque la culture ne couvre pas totalement le sol et permet également une meilleure infiltration de l'eau (Raper et al., 1994). Néanmoins, il a été prouvé que le pourcentage d'humidité du sol est plus élevé dans l'inter-rang non travaillé en comparaison avec la future ligne de semis travaillée dû à l'accumulation de résidus de culture dans l'inter-rang qui jouent un rôle de barrière à l'évapotranspiration du sol. L'accumulation de résidus de culture dans l'inter-rang augmente donc la teneur en carbone organique par rapport à l'intra-rang (Overstreet et al., 2008).

En outre, le semis direct réalisé en un seul passage avec le strip-till permet également de limiter le nombre de passages de tracteur sur la parcelle et induit donc une moindre compaction du sol, en comparaison avec une méthode de travail traditionnelle comprenant le travail complet du sol (labour, travail superficiel du sol, préparation du lit de semence et semis). Par conséquent, l'utilisation de carburant est également réduite, ainsi que le nombre d'heures de travail à l'hectare (Raper et al., 1994).

1.2.3. Impact du strip-till sur l'activité biologique du sol

Une étude a été réalisée en 2008 par Overstreet et al. Ils se sont attardés sur l'activité biologique du sol dans des parcelles strip-tillées ayant reçu des fertilisants organiques ou d'origine minérale. Concernant la biomasse microbienne, celle-ci est plus élevée dans l'inter-rang et plus faible dans le rang. Un niveau intermédiaire se trouve à la limite entre le rang et l'inter-rang (Figure 7). De plus, les valeurs sont également plus élevées sur la parcelle ayant été fertilisée avec des apports organiques plutôt que minéraux.

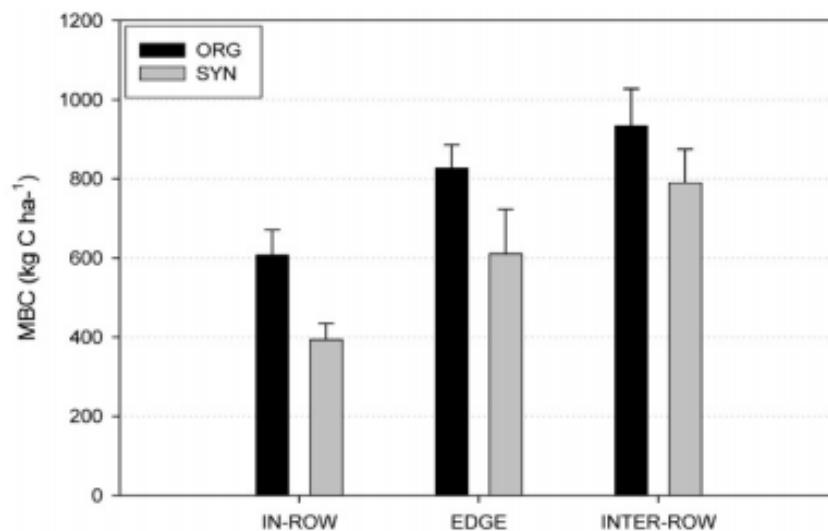


Figure 7: Biomasse microbienne mesurée dans le rang (= IN-ROW), sur le bord (=EDGE), et dans l'inter-rang (=INTER-ROW). ORG = Fertilisant organique, SYN = Fertilisant minéral (Overstreet et al., 2008).

Une autre étude réalisée durant une période de trois ans (2012-2014) s'est portée sur les différentes populations de microorganismes retrouvées dans deux sols conduits différemment, l'un travaillé en strip-till et l'autre travaillé en conventionnel. Cette expérience a pu montrer que le strip-till permet d'accroître la communauté de microorganismes par l'augmentation du nombre de bactéries, de champignons et de nématodes. Les chercheurs ont également pu démontrer que sur une période de 6 ans (2009-2015), la population de bactéries a augmenté de 49%, celle des champignons de 37%, celle des nématodes de 275% et celle des nématodes pathogènes des racines de 797%. Un problème se pose donc quant au développement de la population de nématodes phytopathogènes. A l'inverse, le travail conventionnel du sol homogénéise la couche superficielle du sol et modifie donc l'environnement utile aux microorganismes. La conséquence de ce phénomène est une diminution de la diversité de bactéries et de champignons (Leskovar et al., 2016).

Un indicateur de la santé d'un sol peut être le nombre de nématodes présents car les bactéries et champignons sont une source de nourriture pour les nématodes. Une importante population de nématodes signifie donc que les autres populations de microorganismes sont également élevées. D'après l'étude, la population de nématodes est quatre fois plus élevée sur la parcelle strip-tillée en comparaison avec la parcelle conduite en conventionnelle. En outre, comme expliqué précédemment, le travail conventionnel du sol modifie le microenvironnement des couches superficielles du sol et pourrait donc également mener au déclin de la population de nématodes.

Cette étude confirme également que, par des observations menées sur 10 ans, la population de vers de terre tend à augmenter dans la parcelle strip-tillée par rapport à une parcelle où la charrue à socs a été utilisée (Leskovar et al., 2016).

1.2.4. Impact du strip-till sur le rendement

Comme expliqué précédemment, le strip-till peut être appliqué à différentes cultures qui respectent un écartement minimum de 45 cm entre les rangs de semis. Différentes expérimentations ont donc été réalisées sur plusieurs cultures depuis les années 1990.

Une culture pouvant être mise en place par cette méthode est celle du tournesol qui comporte un écartement entre les rangs de 75 cm pour cette étude. Une étude s'attardant sur le potentiel d'émergence des graines et sur le rendement en fonction de la largeur de bande travaillée a montré en 2013 que le pourcentage d'émergence des graines était plus faible pour la bande travaillée sur une largeur de 22,5 cm en comparaison avec celle de 37,5 cm. La raison principale est le fait que sur la bande de travail moins large, la quantité de résidus de culture présente sur cette bande est plus importante. Ces résidus sont un obstacle à l'émergence des graines semées. La chasse-débris joue donc un rôle primordial lors du semis de la culture (Celik et al., 2013). Dans cette étude, la proportion de sol travaillée dépasse largement les 25 % de sol travaillé théorique acceptable en travail de strip-till. Néanmoins, cet essai permet de mettre en évidence certaines observations.

Egalement, la hauteur et le diamètre des tiges sont plus importants pour la bande de travail la plus large, ainsi que pour le rendement en graines qui est de 4,4 et 3,9 tonnes/ha, respectivement pour la largeur de travail de 37,5cm et 22,5 cm. A l'inverse, la teneur en humidité du sol tend à augmenter avec une largeur de bande de travail plus faible, ce qui pourrait être un avantage lors des années sèches (Celik et al., 2013).

Concernant la culture du maïs, des essais ont été effectués sur deux ans en comparant le strip-till avec une parcelle en travail conventionnel. Les chercheurs américains ont tiré comme conclusion que le système strip-till avait autant de potentiel, voire plus que le système conventionnel concernant le rendement couplé à des économies en termes de carburants et de temps de travail. Néanmoins, chaque parcelle répond différemment à cette pratique à cause du type de sol, du niveau de compaction, de l'historique cultural ou des résidus de culture. L'effet positif du strip-till est accentué par l'implantation d'un couvert végétal avant la culture principale en raison de l'accumulation de résidus de culture au printemps permettant de garder un meilleur taux d'humidité dans le sol (Luna et al., 2002).

Toujours pour le maïs, une autre étude réalisée dans le nord de l'Italie a, cette fois, comparé le strip-till avec un travail minimum du sol et un sol non travaillé. Les résultats de rendement montrent que la première année (2010), le rendement de la parcelle strip-tillée est supérieure aux autres, alors que la deuxième année, c'est la parcelle avec un travail minimum du sol qui l'emporte. Dans les deux cas, le sol non travaillé possède le plus mauvais rendement (Trevini et al., 2013).

Dans l'ensemble, de nombreuses études aboutissent à des résultats différents les uns des autres. Certains ont constaté de meilleurs rendements avec le strip-till par rapport au travail conventionnel et vice versa. C'est également le cas lorsque la comparaison est faite entre le

strip-till et un travail minimum du sol. Il est donc difficile de tirer des conclusions significatives quant à l'impact de l'une ou l'autre technique sur le rendement (Trevini et al., 2013).

1.2.5. Application du strip-till à la culture de la betterave

Ce mémoire étudiant l'effet du strip-till végétal sur la betterave, il est important de rassembler les connaissances qui existent actuellement dans le domaine et notamment sur le strip-till simple sans semis d'une espèce de couvert végétal dans la ligne.

En agriculture conventionnelle, le labour est souvent utilisé pour travailler le sol en profondeur et est suivi par un travail plus superficiel à l'aide d'un cultivateur léger lorsque le sol est battant ou par le travail d'un cultivateur couplé à une herse rotative lorsque le sol possède une structure stable. Lorsque le labour est abandonné, un déchaumage suivi d'un éventuel décompactage et de l'utilisation d'un cultivateur couplé à une herse rotative sont effectués avant le semis de la betterave (Bertin, 2018).

En outre, le fait de travailler la surface totale de la parcelle va permettre d'améliorer les conditions de levée des adventices dans l'inter-rang. La chambre d'agriculture de Normandie (France) a réalisé un essai comparant le pourcentage de levée des adventices d'une parcelle témoin travaillée superficiellement sur l'ensemble de sa surface, une parcelle strip-tillée deux fois au printemps et une dernière strip-tillée en un seul passage en automne suivi d'un semis direct de betteraves au printemps. Les résultats montrent une plus grande quantité d'adventices sur le témoin et un nombre plus faible dans la parcelle strip-tillée en automne car pour cette dernière, il n'y a eu qu'un seul passage du semoir au printemps. Très peu de terre a donc été déplacée dans l'inter-rang (Figure 8) (ITB, 2017).

Une étude réalisée sur 5 années en Australie a été mise place pour comparer le travail du sol conventionnel (travail profond avec une défonceuse + deux passages avec un broyeur + deux passages avec un rouleau niveleur + cultivateur) à celui du strip-till (seul un passage au strip-tiller avant le semis). Cet essai a été réalisé sur deux types de sol différents : le premier est un sol argilo-limoneux et le second est sablo-limoneux. Evans et son équipe ont tiré différentes conclusions de ce travail (2009).

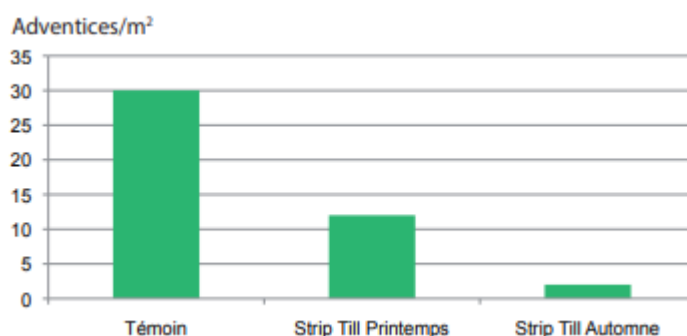


Figure 8 : Impact du strip-till sur le nombre d'adventices (ITB, 2017).

Comme expliqué sur le tableau 2, pour la parcelle se trouvant sur le sol argilo-limoneux, le rendement en poids de betterave par hectare est systématiquement plus élevé pour la parcelle strip-tillée (ST) par rapport à la parcelle en agriculture conventionnelle (CT), à

l'exception de la première de l'essai. En moyenne sur les 5 ans, le pourcentage en saccharose est également plus élevé pour ST, de même pour le poids de saccharose par hectare (Evans et al., 2009).

Tableau 2: Rendement et paramètres qualitatifs comparant une parcelle en strip-till (ST) et une parcelle en agriculture conventionnelle (CT) sur un sol argilo-limoneux. Les données suivies par une même lettre ne sont pas significativement différentes. (Evans et al., 2009).

Year	Sugarbeet Yields, metric tonnes ha ⁻¹ (tons acre ⁻¹) ^[a]		Percent Sucrose		Gross Sucrose, kg ha ⁻¹ (lb acre ⁻¹)	
	CT	ST	CT	ST	CT	ST
2004	52.0 (23.2) d	51.4 (22.9) d	19.8 ab	20.1 a	10,360 (9,225) abcd	10,342 (9,208) bcd
2005	56.2 (25.1) cd	62.6 (27.9) bc	19.4 bc	19.9 ab	11,048 (9,864) abcd	12,094 (10,768) a
2006	63.4 (28.3) ab	71.2 (31.8) a	17.7 e	17.4 e	11,315 (10,078) abc	12,448 (11,085) a
2007	57.8 (25.8) bcd	61.1 (27.3) bc	19.8 ab	19.7 b	11,540 (10,280) abc	12,000 (10,685) ab
2008	52.5 (23.4) cd	54.7 (24.4) cd	18.7 d	18.7 cd	9,649 (8,780) d	10,037 (9,133) cd
Average	56.4 (25.2)	60.2 (27.5)	19.1	19.2	10,782 (9,645)	11,184 (10,176)

La même étude réalisée cette fois-ci sur le sol sablo-limoneux a révélé des résultats différents de ceux observés sur la parcelle argilo-limoneuse : Le rendement est plus faible pour ST, 63 T/ha contre 63,5 T/ha pour CT, de même pour le poids de sucre à l'hectare qui est également plus élevé pour CT. Seul le pourcentage de sucre est plus élevé pour ST de 0,1% (Evans et al., 2009). La composition du sol joue donc un rôle important sur l'effet des différentes techniques culturales sur la culture. L'effet du strip-till est d'autant plus visible lorsque le sol est lourd (teneur en argile plus élevée). Un sol limoneux est plus sensible à la compaction en raison de la taille de ses particules. Celles-ci sont plus petites que des grains de sable, ce qui a pour conséquence qu'un sol sableux ne subit pas le phénomène de compaction. Aussi, les particules d'argile sont encore plus petites que celles de limon, mais ont une capacité de gonflement et de rétrécissement plus importantes que celles de limon et pourront donc limiter plus facilement la compaction du sol (Euben, 2017).

Un des rôles du strip-till est de décompacter le sol à l'endroit de la future ligne de semis de la betterave car un sol compact constitue un obstacle à une croissance optimale des racines de betterave avec l'apparition de betteraves dites fourchues, c'est-à-dire une racine de betterave possédant plusieurs ramifications de taille assez importante et non pas un pivot central (Tableau 3). Ces betteraves fourchues provoquent donc une perte de rendement et une perte de qualité car lors de la récolte, la terre colle plus facilement à la racine et les pertes par bris de pointes sont plus élevées (Euben, 2017).

Tableau 3: Morphologie racinaire dû à l'état de compaction du sol. Cat. 1 = sol non compacté, Cat. 2 = Sol légèrement compacté, Cat. 3 = Sol fortement compacté (Biielders, 2018).

Catégorie	Particularité des racines	Exemple
1	Racines ne présentant pas de défaut	
2	Racines présentant des ramifications latérales mais pas d'arrêt du pivot	
3	Racines présentant un défaut majeur : arrêt du pivot, fourchage	

Malgré tous les avantages préalablement cités concernant la méthode du strip-till, il existe aussi quelques désavantages. Le premier est la nécessité de disposer d'un autoguidage GPS-RTK (Real time kinematics) pour semer les graines avec précision dans la ligne ayant été travaillée par le strip-tiller. Si ce n'est pas le cas, la graine pourrait être semée dans la zone non-travaillée et ne bénéficiera pas du travail de décompaction du sol. Il peut également arriver fréquemment une diminution du pourcentage de levée de semis en raison d'un lit de semence trop grossier et d'un mauvais contact entre le sol et la graine. Pour y remédier, un travail superficiel du sol est nécessaire avant le semis à l'aide d'une herse rotative. Il pourrait également se produire une augmentation de la tare terre lors de la récolte par concentration de l'eau dans le « V » de décompaction du strip-tiller. Enfin, lors du semis, le sol pourrait ne pas être assez ressuyé en raison d'un trop important développement du couvert végétal précédent et donc également impacter la levée des graines (Roisin, 2014).

1.3. Culture intercalaire

1.3.1. Définition

La culture intercalaire est une culture implantée entre deux cultures successives présentes dans la rotation. Donc, la culture principale et la culture intercalaire se succèdent la même année dans la rotation. Il existe quatre grands groupes de culture intercalaire :

- La culture fourragère
- L'engrais vert
- La culture intercalaire piège à nitrates (CIPAN)
- La culture de couvert

L'implantation de cette culture intercalaire se fait généralement entre une culture récoltée assez tôt dans la saison (juillet-août) et une culture semée au printemps de l'année suivante.

1.3.2. Rôles de la culture intercalaire

Plusieurs rôles sont garantis par cette culture intercalaire. Le premier est la production de fourrage destiné à l'élevage (colza fourrager, navet fourrager, choux fourrager, Ray-Grass d'Italie, seigle...). Un second rôle est l'enrichissement du sol en humus et/ou en azote grâce aux légumineuses pour ce dernier par l'incorporation de la culture dans le sol. La vesce, la féverole, le trèfle d'Alexandrie, le trèfle violet, le pois, la luzerne sont généralement utilisés pour leur rôle de fixation de l'azote atmosphérique. Enfin, une dernière fonction importante est celle de couverture du sol pour toutes les raisons expliquées au point 1.1.3.1., c'est-à-dire le piégeage des nitrates (moutarde, phacélie), la lutte contre l'érosion du sol, le contrôle des adventices, l'augmentation du taux de matière organique dans le sol pour optimiser les propriétés physico-chimiques du sol et augmenter l'activité biologique du sol (Bertin, 2018).

La culture de piège à nitrates a été instaurée suite aux pollutions environnementales par l'azote souvent d'origine minérale utilisé comme fertilisant des cultures et dans la majorité des cas, utilisé en excès. La conséquence de cette surfertilisation est la contamination des eaux de surface et nappes phréatiques. Le moment le plus délicat concernant la gestion de l'azote dans le sol est la période se trouvant entre la récolte de la première culture et le semis de la culture suivante car le sol est nu et donc peu d'obstacles sont présents pour éviter le lessivage de l'azote en profondeur. Une période d'interculture longue augmente ce phénomène de lessivage. La solution pour remédier à ce problème est l'installation d'une culture intermédiaire piège à nitrates (CIPAN) qui est une culture installée durant cette période d'interculture. Son rôle est d'utiliser l'azote présent dans le sol pour sa croissance. Cet azote ne sera donc plus libre dans le sol et ne sera plus lessivé. Avant le semis de la culture suivante, cette CIPAN sera détruite et se décomposera pour que l'azote stocké soit libéré dans le sol et utilisé par la culture suivante. Sur la figure 9, l'efficacité du piégeage de l'azote est clairement visible. Il est facilement observable que la quantité de nitrate potentiellement lessivable dans le sol est beaucoup plus élevée sur un sol nu en comparaison avec un sol sur lequel se trouve un couvert végétal. En outre, une légumineuse pure (vesce) a un effet limité dans son rôle de piège à nitrates. Un mélange graminée-légumineuse est par contre plus efficace. La date de semis du couvert joue également un rôle important car un couvert semé trop tardivement n'aura pas le temps de se développer correctement avant l'hiver et ne remplira pas son rôle comme nous pouvons le constater pour la moutarde semée le 25 septembre (Protect'eau, 2017). Dans ce cas particulier et si le

semis du couvert ne peut être réalisé en amont en raison de l'implantation de la culture précédente, un couvert à semis tardif doit être préféré. C'est le cas du seigle (Bertin, 2018).

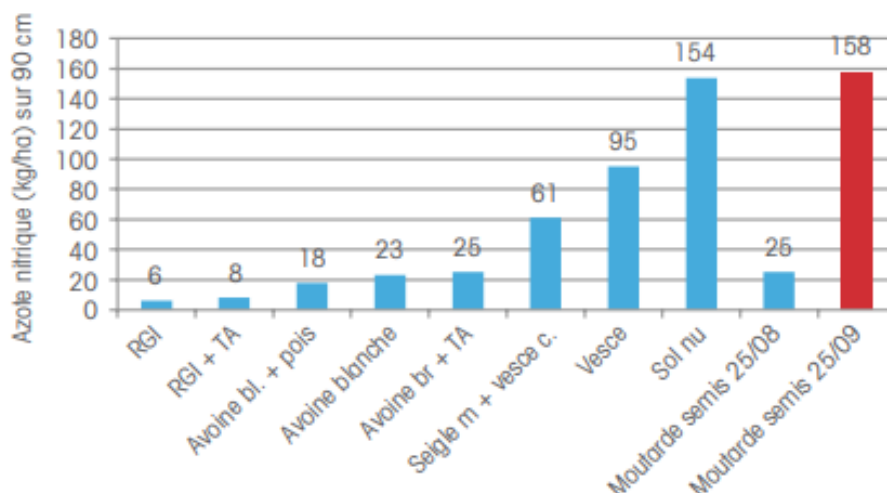


Figure 9: CIPAN après pois : Reliquats azotés deux mois après le semis (Protect'eau et UCL-ELIA, 2017).

La CIPAN est plus efficace lorsqu'elle est implantée après les céréales et avant une culture de printemps car la durée de l'interculture est élevée, également après une culture laissant un reliquat azoté élevé (pois, lin, haricot et autres) et enfin après l'épandage de matière organique (fumier, lisier...) (Protect'eau, 2017).

1.3.3. Mélange d'espèces de couvert végétal

Lors de l'installation de cet essai, un couvert végétal a été semé en plein sur l'ensemble de la parcelle. Ce couvert comprend un mélange de 5 espèces différentes: La phacélie, le lin, le tournesol, la féverole de printemps et l'avoine brésilienne. Cet essai est décrit en détail dans la partie « Matériels et méthodes ».

Le semis d'un couvert végétal multi-espèces possède plusieurs avantages par rapport à un couvert végétal en espèce pure. Un mélange d'espèces possède les mêmes rôles que ceux expliqués au point précédent et peut remplir une plus grande variété de bénéfices écologiques comme le stockage de l'azote, la réduction du lessivage de l'azote, une plus grande production de biomasse, la suppression d'un bon nombre de plantes adventices, l'amélioration de l'activité biologique du sol ou encore l'amélioration de la structure du sol par le développement de systèmes racinaires différents (fasciculé et pivotant). Certaines études ont démontré que la production de biomasse par un couvert multi-espèces pouvait être de deux à dix fois supérieure à celle d'un couvert végétal en monoculture alors que d'autres études n'ont pu tirer cette conclusion (Murrell et al, 2017 ; Appelgate et al., 2017).

Ces nombreuses fonctions réalisées en même temps sur une parcelle en comparaison avec un couvert végétal en espèce pure peuvent également induire une augmentation du rendement de la culture suivante. Le choix des espèces qui composent ce couvert est très

important car elles doivent être complémentaires et ne doivent pas présenter de comportements allélopathiques négatifs entre elles. Des espèces complémentaires permettent d'exploiter au maximum leur potentiel de services écosystémiques. Par exemple, un mélange entre une graminée et une légumineuse permet de fixer l'azote atmosphérique dans le sol qui sera utilisé par la graminée pour lui permettre d'augmenter sa biomasse et sera également utilisable pour la culture suivante (Murrell et al., 2017).

1.3.4. Destruction du couvert végétal

Un des éléments les plus importants à prendre en compte est la date de destruction du couvert. Si celui-ci est détruit trop tôt, la production de biomasse sera assez faible et les effets positifs sur le sol et la culture suivante seront limités. De plus, les adventices auront plus de temps et une plus grande facilité à se développer en raison de la moindre quantité de résidus de couvert sur le sol. Un travail du sol supplémentaire sera donc nécessaire pour lutter contre ces adventices. A l'inverse, si le couvert végétal est détruit trop tardivement, il y aura une production trop importante de biomasse, ce qui posera un problème lors du travail du sol et du semis. De plus, un couvert trop mature aura un rapport C/N trop élevé, ce qui peut conduire à une immobilisation de l'azote dans le sol lors de l'incorporation des résidus du couvert dans le sol (Luna et al., 2002).

En outre, la date de destruction dépend majoritairement de la date de semis de la culture suivante et du type de sol de la parcelle. D'après Arvalis-institut du végétal, la destruction du couvert intervient juste avant le semis d'une céréale d'hiver et ± 2 mois avant le semis d'une culture de printemps (Tableau 4) (Brun et Labreuche, 2018).

Tableau 4: Date de destruction du couvert végétal en fonction de la culture suivante et du type de sol (Brun et Labreuche, 2018).

Type de sol	Culture suivante		
	Blé, orge d'hiver	Betterave, lin, orge, pois et féverole de printemps	Mais, tournesol
Limon sain, craie, sable	Juste avant le semis	De mi-novembre à mi-décembre	De novembre à février (au plus tard, début mars)
Limon argileux Sol argilo-calcaire	Juste avant le semis	De mi-novembre à mi-décembre	Labour: dès le 15/11 Non-labour: entre le 15/11 et le 1/2 selon climat et vitesse de ressuyage
Sol argileux	Non-labour: juste avant le semis Labour: anticiper la date de destruction et de labour	Non-labour: 15/11 Labour: anticiper la date de destruction et de labour	Non-labour: mi-novembre à mi-décembre Labour: anticiper la date de destruction et de labour

La destruction du couvert peut se faire par différents moyens mécaniques ou une action chimique. Le moyen chimique utilisé couramment est la pulvérisation de glyphosate qui est un herbicide total. Ses avantages sont sa facilité de mise en œuvre, le gain de temps lors de l'application comparativement à une action mécanique et la non-perturbation du sol. Néanmoins, il est remis en cause depuis quelques années en raison de son potentiel effet cancérogène.

Les moyens mécaniques sont assez nombreux. Il existe notamment le broyage du couvert. En général, cette méthode est assez efficace et permet de diminuer le volume de biomasse et donc de faciliter le travail du sol par la suite. Il est néanmoins déconseillé de l'utiliser pour détruire des graminées puisqu'elles ont la capacité de repousser après une coupe. Une deuxième action mécanique de destruction est le labour du couvert. Cette technique est également efficace sauf pour des espèces possédant des organes souterrains de réserve (radis, navette) et pouvant donc repousser après le labour. Pour des espèces de haute taille comme la moutarde, celle-ci doit d'abord être broyée ou roulée grâce à un outil à l'avant du tracteur pour éviter le bourrage de la charrue. Un autre mode d'action est le roulage sur gel. Cette méthode a été mise en œuvre pour détruire le couvert végétal présent sur l'essai « strip-till végétal ». Le roulage sur gel est assez efficace pour des espèces sensibles au gel, ce qui n'est pas le cas des graminées adventices ou repousses de blés. Les blessures occasionnées sur le couvert par le rouleau permettent d'accroître l'effet du gel sur le végétal et permet également l'entrée de microorganismes qui vont décomposer ce couvert. Cette méthode est cependant contraignante car la date de destruction n'est pas prévisible car elle est dépendante de la météo. Le déchaumage est également une technique utilisée pour la destruction à l'aide d'un déchaumeur à disques, une bêche roulante ou un cultivateur. Il faut néanmoins veiller à ce que le sol soit bien ressuyé. La simple action du gel sur les espèces gélives permet la destruction sans l'intervention de l'homme, mais la réussite est plus aléatoire (Brun et Labreuche, 2018).

Pour la destruction d'un couvert végétal multi-espèces, le mode de destruction doit être choisi en fonction de l'espèce la plus difficile à détruire (Tableau 5) (Protect'eau, 2017).

Tableau 5: Mode de destruction du couvert végétal en fonction de l'espèce présente (Protect'eau, 2017 ; Labreuche, 2011).

ESPÈCES	STADE	GEL	ROULAGE EN PÉRIODE DE GEL	BROYAGE	LABOUR	DÉCHAUMAGE	GLYPHOSATE	GLYPHOSATE + 2-4D
Ray-grass italien, seigle		-	-	-	++	+	++	++
Moutarde		++ (-5 à -10°)	++	+++	++	+++	++	+++
Avoine (brésilienne ou blanche)	tallée	+	-	-	++	++	+++	+++
	épiée	++ (-8°)	+	+	+	+	+++	+++
Radis fourrager	précoce	+	+	+	++	+	++	++
	tardif	-	-	-	++	+	++	++
Phacélie		++ (-5 à -13°)	+++	++	+++	++	++	+++
Trèfle d'Alexandrie, vesce, pois, féverole		++ (-5 à -10°)	++	+	+++	+	+	+++
Repousses de céréales d'hiver		-	+	-	++	+	+	+++

-

+

++

+++

peu sensible assez sensible sensible très sensible

Source : Tiré en partie de : Labreuche J., Arvalis Institut du Végétal, 2011

1.4. Strip-till végétal

1.4.1. Définition

Le strip-till végétal est une technique agricole qui est apparue au début des années 2000. Elle consiste en l'implantation d'une espèce de couvert végétal spécifique semée dans la future ligne de semis de la culture suivante pendant la période d'interculture. Un couvert végétal comprenant une ou plusieurs autres espèces est également semé sur l'ensemble de la surface de la parcelle pour couvrir le sol (Figure 10). Ce travail est généralement réalisé juste après la récolte de la culture précédente et est effectué à l'aide d'un strip-tiller combiné à un semoir dont chaque élément semeur se trouve derrière chaque dent du strip-tiller travaillant la terre. L'écartement entre les bandes travaillées correspond à l'écartement entre les lignes de semis de la culture suivante (Brun et Légère, 2016).



Figure 10: Essai « strip-till végétal » mis en place à La Jaillière (France) en 2013 comprenant de la féverole (lignes hautes) dans la future ligne de semis de la culture suivante et de l'avoine (lignes basses) dans l'inter-rang (Brun et Légère, 2016).

L'espèce semée présente dans le rang a pour but d'améliorer la structure du sol par un système racine de type « pivot » tel que le radis chinois ou la féverole. Une seconde fonction est la fixation de l'azote atmosphérique par l'implantation d'une légumineuse (trèfle d'Alexandrie, trèfle incarnat, vesce, féverole...) qui pourra fournir une certaine quantité de cet azote pour la culture suivante. Certaines espèces ont également la capacité de lutter contre certains parasites du sol (phénomène de biofumigation), comme par exemple la moutarde qui possède une propriété anti-nématode. Le rôle rempli par une ou plusieurs espèces de couvert végétal présente(s) dans l'inter-rang est la couverture rapide du sol et leur effet allélopathique pour éviter le développement d'adventices (Bertin, 2018 ; Soumoy, 2018 ; Brun et Légère, 2016).

Cette technique étant relativement récente, il n'existe que très peu d'études sur le sujet, ce qui a encouragé le laboratoire « Earth and Life Institute : Agronomy » de l'Université Catholique de Louvain (Belgique) à s'y intéresser. Concernant le strip-till végétal appliqué à la betterave dans cet essai, celui-ci a été réalisé le 16 août 2017 en même temps que l'implantation d'un couvert végétal dans la future ligne de semis avec un écartement entre les rangs travaillés de 45 cm. Juste avant ce travail, un mélange de 5 espèces de couvert

végétal (la phacélie (*Phacelia tanacetipholia*), le lin (*Linum usitatissimum*), le tournesol (*Helianthus annuus*), la féverole de printemps (*Vicia faba*), et l'avoine brésilienne (*Avena strigosa*)) avait été implanté sur l'ensemble de la parcelle (Soumoy, 2018).

1.4.2. Contraintes liées au strip-till végétal

Le strip-till végétal nécessitant généralement l'implantation d'un couvert semé en plein et un second semé dans le rang de la future culture, la mise en place de cette technique requiert au moins deux passages sur la parcelle. Une possible compaction du sol supplémentaire, une perte de temps et une augmentation de la consommation du carburant sont donc des conséquences liées au strip-till végétal.

Une seconde contrainte est que le semis de la culture suivante doit se faire à l'aide d'un autoguidage GPS-RTK pour être certain de semer la culture (maïs, betterave...) à l'endroit précis où se trouvait l'espèce de couvert précédente semée dans le rang pour bénéficier au maximum de ses avantages cités au point 1.4.1..

Enfin, sans travail du sol avant l'implantation de la culture suivante, la surveillance des ennemis de culture comme la limace ou le corbeau doit être de mise car les résidus de culture peuvent les attirer. Aussi, le semis de la culture est plus superficiel en comparaison avec un travail homogène du sol et les lignes de semis sont plus difficiles à refermer, ce qui favorisent l'attaque des ennemis de culture (Brun et Légère, 2016).

1.4.3. Exemple d'essai « strip-till végétal »

Un essai « strip-till végétal » a été réalisé sur 4 années (2012-2015) par Arvalis-Institut du végétal à Boigneville et La Jaillière (France). Sur le premier site, trois traitements ont été mis en place : un strip-till simple, un strip-till végétal avec une féverole de printemps dans le rang et un strip-till végétal avec une féverole d'hiver dans le rang. L'inter-rang était composé d'avoine ou d'un mélange multi-espèces et variait au cours des années. Un maïs était semé en tant que culture suivante au printemps. La différence de rendement en maïs entre les parcelles n'a pas été significative sur l'ensemble des 4 années. L'année 2014 n'a pas été comptabilisée en raison d'importantes attaques de corbeaux sur l'ensemble de l'essai lors du semis du maïs, ainsi qu'en 2012 pour le traitement « Strip-till + féverole d'hiver » où les corbeaux ont également fait des dégâts (Figure 11) (Brun et Légère, 2016).

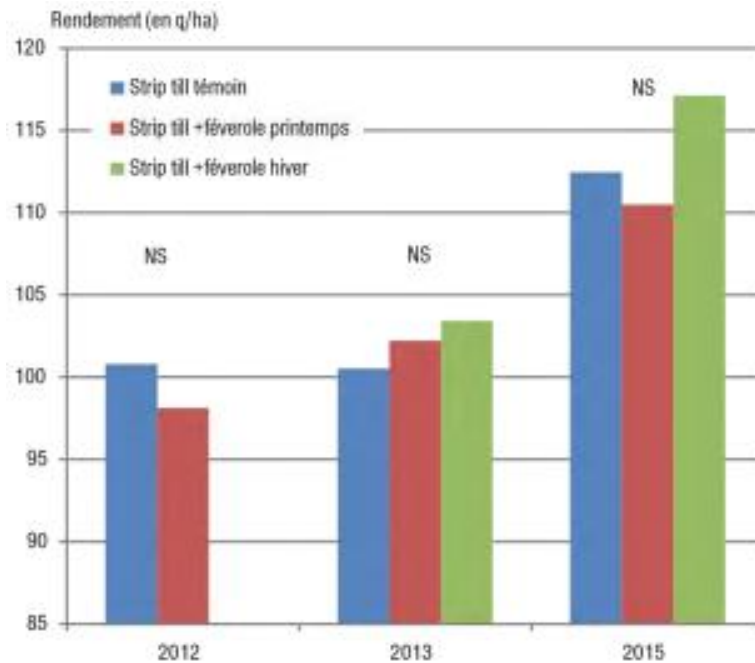


Figure 11: Rendement en maïs pour l'essai « strip-till végétal » à Boigneville en fonction de l'année et du traitement. NS = Non-significatif (Brun et Légère, 2016).

Concernant l'essai réalisé à La Jaillière, 4 traitements différents ont été mis en place :

- 1) Bande témoin avec un couvert multi-espèces semé en plein,
- 2) Couvert multi-espèces semé en plein + avoine et radis chinois dans le rang,
- 3) Couvert multi-espèces semé en plein + avoine et féverole d'hiver dans le rang,
- 4) Couvert multi-espèces semé en plein + radis chinois et féverole d'hiver dans le rang.

Comme pour l'essai de Boigneville, aucun résultat significatif n'a pu être conclu quant à la différence de rendement en maïs entre chaque parcelle pour cet essai (Brun et Légère, 2016).

2. Objectif

De nombreuses études ont déjà mis en évidence l'impact de la technique du strip-till sur les propriétés physico-chimiques du sol et également sur le développement et le rendement des cultures suivantes. De même pour le couvert végétal, de nombreux scientifiques ont déjà étudié le sujet. Par ailleurs, la technique du strip-till végétal a été très peu étudiée par les différents organismes de recherche. Pour rappel, le strip-till végétal est une technique culturale qui consiste à travailler uniquement la future ligne de semis de la culture suivante et d'y localiser une espèce de couvert végétal l'année précédant le semis de la culture principale.

Après avoir étudié les effets du strip-till végétal sur les propriétés physico-chimiques du sol et sur la croissance du couvert végétal, l'objectif de ce mémoire sera de déterminer s'il existe des effets de ce strip-till végétal sur la culture suivante : la betterave.

Ce travail sera porté sur l'analyse du système aérien et racinaire des betteraves, ainsi que sur le potentiel de rendement qui est l'indice principal sur lequel se base l'agriculteur. Le but de ce travail est de comparer les betteraves issues de différents traitements où des couverts végétaux ont été implantés, puis détruits avant le semis de la betterave. Cette comparaison sera également faite par rapport à deux témoins, l'un étant un traitement sans espèce implantée dans la future ligne de semis et l'autre étant un traitement sans espèce implantée dans la future ligne de semis, mais également sans travail du sol à l'aide du strip-tiller.

Une conclusion pourra donc être tirée quant à l'utilité de travailler la future ligne de semis et d'y semer une espèce de couvert végétal.

3. Matériels et méthodes

3.1. Contexte de l'étude

Ce travail s'intéressant à l'effet du strip-till végétal sur la culture suivante (la betterave sucrière) est la suite de l'étude réalisée en 2018 par Rodolphe Soumoy concernant l'effet du strip-till végétal sur les propriétés physico-chimiques du sol.

Les mesures réalisées directement sur les betteraves pourront donc être comparées avec celles effectuées sur le sol et sur le couvert végétal avant le semis de la betterave.

3.2. Plan expérimental

Cet essai de strip-till végétal a été mis en place sur un champ appartenant à l'UCL mais cultivé par Mr Nicolas Braibant, agriculteur à Corroy-le-Grand. Cette parcelle se situe à Vieusart, village situé dans la commune de Chaumont-Gistoux en province de Brabant wallon, en Belgique (Figure 12).



Figure 12: Photographie aérienne de la zone de l'essai strip-till végétal encadrée en orange.
Echelle = 1:5500 (Google earth, 2019).

Les coordonnées de la parcelle sont 50°40'50''N et 4°38'04''E. La mise en place de l'essai a débuté par l'épandage de compost suivi par un premier déchaumage le 7 août 2017 pour enfuir les résidus du blé moissonné le 29 juillet 2017 (Soumoy, 2018).

Une fois ces travaux réalisés, l'essai, proprement dit, a pu être installé. Tout d'abord, un couvert végétal composé de cinq espèces a été semé sur l'ensemble de la parcelle le 14 août, en même temps que le second déchaumage. Ces 5 espèces sont la phacélie (*Phacelia tanacetipholia*), le lin (*Linum usitatissimum*), le tournesol (*Helianthus annuus*), la féverole de printemps (*Vicia faba*), et l'avoine brésilienne (*Avena strigosa*).

Ensuite, le 16 août 2017, un travail de décompaction dans la future ligne de semis (=strip-till) a été réalisé au moyen d'un décompacteur munis de cinq dents espacées de 45 centimètres, ce qui correspond à l'écartement entre deux lignes de semis de betteraves sucrières qui seront semées après le couvert. L'essai a été implanté dans le sens Sud-Est Nord-Ouest, c'est-à-dire perpendiculairement au chemin en laissant une forrière de 15m. Sur ce décompacteur, un semoir a été installé pour pouvoir semer des espèces de couverts directement dans la future ligne de semis des betteraves sucrières. C'est ce travail de décompaction suivi du semis d'une espèce de couvert végétal dans la ligne de travail du sol qui est appelé le strip-till végétal (Figure 13).



Figure 13: Décompacteur à 5 dents suivi du semoir dans la ligne décompactée (Soumoy, 2018).

Concernant les différents traitements réalisés, 8 espèces ou mélanges d'espèces de couvert végétal ont été semés (entre parenthèse l'initiale attribuée à chaque traitement) : le tournesol (C5), l'avoine brésilienne (C1), le radis chinois structurateur (C2), la vesce de printemps (C4), le fenugrec (C6), la phacélie (C7), un mélange de trèfle de Perse, de Micheli, renversé, raboteux et de Jamin (C8) et le trèfle incarnat (C3). Outre ces traitements, un traitement témoin décompacté, mais sans le semis d'un couvert végétal localisé dans la bande travaillée a été mis en place (T1), ainsi qu'un traitement sans strip-till végétal (T0). Comme expliqué plus haut, une bande témoin sépare chaque traitement (Soumoy, 2018) (Figure 14).

Lors du semis du traitement « tournesol », le semoir a rencontré un problème de blocage par les graines. Ce traitement a donc dû être recommencé en début de parcelle.

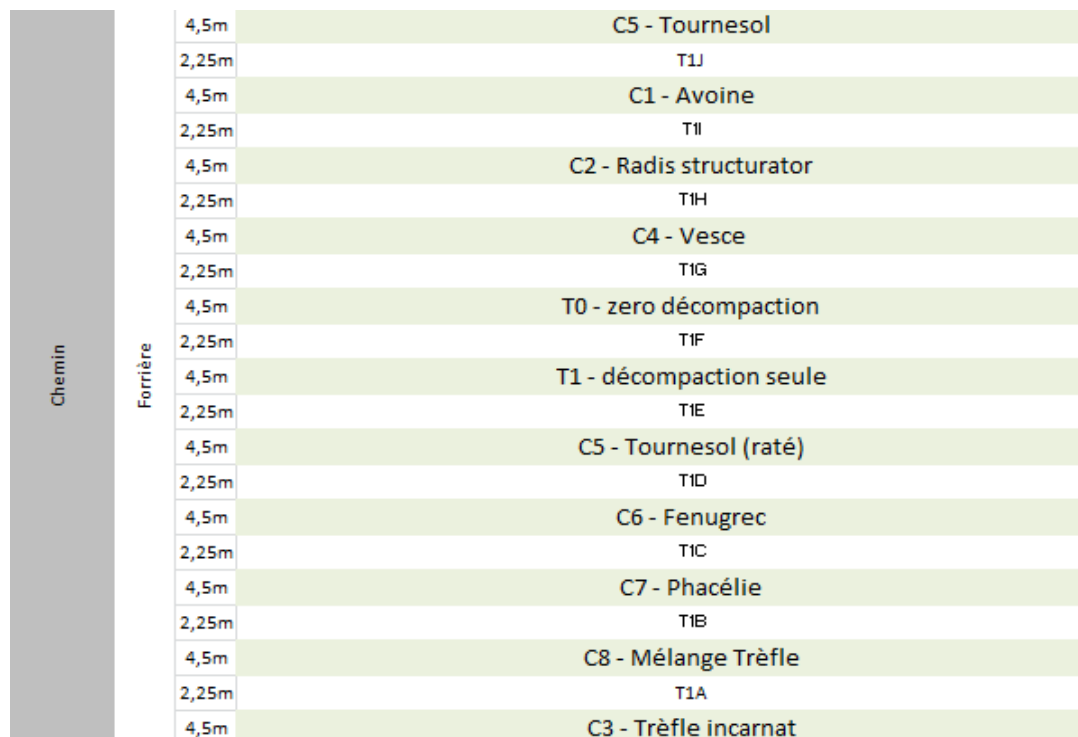


Figure 14: Plan expérimental de l'essai strip-till végétal.

Les bandes de traitement (C1 à C8, T1 et T0) ont une largeur de 4,5 m, ce qui correspond à un aller-retour du tracteur avec le décompacteur. Quant aux bandes témoin (T1A à T1J), elles ont une largeur de 2,25 m qui correspond à un aller simple du tracteur. Les bandes de traitement sont donc composées de 10 lignes, alors que celles du témoin en sont composées de 5.

Le 8 février 2018, le mélange de couvert végétal a été détruit par roulage sur gel pour permettre sa décomposition jusqu'au semis de betteraves sucrières le 9 avril 2018 (Soumoy, 2018). C'est à partir de cette date que mon travail d'observation et de prélèvement a débuté. Le semis de betterave avait une densité de 110000 graines à l'hectare et a été réalisé à l'aide d'un tracteur muni d'une herse rotative combinée à un semoir de précision équipé d'un GPS pour semer exactement dans les bandes travaillées avec le décompacteur. L'écartement entre les lignes est donc de 45 cm et de 20 cm dans la ligne. Chaque traitement a été mis en place sur une longueur de 90 m.

La difficulté avec l'installation d'un essai en champ en milieu agricole réel avec matériel agricole non spécifique à la réalisation d'essais est le fait qu'il est impossible de scinder les blocs en plusieurs petits rectangles répartis aléatoirement tant en longueur qu'en largeur pour former des blocs aléatoires complets. Dans ce cas-ci, seules des bandes de 90 m ont pu être délimitées où chaque traitement y a été choisi aléatoirement à l'exception du traitement témoin (T1) qui ne pouvait pas se trouver en bord de parcelle, à raison d'une bande par traitement.

L'arrachage des betteraves a eu lieu le 22 novembre 2018 à l'aide d'une arracheuse à 6 rangs attelée au tracteur pour former un andain après son passage, ce qui me laissait le temps de prélever les betteraves de chaque traitement, avec l'aide des employés de la ferme de Marbaix, avant que la chargeuse ne récolte les betteraves. Les échantillons, une fois prélevés, ont été envoyés à l'Institut Royal Belge pour l'Amélioration de la Betterave (IRBAB) situé à Tirlemont pour procéder à un ensemble d'analyse.

Tableau 6: Récapitulatif de l'itinéraire technique.

Date	Travail effectué
7 août 2017	Epandage de compost et premier déchaumage
14 août 2017	Second déchaumage et semis du mélange de 5 espèces en plein
16 août 2017	Strip-till végétal
8 février 2018	Destruction du couvert par roulage sur gel
9 avril 2018	Semis des betteraves
22 novembre 2018	Arrachage des betteraves

3.3 Analyses

Des mesures et prélèvements ont été réalisés durant toute la période de culture de la betterave, de la germination des graines jusqu'à la récolte des betteraves. Il est également bon de noter que lors de la prise d'échantillons des racines de betteraves à l'arrachage, cinq bandes témoin n'ont pas été récoltées. Effectivement, pour des raisons logistiques et vu le coût d'analyse des échantillons, il a été décidé de ne récolter qu'un témoin sur deux. Les témoins T1B, T1D, T1E, T1G et T1I n'ont donc pas été récoltés. Chaque témoin analysé sera donc comparé avec les deux bandes de traitement accolées au témoin.

3.3.1. Analyses de la partie aérienne

3.3.1.1. Taux de germination

Comme dit précédemment, le semis des betteraves a été effectué le 9 avril 2018. Le taux de germination a donc pu être mesuré un mois plus tard, soit le 6 mai 2018. Cela n'aurait pas pu se faire avant cette date pour être certain que l'ensemble des graines capables de germer ait eu le temps de lever.

Cette mesure s'est faite à l'aide d'un mètre enrouleur. Sur chaque traitement, un comptage du nombre de graines germées sur une distance d'un mètre dans la ligne de semis a été mesuré. Ce dispositif a été répété dix fois sur l'ensemble de chaque traitement et bande témoin, réparti sur l'ensemble de la surface de la parcelle. Nous obtenons donc 150 mesures (10 mesures dans 15 traitements et témoins). Cette analyse peut être délimitée sous forme de 10 blocs répartis de façon homogène sur toute la longueur des bandes de traitement ou témoin (Figure 15).

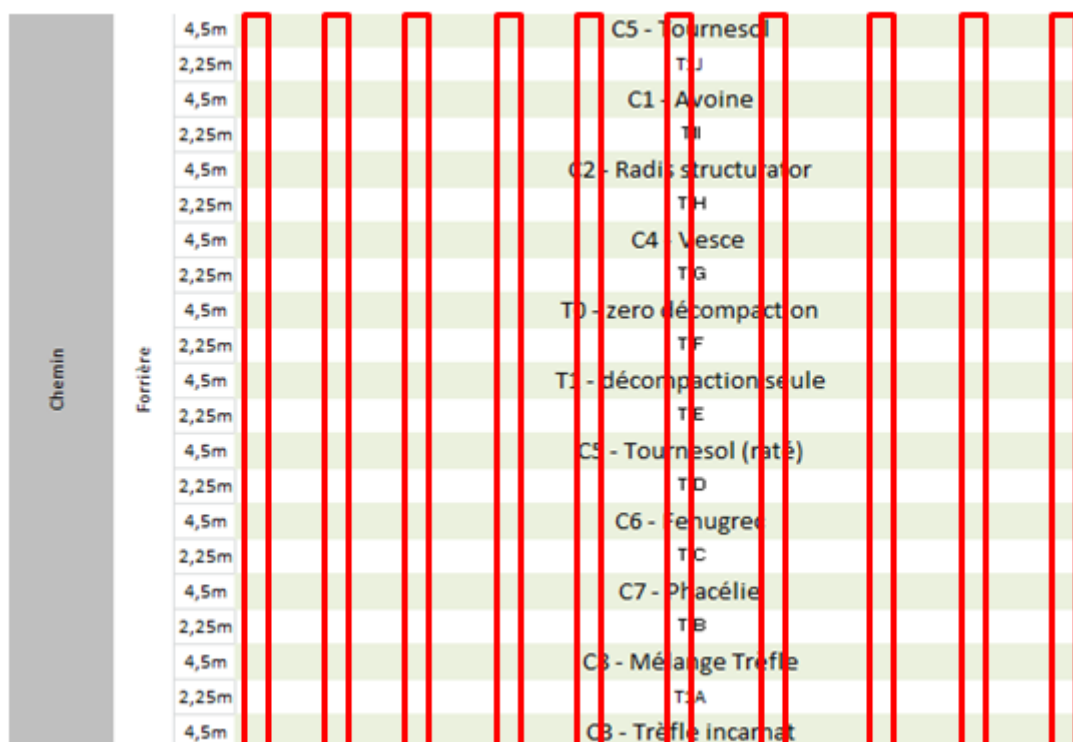


Figure 15: Méthode de mesure pour le suivi du taux de germination avec les 10 blocs dans lesquels les mesures ont été effectuées (rectangle rouge).

Pour limiter au maximum les erreurs dues au matériel de semis ou à un problème apparu pendant le semis, les mesures ont été prises sur l'ensemble des lignes de chaque traitement ou bande contrôle à l'exception des lignes les plus extérieures pour éviter les effets de bord.

3.3.1.2. Recouvrement foliaire

La mesure du recouvrement foliaire permet de mesurer la vitesse de croissance des feuilles de betteraves. Ces résultats pourront être comparés entre les différents traitements et témoins. Pour ce faire, un cadre de forme carrée d'un mètre sur un mètre a été fabriqué dans lequel de petits carrés de 4 cm de côté ont été délimités à l'aide d'une fine ficelle. Nous obtenons donc au total 625 carrés.

La mesure du recouvrement foliaire à l'aide de ce cadre est relativement simple. Il suffit de le poser sur trois lignes de betteraves en croissance et de compter le nombre de carrés recouvert par des feuilles appartenant à la ligne du milieu. Si un carré est rempli à plus de la moitié par une feuille, il est comptabilisé. Si ce n'est pas le cas, le petit carré n'est pas comptabilisé.

Le résultat obtenu est donc un nombre de carré couvert par les feuilles de betterave. Ensuite, ce résultat a été ramené en pourcentage :

$$\text{Pourcentage de recouvrement foliaire (\%)} = \frac{\text{Nombre de carrés rempli}}{\text{Nombre de carrés total}} \times 100$$

Ce travail étant fastidieux, l'opération a été répétée cinq fois sur chaque traitement de manière à récolter des résultats représentatifs de l'ensemble des bandes. Cinq blocs ont donc été délimités perpendiculairement au sens des traitements.

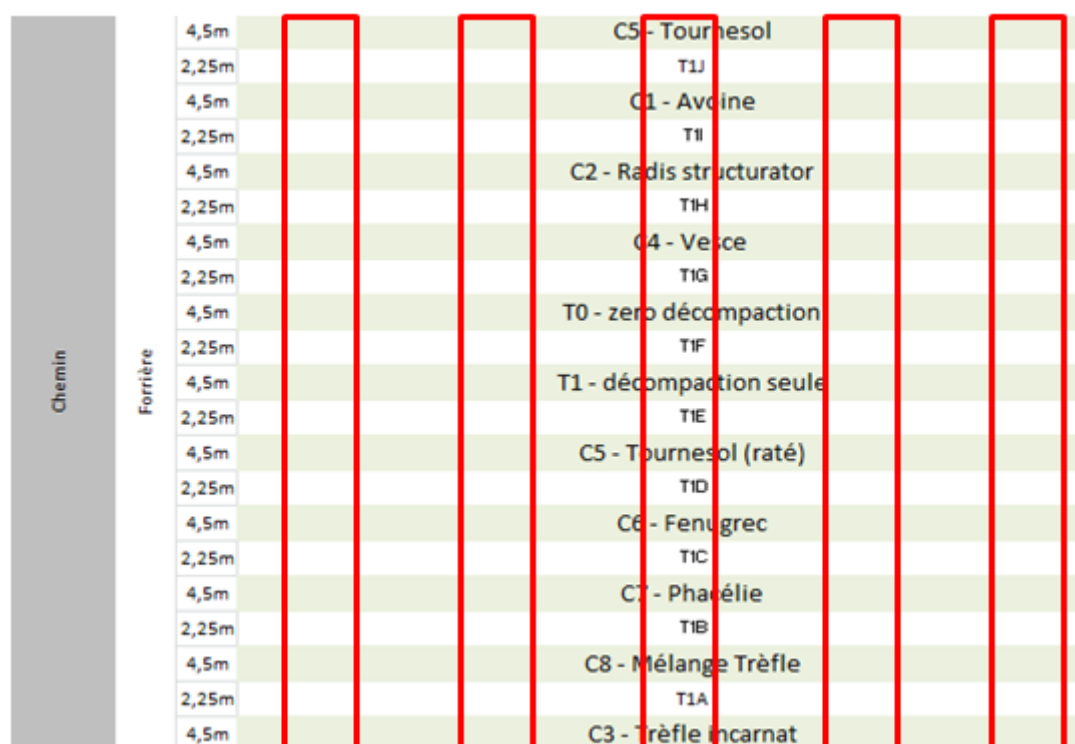


Figure 16: Méthode de mesure pour le suivi du recouvrement foliaire avec les 5 blocs dans lesquels les mesures ont été effectuées (rectangle rouge).

Une première série de mesure a été effectuée le 7 juin 2018. Ensuite, pour la seconde série de mesures le 27 juin 2018, le recouvrement foliaire était de 100%. L'interligne était totalement recouverte par les feuilles de betteraves. Dès lors, seules les mesures du 7 juin 2018 pourront être utilisées pour mettre en évidence les éventuelles différences entre les traitements.

3.3.1.3. Suivi du nombre de feuilles

Une troisième analyse a pu être faite concernant le nombre de feuilles fabriquées par les betteraves. Durant l'ensemble de la saison, le nombre de feuilles présentes sur 7 betteraves dans chaque bande de traitement et témoin a été relevé. Cette analyse s'est déroulée à trois dates distinctes : le 27 juin 2018, le 29 juillet 2018 et le 3 septembre 2018. A partir du début du mois d'octobre, les feuilles devenaient cassantes et tombantes. Il était donc impossible de récolter des résultats assez fiables que pour être traités.

Pour pouvoir suivre le développement des mêmes betteraves durant toute la saison, de petits piquets ont été placés au pied de 7 betteraves répartis aléatoirement et de façon homogène dans chaque bande de traitement et témoin. La parcelle expérimentale a donc été divisée en 7 blocs perpendiculairement au sens des bandes de traitement et de témoin afin d'avoir une représentation caractéristique de l'hétérogénéité de la parcelle.

De plus, pour compter le nombre de feuilles en développement durant plusieurs mois, un élastique a été placé autour d'une feuille de chaque betterave pour servir de repère car les feuilles les plus âgées entrent en sénescence en position extérieure de la plante, alors que les plus jeunes feuilles sont formées à partir du cœur de la betterave. Toutes les feuilles faisant plus de 3 cm de longueur étaient comptabilisées lors du comptage.

3.3.1.4. Surface foliaire

La mesure de la surface foliaire des betteraves s'est déroulée durant trois mois. Quatre périodes de relevé ont été déterminées : le 1^{er} juillet 2018, le 29 juillet 2018, le 4 septembre 2018 et le 11 octobre 2018.

Pour ce faire, durant chaque mesure, l'ensemble des feuilles de sept betteraves dans chaque bande de traitement ou de témoin ont été récoltées. Les betteraves ont été tirées aléatoirement et de façon homogène sur l'ensemble de la surface de chaque traitement.

Une fois les feuilles récoltées, la mesure de la surface foliaire a été effectuée en laboratoire. La surface foliaire de chaque betterave a été mesurée à l'aide d'un scanner, le LI-COR Li-3100c (Figure 17).

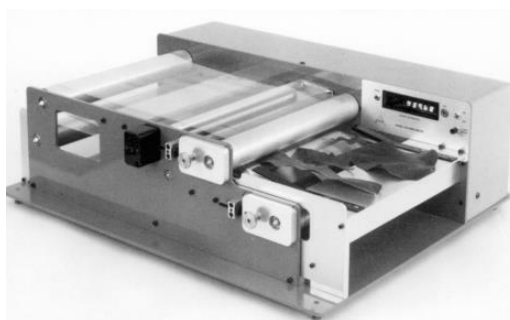


Figure 17: Scanner utilisé pour mesurer la surface foliaire des betteraves (Licor, 2012).

Les feuilles de betteraves étant très larges et longues, les pétioles des feuilles ont été coupés pour pouvoir scanner correctement les limbes. Les pétioles n'ont pas pu être passés dans l'appareil par la suite car ceux-ci étaient trop épais.

Le scanner Li-Cor est précis au millimètre près. Il était donc primordial de nettoyer l'appareil après avoir scanné chaque bouquet foliaire des betteraves car la moindre poussière ou débris de terre peut également être scanné, ce qui fausserait les résultats.

Avant toute utilisation, le scanner doit également être calibré avec deux plaques de référence pour, une nouvelle fois, limiter les erreurs.

Dans un souci de réaliser un travail de qualité, les feuilles de betteraves à analyser auraient dû être récoltées avec les racines pour certifier que l'ensemble des feuilles soit bien rattachées à une même betterave et éviter des pertes durant le transport jusqu'au laboratoire. Malheureusement, avec le temps très sec de l'été 2018, il n'était pas possible d'arracher les racines sans endommager le plant, c'est pour cette raison que seules les

feuilles ont été récoltées, à l'exception du 11 octobre 2018 où il a été possible d'analyser également les racines.

3.3.2. Analyses de la partie racinaire

3.3.2.1. Analyse individuelle des racines de betterave

Lors de la dernière récolte des feuilles pour mesurer la surface foliaire, le 11 octobre 2018, les racines des sept betteraves analysées par bande de traitement et témoin ont également été récoltées pour procéder à une analyse du volume de chaque racine. Au total, les racines de 105 betteraves ont donc été étudiées. De la même manière que l'étude de la surface foliaire, les sept betteraves analysées ont été prélevées de façon homogène et aléatoire à travers l'ensemble de la surface des 15 bandes étudiées.

Après avoir soigneusement enlevé tous les résidus de terre présents autour des racines, les sept betteraves de chaque parcelle ont été placées sur un papier à fond bleu et prises en photo (Figure 18).



Figure 18: Photographie des racines de betteraves de la bande C5 (Tournesol).

Le fond bleu permet d'atténuer l'effet d'ombrage et donc de mettre correctement en évidence les racines. Ensuite, les 15 photos réalisées pour l'ensemble des parcelles ont été traitées à l'aide du programme de traitement d'image « ImageJ ». Les photos ont été modifiées suivant un mode binaire (noir et blanc) et également retouchées pour isoler la racine principale sans les radicelles et autres imperfections (Figure 19).



Figure 19: Représentation binaire des racines de la bande C5 (tournesol).

A partir de cette représentation, les surfaces en deux dimensions de chaque racine ont pu être déterminées par ImageJ. De plus, le volume de celles-ci a également pu être calculé en découpant la racine en cylindre d'épaisseur de 0.0265 cm sur toute la hauteur de la betterave. Pour ce faire, une hypothèse a dû être posée : chaque cylindre possède une forme parfaitement circulaire.

Une fois les variables en Y, la hauteur du cylindre et X, le rayon du cylindre, obtenues pour chaque cylindre, une formule a été appliquée pour en déterminer le volume de chaque cylindre.

$$\text{Volume de la racine de betterave} = \pi \cdot Y_i \cdot \sum_i (X_i^2) \quad [\text{cm}^3]$$

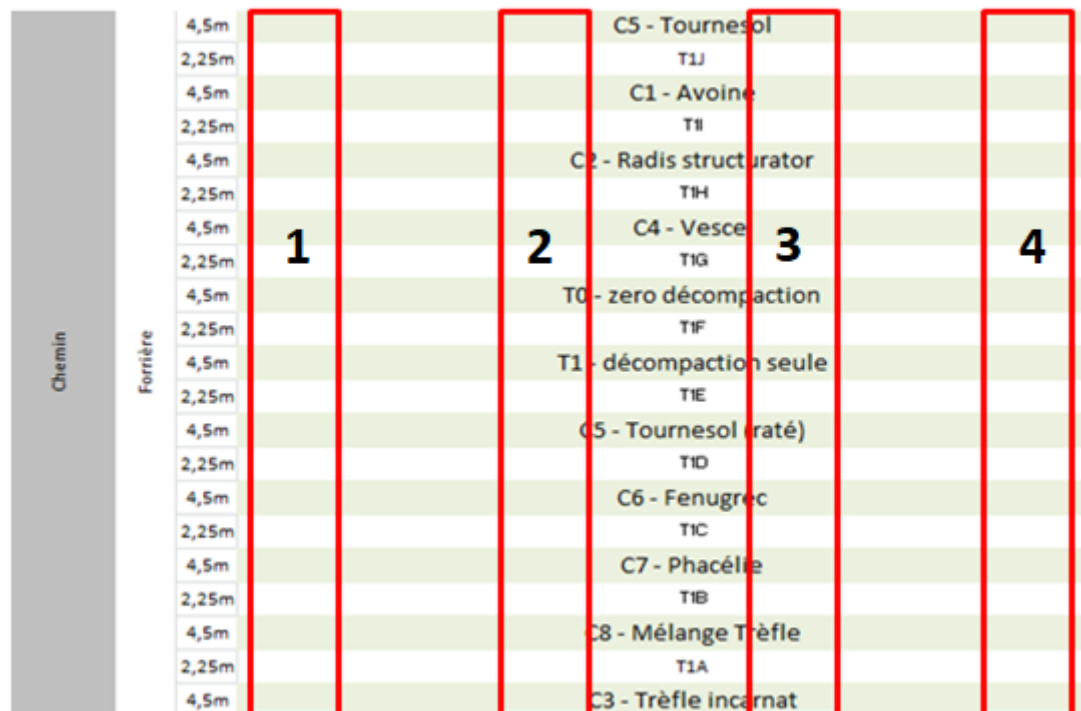
Avec :

- X_i , le rayon de chaque rayon [cm],
- Y_i , la hauteur du cylindre équivalent à 0.0265 [cm].

3.3.2.2. Analyse de récolte

Le 22 novembre 2018, Mr Braibant, l'agriculteur s'occupant du champ, a récolté les betteraves. L'opération s'est réalisée en deux étapes. Tout d'abord, un tracteur muni d'une arracheuse arrachait cinq rangs à la fois et formait un andain après son passage. Une fois l'andain formé, les échantillons ont été récoltés pour être envoyés au laboratoire de l'Institut Royal Belge pour l'Amélioration de la Betterave, l'IRBAB. Dès que les échantillons

Concernant la prise des échantillons, quatre échantillons ont été récoltés par bande de traitement ou témoin, ce qui constitue un total de 60 échantillons. Quatre blocs ont donc été délimités perpendiculairement au sens des traitements (Figure 20).



Un échantillon correspond à la récolte de betteraves sur cinq rangs et sur 3 m de longueur. Ce n'est pas un nombre de betteraves qui a été récolté, mais bien l'ensemble des betteraves présentes dans la zone de prélèvement pour éviter toute erreur à cause d'un phénomène de compensation de certaines betteraves si certaines betteraves dans la zone sont manquantes. Néanmoins, les collaborateurs de l'IRBAB conseillent de récolter un minimum de 200 betteraves par bande de traitement ou témoin pour obtenir une valeur représentative de l'ensemble de la parcelle.

56



Figure 21: Caisses utilisées pour le tri et le transport des échantillons de betteraves.

3.3.2.2.1. Rendement

Le rendement de chaque échantillon a été calculé par l'IRBAB et s'exprime en kg sur une superficie de 6,75 m². Les effets de bord dans chaque bande n'ont pas pu être évités car l'arracheuse récoltait cinq rangs à la fois, ce qui correspond à la largeur d'une bande témoin ou à un aller-retour pour une bande de traitement.

Pour déterminer le poids en betteraves de chaque caisse, une série de dispositifs est mise en place dans le laboratoire de l'IRBAB. Lorsque la caisse arrive en début de chaîne d'analyse, l'étiquette y est scannée pour la reconnaissance de chaque échantillon. Ensuite, la caisse est pesée une première fois (poids brut). Après la pesée, l'échantillon entre dans une parmentière pour être lavé (Figure 22). La terre est donc éliminée. Une seconde pesée est réalisée par la suite pour déterminer le poids net 1 et par conséquent, la tare terre. L'ensemble de l'échantillon passe ensuite sur un tapis où un tri est réalisé (Figure 23). Les cailloux, résidus de feuilles et betteraves pourries sont éliminés pour ne conserver que les betteraves saines qui donneront le poids net 2 correspondant au rendement de l'échantillon. Les betteraves pourries sont éliminées car elles peuvent influencer les teneurs en sucre et éléments mélassigènes. Les éléments mélassigènes (Na, K, N α -aminé) sont des éléments qui réduisent l'extraction du sucre à partir de la betterave. La concentration en ces éléments dans le jus de sucre permet de quantifier le sucre qui ne peut être extrait par les processus utilisés en sucrerie (Mzibra et al., 2008).



Figure 22: Parmentière pour laver l'échantillon.



Figure 23: Table de tri des betteraves.

3.3.2.2.2. Tare terre

Comme expliqué au point précédent, chaque échantillon est pesé une première fois, lavé et ensuite pesé une seconde fois. La tare terre est le poids de terre qui a été éliminé lors du lavage.

$$Tare\ terre = Poids\ brut - Poids\ net\ 1\ [kg]$$

Avec :

- Poids brut, le poids de l'échantillon à l'entrée [kg],
- Poids net 1, le poids de l'échantillon directement après le lavage [kg].

3.3.2.2.3. Teneur en sucre

Après avoir été triées, les betteraves sont hachées par un ensemble de scies circulaires pour former de la râpure. Cette râpure est échantillonnée pour composer trois échantillons qui seront utilisés pour les analyses de la teneur en sucre et en éléments mélassigènes.

Dès que les trois échantillons ont été prélevés, ceux-ci sont directement congelés pour éviter toute oxydation par la chaleur et l'air.

Pour les analyses, du sulfate d'aluminium est ajouté pour mettre en solution le sucre et les autres éléments mélassigènes et permet également de faire précipiter les impuretés. Après filtration, la solution peut être analysée (Figure 24).



Figure 24 : Filtration de la solution à analyser.

Concernant l'analyse de la teneur en sucre, l'appareil utilisé est un polarimètre. Les mesures obtenues par l'IRBAB sont exprimées en pourcentage de sucre. Or, le producteur betteravier est payé en kilogramme de sucre lors de la livraison à la sucrerie et non pas en pourcentage. Les résultats ont donc été transformés en kilogramme.

$$Teneur\ en\ sucre = Rendement \times Teneur\ en\ sucre\ (\%) \quad [kg]$$

3.3.2.2.4. Teneur en éléments mélassigènes

Comme expliqué au point 3.3.2.2.1., la teneur en éléments mélassigènes représente la capacité d'extraction du sucre lors des processus effectués en sucrerie. La quantité en potassium et en sodium est mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre. Celle de l'azote α -aminé est mesurée par un fluorimètre. Le résultat obtenu est exprimé en mmol/100g de betterave. L'azote α -aminé représente l'azote nuisible présent dans les racines de betteraves lorsque ce fertilisant a été appliqué en excès sur la parcelle. Il peut causer des altérations au niveau de la physiologie de la plante et diminuer la synthèse du sucre au niveau de la racine (Legrand et Vanstallen, 2000).

Tableau 7: Récapitulatif des différentes mesures effectuées.

Date	Mesure effectuée
6 mai 2018	Taux de germination
7 juin 2018	Recouvrement foliaire
27 juin 2018 - 29 juillet 2018 - 3 septembre 2018	Nombre de feuilles
1 ^{er} juillet 2018 - 29 juillet 2018 - 4 septembre 2018 - 11 octobre 2018	Surface foliaire
11 octobre 2018	Volume racinaire
22 novembre 2018	Rendement
22 novembre 2018	Teneur en éléments mélassigènes

3.4. Analyses statistiques

Le traitement statistique de l'ensemble des données a été réalisé à l'aide du logiciel statistique SAS, ainsi qu'avec le logiciel Microsoft Excel. Ces analyses et interprétations se basent sur le cours de biométrie enseigné à la Faculté des bioingénieurs de l'UCLouvain par les professeurs B. Govaerts et X. Draye.

3.4.1. Facteur correctif

Avant de débiter le traitement statistique des données, celles-ci ont dû être corrigées. Effectivement, vu l'hétérogénéité spatiale potentielle de la parcelle, une correction des données a été effectuée en tenant compte de chaque résultat des bandes témoins accolées aux bandes de traitement.

L'équation s'exprime sous la forme suivante :

$$X_{i\text{ corr}} = X_i + \mu_t - X_{(i-1)}$$

Avec :

- $X_{i\text{ corr}}$, la mesure corrigée du traitement i,
- X_i , la mesure non corrigée du traitement i,
- μ_t , la moyenne des mesures des bandes témoin t,
- $X_{(t-1)}$, la mesure de la bande témoin juxtaposé à la bande de traitement i,

Pour réaliser cette correction, le logiciel Excel a été utilisé.

3.4.2. Moyennes et écart-types

Pour chaque analyse effectuée, le calcul de la moyenne des résultats dans chaque traitement a été effectué, ainsi que l'écart-type lié à cette moyenne.

La formule de la moyenne (μ) et de l'écart-type (σ) se trouvent sous la forme :

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

Avec :

- μ , la moyenne des résultats de chaque traitement,
- σ , l'écart-type lié à la moyenne,
- x_i , la valeur obtenue dans le bloc de prélèvement i ,
- n , le nombre de blocs où un prélèvement a été effectué.

L'écart-type lié à chaque moyenne renseigne la dispersion des données autour de la moyenne. Plus l'écart-type est élevé, plus la variabilité des données est importante.

3.4.3. Analyse statistique de l'évolution de la surface foliaire

Le suivi de l'évolution de la surface foliaire s'est fait en étudiant sept betteraves prises aléatoirement et de façon homogène à travers chaque bande de traitement et témoin. Pour cette analyse, aucun bloc n'a été délimité. L'analyse statistique peut donc se faire en réalisant une analyse de variance à deux critères ANOVA 2, à l'aide du logiciel SAS, qui explique la variable quantitative (surface foliaire) en fonction de deux variables catégorielles (traitement et date). Le facteur « date » aurait pu être considéré comme un facteur quantitatif, mais les dates étant espacées d'à peu près un mois entre chaque analyse, les valeurs de surface foliaire obtenues sont clairement indépendantes l'une de l'autre.

Une fois l'ANOVA 2 réalisée, des ANOVA 1 peuvent également être effectuées indépendamment pour chaque date de prélèvement. Nous ne tiendrons compte plus que du facteur « traitement ».

Les analyses ANOVA ont pour objectif de déterminer si une part significative de la variance observée dépend des paramètres étudiés.

Le test de Fisher permet de vérifier si les moyennes pour chaque traitement sont égales entre elles ou pas. Si la p-valeur issues de ce test est inférieure à 0.05, l'égalité des moyennes est rejetée. Il existe donc bien des différences entre les traitements. Pour déterminer ensuite quels facteurs sont significativement différents, un test de Tukey peut être réalisé. Celui-ci compare chaque résultat deux à deux.

Pour chaque analyse réalisée par SAS, un coefficient de détermination (R^2) est également calculé. Celui-ci renseigne la part de variabilité de la réponse expliquée par le modèle et donc la qualité de prédiction de ce modèle. De plus, le R^2 ajusté tient compte du nombre de termes dans le modèle et est donc plus précis. Plus la valeur de R^2_{adj} se rapproche de 100%, plus le modèle est de qualité.

Les formules de R^2 et R^2_{adj} s'écrivent sous la forme :

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad \text{et} \quad R^2_{adj} = 1 - \frac{MSE}{MST} = 1 - \frac{SSE/N-k}{SST/k-1}$$

Où $SST = SSM + SSE$

Avec :

- SST, l'estimation de la variabilité totale des résultats,
- SSE, l'estimation de la variabilité des résidus,
- SSM, l'estimation de la variabilité entre les traitements,
- $N - k$, le degré de liberté des résidus,
- $k - 1$, le degré de liberté des traitements.

3.4.4. Analyse statistique des racines individuelles

Comme pour l'analyse de la surface foliaire, sept betteraves ont été échantillonnées aléatoirement et de façon homogène à travers chaque bande. Une régression linéaire entre la surface foliaire et le volume racinaire permettra de mettre en évidence s'il existe une relation entre ces deux facteurs.

3.4.5. Analyse statistique avec un facteur « bloc »

Contrairement aux analyses précédentes, un facteur aléatoire intervient pour les autres analyses, c'est-à-dire pour le taux de germination, le recouvrement foliaire, le nombre de feuilles, le rendement et la teneur en éléments mélassigènes. Ce facteur aléatoire est le facteur « bloc » puisque ces blocs ont été choisis de façon homogène, mais aléatoirement pour l'ensemble des traitements. Une nouvelle procédure sera donc utilisée pour y incorporer ce facteur aléatoire. Comme expliqué par B. Govaerts et al. (2017), un facteur aléatoire apparaît lorsque les niveaux d'un facteur sont un échantillon aléatoire d'une population de niveaux possibles, dans ce cas-ci, le facteur « bloc ». Chaque résultat analysé est donc une variable quantitative expliquée par un facteur catégoriel « traitement » dans lequel intervient également le facteur aléatoire « bloc ».

Pour chaque analyse dans laquelle se trouve le facteur « bloc », un modèle ANOVA 1 aléatoire sera utilisé avec comme facteur catégoriel, le facteur « traitement ». Pour séparer l'estimation des paramètres de la partie fixe (« traitement ») et aléatoire (« bloc ») du modèle, la méthode du maximum de vraisemblance restreint (REML) est appliquée en estimant les composantes des variances. Aussi, le test du rapport de vraisemblance de modèles emboîtés permet de comparer le modèle complet comprenant le facteur « bloc » et le facteur catégoriel, ainsi que leurs interactions, à un modèle restreint qui correspond à un modèle complet dont les facteurs aléatoires sont enlevés un à un.

Les deux modèles sont les suivants :

$$H_0 : \text{Modèle restreint} : Y_{ij} = \mu + \varepsilon_{ij} \quad \text{avec } \varepsilon_{ij} \sim iN(0, \sigma^2)$$

$$H_1 : \text{Modèle complet} : Y_{ij} = \mu + a_i + \varepsilon_{ij} \quad \text{avec } a_i \sim iN(0, \sigma_a^2)$$

La statistique du test du rapport de vraisemblance est la suivante (Govaerts et al., 2017) :

$$LRT = -2 \log_e \left[\frac{L(R)}{L(F)} \right] = -2 [\log_e L(R) - \log_e L(F)] \sim X^2_{(p)}$$

Avec :

- Y_{ij} , la variable quantitative étudiée,
- μ , la moyenne générale,
- ϵ_{ij} , la fluctuation aléatoire due aux différences entre les mesures au sein de l'essai,
- a_i , l'effet du $i^{\text{ème}}$ traitement par rapport à μ ,
- $L(R)$, la vraisemblance du modèle restreint,
- $L(F)$, la vraisemblance du modèle complet.
- p , le nombre de paramètres soustraits du modèle complet

L'hypothèse H_0 est rejetée lorsque $LRT > X^2(0.95 ; p)$. Ainsi, par le tableau de résultat de l'analyse de la variance, la valeur du LRT permet de déterminer si le modèle restreint est utilisé ou non.

L'ensemble de ces analyses sera détaillé dans la partie 3 « Résultats » et discuté dans la partie 4 « Discussion ».

4. Résultats

Les résultats obtenus à partir des différents travaux réalisés sur la culture de la betterave et expliqués dans la partie « Matériels et méthodes » sont rassemblés dans cette partie. L'ensemble des tableaux et figures ci-dessous est issu du programme de traitement statistique SAS. Avant de traiter les données, l'ensemble de celles-ci a été modifié par le facteur de correction comme expliqué au point 3.3.3.1. .

Les résultats sont présentés chronologiquement en fonction des dates d'analyses et de prélèvements effectués durant toute la durée du suivi des betteraves. Les bandes témoins T1 intermédiaire ont été prises en compte lors de chaque analyse, mais ne seront pas représentées dans la partie « Résultats » pour une meilleure clarté. Seul le traitement témoin T1 (Traitement avec strip-till, mais sans semis d'une espèce spécifique dans la ligne) principal y est représenté.

4.1. Taux de germination

Pour analyser les données récoltées concernant le nombre de graines levées sur un mètre (10 x 1m/traitement), une analyse ANOVA 2 mixte de la variable quantitative expliquée a été réalisée en fonction du facteur catégoriel « Traitement » et du facteur aléatoire « Bloc ».

Cette analyse a révélé que le facteur « Bloc » au sein de chaque traitement n'est pas significatif car le test du rapport de vraisemblance est inférieur à la valeur du Chi-carré théorique ($LRT = 1.1 < 3.84$). Une seconde analyse utilisant un modèle ANOVA 1 en fonction du facteur catégoriel « Traitement » a également mis en évidence qu'il n'y a pas de différences significatives entre les traitements (Tableau 8).

La P-valeur associée au test de Fisher doit être inférieure à 0.05 pour que le facteur étudié ait un effet significatif sur la variable observée. Or, dans ce cas-ci, la P-valeur est de 0.9811 (Tableau 8).

Tableau 8: Résultat de l'ANOVA 1 pour le taux de germination en fonction du facteur « Traitement ».
DF = degré de liberté, Mean Square = Ecart-type, F Value = Valeur du test de Fisher,
Pr > F = la P-Valeur associée à F.

Facteur	DF	Mean Square	F Value	Pr > F
Traitement	14	0.30597067	0.37	0.9811

Néanmoins, l'ensemble des taux de germination des betteraves pour chaque traitement est relativement élevé avec des taux entre 85 et 90 % de germination (Tableau 9).

Tableau 9: Moyenne et écart-type du modèle du taux de germination des betteraves en fonction du traitement. Les traitements appartenant à des groupes identiques signifient que les moyennes ne sont pas significativement différentes.

Traitement	Moyenne (%)	Ecart-type	Groupe
C1 Avoine brésilienne	90	7	A
C2 Radis structurator	88.3	6.7	A
C3 Trèfle incarnat	85	1	A
C4 Vesce	85	7.4	A
C5 Tournesol	88.3	8	A
C6 Fenugrec	90	9.7	A
C7 Phacélie	90	8.4	A
C8 Mélange trèfle	88.3	8.2	A
T0 Témoin sans S-T	90	7	A
T1 Témoin avec S-T	90	7	A

En conclusion, les différents traitements réalisés dans chaque bande n'ont pas d'effet significatif sur le pouvoir germinatif des graines de betteraves. Ce constat a pu être confirmé par le test de Tukey comparant les traitements deux à deux. Aucun de ceux-ci ne se différencie l'un de l'autre.

4.2. Recouvrement foliaire

Pour le recouvrement foliaire, la récolte de données a été effectuée en deux dates séparées : Le 7 juin 2018 et le 27 juin 2018. Comme expliqué précédemment, à la date du 27 juin 2018, le recouvrement foliaire des interlignes est presque complet. Seules les données du 7 juin 2018 ont donc été analysées statistiquement. A cette date, les recouvrements vont de 54.1 à 73.3% en fonction des traitements.

D'après l'analyse ANOVA 2 mixte de la variable quantitative expliquée « Recouvrement foliaire » en fonction du facteur catégoriel « Traitement » et du facteur aléatoire « Bloc », le facteur « Bloc » est non-significatif car le rapport de maximum de vraisemblance est égale à 0 qui est inférieur à 3.84. Il n'y a donc pas d'effet significatif du facteur « Bloc ».

Une comparaison entre les traitements a pu révéler certaines différences (P-Value < 0.05). Les traitements « Avoine brésilienne », « Radis structurator » et « Mélange trèfle » (Groupe A) possèdent une moyenne du recouvrement foliaire par la betterave supérieure aux autres traitements. De plus, le traitement « Vesce » est significativement différent de tous les autres traitements et possède une moyenne légèrement plus faible que le groupe A. Aussi, le témoin sans strip-till (T0) se retrouve seul dans le groupe D, T0 possédant la moyenne la plus faible de tous les traitements (Tableau 10).

Tableau 10: Moyenne et écart-type du modèle du recouvrement foliaire des betteraves en fonction du traitement. Les traitements appartenant à des groupes identiques signifient que les moyennes ne sont pas significativement différentes.

Traitement	Moyenne (%)	Ecart-type	Groupe
C1 Avoine brésilienne	71	3.4	A
C2 Radis structurator	73	1.1	A
C3 Trèfle incarnat	57	0.9	C
C4 Vesce	64	1.2	B
C5 Tournesol	58	1.8	CD
C6 Fenugrec	56	1.4	CD
C7 Phacélie	58	1	CD
C8 Mélange trèfle	70	1.6	A
T0 Témoin sans S-T	54	1.9	D
T1 Témoin avec S-T	59	1.1	C

Le R^2 de ce modèle est de 0.92. Cela signifie que 92% de la variabilité des résultats est expliqué par le modèle. Plus le R^2 est proche de 1, plus la qualité du modèle est importante.

4.3. Evolution du nombre de feuilles

4.3.1. Sur l'ensemble de la saison

En premier lieu, l'analyse des données s'est focalisée sur l'évolution du nombre de feuilles en fonction des facteurs catégoriels explicatifs « Traitement » et « Date ».

Les deux facteurs ont une P-Valeur inférieure à 0.05. Ils ont donc tous les deux un effet significatif sur l'évolution du nombre de feuilles par betterave (Tableau 11). Le R^2 de ce modèle est très élevé : 0.9659.

Tableau 11: Résultat de l'ANOVA 2 de l'évolution du nombre de feuilles en fonction des facteurs catégoriels « Traitement » et « Date ». DF = degré de liberté, Mean Square = Ecart-type, F Value = Valeur du test de Fisher, $Pr > F$ = la P-Valeur associé à F.

Facteur	DF	Mean Square	F Value	Pr > F
Traitement	14	11.487736	9.64	<.0001
Date	2	4391.809762	3685.30	<.0001
Traitement*Date	28	6.441867	5.41	<.0001

Comme prévu, le nombre de feuilles par betterave augmente au cours de la saison. Comme observé sur la figure 25, les résultats correspondant à la date du 27 juin 2018 (colonne bleue) sont situés en dessous des résultats du 29 juillet 2018 (colonne rouge) qui sont eux-mêmes inférieurs aux résultats correspondant à la date du 3 septembre 2018 (colonne verte).

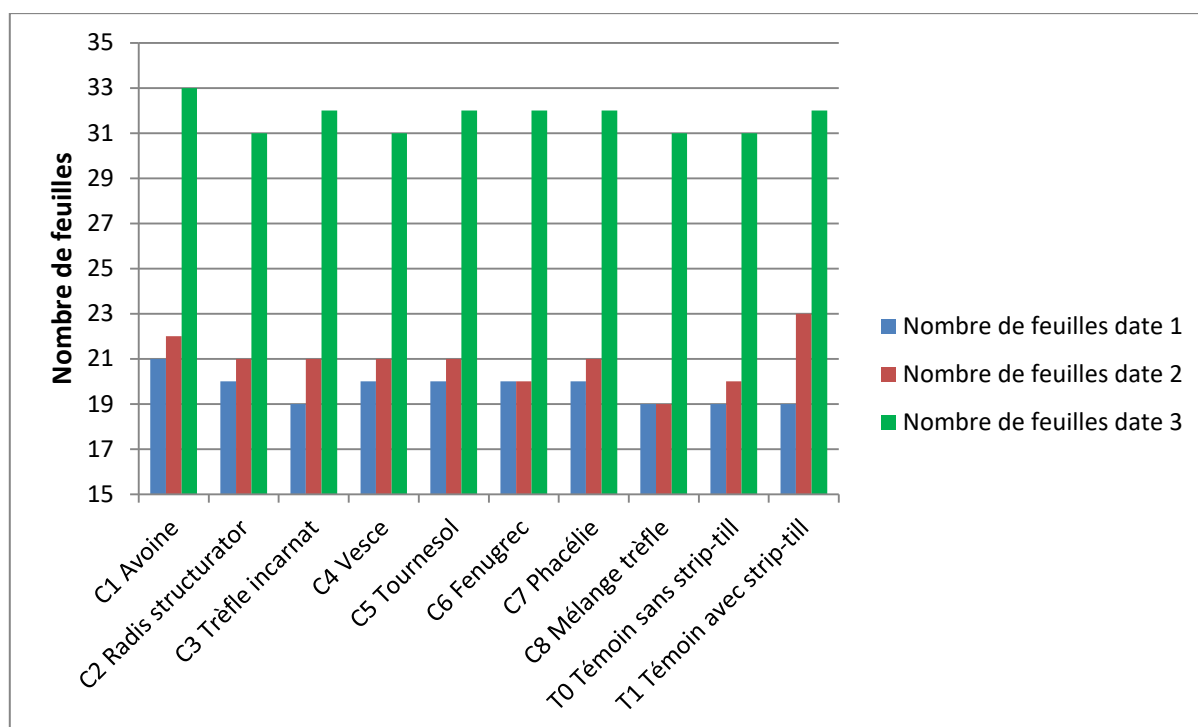


Figure 25: Nombre de feuilles par betterave en fonction du traitement et de la date d'observation. Date 1 = trait bleu (27 juin 2018), Date 2 = trait rouge (29 juillet 2018), Date 3 = trait vert (3 septembre 2018).

4.3.2. Nombre de feuilles par date

4.3.2.1. A la date 1 (27 juin 2018)

Une analyse ANOVA 2 du nombre de feuilles en fonction du facteur catégoriel « Traitement » et du facteur aléatoire « Bloc » a été effectuée pour chaque date. Pour la date 1, l'analyse montre que le facteur « Bloc » n'est pas significativement différent sur l'ensemble de chaque parcelle car le test du rapport de vraisemblance LRT est égale à 0.02 qui est inférieur au test Chi carré théorique (3.84) (Tableau 12).

Tableau 12: Résultat de l'ANOVA 2 mixte du nombre de feuilles en fonction du facteur catégoriel « Traitement » et du facteur aléatoire « Bloc » à la date 1. DF = degré de liberté, F Value = Valeur du test de Fisher, $Pr > F$ = la P-Valeur associé à F, χ^2 = Test du Chi-carré et LRT = Test du rapport de vraisemblance.

Facteur catégoriel	DF	F Value	Pr > F
Traitement	14	1.54	0.1122
Facteur aléatoire	DF	χ^2	LRT
Bloc	89	3.84	0.02

D'après l'observation du tableau 11, la P-valeur (= 0.1122) associée au test de Fisher est supérieure à 0.05, ce qui a pour conséquence que l'effet du traitement sur le nombre de feuilles de betterave n'est pas significatif. Ce constat a également été démontré par le test

de Tukey comparant les traitements deux à deux pour lequel aucun effet significatif n'a été constaté.

4.3.2.2. A la date 2 (29 juillet 2018)

Concernant l'analyse de données à la date 2, le facteur aléatoire « Bloc » est également non-significatif. Néanmoins, à l'inverse de la date 1, le facteur catégoriel « Traitement » est significatif puisque la P-Valeur est inférieure à 0.05 (Tableau 13).

Tableau 13: Résultat de l'ANOVA2 mixte du nombre de feuilles en fonction du facteur catégoriel « Traitement » et du facteur aléatoire « Bloc » à la date 2. DF = degré de liberté, F Value = Valeur du test de Fisher, $Pr > F$ = la P-Valeur associée à F, χ^2 = Test du Chi-carré et LRT = Test du rapport de vraisemblance.

Facteur catégoriel	DF	F Value	Pr > F
Traitement	14	18.47	<0.0001
Facteur aléatoire	DF	χ^2	LRT
Bloc	89	3.84	0.07

Le test de Tukey a montré que le traitement « Témoin avec strip-till » (23.6 feuilles) a une moyenne en nombre de feuilles significativement supérieure à la moyenne des autres traitements alors que le traitement « Mélange trèfle » (19.2 feuilles) possède la moyenne la plus faible et est significativement inférieur aux traitements «Avoine brésilienne», «Tournesol» et «Témoin avec strip-till».

4.3.2.3. A la date 3 (3septembre 2018)

La dernière observation est importante puisqu'elle est le reflet du nombre de feuilles produites par betterave sur l'ensemble de la période de croissance de celles-ci.

Comme pour les deux dates précédentes, le facteur aléatoire « Bloc » n'est pas significatif (LRT = 0.01 < 3.84), de même que le facteur « Traitement » qui est égal à 0.0733 et donc supérieur à 0.05. Néanmoins, la comparaison entre les traitements révèle que le traitement « Avoine brésilienne» possède le plus grand nombre de feuilles de betterave en moyenne en fin de saison et que ce nombre est significativement supérieur au traitement « Mélange trèfle » qui possède le nombre de feuilles de betterave en moyenne le plus faible (Tableau 14).

Tableau 14: Moyenne et écart-type du nombre de feuilles par betterave en fonction du traitement à la date 3. Les traitements appartenant à des groupes identiques signifient que les moyennes ne sont pas significativement différentes.

Traitement	Moyenne (Nombre de feuilles)	Ecart-type	Groupe
C1 Avoine brésilienne	33	0.5	A
C2 Radis structurator	31.5	1.41	AB
C3 Trèfle incarnat	31.6	1.23	AB
C4 Vesce	31.5	1.22	AB
C5 Tournesol	32	0.99	AB

C6 Fenugrec	31.9	0.46	AB
C7 Phacélie	32.2	0.46	AB
C8 Mélange trèfle	30.8	0.99	B
T0 Témoin sans S-T	31.2	0.84	AB
T1 Témoin avec S-T	31.6	0.49	AB

4.4. Evolution de la surface foliaire

4.4.1. Sur l'ensemble de la saison

Quatre prélèvements ont eu lieu pour suivre l'évolution de la surface foliaire des betteraves pour chaque traitement du 1^{er} juillet au 11 octobre 2018. Le modèle ANOVA 2 établi en fonction des facteurs catégoriels « Traitement » et « Date » permet de conclure que ces deux facteurs ont un effet significatif sur l'évolution de la surface foliaire (P-Valeur < 0.0001). Comme sept betteraves ont été récoltées lors de chacun des quatre prélèvements de façon aléatoire à travers chaque bande de traitement, le facteur « Bloc » n'est pas présent pour cette analyse.

La surface foliaire des betteraves est généralement la plus élevée en début de saison et décroît au fil des mois pour être la plus faible en fin de saison (date 1 = 1^{er} juillet ; date 4 = 11 octobre 2018) (Figure 26).

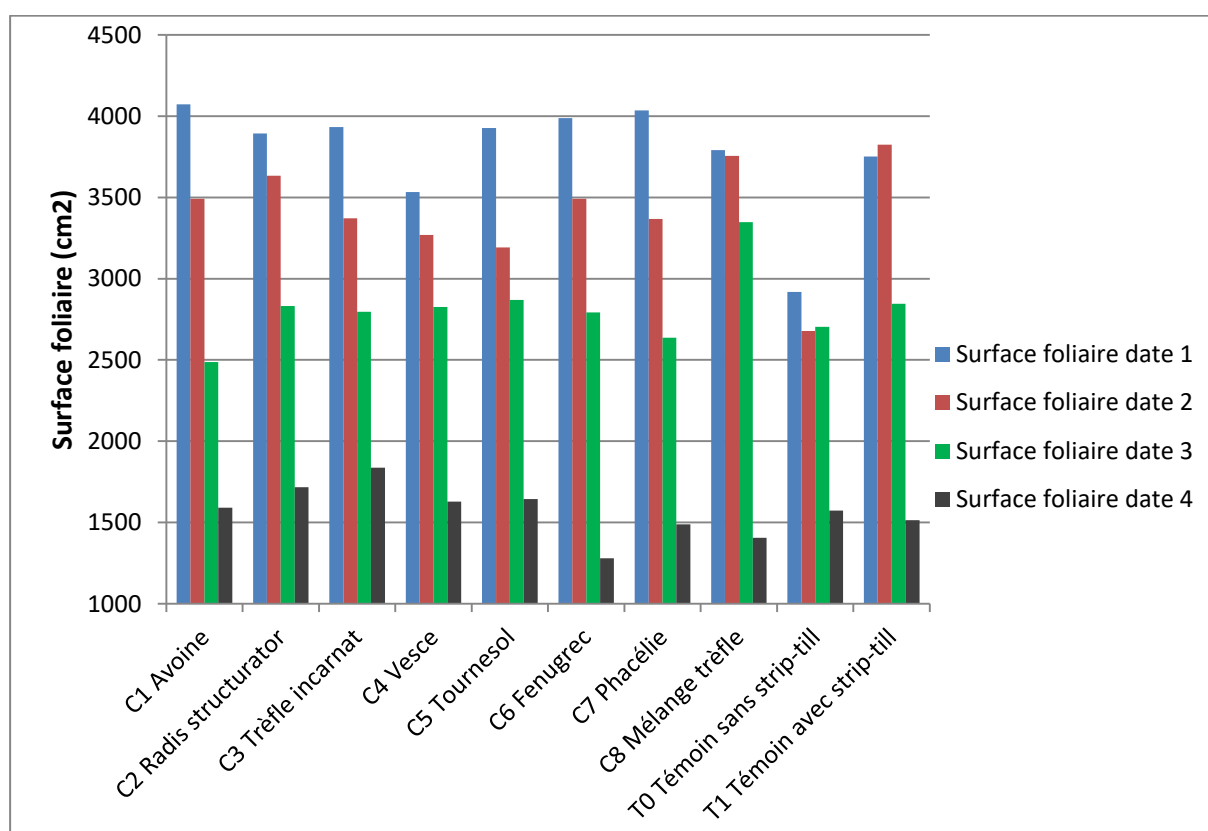


Figure 26: Evolution de la surface foliaire par betterave en fonction du traitement et de la date. Date 1 = Trait bleu (1^{er} juillet 2018), Date 2 = Trait rouge (29 juillet 2018), Date 3 = Trait vert (4 septembre 2018) et Date 4 = Trait noir (11 octobre 2018).

La moyenne des surfaces foliaires des betteraves par traitement a également été calculée en prenant en compte les 4 dates d'observation. Le traitement « Mélange trèfle » possède la plus grande surface foliaire sur l'ensemble de la saison, mais cette différence avec les autres traitements n'est pas significative à l'exception du témoin sans strip-till T0 qui possède la plus faible surface foliaire.

4.4.2. A la date 1 (1^{er} juillet 2018)

Comme constaté sur l'ensemble de la saison, le traitement « Témoin sans strip-till » est également significativement inférieur aux autres traitements avec une surface foliaire moyenne de 2919 cm², concernant les données récoltées à la date 1 d'après le modèle ANOVA 1 de la surface foliaire en fonction du facteur catégoriel « Traitement ».

4.4.3. A la date 2 (29 juillet 2018)

Comme les données de la date 1, le modèle ANOVA 1 montre que le témoin sans strip-till (=2679 cm²) est significativement inférieur à certains autres traitements en date 2. C'est le cas pour le traitement « Avoine brésilienne » (=3492 cm²), « Radis structurator » (=3633 cm²), « Fenugrec » (=3491 cm²), « Mélange trèfle » (=3755 cm²) et « Témoin avec strip-till » (=3824 cm²). Outre ce constat, l'ensemble des traitements ne sont pas significativement différents l'un de l'autre, mais le témoin avec strip-till possède la moyenne la plus élevée.

4.4.4. A la date 3 (4 septembre 2018)

A l'inverse des deux dates précédentes, la moyenne des surfaces foliaires des betteraves du traitement « Mélange trèfle » (=3348 cm²) est la plus élevée et est significativement différentes par rapport aux traitements « Avoine brésilienne » (=2488 cm²), « Phacélie » (=2637 cm²) et « Témoin sans strip-till » (=2703 cm²).

4.4.5. A la date 4 (11 octobre 2018)

La date du 11 octobre 2018 correspond à la dernière mesure de surface foliaire des betteraves pour chaque parcelle. Un constat général pour l'ensemble des traitements est que la surface foliaire des betteraves diminue comme observé sur la figure 26. Aucune différence n'est significativement observable entre les traitements à l'exception du traitement « Trèfle incarnat » (=1837 cm²) qui est significativement supérieur au traitement « Fenugrec » (=1280 cm²).

4.5. Relation entre le volume racinaire et la surface foliaire des betteraves

Le 11 octobre 2018, sept betteraves par traitement ont été récoltées pour analyser le système racinaire de celles-ci. Le volume racinaire a pu être déterminé sur base de l'analyse et de la modélisation de l'image des racines. Le système foliaire et le système racinaire des betteraves ont pu être mis en relation et comparés entre les différents traitements. La régression linéaire indique que la P-Valeur est de 0.01104 et donc inférieure à 0.05. Il existe

donc bien une relation entre la surface foliaire et le volume racinaire des betteraves (Figure 27). De plus, d'après les courbes de tendance effectuées pour chaque traitement, celles-ci montrent que, dans la majorité des traitements, l'augmentation de la surface foliaire des betteraves induit un volume racinaire plus élevé à l'exception du traitement « Tournesol » dont la courbe de tendance possède une pente négative et une P-Valeur égale à 0.734. Pour ce traitement, la relation entre la surface foliaire et le volume racinaire n'est donc pas significative. En outre, le R^2 est de 8.4%, ce qui veut dire que seuls 8.4% de la variabilité du volume racinaire sont expliquées par la surface foliaire. Cette relation doit donc être analysée avec prudence.

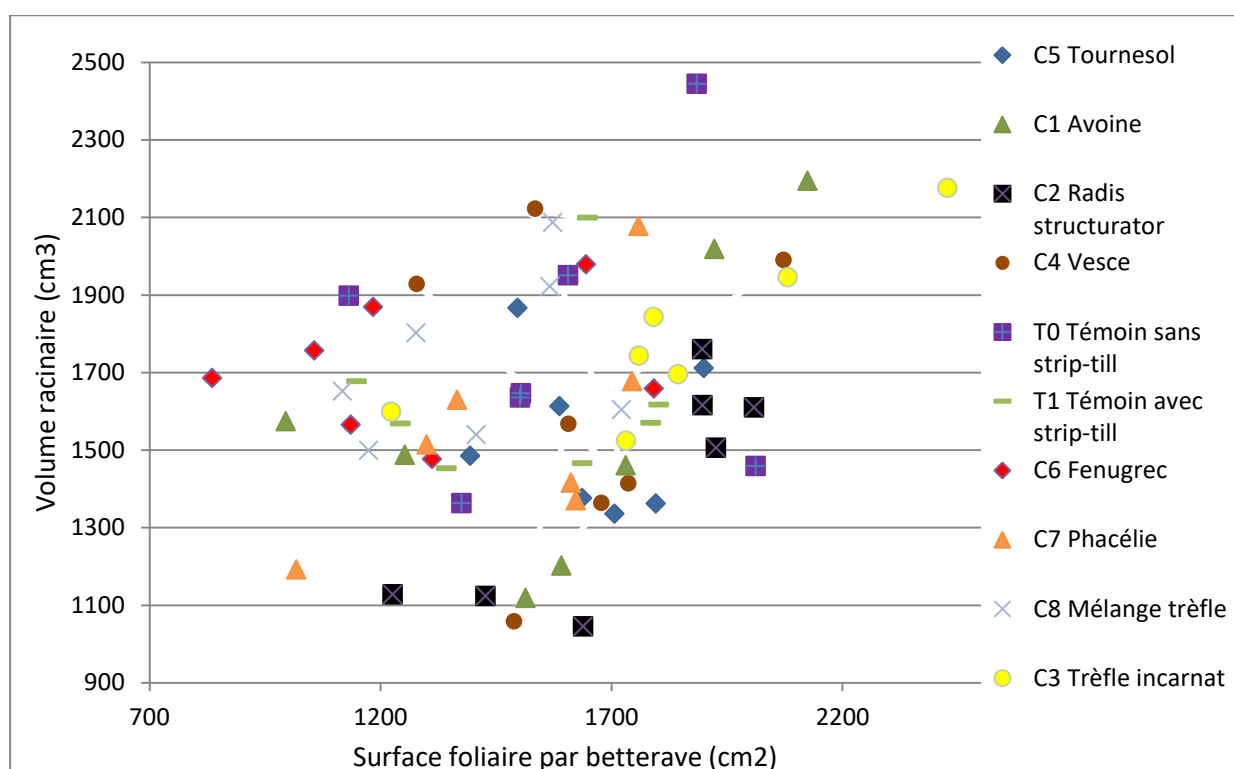


Figure 27: Relation entre le volume racinaire et la surface foliaire des betteraves en fonction du traitement à la date du 11 octobre 2018.

4.6. Analyses de récolte

L'ensemble des résultats ci-dessous provient de l'analyse des échantillons récoltés sur la parcelle lors de l'arrachage des betteraves. Quatre blocs avaient été délimités par traitement pour avoir une représentation spatiale la plus précise possible.

4.6.1. Rendement

Un modèle ANOVA 2 mixte analysant le rendement (en kg) en fonction du facteur catégoriel « Traitement » et du facteur aléatoire « Bloc » a montré que l'effet « Bloc » n'est pas significatif car le rapport de vraisemblance est égale à 2.5, ce qui est inférieur au test du Chi carré (= 3.84). La comparaison du rendement en fonction du facteur « Traitement » sur base d'un modèle ANOVA 1 a donc été réalisée pour observer si des différences de rendement sont constatées entre les traitements (Tableau 15).

Tableau 15: Moyenne des rendements de chaque traitement avec leur écart-type. Les traitements appartenant à des groupes identiques signifient que les moyennes ne sont pas significativement différentes.

Traitement	Moyenne (kg)	Ecart-type (kg)	Groupe
C1 Avoine brésilienne	60.83	8.28	A
C2 Radis structurator	62.76	5.83	A
C3 Trèfle incarnat	74	6.58	A
C4 Vesce	65.1	3.44	A
C5 Tournesol	57.92	7.48	A
C6 Fenugrec	62.68	5.3	A
C7 Phacélie	60.88	3.33	A
C8 Mélange trèfle	66.25	7.67	A
T0 Témoin sans S-T	69.7	6.68	A
T1 Témoin avec S-T	63.99	4.76	A

Bien que les différences de rendement entre les traitements semblent assez élevées, un test de Tukey a permis de mettre en évidence qu'il n'y a aucune différence significative entre les traitements en termes de rendement. De plus, la P-valeur correspondant au facteur « Traitement » est de 0.277. Ce résultat confirme bien qu'il n'y a pas d'effet « Traitement » car la P-valeur est supérieure à 0.05. Néanmoins, le tableau 15 montre que le rendement le plus élevé se trouve dans le traitement « Trèfle incarnat » (=74 kg) et le plus faible est celui du traitement « Tournesol » (=57.92 kg). Une autre observation intéressante à souligner est le fait que le traitement T0 « Témoin sans strip-till » (=69.7 kg) possède le deuxième rendement le plus élevé.

4.6.2. Tare terre

La tare terre, c'est-à-dire le poids de terre présent dans l'échantillon, a également été calculée par l'IRBAB. L'analyse statistique révèle que, comme le rendement, aucune différence significative entre traitements n'est observée puisque la P-valeur (= 0.4902) est supérieure à 0.05 (Tableau 16).

Tableau 16: Résultat de l'ANOVA 1 de la tare terre en fonction du facteur catégoriel « Traitement ». DF = degré de liberté, F Value = Valeur du test de Fisher, Pr > F = la P-Valeur associée à F.

Facteur catégoriel	DF	F Value	Pr > F
Traitement	14	0.98	0.4902

4.6.3. Rendement en sucre

Le rendement en sucre est un des facteurs les plus importants à analyser puisque lorsque l'agriculteur livre ses betteraves à la sucrerie, celui-ci est rémunéré par rapport au poids en sucre de sa livraison et non par rapport au poids total des betteraves.

L'analyse statistique du rendement en sucre des betteraves de chaque traitement a mis en évidence qu'il n'y a pas de différences significatives entre les différents traitements. La P-

Valeur est de 0.294, ce qui est supérieur à 0.05. De plus, le test de Tukey comparant les traitements deux à deux prouve également qu'il n'y a pas d'effet « Traitement ». Néanmoins, la moyenne du rendement en sucre par parcelle est la plus élevée pour le traitement « Trèfle incarnat » (=14.74 kg) et est la plus faible pour le traitement « Tournesol » (=11.50 kg). Il est également intéressant de noter que le rendement en sucre pour le traitement « Témoin sans strip-till » est la seconde valeur la plus élevée (=13.78 kg) (Tableau 17).

Tableau 17: Moyenne des rendements en sucre (en kg) de chaque traitement avec leur écart-type. Les traitements appartenant à des groupes identiques signifient que les moyennes ne sont pas significativement différentes.

Traitement	Moyenne (kg)	Ecart-type (kg)	Groupe
C1 Avoine brésilienne	11.93	1.7	A
C2 Radis structurator	12.27	1.16	A
C3 Trèfle incarnat	14.74	1.43	A
C4 Vesce	12.94	0.77	A
C5 Tournesol	11.5	1.51	A
C6 Fenugrec	12.31	0.87	A
C7 Phacélie	12.12	0.58	A
C8 Mélange trèfle	13.21	1.47	A
T0 Témoin sans S-T	13.78	1.45	A
T1 Témoin avec S-T	12.69	0.99	A

Malgré que les écarts de rendement en sucre entre traitements ne soient pas significatifs, il existe tout de même une différence de plus de 3 kg de sucre entre le traitement possédant le rendement en sucre le plus élevé (« Trèfle incarnat ») et celui possédant le plus faible rendement en sucre (« Tournesol »). Pour l'agriculteur, cette différence peut devenir importante si elle se répète sur l'ensemble de la parcelle.

Lors de la récolte, l'échantillonnage a été réalisé en délimitant 4 blocs par traitement. Concernant le rendement en sucre, le test de rapport de vraisemblance ne montre pas d'effet significatif du facteur aléatoire « Bloc » sur le rendement en sucre de chaque parcelle puisque le LRT est inférieur au test du Chi-carré (Tableau 18).

Tableau 18: Résultat du test du rapport de vraisemblance du rendement en sucre pour le facteur aléatoire « Bloc ». DF = degré de liberté, χ^2 = Test du Chi-carré et LRT = Test du rapport de vraisemblance.

Facteur aléatoire	DF	χ^2	LRT
Bloc	44	3.84	3.5

Malgré tout, après avoir consulté les résultats, une légère différence du rendement en sucre entre les différents blocs au sein d'un même traitement est constatée et se répète pour l'ensemble des traitements. Les deux blocs se trouvant aux extrémités de chaque traitement

ont en général un rendement en sucre légèrement supérieur aux deux blocs se trouvant au milieu de la parcelle. Bien que cet effet ne soit pas significatif, son côté systématique appelle à la prudence, ce qui justifie a posteriori l'usage des blocs. Cette observation devra être tenue en compte au cas où des essais seraient répétés à l'avenir sur cette parcelle.

4.6.4. Teneur en éléments mélassigènes

4.6.4.1. Teneur en potassium

D'après le modèle ANOVA 2 mixte de la teneur en potassium en fonction des facteurs « Traitement » et « Bloc », les différences de teneur entre les traitements ne sont pas significatifs, la P-Valeur (= 0.3302) étant supérieure à 0.05.

Mais, à l'inverse du rendement brut et du rendement en sucre, l'effet « Bloc » est significatif. Le test du rapport de vraisemblance est de 33.8 et est donc supérieur à la valeur théorique du test de Chi-carré qui est de 3.84 (Tableau 19).

Tableau 19: Résultat de l'ANOVA 2 mixte de la teneur en potassium en fonction du facteur catégoriel « Traitement » et du facteur aléatoire « Bloc ». DF = degré de liberté, F Value = Valeur du test de Fisher, Pr > F = la P-Valeur associée à F, χ^2 = Test du Chi-carré et LRT = Test du rapport de vraisemblance.

Facteur catégoriel	DF	F Value	Pr > F
Traitement	14	1.17	0.3302
Facteur aléatoire	DF	χ^2	LRT
Bloc	44	3.84	33.8

En analysant les données du taux de potassium en mmol/100g de betterave pour chaque traitement, celle-ci montre que le bloc 1, le plus proche de la route (Cfr Figure 20 : Plan expérimental au point 3.3.2.2. de la partie « Matériels et méthodes »), possède la teneur en potassium la plus élevée dans la plupart des traitements, alors que le bloc 4, situé au bout de chaque traitement, possède généralement la teneur en potassium la plus faible. Les blocs 2 et 3 ont des valeurs situées entre ces deux extrêmes, ce qui peut être constaté par l'écart-type de chaque traitement se trouvant sur la figure 28 qui est fort variable d'un traitement à un autre et peuvent être importants notamment pour le traitement « Avoine brésilienne », « Vesce », « Témoin avec strip-till » ou encore « Mélange trèfle ». Il existe donc une certaine hétérogénéité au sein de la parcelle concernant ce paramètre.

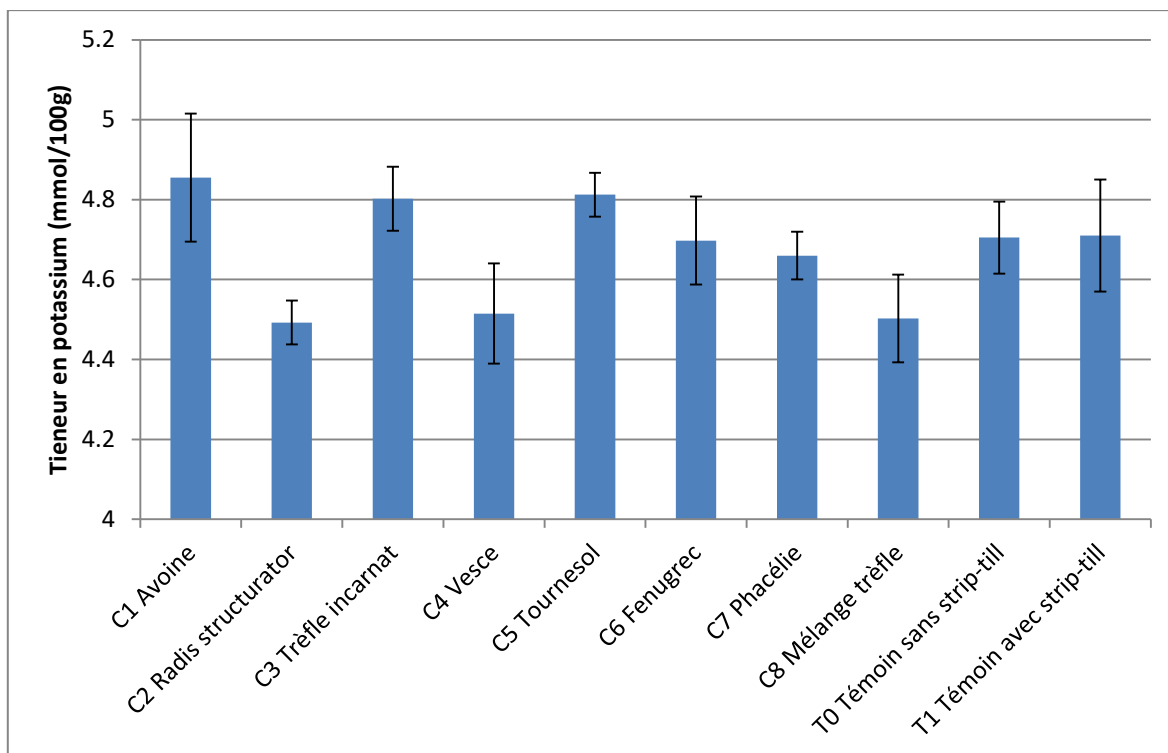


Figure 28: Teneur en potassium des betteraves en fonction du facteur catégoriel « Traitement ».

4.6.4.2. Teneur en sodium

Comme pour la teneur en potassium, aucun effet « Traitement » n'est observable ($P\text{-Valeur} = 0.3432 > 0.05$). Le traitement « Avoine brésilienne » a, cependant, la moyenne des valeurs la plus élevée avec 0.2375 mmol/100g de betterave, à l'inverse du traitement « Mélange trèfle » dont la moyenne est la plus faible (0.205 mmol/100g). De plus, le témoin sans strip-till possède la seconde valeur la plus élevée après le traitement « Avoine brésilienne ». (Figure 29).

Au contraire de l'effet « Traitement » qui n'est pas significatif pour cette mesure, l'effet « Bloc » est présent, comme pour la teneur en potassium. Le test du rapport de vraisemblance révèle une valeur de 10.62 qui est bien supérieure à la limite théorique du test de Chi-carré (3.84). Pour la plupart des traitements, les échantillons des deux blocs situés aux extrémités des bandes d'essai possèdent des teneurs en sodium plus faibles en comparaison avec les blocs centraux qui ont des valeurs relativement identiques. Le bloc 4 est généralement celui dont les teneurs en sodium contenu dans les betteraves sont les plus basses (Cfr Figure 20 : Plan expérimental au point 3.3.2.2. de la partie « Matériels et méthodes »). Comme expliqué au point précédent, l'écart-type de certains traitements est relativement important. Cet écart est la conséquence d'une relative hétérogénéité au sein même de chaque traitement (Figure 29).

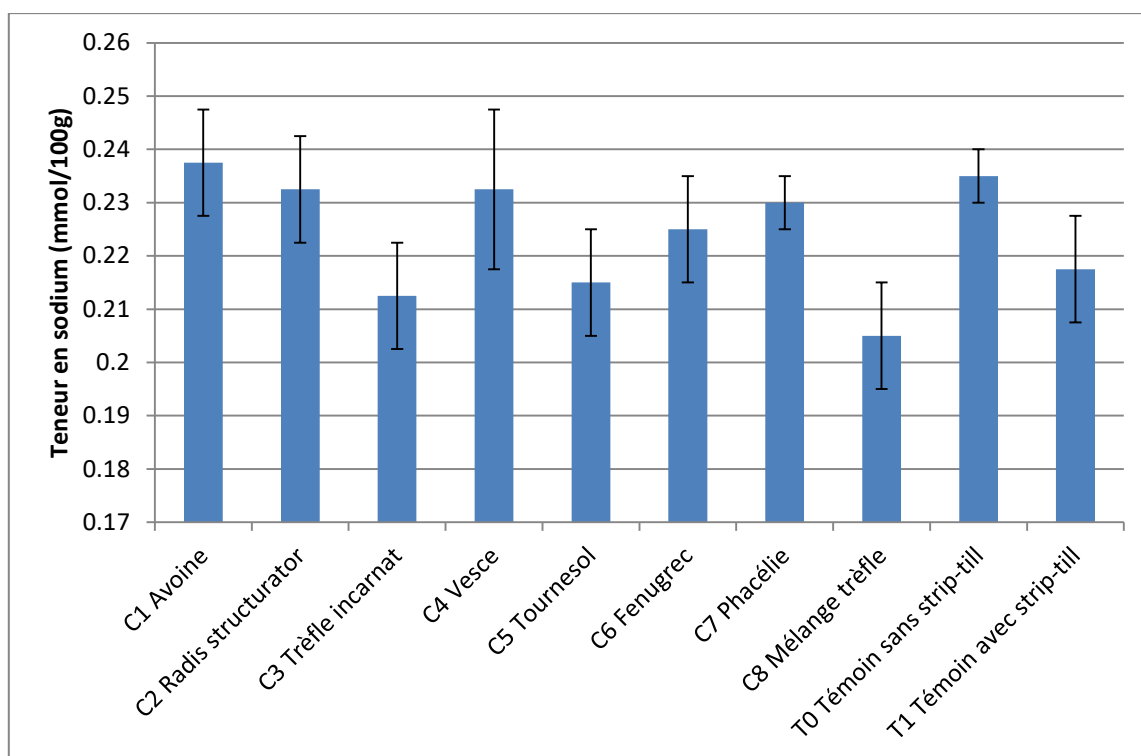


Figure 29: Teneur en sodium en fonction du facteur catégoriel « Traitement ».

4.6.4.3. Teneur en azote α -aminé

La teneur en azote α -aminé présente les mêmes caractéristiques que pour la teneur des deux éléments mélassigènes précédents, c'est-à-dire qu'aucun effet du facteur catégoriel « Traitement » n'est observable (P -Valeur = 0.9937 > 0.05). Par contre, l'effet aléatoire « Bloc » est significatif car le LRT de 8.79 est supérieur aux 3.84 du test théorique du Chi-carré (Tableau 20). En analysant les résultats, les valeurs en azote α -aminé sont les plus faibles dans le bloc d'échantillonnage 4 pour chaque traitement.

Tableau 20: Résultat de l'ANOVA 2 mixte de la teneur en azote en fonction du facteur catégoriel « Traitement » et du facteur aléatoire « Bloc ». DF = degré de liberté, F Value = Valeur du test de Fisher, $Pr > F$ = la P -Valeur associée à F , χ^2 = Test du Chi-carré et LRT = Test du rapport de vraisemblance.

Facteur catégoriel	DF	F Value	Pr > F
Traitement	14	0.28	0.9937
Facteur aléatoire	DF	χ^2	LRT
Bloc	44	3.84	8.79

Comme expliqué dans la partie « Matériels et méthodes » au point 3.3.2.2.4., la teneur en azote α -aminé influence négativement le pourcentage de sucre présent dans les racines de betteraves. Cet aspect sera traité plus en profondeur dans la partie « Discussion ». Néanmoins, une comparaison entre le rendement en sucre et la teneur en azote α -aminé peut être intéressante à observer car d'après la littérature, une relation inversement linéaire existe entre les deux paramètres. La figure 30 montre que lorsque le pourcentage en sucre

par traitement est élevé, la teneur en azote α -aminé diminue. Inversement, lorsque la teneur en azote α -aminé est élevée, le taux de sucre diminue. Néanmoins, la P-Valeur de la régression linéaire est égale à 0.076 et donc supérieure à 0.05. Dans cet essai, la relation inversement linéaire entre la teneur en azote α -aminé et le rendement en sucre n'est donc pas significative.

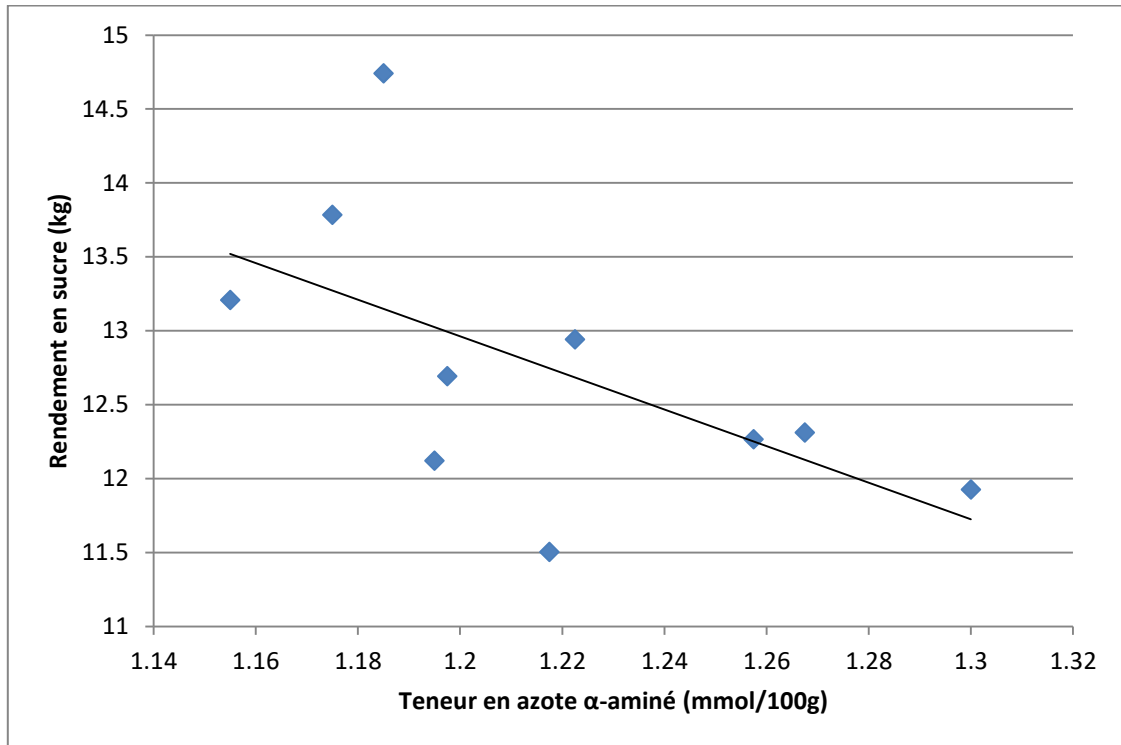


Figure 30: Relation entre le rendement en sucre et la teneur en azote α -aminé en fonction du traitement.

5. Discussion

La partie « Discussion » permet d’analyser les données statistiques se trouvant dans la partie 4 « Résultats ». Cette analyse a pour but de comparer les résultats significatifs obtenus dans les différents traitements. Ceux-ci seront mis en lien avec l’effet du strip-till végétal sur les propriétés physico-chimiques du sol étudié précédemment par Rodolphe Soumoy (2018).

5.1. Taux de germination

D’après des études réalisées précédemment, le strip-till effectué dans de bonnes conditions permet la préparation d’un bon lit de semences en créant suffisamment de terres fines pour permettre un bon contact entre le sol et la graine. Il favorise également un réchauffement plus rapide du sol au printemps en réduisant l’humidité contenue dans le lit de semences. Néanmoins, la température du sol augmente plus lentement qu’un sol labouré (Labreuche, 2012). Cependant, dans cet essai, un passage à la herse rotative a été réalisé avant le semis. Les caractéristiques mises en avant pour le strip-till, ainsi que pour l’effet des résidus de chaque couvert végétal seront donc difficilement observables au stade de la germination. Si un effet du strip-till végétal sur les betteraves existe, celui-ci sera visible plus tard dans la saison lorsque le système racinaire des betteraves sera plus développé.

L’analyse de sol réalisée durant l’été précédant le semis de la betterave a révélé que l’ensemble de la parcelle d’essai possède une granulométrie de type limon sableux et un sol assez stable. De plus, la parcelle est homogène au niveau de ses caractéristiques physico-chimiques (Soumoy, 2018).

Juste avant le semis de la betterave, un passage à l’aide d’une herse rotative a été effectué pour émietter le sol et favoriser un bon contact entre la terre et la semence. Après analyse, le taux de germination n’est pas significativement différent entre les traitements. Le pourcentage de germination dépend principalement de la qualité des semences, de la bonne préparation du lit de semences et aussi des conditions météorologiques après le semis. Des températures froides peuvent ralentir la levée des betteraves, mais ne causent pas la perte de la semence (IRBAB, 2019). Or, lors du semis de cet essai, le taux de germination des betteraves de chaque traitement n’étaient pas significativement différents entre eux, ce qui indique que les conditions superficiels du sol et les conditions environnementales étaient les mêmes pour l’ensemble des traitements.

Un autre élément capable de modifier le taux de germination des betteraves est la quantité de résidus de culture présents sur la surface de la parcelle. Ces résidus peuvent modifier la profondeur de semis et donc altérer la levée (Jones et al., 2006). Cependant, dans notre cas, le passage de la herse rotative avant le semis a permis d’enfouir une partie des résidus dans le sol et donc de limiter l’impact de ceux-ci sur la levée des betteraves. Aucune différence significative n’est observable entre les traitements. De plus, le pourcentage moyen de germination pour chaque traitement est très élevé (entre 85 et 90%). Il est donc très difficile d’améliorer ce taux de germination par l’utilisation de techniques innovantes.

5.2. Recouvrement foliaire

Concernant le recouvrement foliaire de l'interligne et de la ligne, deux analyses ont été effectuées, mais seule la première (le 7 juin 2018) sera traitée car le recouvrement foliaire lors de la seconde analyse était à son maximum.

D'après les résultats de pénétrométrie obtenus au printemps 2018 par R. Soumoy, le strip-till a permis d'augmenter la pénétration dans la future ligne de semis de 7 cm en plus par rapport à l'interligne qui n'a pas été décompactée. Ce constat est donc favorable à une meilleure croissance des betteraves durant les premiers mois. L'hypothèse peut être confirmée par le fait que le traitement sans strip-till (T0) possède le pourcentage de recouvrement foliaire le plus faible (54%) comparativement aux autres traitements et est significativement inférieur aux traitements « Avoine brésilienne » (71%), « Radis structurator » (73%) et « Mélange trèfle » (70%). Les autres traitements se situent entre ces deux extrêmes.

Le recouvrement foliaire plus élevé des betteraves pour le traitement « Avoine brésilienne », directement corrélé avec la vitesse de croissance des feuilles de betterave, ne peut pas être expliqué par la quantité de biomasse produite par ce traitement car l'étude antérieure de la quantité de biomasse produite par les couverts de chaque traitement a révélé que le traitement « Avoine brésilienne » possédait la biomasse la plus faible (3.09 T de MS/ha), avec le traitement « Radis structurator » (2.97 T de MS/ha) (Soumoy, 2018). Une explication peut venir du fait que l'avoine brésilienne possède un système racinaire fasciculé puissant permettant une bonne structuration du sol dans les premiers centimètres, idéal pour une croissance rapide de la betterave durant les premières semaines de culture. Ce système racinaire peut atteindre jusqu'à plus de 150 cm de profondeur (Hayes et al., 2005). De plus, cette culture de couvert a la capacité d'être un bon piège à azote, ce qui permet de le rendre disponible pour la culture suivante lors de sa décomposition (Chambre d'agriculture Meuse, 2007).

Pour le radis structurator, sa particularité se trouve également dans son système racinaire. Celui-ci possède un système racinaire pivotant comparable à celui de la betterave, mais de taille moins élevée. Cette particularité lui permet de structurer et de préparer le sol en profondeur pour permettre un bon développement de la betterave qui le suit.

Enfin, le dernier traitement qui a permis une croissance foliaire rapide de la betterave est le traitement « Mélange trèfle ». Une explication logique se trouve dans le fait que le trèfle est une légumineuse et a donc un rôle de fixation de l'azote atmosphérique grâce aux Rhizobium présents dans les nodules se trouvant sur les racines du trèfle. Lors de la décomposition de ces différentes variétés de trèfle, une partie de l'azote fixé sera libérée dans le sol et pourra être utilisée par la betterave durant sa croissance. Cependant, cette explication doit être prise avec précaution car si le sol est naturellement riche en azote, les nodules présents sur les racines du trèfle sont inactifs et ne captent donc pas l'azote atmosphérique. Aussi, si cette explication était certaine, les traitements « Vesce » et « Trèfle

incarnat » possèderaient également un recouvrement foliaire des betteraves plus important que la moyenne car ces deux couverts végétaux sont aussi des légumineuses.

5.3. Evolution du nombre de feuilles par betterave

Trois périodes d'analyse ont permis de suivre l'évolution du nombre de feuilles par betterave durant l'ensemble de la saison. Logiquement, le nombre de feuilles par betterave ne cesse d'augmenter durant la saison. Néanmoins, nous pouvons remarquer sur la figure 25 que le nombre de feuilles entre les relevés du 27 juin et du 29 juillet 2018 a très peu augmenté. Ce constat peut être expliqué par le fait que les mois de juin et juillet 2018 ont été caractérisés par des températures anormalement élevées et par des précipitations très peu fréquentes. Les tableaux 21 et 22 montrent les relevés météorologiques des mois de juin et juillet 2018 en comparaison avec les températures et précipitations normales de saison. La différence la plus marquée est celle du mois de juin 2018. Les précipitations relevées (15.8 L/m²) étaient approximativement cinq fois plus faibles que la normale de saison (71.8 L/m²).

Tableau 21: Moyenne des relevés météorologiques du mois de juin 2018 à Uccle (MétéoBelgique, 2019).

	Température en °C	Précipitations en litres / m ² (jours)	Insolation en heures
Valeurs	18.1	15.8 (4)	190.0
Normales 1981-2010*	16.2	71.8 (15.0)	187.7
Ecart	1.9	-56 (-11)	2.3

Tableau 22: Moyenne des relevés météorologiques du mois de juillet 2018 à Uccle (MétéoBelgique, 2019).

	Température en °C	Précipitations en litres / m ² (jours)	Insolation en heures
Valeurs	22.0	49.7 (5)	298.2
Normales 1981-2010*	18.4	73.5 (14.3)	200.7
Ecart	3.6	-23.8 (-9.3)	97.5

Ce climat anormalement chaud et sec a pu avoir un impact sur le développement et la croissance des betteraves. Celles-ci sont capables de mettre en place une résistance contre le stress hydrique. Cette résistance est le phénomène d'évitement à la sécheresse par lequel

les feuilles de betterave perdent leur turgescence, flétrissent pour limiter l'exposition aux rayonnements du soleil et se réhydratent pendant la nuit. Le pivot racinaire pouvant atteindre 1 m de profondeur à la période mi-juin et mi-juillet leur permet également de résister à la sécheresse (Bertin, 2016). Ces mécanismes de résistance mis en place par la betterave limitent donc son développement, ce qui pourrait être une conséquence de la faible augmentation du nombre de feuilles durant les mois de juin et juillet 2018. Cependant, l'impact de l'environnement (humidité, température, luminosité, saison,...) influence davantage le taux de croissance foliaire par rapport au rythme d'apparition des feuilles (Bertin, 2016).

A la date du 27 juin 2018, aucune différence significative n'est observée entre les traitements. De même pour la date du 29 juillet 2018, l'ensemble des traitements possède un nombre de feuilles non significativement différent à l'exception du traitement « Témoin avec strip-till » dont son nombre de feuilles par betterave est supérieur aux autres traitements. Le traitement « Mélange trèfle » possède le nombre de feuilles le plus faible. Le résultat concernant le traitement « Mélange trèfle » est surprenant et difficilement explicable car ce traitement possédait un pourcentage de recouvrement foliaire parmi les plus élevés au début du mois de juin.

A la date du 3 septembre 2018, le traitement « Avoine brésilienne » est seulement significativement supérieur au traitement « Mélange trèfle », ce qui est logique vu les résultats du 29 juillet 2018, date à laquelle le traitement « Avoine brésilienne » possédait le second nombre de feuilles le plus élevé et le traitement « Mélange trèfle » possédait le nombre de feuilles le plus faible.

5.4. Evolution de la surface foliaire

La surface foliaire des betteraves a été évaluée à quatre dates précises réparties sur l'ensemble de la saison de culture. Les résultats montrent que la surface foliaire ne cesse de décroître depuis le premier échantillonnage jusqu'au dernier. Ceci peut être expliqué par le fait que la surface foliaire des betteraves atteint son maximum à la mi-juillet pour capter les rayons lumineux incidents qui sont les plus élevés à la fin du mois de juin (Figure 31) (Bertin, 2016).

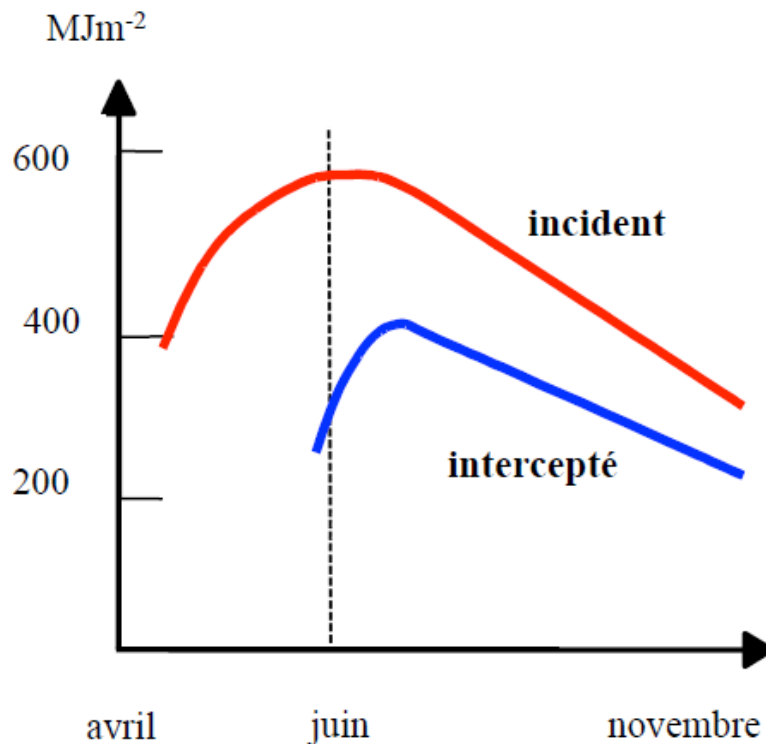


Figure 31: Quantité de rayonnement intercepté en fonction de la quantité de rayonnement incident et du mois de l'année (Bertin, 2016).

La surface maximale des feuilles de même rang varie en fonction de la température et de l'azote disponible dans le sol. La température sur l'ensemble de la parcelle d'essai est homogène. La variation de la surface foliaire totale par betterave entre les différents traitements échantillonnés à une date précise peut donc être expliquée par :

- Le nombre de feuilles par betterave entre les traitements.
- La quantité d'azote disponible dans le sol par traitement.

Sur l'ensemble de la saison, le traitement « Mélange trèfles » possède la surface foliaire totale la plus élevée, mais est non-significativement différente des autres traitements à l'exception du témoin sans strip-till. L'azote présent dans le sol jouant un rôle essentiel dans la croissance foliaire des betteraves, il est logique de constater que ce traitement possède la moyenne de surface foliaire la plus élevée puisque le trèfle est une légumineuse capable de fixer l'azote atmosphérique dans le sol et de le restituer à la culture suivante. De plus, l'analyse de pénétrométrie du sol réalisée juste après le semis a mis en évidence une moindre compaction du sol dans le rang de betterave pour le traitement « Mélange trèfle », ce qui permet un meilleur développement racinaire (Soumoy, 2018).

En outre, le traitement possédant la surface foliaire par betterave la moins élevée est le témoin sans strip-till. La non-décompaction du sol par le strip-tiller pour ce traitement a pu induire une croissance plus difficile des betteraves. Néanmoins, une analyse du sol effectuée en mars 2018 a révélé que le témoin sans strip-till possédait la quantité de matière organique la plus élevée dans le sol (2.79%) (Soumoy, 2018). Cette matière organique a la

capacité d'apporter de l'azote disponible pour la plante à partir d'ions ammonium transformés en nitrite, puis en nitrate, respectivement par les bactéries *Nitrosomonas* et *Nitrobacter* dans le sol (Legrand et Vanstallen, 2000). A première vue, cette quantité plus importante de matière organique n'a pas eu d'impact sur le développement de la betterave. Mais, ce point sera analysé plus en détail lors du traitement des résultats du système racinaire. Les traitements restants ne se démarquent pas l'un de l'autre concernant l'étude de la surface foliaire des betteraves.

Enfin, la dernière mesure réalisée en fin de saison montre que le traitement « Trèfle incarnat » possède la surface foliaire la plus grande en moyenne à la date du 11 octobre 2018. Outre le fait que le trèfle incarnat est une légumineuse capable de fixer l'azote atmosphérique et de le restituer dans le sol, le développement plus important du système foliaire en fin de saison peut être expliqué par le fait que le trèfle incarnat possède un système racinaire pivotant peu actif du semis jusqu'à l'hiver, mais qui se développe de façon importante au début du printemps en colonisant très fortement les 15 premiers centimètres du sol. Ses racines ont la capacité de descendre jusqu'à 40 à 60 cm en profondeur et possèdent un rôle essentiel de structuration du sol (Salitot, 2014). Le retour d'une importante croissance de son système racinaire à la sortie de l'hiver pourrait donc être favorable à la bonne implantation de la culture suivante. Cette hypothèse peut être confirmée par le rendement en racines de betterave de ce traitement qui est le plus élevé de l'essai malgré que celui-ci soit non-significativement différent des autres traitements.

5.5. Relation entre le volume racinaire et la surface foliaire des betteraves

Cette relation montre qu'en général, une surface foliaire plus élevée induit un volume racinaire également plus élevé, ce qui semble logique. La figure 32 montre bien cette corrélation entre la radiation interceptée et le rendement en racine et en sucre par hectare. Si la surface foliaire est plus importante, l'interception de la lumière augmente et donc, le rendement également.

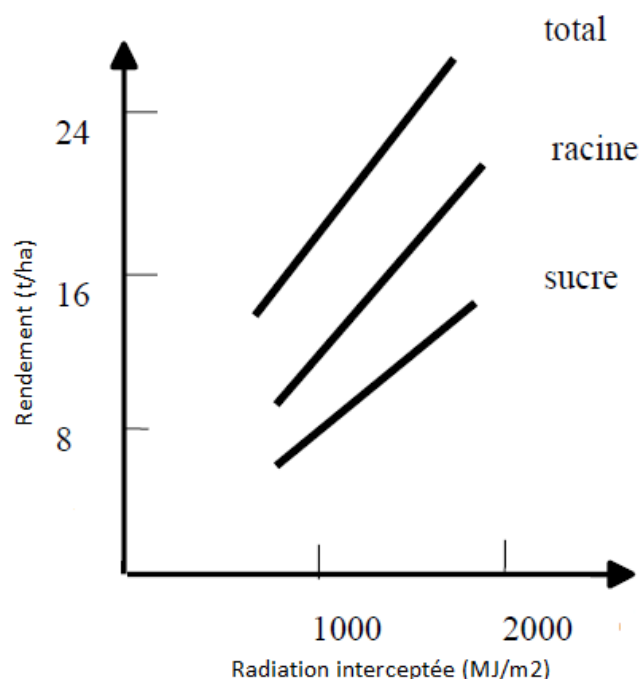


Figure 32: Relation entre la radiation interceptée par le système foliaire et le rendement total, en racine et en sucre (Bertin, 2016).

Dans le cadre de cette essai, un graphique similaire a été réalisé (Figure 27) pour étudier cette relation entre la surface foliaire et le volume racinaire des betteraves. Cette figure (27) montre également la relation linéaire entre les deux paramètres pour chaque traitement. Néanmoins, vu la faible part de variabilité ($R^2 = 8.4\%$) expliquée par le modèle, cette étude ne permet pas de tirer une conclusion fiable concernant la relation entre la surface foliaire et le volume racinaire des betteraves. Les nombreux paramètres externes qui interviennent dans un essai en champ (conditions pédologiques, climatiques...) sont probablement à la base de cette difficulté à mettre en évidence cette relation.

5.6. Analyses de récolte

5.6.1. Rendement

D'après l'analyse statistique réalisée sur le rendement de chaque traitement, il en ressort qu'aucun traitement n'est significativement différent l'un de l'autre. Néanmoins, malgré que ces différences soient non significatives, il existe tout de même une différence de 16 kg entre le traitement possédant le rendement le plus élevé (Traitement « Trèfle incarnat » = 74 kg) et le traitement possédant le rendement le plus faible (Traitement « Tournesol » = 58 kg), soit plus de 23T/ha puisque la surface d'échantillonnage est de 6.75 m^2 .

Comme expliqué au point 5.4., les betteraves du traitement « Trèfle incarnat » possédaient une surface foliaire plus importante en fin de saison, ce qui pourrait avoir eu comme effet un

stockage plus important des sucres synthétisés par le système foliaire et donc un rendement légèrement plus élevé par rapport aux autres traitements.

Concernant le traitement « Tournesol », cette plante possède un système racinaire pivotant puissant capable de descendre en profondeur dans le sol. En général, 90% de la densité racinaire du tournesol se retrouvent dans les 40 premiers centimètres du sol. C'est également une plante peu exigeante en terme de besoin en eau et capable de produire une importante quantité de matière organique (Angadi et al., 2002). Malgré ces avantages théoriques pour la culture suivante, les observations effectuées lors de la période d'interculture ont montré que ce traitement possédait le nombre d'espèces et la couverture foliaire la plus faible de l'essai. Concernant la production de biomasse et de matière organique dans le sol, le traitement « Tournesol » se trouve dans la moyenne des résultats. Il possède aussi la décompaction du sol la plus faible avec le traitement « Avoine brésilienne » (Soumoy, 2018). L'ensemble de ces observations pourrait expliquer la raison de ce faible rendement en betteraves pour le traitement « Tournesol ».

Une dernière observation importante à noter est le fait que le témoin sans strip-till possède le second meilleur rendement. A première vue, cette observation peut sembler étrange car dans la ligne de semis, le sol n'a pas été décompacté et n'a pas été semé par un couvert spécifique. Mais, plusieurs raisons peuvent expliquer ce rendement assez élevé. Premièrement, lors de l'analyse de sol réalisée juste avant le semis de la betterave, le taux de matière organique dans le sol était le plus élevé de l'essai (2.79%). Comme expliqué dans la première partie de ce travail, la matière organique contenue dans le sol est importante pour la fertilité du sol. Elle sert également d'alimentation pour les microorganismes du sol et permet aussi une importante rétention de l'eau dans le sol (Biederbeck et al., 1980 ; Wander, 2004). De plus, un sol travaillé augmente l'évaporation de l'eau contenue dans ce sol par l'aération de celui-ci (Unger et Cassel, 1991). Les traitements strip-tillés pourraient donc posséder un taux d'humidité légèrement inférieur à celui du témoin non strip-tillé. Ce facteur pourrait être d'une grande importance en raison de l'été 2018 particulièrement sec (Tableau 21 et 22). Par ailleurs, la parcelle utilisée pour cet essai possède un sol sablo-limoneux travaillé sans labour depuis près de 10 ans. Une analyse des différents horizons du sol a permis de mettre en évidence que la semelle de labour y est presque inexistante (Soumoy, 2018). L'impact négatif de cette semelle sur le traitement « Témoin sans strip-till » par rapport aux autres traitements est donc limité.

5.6.2. Tare terre

La tare terre peut être influencée par les conditions météorologiques lors de la récolte. Un sol humide favorise l'adhérence de la terre autour des racines de betteraves. Néanmoins, lors de cet essai, les conditions météorologiques étaient clémentes et le sol était bien ressuyé.

Un autre facteur influençant la tare terre de la culture de la betterave est la granulométrie du sol de la parcelle cultivée. Un sol possédant un taux en argile supérieur à 20 % est propice

à l'augmentation de la tare terre car cette terre est plus collante qu'une terre limoneuse ou sableuse (Richard-Molard et Misonne, 2007). Dans cet essai, la parcelle est sablo-limoneuse et possède un taux d'argile inférieur à 13% dans les 30 premiers centimètres du sol (Soumoy, 2018). Ce facteur n'est donc pas le plus important pour expliquer la part de terre présente dans la récolte concernant cet essai.

Enfin, comme expliqué au point 1.2.5., la structure du sol joue un rôle important sur le développement de la betterave. Si le sol possède une mauvaise structure et ne permet pas un développement optimal du pivot des betteraves, celles-ci auront tendance à développer un grand nombre de ramifications secondaires de taille assez importante que pour emprisonner la terre entre ses racines lors de l'arrachage avec, comme conséquence, une augmentation de la proportion de terre récoltée (Richard-Molard et Misonne, 2007).

Dans cette expérience, aucun facteur préalablement cité ne semble différent d'un traitement à l'autre car l'analyse statistique révèle que l'effet « Traitement » n'est pas significatif.

5.6.3. Rendement en sucre

Comme expliqué au point 5.5., il existe une relation linéaire entre le rendement en racine, le rendement en sucre et l'interception de la lumière par la betterave (Figure 32). Il est donc logique d'observer les mêmes résultats entre le rendement brut (point 5.6.1.) et le rendement en sucre car une racine de betterave possédant un poids brut élevé aura également un poids en sucre élevé et inversement. Ces résultats montrent donc qu'il n'existe pas de différences significatives entre les traitements. Néanmoins, il est intéressant de noter que le traitement « Trèfle incarnat » possède le rendement en sucre le plus élevé (14.7 kg) alors que le traitement « Tournesol » possède le rendement en sucre le plus faible (11.5 kg). Cette différence de 3 kg reportée à l'échelle de l'hectare, c'est-à-dire plus de 4.4 tonnes de sucre, s'avère conséquente sur le rendement en sucre.

L'azote joue un rôle très important dans l'accumulation du sucre dans la racine. Un manque d'azote disponible pour la betterave durant la saison limitera la production de biomasse foliaire de celle-ci et limitera donc également la production et le stockage du sucre dans la racine. A l'inverse, une surfertilisation en azote permettra à la betterave de produire des feuilles en excès au détriment de l'accumulation du sucre dans la racine. Ce phénomène est surtout préjudiciable en fin de saison (Legrand et al., 2015). Pour cet essai, la fertilisation azotée était épandue en même quantité sur l'ensemble de la parcelle. Les légumineuses fixatrices de l'azote atmosphérique implantées dans certains traitements avant la betterave ont pu apporter potentiellement une quantité d'azote plus importante que les autres traitements dans le sol. Mais, les résultats ne montrent pas de différences significatives entre les traitements.

5.6.4. Teneur en éléments mélassigènes

Les éléments mélassigènes, c'est-à-dire le potassium, le sodium et l'azote α -aminé, sont un indicateur de la capacité d'extraction du sucre présent dans la racine de betterave. Plus ces éléments sont présents en grande quantité dans la racine, moins le sucre est extractible (Misonne, 2010).

Dans cet essai, il n'existe aucune différence significative entre les traitements concernant la teneur en éléments mélassigènes. Néanmoins, une comparaison entre le rendement en sucre et la teneur en azote α -aminé a permis de mettre en évidence qu'une quantité importante d'azote α -aminé dans la racine réduit l'extraction du sucre (Figure 30). Les traitements « Avoine », « Radis structurator » et « Fenugrec » sont ceux qui possèdent les teneurs en azote α -aminé les plus élevées et par conséquent les rendements en sucre les plus faibles malgré que ces différences ne soient pas significatives par rapport aux autres traitements. Ces légères différences entre les différents traitements sont difficilement explicables.

5.7. Critique de l'étude

5.7.1. Mise en place de l'essai

La mise en place d'un plan expérimental en blocs aléatoires complets qui a pour but de limiter certaines erreurs expérimentales connues comme l'hétérogénéité au sein de la parcelle en orientant les blocs dans le sens du gradient d'hétérogénéité de la parcelle et en répartissant aléatoirement tous les traitements dans chaque bloc n'a pas pu être réalisée pour cette expérience au vu du matériel agricole disponible qui était incompatible avec l'installation de blocs de petite dimension. Néanmoins, pour certaines analyses effectuées sur les betteraves, des blocs ont pu être définis pour pouvoir prendre en compte l'hétérogénéité de la parcelle. L'idéal aurait été de réaliser des blocs pour chaque analyse.

Un second point concernant la mise en place de l'essai est le fait qu'il est inutile de placer une bande témoin entre chaque traitement. Une bande témoin placée d'un seul côté de chaque traitement aurait été tout aussi efficace car lors de la récolte des betteraves pour l'analyse dans le laboratoire de l'IRBAB, seuls 60 caisses étaient disponibles en raison du coût élevé du transport et de l'analyse. Etant donné que quatre répétitions étaient effectuées pour chaque traitement, 15 traitements ont pu être récoltés et cinq bandes témoins ont dû être mises de côté.

De plus, dans l'idéal, chaque traitement doit être composé de 6 ou 12 rangs et non pas 5 et 10 rangs car le matériel utilisé lors de la récolte des betteraves est une arracheuse à 6 rangs. De nombreuses manœuvres ont donc dû être effectuées par l'agriculteur pour récolter la parcelle sans mélanger les différentes bandes de traitement. Néanmoins, les rangs à

l'extrémité de chaque traitement n'ont pas pu être séparés pour éviter l'effet de bord en raison des contraintes de récolte.

Aussi, cet essai a été réalisé sur une parcelle conduite en non-labour depuis une dizaine d'années et possédant un taux de matière organique en moyenne supérieur à 2.5 % alors que la moyenne du taux de matière organique dans le sol en région sablo-limoneuse est de 1.14 % entre 2004 et 2014 (Chartin et al., 2015). Cette parcelle est donc d'une grande qualité et ne reflète pas la réalité des sols agricoles wallons. Il peut donc être logique que cet essai n'ait permis de fournir aucune conclusion significative entre les traitements. Dans le futur, ce type d'essai étudiant la décompaction du sol couplée au semis d'un couvert végétal devrait être réalisé sur une parcelle correspondant à la réalité des sols agricoles wallons ou sur un sol présentant des problèmes importants de compaction.

Enfin, d'après la littérature, les essais étudiant l'effet du travail du sol ou de l'implantation d'un couvert végétal sont répétés et analysés sur plusieurs années car les propriétés physico-chimiques du sol évoluent très lentement et les effets sur le rendement sont peu observables à court terme.

5.7.2. Analyses complémentaires

Toutes les mesures effectuées sur les betteraves durant l'ensemble de la saison ont permis de tirer quelques renseignements. Néanmoins, d'autres analyses auraient également pu être réalisées. Lors de l'analyse racinaire réalisée en octobre 2018, un certain nombre de racines aurait pu être récolté par traitement et trié suivant la morphologie du système racinaire de chaque betterave prélevée. Trois catégories auraient permis de classer les racines en fonction de leurs ramifications, témoins de l'état de compaction du sol (Tableau 3).

Une seconde analyse qui aurait pu apporter un complément d'information à l'étude est l'échantillonnage et l'analyse du sol de chaque traitement après la récolte des betteraves pour identifier les potentielles différences dans les teneurs en minéraux du sol dont certains ont été quantifiés dans les échantillons de racines (Azote, potassium, sodium).

Cependant, les analyses les plus importantes pour étudier l'effet du strip-till végétal sur les betteraves ont été réalisées dans ce travail.

Conclusion et perspectives

Depuis de nombreuses années, notre système agricole est remis en cause du fait de son implication dans les problèmes environnementaux rencontrés par l'intensification de l'agriculture, l'utilisation d'engrais de synthèse et de produits phytopharmaceutiques ou encore le travail excessif du sol.

De nombreuses recherches ont donc été réalisées pour améliorer notre système agricole et le sont encore aujourd'hui. L'une d'entre elles est l'étude des effets du strip-till végétal sur les propriétés physico-chimiques du sol d'une part et sur la culture suivante d'autre part.

Ce strip-till végétal est une technique mise en place en travaillant exclusivement la ligne de semis de la culture suivante et en implantant dans cette ligne un couvert végétal spécifique l'année précédant l'implantation de la culture principale.

Un essai a donc été installé sur une parcelle agricole à Vieusart (Brabant wallon). Après avoir semé un mélange de 5 espèces de couvert végétal sur l'ensemble de la surface de la parcelle, dix traitements ont été délimités. Huit espèces particulières de couvert végétal ont été semées, chacune dans une parcelle distincte, dans la future ligne de semis de betterave directement après avoir travaillé la ligne en profondeur à l'aide du strip-tiller. Deux traitements supplémentaires ont constitué les témoins, l'un ayant été uniquement strip-tillé et l'autre n'ayant pas subi de strip-till végétal.

Une première étude a été consacrée aux effets du strip-till végétal sur le développement des couverts et sur les propriétés physico-chimiques du sol. Au cours du présent travail, une culture betteravière a été implantée sur la même parcelle pour étudier les effets du strip-till végétal sur la culture. Différentes analyses ont ensuite pu être réalisées.

Concernant le taux de germination des betteraves, aucune différence significative n'a pu être observée entre les différents traitements.

Ensuite, le recouvrement foliaire des betteraves a été mesuré. Cette fois-ci, certaines différences sont apparues puisque les traitements « Avoine brésilienne », « Radis structurateur » et « Mélange trèfle » possédaient un recouvrement foliaire supérieur aux autres traitements au début du mois de juin 2018 alors que le traitement sans strip-till possédait le recouvrement foliaire le plus faible. Cependant, à la fin du mois de juin, l'ensemble des traitements possédait un recouvrement foliaire presque maximal.

Concernant l'étude du nombre de feuilles de betterave de plus de 3 cm de longueur comptabilisées durant la saison, ce nombre augmente très peu entre la fin du mois de juin et la fin du mois de juillet. Ceci peut être expliqué par le fait que l'été 2018 a été particulièrement chaud et sec. La betterave a donc pu mettre en place un phénomène d'évitement à la sécheresse par lequel les feuilles de betteraves flétrissent durant la journée et se réhydratent durant la nuit. La conséquence de ce mécanisme est la limitation de la

vitesse de croissance de la plante qui peut donc être constatée par une faible augmentation du nombre de feuilles apparentes durant les mois de juin et juillet. La comparaison entre les traitements a permis de mettre en évidence le plus grand nombre de feuilles du traitement «Témoin avec strip-till» par rapport aux autres traitements à la fin du mois de juillet. Ce nombre est significativement supérieur au nombre de feuilles des autres traitements. Cependant, cette différence n'a pas pu être expliquée.

Durant la saison, la surface foliaire des betteraves pour chaque traitement a également pu être calculée. Le traitement « Témoin sans strip-till » possédait la surface foliaire la plus faible aux deux premières dates d'analyse et était significativement inférieure aux autres traitements à l'inverse du traitement « Mélange trèfle » dont sa surface foliaire est la plus élevée sur l'ensemble de la saison.

Lors de la récolte des betteraves, des échantillons de racines ont également pu être récoltés pour en analyser le rendement brut, le rendement en sucre, la tare terre et la teneur en éléments mélassigènes. Après analyse, les résultats ont permis de déterminer qu'aucun traitement n'est significativement différent par rapport à un autre.

En conclusion, malgré quelques variabilités entre les traitements concernant l'étude du système foliaire des betteraves, il n'existe aucune différence significative concernant le potentiel de récolte. Or, les critères les plus suivis par les agriculteurs sont le rendement racinaire et le rendement en sucre car la rémunération versée à l'agriculteur par la sucrerie dépend du rendement en sucre des betteraves livrées.

Dans le cadre de cet essai, la mise en place de la technique du strip-till végétal n'a donc pas permis d'apporter des éléments supplémentaires quant à l'intérêt de l'utilisation de cette technique sur la betterave. Néanmoins, il est difficile de juger cette technique sur une période courte d'une année. Pour pouvoir tirer des conclusions pertinentes, cet essai devrait être répété sur plusieurs années car les propriétés physico-chimiques du sol évoluent lentement et les effets sur la culture suivante pourraient être visibles sur le long terme s'il en existe. De plus, cet essai a été réalisé sur une parcelle possédant une terre d'excellente qualité et travaillée de façon optimale, notamment sans labour. Cet essai pourrait donc être répété sur une parcelle dont les conditions du sol sont limitantes, par exemple, un sol froid, compacté ou encore un sol pauvre en azote.

Bibliographie

Angadi, Sangamesh V., and Martin H. Entz, 2002, Root System and Water Use Patterns of Different Height Sunflower Cultivars. *Agronomy Journal* 94(1): 136–145.

Appelgate, Seth R., Andrew W. Lenssen, Mary H. Wiedenhoeft, and Thomas C. Kaspar, 2017, Cover Crop Options and Mixes for Upper Midwest Corn–Soybean Systems. *Agronomy Journal* 109(3): 968.

Basch G., n.a. European Conservation Agriculture Federation (ECAAF). <http://ecaf.org/about-us/ecaf>, accessed March 19, 2019.

Bertin, 2016, La Betterave, Productions Végétales

Bertin, 2018, Cultures Intercalaires, BRAI 2106 Phytotechnie, Chapitre 3

Bertin P., 2018, Agriculture de Conservation, BIRA 2109A Système Agraire, Chapitre 9

Bertin P., 2018, Betterave, BRAI 2106 Phytotechnie, Chapitre 10

Biielders C., 2018, Le Travail Du Sol, LBRAI2106 Phytotechnie, Mécanisation Agricole, Chapitre 5

Bonin, Ludovic, 2014, Lutter Efficacement Contre Les Adventices Grâce à La Rotation ? <https://www.arvalis-infos.fr/valoriser-les-rotations-et-les-periodes-de-semis-@/view-11615-arvarticle.html>, accessed March 27, 2019.

Brun, Damien, and Bousquet Nicolas, 2015, Le Strip till : Décryptage de La Technique. <https://www.arvalis-infos.fr/mieux-conna-tre-la-technique-du-strip-till-@/view-14781-arvarticle.html>, accessed April 2, 2019.

Brun, Damien, and Labreuche Jérôme, 2018, Destruction Des Couverts Végétaux : Quel Outil Choisir ?, Arvalis-Institut Du Végétal. <https://www.arvalis-infos.fr/opter-pour-la-technique-de-destruction-des-couverts-la-plus-appropriee-@/view-11589-arvarticle.html>, accessed April 7, 2019.

Brun, Damien, and Légère Romain, 2016, Strip-till végétal : optimiser les effets des couverts en les localisant, Perspectives agricoles: 4.

Brun Damien et Légère Romain, 2018, Sols Argileux : Le Strip-till s'anticipe Dès l'automne. <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 April 3, 2019.

Campbell, C. A., B. G. McConkey, R. P. Zentner, F. Selles, and D. Curtin, 1996, Long-Term Effects of Tillage and Crop Rotations on Soil Organic C and Total N in a Clay Soil in Southwestern Saskatchewan. *Canadian Journal of Soil Science* 76(3): 395–401.

Cannell, R.Q., and J.D. Hawes, 1994, Trends in Tillage Practices in Relation to Sustainable Crop Production with Special Reference to Temperate Climates. *Soil and Tillage Research* 30(2–4): 245–282.

Celik, Ahmet, Sefa Altikat, and Thomas R. Way, 2013, Strip Tillage Width Effects on Sunflower Seed Emergence and Yield. *Soil and Tillage Research* 131: 20–27.

Chambre d'agriculture Meuse, 2007, Avoine Brésilienne, Fiches Techniques N°2, https://meuse.chambre-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/Grand-Est/037_Inst-Meuse/Elevage/Fiche_avoine_bresillienne.pdf, accessed April 27, 2019.

Chan, K.Y, 2001, An Overview of Some Tillage Impacts on Earthworm Population Abundance and Diversity — Implications for Functioning in Soils. *Soil and Tillage Research* 57(4): 179–191.

Chartin, C, Van camp, and Le Villio, 2015, Matière Organique Dans Les Sols Agricoles, Requasud. <http://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/SOLS%202.html>, accessed May 12, 2019.

Chauhan, Bhagirath Singh, Ravi Gopal Singh, and Gulshan Mahajan, 2012, Ecology and Management of Weeds under Conservation Agriculture: A Review. *Crop Protection* 38: 57–65.

Euben R., 2017, Préservez Votre Sol, Diminuez La Pression Au Sol, Techniques Culturelles Betteravières, IRBAB, https://www.irbab-kbivb.be/wp-content/uploads/2017/02/preservez_votre_sol_1702_bt.pdf, accessed April 6, 2019.

Figeac N., 2012, Le Strip-till, Fiche Techniques Culturelles Simplifiées, Fédération Des CUMA Des Charentes, http://www.charentes.cuma.fr/sites/default/files/fiche_strip-till_v_1.pdf, accessed April 3, 2019.

Friedrich, Theodor, Rolf Derpsch, and Amir Kassam, 2012, Overview of the Global Spread of Conservation Agriculture. *Field Actions Science Reports. The Journal of Field Actions*(Special Issue 6). <http://journals.openedition.org/factsreports/1941>, accessed March 19, 2019.

Google earth, 2019, Vieusart. <https://earth.google.com/web/@50.67935904,4.63363329,131.5860186a,1905.86303008d,35y,-0h,0t,0r>, accessed February 19, 2019.

Greenotec, 2012, Essai 2010-2012 - Gestion des semelles de non-labour. <http://www.greenotec.be/pages/recherche/toutes-cultures/essai-2010-2012-gestion-des-semelles-de-non-labour.html>, accessed April 1, 2019.

Harel, Nathalie, 2014 Implantation des cultures : place à l'innovation: 24.

Hayes, Adam, Anne Verhallen, and Ted Taylor, 2005, Cultures couvre-sol : L'avoine.

http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/facts/cover_crops01/oats.htm, accessed April 27, 2019.

Hobbs Peter R, Sayre Ken, and Gupta Raj, 2008, The Role of Conservation Agriculture in Sustainable Agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363(1491): 543–555.

Howard, Ronald J., 1996, Cultural Control of Plant Diseases: A Historical Perspective. *Canadian Journal of Plant Pathology* 18(2): 145–150.

IRBAB, 2019, 80% de la surface betteravière belge étaient semés, Développement cultural, 2019, IRBAB-KBIVB. <https://www.irbab-kbivb.be/fr/80-de-la-surface-betteraviere-belge-etaient-semes/>, accessed April 24, 2019.

Ismail, Isro, R. L. Blevins, and W. W. Frye, 1994, Long-Term No-Tillage Effects on Soil Properties and Continuous Corn Yields. *Soil Science Society of America Journal* 58(1): 193.

ITB, 2017, Planter Ses Betteraves En Strip Till, Quels Atouts ? Quelles Contraintes ?, La Technique Betteravière, N°1053, <http://www.itbfr.org/wp-content/uploads/2017/04/1053Striptill.pdf>, accessed April 6, 2019.

J. E. Morrison, and Jr., 2002, Strip Tillage for “No-till” Row Crop Production. *Applied Engineering in Agriculture* 18(3). <http://elibrary.asabe.org/abstract.asp??JID=3&AID=8593&CID=aeaj2002&v=18&i=3&T=1>, accessed April 2, 2019.

Jones C., Basch G., 2006, Conservation Agriculture in Europe: An Approach to Sustainable Crop Production by Protecting Soil and Water?, https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/68481/4243_conservationagriculture.pdf?sequence=1, accessed March 30, 2019.

Kuhn, 2013, Strip-till-Kuhn, Guide Agronomique, Agriculture de Conservation, <https://agriculture-de-conservation.com/sites/agriculture-de-conservation.com/IMG/pdf/strip-till-kuhn.pdf>, accessed April 3, 2019.

Kumar, K., and K.M. Goh, 1999, Crop Residues and Management Practices: Effects on Soil Quality, Soil Nitrogen Dynamics, Crop Yield, and Nitrogen Recovery. *In Advances in Agronomy* Pp. 197–319. Elsevier. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0065211308608469>, accessed March 19, 2019.

Labreuche, Jérôme, 2012, Limiter le travail du sol au lit de semences, *Agronomie, Perspectives agricoles*: 2.

Lal, R., 2006, Enhancing Crop Yields in the Developing Countries through Restoration of the Soil Organic Carbon Pool in Agricultural Lands. *Land Degradation & Development* 17(2): 197–209.

Legrand G., Vanstallen M., 2000, Fumure Azotée En Betterave Sucrière, Les Guides Techniques de l'IRBAB

Legrand, Guy, André Wauters, and Johan Keleman, 2015, Fumure minérale azotée de la betterave sucrière : augmenter la dose n'augmente pas le rendement ! 2. Leskovar, Daniel, Yahia Othman, and Xuejun Dong, 2016, Strip Tillage Improves Soil Biological Activity, Fruit Yield and Sugar Content of Triploid Watermelon. *Soil and Tillage Research* 163: 266–273.

LICOR, 2019, Appareil de Calcul de Surface. <https://www.licor.com/env/mobile/LI-3100C.html>, accessed February 22, 2019.

Locke, Martin A., Krishna N. Reddy, and Robert M. Zablotowicz, 2002, Weed Management in Conservation Crop Production Systems. *Weed Biology and Management* 2(3): 123–132.

Luna, John M., and Mary L. Staben, 2002, Strip Tillage for Sweet Corn Production: Yield and Economic Return. *HortScience* 37(7): 1040–1044.

MétéoBelgique, 2018 Météo en Belgique - Année 2018. <https://www.xn--mtobelgique-bbbb.be/article/relevés-et-analyses/annee-2018.html?start=10>, accessed April 28, 2019.

Misonne, 2010, Techniques Culturelles Betteravières, Le Betteravier, <http://www.cbb.be/betteravier/LeBetteravier-mar2010-nr469.pdf>, accessed May 6, 2019.

Murrell, Ebony G., Meagan E. Schipanski, Denise M. Finney, et al., 2017, Achieving Diverse Cover Crop Mixtures: Effects of Planting Date and Seeding Rate. *Agronomy Journal* 109(1): 259.

Mzibra, Abdelhamid, Mostafa Zehauf, and Allal Douira, 2008, Effet du cycle de la culture sur le rendement qualitatif et quantitatif de la betterave sucrière dans la région du Gharb (Maroc). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*: 8.

Overstreet, Laura F., and Greg D. Hoyt, 2008, Effects of Strip Tillage and Production Inputs on Soil Biology across a Spatial Gradient. *Soil Science Society of America Journal* 72(5): 1454.

Protect'eau, 2017, Effet azote d'une CIPAN sur la culture suivante, Efficacité des CIPAN: 2.

R. G. Evans, W. B. Stevens, and W. M. Iversen, 2009, Development of Strip Tillage on Sprinkler Irrigated Sugarbeet. *Applied Engineering in Agriculture* 26(1): 59–69.

R. L. Raper, D. W. Reeves, E. C. Burt, and H. A. Torbert, 1994, Conservation Tillage and Traffic Effects on Soil Condition. *Transactions of the ASAE* 37(3): 763–768.

Richard-Molard, Misonne, 2007, Réduire La Tare Déchet et Optimiser Le Déterrage Des Betteraves, ITB, IRBAB, https://www.irbab-kbivb.be/wp-content/uploads/2015/10/brochure_deterrage.pdf, accessed May 6, 2019.

Salitot G., 2014, Moutarde + Trèfle Incarnat, Un Couvert à Double Effet, Chambre d'agriculture Oise, Ministère de l'agriculture et de La Pêche, <http://www.cra.wallonie.be/img/page/Beverley/4nov%20couverts%20v%C3%A9g%C3%A9taux%20DJ/12%20CA%20Picardie,%20Gille%20Salito%20moutarde%20tr%C3%A8fle%20incarnat%20-%20on%20la%20teste%20pour%20vous.pdf>, accessed April 30, 2019.

Soumoy, 2018, Strip-till Végétal: Les Effets Sur Les Propriétés Physico-Chimiques Du Sol, Mémoire de Fin d'études, UCL

Thomas F., Archambeaud M., 2013. Les Couverts végétaux. Gestion Pratique de l'interculture. Editions France Agricole. 306

Trevini, Mattia, Paolo Benincasa, and Marcello Guiducci, 2013, Strip Tillage Effect on Seedbed Tilth and Maize Production in Northern Italy as Case-Study for the Southern Europe Environment. *European Journal of Agronomy* 48: 50–56.

Unger, P.W., and D.K. Cassel, 1991, Tillage Implement Disturbance Effects on Soil Properties Related to Soil and Water Conservation: A Literature Review. *Soil and Tillage Research* 19(4): 363–382.

Wander, Michelle, 2004, Soil Organic Matter Fractions and Their Relevance to Soil Function. *In* *Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture*. Fred Magdoff and Ray Weil, eds. CRC Press. <http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/9780203496374.ch3>, accessed May 1, 2019.

Le strip-till végétal : Effets sur la betterave

Présenté par Pol-Henri Bughin

Résumé

Le strip-till végétal est une technique permettant de travailler le sol en profondeur dans la ligne de semis de la culture suivante combinée au semis d'un couvert végétal spécifique dans cette ligne. L'objectif de ce mémoire est donc de déterminer s'il existe un effet de ce strip-till végétal sur la betterave qui suit.

Dix traitements différents ont été mis en place sur une parcelle à Vieusart qui a été semée à la volée d'un mélange de cinq espèces de couvert végétal en août 2017. Ces traitements comprenaient huit couverts végétaux différents implantés dans la ligne du strip-till, un traitement avec strip-till sans implantation d'un couvert végétal dans la ligne (T1) et un dernier traitement sans strip-till et sans implantation d'un couvert dans la ligne (T0). Les betteraves ont été semées en avril 2018 avec positionnement GPS. Au cours du présent travail, différentes mesures ont pu être effectuées et analysées sur les betteraves : le taux de germination, le recouvrement foliaire, l'évolution de la surface foliaire, l'analyse racinaire, le rendement brut et en sucre et les teneurs en éléments mélassigènes.

Les résultats obtenus concernant le recouvrement foliaire des betteraves permettent de mettre en évidence que le traitement T0 possède la plus faible valeur, de même pour l'étude de la surface foliaire à l'exception de la fin de saison. Néanmoins, il n'existe aucune différence entre les traitements en ce qui concerne l'étude du rendement brut, du rendement en sucre et des teneurs en éléments mélassigènes qui sont les facteurs les plus importants aux yeux de l'agriculteur.

Il n'existe que très peu d'études réalisées sur ce sujet. Il est donc difficile de comparer cet essai avec des études précédentes.

En conclusion, il n'existe pas d'effet réel du strip-till végétal sur la betterave dans le cadre de cet essai. Néanmoins, cette conclusion ne doit pas être tirée de manière définitive en raison de la courte période sur laquelle l'essai a été réalisé. Une étude effectuée sur plusieurs années, dans des conditions de sol et de phytotechnie différentes, permettra de mettre en évidence de façon plus précise un éventuel effet du strip-till végétal.