

Faculté des bioingénieurs

**Analyse des impacts de différentes
modalités de travail du sol sur les
paramètres physiques, chimiques et
biologiques du système sol-plante en
culture de pommes de terre sur sols
limoneux**

Auteur : Florent Matheise

Promoteur(s) : Pr. Pierre Bertin (UCL/ELI/ELI-A)

Pr. Stéphane Declerck (SST/ELI/ELIM)

Lecteur(s) : Pr. Charles Bielders (UCL/ELI/ELIE)

François Dessart (GREENOTEC)

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du
diplôme de Bioingénieur : Sciences Agronomiques

Année académique 2019-2020

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma reconnaissance à mes promoteurs, le Pr. Pierre Bertin et le Pr. Stéphane Declerck, pour leur disponibilité, leurs conseils précieux ainsi que leur patience.

Je remercie tout particulièrement l'asbl GREENOTEC pour avoir accepté la réalisation d'un partenariat pour ce mémoire. Un très grand merci également à François Dessart pour son aide précieuse sur le terrain, le temps qu'il a consacré et sa sympathie.

Je souhaite également remercier les membres du laboratoire PEPA, Thomas Dagbert ainsi que Pierre Van Thorre pour l'aide qu'ils m'ont apportée concernant le matériel du laboratoire. Mes remerciements vont également aux membres du laboratoire de Sciences du Sol, et plus particulièrement à Anne Iserentant, pour sa disponibilité, les analyses réalisées ainsi que pour ses conseils toujours avisés. Un très grand merci à François Ferrais du laboratoire CESAMM, pour son aide très précieuse lors des analyses, pour les prélèvements et pour sa disponibilité.

Je tiens également à remercier la Pr. Bernadette Govaerts pour son aide précieuse lors des analyses statistiques.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance à mes amis et tout particulièrement à Nicolas Biot pour la merveilleuse entente et son aide lors des analyses. Merci aussi pour son soutien et ses conseils avisés lors de la rédaction de mémoire aussi bien avant et pendant la période de confinement.

Enfin je tiens à témoigner toute ma gratitude à ma famille pour son soutien et pour la dernière relecture de ce mémoire.

Table des matières

Introduction.....	9
Table des figures.....	10
Liste des tableaux.....	13
Partie I : Etat de l'art	16
Chapitre 1 : Le travail du sol.....	17
1.L'évolution du travail du sol à travers les systèmes agraires.....	17
2.Travail du sol actuel.....	19
2.1 Définition du travail du sol	19
3.La classification du travail du sol.....	20
3.1 Classification des opérations de travail du sol	20
3.2 La classification des itinéraires culturaux sur base de leurs objectifs	21
3.2.1 Les systèmes « conventionnels »	21
3.2.2 Les techniques culturales simplifiées (TCS).....	22
3.2.3 L'agriculture de conservation.....	23
Chapitre 2 : La biologie du sol	25
1. L'intérêt pour l'activité biologique des sols	25
2.La flore du sol	26
2.1 La symbiose mycorhizienne : Définition	26
2.2 Types de mycorhizes et principales connaissances sur les CMA	26
2.2.1 Taxonomie des CMA.....	27
2.2.2 Structures et développement des CMA	27
2.3 Services apportés à l'agroécosystème par les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA)	29
2.3.1 Aspect négatif de l'association CMA-plante : les coûts carbonés pour les plantes	29
2.3.2 Prélèvement des nutriments.....	30
2.3.3 Protection contre les pathogènes racinaires	31
2.3.4 Stabilité des agrégats du sol.....	33
2.3.5 Amélioration des prélèvements en eau	33
2.4 Les impacts de la gestion du système cultivé sur les CMA	34
2.4.1 Impact du travail du sol	34

2.4.2. L'utilisation de pesticides	36
2.4.3. Les rotations culturales	37
2.4.4. La fertilisation	38
2.5 Effet spécifique des CMA sur la culture de la pomme de terre	38
2.5.1 Résistance contre les pathogènes fongiques	38
2.5.2 Effets positifs sur les rendements	39
2.5.3 Interaction spécifique plante-champignon	40
Chapitre 3 : La culture de la pomme de terre	41
1.Introduction.....	41
2.Caractéristiques favorables du sol pour l'implantation de la pomme de terre.....	42
3.Le travail du sol conventionnel en vue de la culture de la pomme de terre	43
4.Les effets négatifs du travail conventionnel en pommes de terre	44
5.Le travail du sol en non-labour en vue de la culture de pomme de terre	45
5.1 Exemples introductifs de systèmes innovants en cultures de pomme de terre	45
5.2. Vie biologique en lien avec de telles pratiques.....	46
5.3. Disponibilité en éléments minéraux.....	47
5.4. Pathogènes du sol	49
5.5. Stabilité structurale du sol.....	49
5.6. Densité apparente	50
5.7 Humidité du sol	51
5.8. Résistance à la pénétration	52
5.9 Variation de rendement en tubercules de pommes de terre	53
5.10 Composition minérale des pommes de terre.....	55
Chapitre 4 : Les objectifs du mémoire	55
Partie II : Matériel et Méthode	57
Chapitre 1 : Le dispositif expérimental	58
1.Localisation du dispositif expérimental	58
2.Caractérisation du dispositif expérimental	59
2.1 Mise en place de l'essai et description des modalités de travail du sol	59
2.1.1 La modalité labour (« LAB »)	59
2.1.2 La modalité Techniques Culturelles Simplifiées (TCS).....	60
2.1.3 La modalité « Semis-direct » (SD).....	61
2.1.4 La modalité Buttes Retravaillées (« RETRA »)	63
2.2 Profil altimétrique du dispositif expérimental	65

2.3 Texture et drainage du sol du champ et du dispositif expérimental	66
Chapitre 2 : Les analyses	67
1. Analyses physiques et chimiques du sol	67
1.1 La méthode de prélèvement et l'utilisation des échantillons	67
1.2 Pré-traitement.....	68
1.3 Analyses chimiques de caractérisation des sols.....	68
1.3.1 pH (H ₂ O)	68
1.3.2 CEC et Bases échangeables	69
1.3.3 Phosphore disponible.....	69
1.4 Analyse physiques de caractérisation des sols	70
1.4.1 Résistance à la pénétration (pénétrométrie)	70
2. Analyse du couvert.....	70
2.1 Mesure du poids sec de la biomasse aérienne	71
1.5.2 Mesure du Green Area Index (GAI)	71
3. Analyses biologiques du sol et des racines	72
3.1 La méthode de prélèvement du sol en vue d'une analyse de son contenu en CMA	72
3.2 Pré-traitement.....	73
3.3 Analyse	73
3.3.1 Détermination de la densité de population des CMA par la méthode MPN	73
3.4 Méthode de prélèvement de racines en vue d'une analyse du taux de colonisation racinaire par les CMA.	79
3.5 Pré-traitement (conservation et coloration).....	79
3.6 Analyse	79
3.6.1 Détermination de la colonisation racinaire par la méthode Mc Gonigle.....	79
Chapitre 3 : Méthodes d'analyses statistiques	80
1. Moyenne, écarts-types et erreur standard.....	80
2. Analyse de la variance.....	81
2.1 Principe de l'analyse de la variance	81
2.2 Les hypothèses de l'analyse de la variance.....	81
2.3 ANOVA à un critère de classification (ANOVA I)	81
2.3.1 Description du modèle et hypothèses	81
2.3.2 Tests de comparaison de moyennes (Tukey)	82

2.1 ANOVA à deux critères de classification (ANOVA II)	82
2.2.1 Description du modèle	82
2.2 Modèle mixte	83
2.3 Modèle aléatoire hiérarchisé	84
2.4 Corrélacion entre variables.....	84
Partie III : Les résultats	85
Chapitre 1 : La presentation des résultats et des modèles statistiques	86
1. Les analyses physiques et chimiques de caractérisation du sol	86
1.1 pH	86
1.1.1 Les facteurs « Profondeur », « Modalité » et leur interaction.....	87
1.1.2 Test d'égalité des moyennes de pH suivant la profondeur.....	88
1.1.3 Test d'égalité des moyennes de pH sur base des modalités.....	88
1.2 Bases échangeables.....	89
1.2.1 Le Calcium (Ca ²⁺).....	89
1.2.2 Le Potassium (K ⁺)	90
1.2.3 Le Magnésium (Mg ²⁺)	91
1.2.4 Le Sodium (Na ⁺)	92
1.3 La capacité d'échange cationique (CEC).....	93
1.4 La pénétrométrie.....	95
1.4.1 Le facteur « Modalité » et l'interaction « Modalité*Profondeur ».....	95
1.4.2 Le facteur « Profondeur »	97
2. Les analyses de couvert.....	98
2.1 Le Green Area Index (GAI)	98
2.2 Le poids sec de la biomasse aérienne	99
3. Les rendements obtenus en tubercules de pommes de terre.....	100
4. Analyses biologiques : Mycorhizes.....	102
4.1 Taux de colonisation arbusculaire.....	102
4.2 Taux de colonisation vésiculaire	103
4.3 L'évaluation du " Most Probable Number" (MPN)	105
5. Corrélacion entre les mesures de biomasse aérienne et rendement en tubercules.	107
Partie IV : Discussion	109
Chapitre 1 : Interprétation des résultats.....	110

1. Analyses chimiques et physiques de caractérisation des sols	110
1.1 Le pH.....	110
1.2 La capacité d'échange cationique (CEC).....	110
1.3 Les bases échangeables.....	111
1.4 La pénétrométrie.....	112
2. Analyse du couvert.....	113
2.1 Green Area Index (GAI) et poids sec de la biomasse aérienne	113
3. Les rendements en tubercules pommes de terre.....	115
4. Taux de colonisation arbusculaire.....	116
5. MPN (Most Probable Number)	118
Chapitre 2 : Amélioration du travail.....	119
Conclusion et perspectives.....	121
Bibliographie	124

Introduction

A la fin de la seconde Guerre Mondiale, les pénuries alimentaires et les rationnements ont guetté les populations européennes. Afin de répondre aux besoins des populations, les agriculteurs ont dû réaliser une transition d'un modèle agricole de subsistance empreint de traditions, vers un modèle productiviste caractérisé par la rapidité et la rentabilité. L'apparition de ce dernier modèle n'a été possible que par de l'utilisation d'engrais chimiques, de pesticides, d'une mécanisation lourde et enfin de l'utilisation de plantes issues de l'amélioration végétale. Une décennie plus tard, la modernité dans l'agriculture a mené à une abondance dans les productions. Cependant, à cette époque les préoccupations environnementales n'existaient pas, et la volonté prédominante des agriculteurs était l'atteinte d'un système viable économiquement. Ce n'est que plus tard que les conséquences écologiques ont été mises en évidence. Suite à cela, des scientifiques et agriculteurs se sont interrogés sur la durabilité des systèmes agricoles et ont mis au point de nouveaux systèmes agricoles. Parmi ces systèmes, l'agriculture de conservation propose des réponses aux problèmes relatifs au sol tels que l'érosion, la perte de la matière organique et de la biologie du sol. L'idée d'appliquer ce concept qui se base sur une réduction du travail du sol à des cultures exigeantes en termes d'affinage du sol telles que les pommes de terre est un réel défi. C'est cet objectif que l'asbl GREENOTEC (Groupement de Recherche sur l'Environnement et d'Etude de Nouvelles Techniques Culturelles) a décidé d'atteindre, et c'est avec eux qu'une coopération a été réalisée lors de mise en place de ce mémoire. La première partie de ce travail, l'« Etat de l'Art », regroupe un ensemble de données sur les thématiques du travail du sol et de la biologie de celui-ci. Une dernière partie est consacrée à l'interaction entre ces deux thèmes et la thématique de la culture de la pomme de terre.

La deuxième partie, « Matériel et Méthode » consiste d'une part en la description du dispositif expérimental de l'essai de pommes de terre mené par GREENOTEC, d'autre part en une description des analyses effectuées afin de comparer les diverses modalités de travail du sol exploitées dans l'essai portant sur la culture de la pomme de terre. Ces analyses ont porté sur les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol, et sur le couvert de la culture de pomme de terre.

Une troisième partie « Résultats », décrit les modèles statistiques utilisés pour traiter les données et présente les résultats obtenus sur bases des analyses effectuées.

Une quatrième partie « Discussion » a pour but de documenter et d'interpréter ces résultats par des travaux déjà réalisés antérieurement.

Table des figures

Figure 1: Importance des animaux du sol par rapport à la totalité des organismes décrits sur Terre (gauche). Importance de chacun des taxons parmi l'ensemble des organismes telluriques (droite) (Decaëns et al., 2006).	25
Figure 2: Représentation schématique d'une racine colonisée par des CMA. Phase extra-radical : spore, mycélium; Phase intra-radical: arbuscule, vésicule (Fortin et al., 2016). ...	27
Figure 3: Représentation schématique de 2 types de colonisation des CMA : type "PARIS" et type "ARUM "(adapté de Garbaye, 2013). a : assise épidermique ; b : assises corticales ; c : vésicule ; d : hyphe intra racinaire ; e : appressorium ; f : arbuscule ; g : hyphe extra racinaire.....	28
Figure 4: Profil du sol recherché en pomme-de-terre (Arvalis, 2011)	43
Figure 5: Succession des travaux du sol et plantation de pommes -de- terre dans un itinéraire basé sur les buttes d'automne et plantation directe des tubercules. Gauche : déchaumage et semis d'engrais vert; Milieu: buttage; Droite: Plantation directe dans les buttes(Leforestier et al., 2018).....	46
Figure 6: Evolution de la température dans la butte en pourcentage du témoin (Témoin agriculteur). Buttes SD: formation des buttes fin été et plantation directe dans les buttes au printemps; Buttes retravaillées: formation des buttes en été et reprise superficielle avec la herse rotative avant la plantation; Témoin agriculteur : non-labour et reprise au printemps avant plantation ; Témoin labour : labour d'hiver et reprise au printemps avant plantation(Greenotec, 2017).....	48
Figure 7: Comparaison de la proportion d'agrégats stables (WSA) en fonction de leur taille (mm) à une profondeur de 0 à 10 cm en fonction de la longueur de la rotation et du travail du sol effectué (Carter, Peters, et al., 2009)	50
Figure 8: Contenu volumétrique en eau du sol selon diverses modalités de travail du sol (gauche: mesures de 0 à 15 cm avant le travail du sol printanier; droite: mesures de 0 à 30 cm après la plantation mais avant le buttage) (Tr1: Labour d'automne et reprise de labour au printemps; Tr2: Labour de printemps et reprise de labour; Tr3: Passage automnale au chisel et reprise au printemps ; Tr4 : Travail du sol printanier au chisel uniquement) . Barres verticales= erreur standard de la moyenne(Carter et al., 2005)	52
Figure 9: a) et b) Résistance à la pénétration (MPa) en fonction de la profondeur selon les différentes modalités de travail du sol en culture de pomme-de-terre . (Tr1: Labour d'automne et reprise de labour au printemps; Tr2: Labour de printemps et reprise de labour; Tr3: Passage automnale au chisel et reprise au printemps ; Tr4 : Travail du sol printanier au chisel uniquement . Barres horizontales= erreur standard de la moyenne(Carter et al., 2005)	53

Figure 10: Localisation du dispositif expérimental à l'échelle de la Belgique et du champ (cartes de la Belgique et vue aérienne), échelle des cartes de la Belgique :25km, échelle de la vue aérienne 1 :10000 et 0.3km, adapté de SPW (2018) (Auteur :Florent Matheise)	58
Figure 11: Photo illustrant le passage du déchaumeur "Horsch Tiger" couplé au semi d'engrais vert , source Greenotec (2017).....	59
Figure 12: Photos des différents outils utilisés pour l'affinage du sol et la plantation des pommes de terre. Gauche: herse rotative à axe vertical ; Milieu : chisel lourd ; Droite : planteuse à pommes de terre classique.	60
Figure 13: Photo illustrant le" buttage d'automne" juste après le semi de l'engrais vert à gauche et la plantation directe dans les buttes d'automne à droite, source GREENOTEC (2017)	62
Figure 14: Photos illustrant les constituants de l'outil combiné « dent-butteuse ». Gauche :ouverture de la butte d'automne par un disque. Milieu: ouverture en profondeur de la butte par une dent; Droite: re-buttage par une cappe	63
Figure 15: Schématisation du dispositif expérimental adapté du plan fourni par GREENOTEC (Auteur : Florent Matheise).....	65
Figure 16: Localisation des extrémités (A, B, C, D) du dispositif expérimental. Echelle 1 :5000, adapté de SPW (2018), (Auteur : Matheise Florent)	65
Figure 17: Profil altimétrique du dispositif expérimental entre les segments AB et CD, adapté de SPW (2018) (Auteur : Florent Matheise).....	66
Figure 18: Carte des sols de Belgique centrée sur le dispositif expérimental, échelle 1:10000, adapté de SPW (2018) (Auteur : Florent Matheise)	67
Figure 19: Photo illustrant la méthode de prélèvement du sol. (Auteur : Florent Matheise). 68	
Figure 20: Photos illustrant les étapes de la réalisation de la mesure du poids sec de la biomasse aérienne. De gauche à droite : récolte de 2m ² de biomasse ; prélèvement d'un échantillon frais à l'aide d'une sonde et une manne; pesage de l'échantillon sec (Auteur : Florent Matheise).....	71
Figure 21: Photo illustrant les étapes de la réalisation de la mesure du GAI. De gauche à droite : Prélèvement d'1m ² de biomasse à l'aide d'un cadre en plastique ; passage au scanner de l'ensemble de la biomasse récoltée. (Auteur : Florent Matheise).....	72
Figure 22: Photo illustrant l'échantillonnage du sol dans la butte à proximité des racines de pommes de terre (Auteur : Florent Matheise).	72
Figure 23: Photo illustrant à gauche la phase de remplissage du substrat dans la plaque de culture, à droite le développement du maïs dans les plaques de cultures en serre. (Auteur : Florent Matheise).....	76

Figure 24: Photo illustrant à gauche le prélèvement de racines, et à droite le conditionnement en sacs microperforés (Auteur : Florent Matheise)	79
Figure 25: Valeurs moyennes de pH en fonction de la modalité de travail du sol et la profondeur. Les barres d'erreurs correspondent aux erreurs standards. Les couleurs symbolisent les modalités de travail du sol (voir légende)	88
Figure 26: Valeurs moyennes de concentration en Calcium (még/100g) en fonction de la profondeur (cm) toutes modalités confondues. Les barres d'erreurs correspondent aux erreurs standards.	90
Figure 27: Valeurs moyennes de concentration en Potassium (még/100g) en fonction de la profondeur (cm) toutes modalités confondues. Les barres d'erreurs correspondent aux erreurs standards.	91
Figure 28: Valeurs moyennes de concentration en Magnésium (még/100g) en fonction de la profondeur (cm) toutes modalités confondues. Les barres d'erreurs correspondent aux erreurs standards.	92
Figure 29: Valeurs moyennes de concentration en Sodium (még/100g) en fonction de la profondeur (cm) toutes modalités confondues. Les barres d'erreurs correspondent aux erreurs standards.	93
Figure 30: Valeurs moyennes de CEC (még/100g) en fonction de la profondeur (cm) toutes modalités confondues. Les barres d'erreurs sont des erreurs standards.	94
Figure 31: Graphe de la Résistance à la pénétration (MPa) en fonction de la profondeur (cm), les couleurs symbolisent les modalités (voir légende).	96
Figure 32: Régression linéaire polynomiale de la Résistance à la pénétration (MPa) en fonction de la profondeur (cm). L'équation de la courbe est la suivante : Résistance à la pénétration (MPa) = $-1,492285 + 0,1089626 * \text{Profondeur}(\text{cm}) + 0,002566 * (\text{Profondeur}(\text{cm}) - 21,7771)^2 - 7,3741e-5 * (\text{Profondeur}(\text{cm}) - 21,7771)^3 + 4,6915e-8 * (\text{Profondeur}(\text{cm}) - 21,7771)^4$	97
Figure 33: Valeurs moyennes du Green Area Index en fonction des modalités de travail du sol. Les barres d'erreurs correspondent aux écarts-types. Les couleurs symbolisent les modalités de travail du sol (voir légende).....	98
Figure 34: Valeurs moyennes du poids sec de la biomasse aérienne en fonction des modalités de travail du sol. Les barres d'erreurs sont des écarts-types. Les couleurs symbolisent les modalités de travail du sol (voir légende).....	100
Figure 35: Valeurs moyennes de rendements totaux (t/ha) en pommes de terre en fonction des modalités de travail du sol. Les barres d'erreurs sont des erreurs standards. Les couleurs symbolisent les modalités de travail du sol (voir légende).....	101

Figure 36 Valeurs moyennes des taux de colonisation arbusculaires en fonction des modalités de travail du sol. Les couleurs symbolisent les modalités comme décrit dans la légende. Les barres d'erreurs sont des erreurs standards.	103
Figure 37: Valeurs moyennes des taux de colonisation vésiculaires en fonction des modalités de travail du sol. Les couleurs symbolisent les modalités comme décrit dans la légende. Les barres d'erreurs sont des erreurs standards.....	104
Figure 38: Valeurs moyennes du nombre de plus probable de propagules actives par g de sol en fonction du facteur "Temps" toutes modalités confondues. Les barres d'erreurs sont des erreurs standards.	106
Figure 39: Relation linéaire entre les rendements (t/ha) en pommes de terre pour les calibres >35 mm et le poids sec de la biomasse aérienne (kg/ha). L'équation de la droite est la suivante : Rendements pour les calibres>35mm (t/ha) = -42.8952+0.0451721*Biomasse aérienne moyenne(kg/ha).....	107
Figure 40:Relation quadratique entre les rendements totaux (t/ha) en pommes de terre et le poids sec de la biomasse aérienne (kg/ha). L'équation de la droite est la suivante : Rendements totaux (t/ha) =-68.95894+0.0617482*biomasse aérienne (kg/ha)+ 0.0001942*(biomasse aérienne (kg/ha)-1615.38) ²	108
Figure 41: Comparaison des rendements (tonnes/ha) entre les modalités de travail du sol de 2017 à 2019 (GREENOTEC, 2019).....	116

Liste des tableaux

Tableau 1:Classification des opérations de travail du sol en fonction de la profondeur (cm), du mélange des horizons, et du retournement de la surface. (Labreuche et al., 2007)	21
Tableau 2 : Choix indicatif des outils de travail du sol suivant les caractéristiques du sol (Arvalis, 2011).....	43
Tableau 3: Poids frais de tubercules (Mg/ha) pour 2 travaux du sol et 3 dates de récolte.....	54
Tableau 4: Synthèse des différents travaux du sol effectués suivant la date et la modalité de travail du sol	64
Tableau 5: Tableau illustrant les quantités de sol stérile et inoculé qui ont été mélangées suivant le niveau de dilution	75
Tableau 6: Représentation schématique de la disposition des niveaux de dilution, et témoin négatif ainsi que leurs répliques sur une plaque de culture de 55 puits	75
Tableau 7: Tableau illustrant les étapes et la durée de ces dernières pour effectuer une coloration des racines	76

Tableau 8 : Comparaison de moyennes de pH (test de Tukey) au niveau de signification $\alpha=0.05$, les niveaux du facteur "Profondeur" pour lesquels l'appartenance au groupe n'est pas la même sont différents significativement.	88
Tableau 9: Comparaison de moyennes (test de Tukey) au niveau de signification $\alpha=0.05$. Les niveaux du facteur "Modalité" pour lesquels l'appartenance au groupe n'est pas la même, sont différents significativement.	88
Tableau 10: Comparaison de moyennes (test de Tukey) au niveau de signification $\alpha=0.05$. Les niveaux du facteur "Profondeur" pour lesquels l'appartenance au groupe n'est pas la même sont différents significativement.	90
Tableau 11: Comparaison de moyennes d'un test de Tukey au niveau de signification $\alpha= 0.05$. Les niveaux du facteur "Profondeur" pour lesquels l'appartenance au groupe n'est pas la même sont différents significativement.	91
Tableau 12: Comparaison de moyennes d'un test de Tukey au niveau de signification $\alpha= 0.05$. Les niveaux du facteur "Profondeur" pour lesquels l'appartenance au groupe n'est pas la même sont différents significativement.	92
Tableau 13: Comparaison de moyennes d'un test de Tukey au niveau de signification $\alpha= 0.05$. Les niveaux du facteur "Profondeur" pour lesquels l'appartenance au groupe n'est pas la même sont différents significativement	93
Tableau 14: Comparaison de moyennes d'un test de Tukey au niveau de signification 0.05. Les niveaux du facteur "Profondeur" pour lesquels l'appartenance au groupe n'est pas la même sont différents significativement.	94
Tableau 15: Moyennes et écarts-types de la résistance à la pénétration en fonction de la modalité. Les résultats obtenus par le test de Tukey ont également été répertoriés dans la colonne "Groupe". Les niveaux du facteur "Modalités" pour lesquels l'appartenance au groupe n'est pas la même sont différents significativement.....	95
Tableau 16: Les moyennes, écarts-types du GAI selon la modalité de travail du sol. Les modalités caractérisées par une lettre différente dans la colonne "Groupe" signifient qu'elles sont différentes significativement au niveau de signification 0.05.	99
Tableau 17: Valeurs moyennes et écarts-types des poids secs de la biomasse aérienne en fonction de la modalité(kg/ha). Une différence est significative entre deux valeurs du poids sec de la biomasse aérienne lorsque les modalités ne sont pas liées pas la même lettre dans la colonne « Groupe ».	100
Tableau 18: Valeurs moyennes et écarts-type des rendements totaux en pommes de terre, les résultats du Test de Tukey ont également été notés. Une différence est significative entre deux valeurs rendements lorsque les modalités ne sont pas liées pas la même lettre dans la colonne « Groupe ».	101

Tableau 19: Valeurs moyennes et écarts-types du taux de colonisation arbusculaire (%) en fonction de la modalité. Les résultats issus du test de Tukey (niveau de signification 0.05 et 0.1) sont aussi présents. Une différence est significative entre deux valeurs de taux de colonisation arbusculaire lorsque les modalités ne sont pas liées pas la même lettre dans la colonne « Groupe »..... 103

Tableau 20: Valeurs moyennes et écarts-types du taux de colonisation vésiculaire (%) en fonction de la modalité. Les résultats issus du test de Tukey (niveau de signification 0.05 et 0.1) sont aussi présents. Une différence est significative entre deux valeurs de taux de colonisation vésiculaire lorsque les modalités ne sont pas liées pas la même lettre dans la colonne « Groupe »..... 104

Tableau 21: Valeurs MPN (nombres de propagules actives /g de sol) moyennes et écarts-types en fonction des niveaux 0 et 1 du facteur « Temps » 106

PARTIE I : ETAT DE L'ART

CHAPITRE 1 : LE TRAVAIL DU SOL

1.L'évolution du travail du sol à travers les systèmes agraires

Il y a 10000 ans, des sociétés d'agriculteurs sédentaires sont apparues au départ de sociétés de chasseurs-cueilleurs-pêcheurs nomades (Universalis, 2020). Au départ, les premiers agriculteurs ont exploité des terrains qui présentaient des caractéristiques favorables à l'agriculture et qui ne nécessitaient pas ou peu de travaux du sol, ce qui était le cas pour les terrains situés dans la vallée du Nil notamment. Pour les terrains moins favorables tels que les terrains boisés, la technique de « l'abattis-brûlis » était pratiquée. Celle-ci consistait en l'abattage puis le brûlage de la végétation qui était en place sur ce terrain. Après, une succession de jusqu'à trois années de cultures laissait place à une longue friche forestière permettant un retour de fertilité au sol. A cette époque, les cultivateurs se dotaient d'un bâton fousseur permettant de positionner les graines en terre ou encore formaient des buttes pour la plantation de tubercules (Bertin, 2019).

Suite à une augmentation démographique soutenue, les besoins en terrains cultivables ont augmenté. Les systèmes basés sur l'abattis-brûlis se sont petit à petit intensifiés se ponctuant de défrichages de plus en plus abondants et de réductions de la période de friche forestière menant finalement à une disparition de cette dernière conduisant à la formation d'une friche herbeuse. Un nouveau système devait alors être créé pour cultiver ces friches herbeuses, c'est pourquoi le système de la culture attelée légère a vu le jour. Ce nouveau système a nécessité l'invention de nouveaux outils, c'est pourquoi à l'Antiquité, la houe, la bêche et enfin l'araire attelée au bétail ont émergé. Cette dernière était un des premiers outils de travail du sol primaire et était caractérisée par un ameublissement du sol sans retournement des horizons laissant ainsi de nombreux résidus en surface (Gérard and Hoogmoed, 2014).

Parmi les nombreuses innovations qui ont ensuite vu le jour au Moyen-Age, la charrue était une des plus importantes. Elle a permis de lutter contre les mauvaises herbes, d'incorporer le fumier au sol et de provoquer une minéralisation importante de la matière organique. Ces avantages, autrefois obtenus grâce à la mise en jachère des terrains, étaient dorénavant accessibles par l'utilisation de la charrue. C'est pourquoi cette dernière fut maintenue dans les pays du Nord ce qui a permis au XVème siècle l'arrivée des systèmes sans jachère. Ces systèmes étaient caractérisés par des rotations qui s'étendaient de trois à 12 ans pour les terres les plus fertiles. Il se fait que la productivité du travail et celui de la terre ont augmenté (Bertin, 2019).

Vient ensuite l'époque de la mécanisation et de la révolution des transports, au XIX et XXème siècle, où les outillages hérités du Moyen Âge ont été améliorés. C'est le cas notamment pour la charrue qui a été améliorée et largement étudiée, entre autre, par Mathieu de Dombasle, un ingénieur agronome lorrain (Knittel, 2005). Outre cette amélioration, d'autres outils de fenaison, de battage et de travail du sol ont vu le jour. La diffusion de ces nouvelles machines se fera dans un premier temps essentiellement dans les grandes exploitations aux Etats-Unis, Canada, Argentine, Australie mais également en Europe dans les grandes exploitations d'Angleterre et de Prusse. Les petites exploitations en France mettront, quant à elles, plus de temps à s'équiper de telles innovations.

La deuxième révolution agricole des Temps Modernes a reposé sur trois grands principes. L'apparition de la motorisation a entraîné une émergence importante de la mécanisation, la chimisation et enfin l'amélioration végétale et animale. Ces principes ont permis des gains considérables en termes de productivité de la terre et de travail. On assiste cependant de plus en plus à l'« artificialisation » de l'écosystème cultivé comme le qualifie Marcel Mazoyer (Mazoyer, 2011). En effet, l'Homme va progressivement mettre au point des pratiques culturales qui modifieront de plus en plus les états naturels de l'écosystème cultivé (Ruf, 2000).

A l'heure actuelle, le système agricole hérité de la 2^{ème} révolution des Temps Modernes est encore fort présent en Europe mais est, de plus en plus, sujet à débat. Les pesticides impliqués dans la protection des plantes permettent d'assurer des productions végétales en quantité et en qualité. Cependant, l'exposition de la population à certains produits et à certaines doses semble néfaste pour la santé humaine et l'environnement, et ce à plusieurs égards (Gilden et al., 2010; Liu et al., 2012). La mécanisation a permis d'augmenter fortement l'intensité de travail du sol basé sur le labour, mais celui-ci impacte inévitablement le biote tellurique (Roger-Estrade et al., 2010) ainsi que la sensibilité du sol aux problèmes d'érosion. C'est pourquoi, une multitude de nouveaux systèmes agraires, basés sur de nouvelles connaissances, exploitées par de nouveaux scientifiques et agriculteurs, ont vu le jour ces dernières années. Et ce, pour limiter et éliminer les problèmes précités. Ce n'est, au final, qu'une répétition de plus dans l'histoire de l'Agriculture...

2.Travail du sol actuel

Cette section a pour but de donner un aperçu de la notion de « travail du sol », la manière dont il est pratiqué, sa classification ainsi que les évolutions de cette notion qui ont mené, aujourd’hui, à repenser la vision du travail du sol d’autrefois.

2.1 Définition du travail du sol

“Le travail du sol consiste à le traiter mécaniquement grâce au passage d’instruments appropriés de manière à essayer de lui donner une structure¹ satisfaisante compte tenu de sa texture², de son humidité et de son état de surface, en vue de la culture envisagée”(Havard, 1986).

Cette définition est une vision systémique du travail du sol. En effet, l’auteur prend en considération trois éléments fondamentaux : l’instrument de travail du sol approprié à utiliser, l’état de surface ainsi que la texture du sol et enfin la culture future. Cela sous-entend que chaque parcelle, ou terrain cultivé, doit être traité différemment suivant son contexte ; cette notion de contextualisation est courante dans le domaine de l’agroécologie. Si l’on contextualise chaque parcelle, le moment d’intervention et le choix de l’outil peuvent être différents selon la nature et la quantité des divers résidus à enfouir, les pathogènes pouvant nuire à la culture précédente, les résidus de produits phytosanitaires et enfin les risques liés au climat à venir (AgroParisTech, 2012) même si le résultat final attendu en termes de préparation du sol est le même.

Si l’on reprend la définition ci-dessus, l’auteur ne met en exergue que l’effet du travail du sol sur sa structure, mais en réalité, cette structure même va agir sur une multitude d’autres processus tels que la circulation de l’eau et de l’air, la nature et l’intensité des réactions biogéochimiques, les conditions dans lesquelles les organismes telluriques se développent (Labreuche et al., 2014). Le travail a également des effets directs sur le sol tels que la répartition de la matière organique ainsi que le stock semencier d’adventices à travers les horizons, la composition des populations de la faune et la flore associée au sol, ... C’est grâce à ces divers effets qu’il est possible d’en tirer des avantages tels qu’assurer la mise en place correcte des cultures et le fonctionnement des racines, d’améliorer la circulation de l’eau et de l’air dans le sol, de favoriser son réchauffement et de limiter les infestations de mauvaises herbes et d’un certain nombre de bioagresseurs telluriques (Labreuche et al., 2011).

¹ La structure du sol est définie comme l’agencement tridimensionnel dans l’espace des complexes organiques/minéraux du sol (agrégats) (ARCHAMBEAUD & DE TOURDONNET, 2014.-a)

² La texture du sol est la répartition granulométrique de ses constituants (ARCHAMBEAUD & DE TOURDONNET, 2014.-b)

3. La classification du travail du sol

Selon la littérature, les opérations de travail du sol sont classées suivant le retournement de la surface du sol, la profondeur de travail et enfin le mélange des horizons.

Il existe également une classification des itinéraires culturaux qui sont définis comme étant une combinaison logique et ordonnée d'opérations culturales mises en œuvre pour la conduite d'une culture. Labreuche et al. (2007) recense deux classifications d'itinéraires culturaux. La première consiste en la classification des itinéraires culturaux par l'opération la plus profonde qu'ils contiennent (Annexe I). La deuxième est une classification des itinéraires culturaux sur base de leur objectif (Labreuche et al., 2007). Sera décrite en premier lieu dans cette section la classification des opérations culturales, ensuite la dernière classification des itinéraires culturaux sera retenue et détaillée car c'est cette dernière qui sera utilisée par la suite dans cette étude.

3.1 Classification des opérations de travail du sol

L'opération de travail du sol varie suivant trois critères fondamentaux : le retournement ou non de la surface du sol, la profondeur de travail et enfin le degré de mélange des horizons. Premièrement, le retournement est caractérisé par une inversion des horizons, en d'autres mots : le positionnement des horizons de surface dans le fond du profil et une exposition des horizons profonds à la surface. Deuxièmement, il existe trois niveaux de profondeur en termes de travail du sol. Le travail profond affecte l'entièreté de l'épaisseur de la couche arable du sol, c'est-à-dire la couche remuée par le labour. Le travail très profond concerne, quant à lui, les couches plus profondes au-delà de la couche arable. Le travail superficiel est caractérisé par une profondeur de travail ne dépassant pas le seuil des 15 cm. Enfin, le mélange des horizons s'accompagne d'un enfouissement et d'une dilution des éléments initialement concentrés en surface. Un tableau synthétique (tab.1) a été réalisé sur base des travaux de Labreuche et al. (2007). Il est aisément observable que seul le labour s'accompagne d'un retournement des horizons, signe d'un travail du sol qui perturbe fortement l'organisation du sol. Le décompactage et le sous-solage sont des travaux du sol semblables entre eux excepté en ce qui concerne la profondeur de travail.

Tableau 1: Classification des opérations de travail du sol en fonction de la profondeur (cm), du mélange des horizons, et du retournement de la surface. (Labreuche et al., 2007)

	Labour	Pseudo-labour	Décompactage	Sous-solage	Travail superficiel	Strip-tillage	Billonnage
Retournement de la surface	Retournement	Aucun	Aucun	Aucun	Aucun	Aucun	Aucun
Mélange des horizons	Mélange	Mélange	Aucun	Aucun	Mélange	Mélange	Mélange
Profondeur (cm)	15-40	20-40	15-40	40-80	0-15	0-15	0-20
Exemple d'outil	Charrue à socs	Cultivateur lourd, machine à bécher	Décompacteur	Sous-soleuse	Déchaumeur à dents ou à disques, herse rotative	Strip-till	Butteuse, Bineuse

3.2 La classification des itinéraires culturaux sur base de leurs objectifs

3.2.1 Les systèmes « conventionnels »

En système de travail du sol conventionnel, le labour reste un élément clé (Labreuche et al., 2014). Avant de réaliser ce dernier, différentes opérations préparatoires telles que le déchaumage, le décompactage ou encore le broyage peuvent avoir lieu (Angonin, 2014). En ce qui concerne le déchaumage, celui-ci a pour but de réaliser un faux-semis ainsi qu'un éventuel mulchage. Le décompactage a pour but, quant à lui, de restructurer le sol par fissuration et fragmentation de zones compactes (tab.1). L'agriculteur a besoin de réaliser un broyage dans le cas où il a implanté un couvert végétal et qu'il veut favoriser sa dégradation avant de labourer.

Vient ensuite le labour qui consiste en un ameublissement profond s'accompagnant, comme mentionné ci-dessus (tab. 1), d'un retournement des horizons. Ce travail du sol peut être réalisé avec une charrue à disques ou à versoirs. Les avantages (Bertin, 2019) de cette opération de travail du sol souvent énoncés sont la lutte contre les adventices, l'enfouissement de la matière organique et des résidus, le ressuyage des terres humides et mal drainées, la remontée des horizons profonds qui se fissureront sous l'action du climat, et enfin une exposition plus importante des particules de sol à l'oxygène favorisant la minéralisation. Cependant, malgré les nombreux avantages qu'offre le labour et ce depuis son invention au Moyen-Age, celui-ci présente également de nombreux inconvénients. Ces derniers sont : une minéralisation trop intense s'accompagnant d'une chute de la teneur en matière organique dans les sols, une rupture des pores créés par les organismes telluriques

et par les racines, une densification du sol, une exposition du sol nu aux radiations solaires, une destruction des matériaux organiques complexes apportant cohérence et stabilité au sol et enfin la formation d'une semelle de labour³.

En ce qui concerne les impacts du labour sur les CMA, celui-ci, impacte de manière négative la colonisation des racines des plantes hôtes (Galvez et al.,2001). En outre, une modification dans la structure des populations des CMA a été associée au travail du sol (Jansa et al., 2003).

Des opérations de travail du sol post-labour sont ensuite réalisées pour effectuer dans un premier temps la reprise du labour par émottage (Angonin, 2014) ; ceci peut être effectué par des cultivateurs légers ou encore des outils à dents combinés. Dans un deuxième temps, la préparation du sol consiste en un profilage. Cette dernière action permettra de mettre en place le lit de semences par nivelage du sol, enfouissement léger des résidus de cultures éventuels ou engrais de fond via une herse rotative à axe vertical pour les semis de céréales, pois, lin, betteraves... Pour les cultures plus spécifiques telles que les pommes de terre, les agriculteurs ont recours à une butteuse en plus de la herse rotative à axe verticale. Cette dernière action a pour but de faciliter la récolte d'un produit souterrain délicat (tubercule, chicorée, carottes...), d'amener une proportion importante de terre fine au contact du produit souterrain lui permettant un développement optimal. De plus, d'une façon plus secondaire, le buttage favorise la levée car la température augmente au sein des billons. Lorsqu'un re-buttage est effectué celui-ci peut jouer le rôle de désherbage. Un dernier travail du sol peut être réalisé lors de l'itinéraire cultural, c'est le binage. Souvent rencontré en agriculture biologique à l'heure actuelle, il était souvent utilisé, autrefois, dans la culture betteravière dans le but de contrôler les adventices lors du cycle cultural.

3.2.2 Les techniques culturales simplifiées (TCS)

Une multitude de systèmes nommés différemment ont proliféré ces dernières années sous le nom de « travail réduit », « travail minimum », « travail simplifié » (Labreuche et al.,2007). Cet ensemble de termes ne facilite pas le classement des pratiques culturales provoquant une mauvaise compréhension et une confusion entre pays ou entre régions. Si l'on se concentre sur l'acronyme « TCS », différentes significations de cet acronyme ont été décelées dans la littérature notamment « Technique de Conservation des Sols » ou encore « Techniques Compliquées de Semis ». Dans cette étude, nous nous concentrerons sur la notion de « Techniques Culturales Simplifiées » consistant à éviter le recours au labour mais maintenant malgré tout un travail superficiel du sol (Zanella, 2008). Ceci a permis de réduire

³ Semelle de labour : Couche compacte du sol située à la base du labour de la couche arable. Cette couche entraîne un mauvais drainage de la couche arable, une limitation du développement racinaire ainsi que des conditions anoxiques sous la semelle de labour.

l'intensité des travaux du sol. Ces techniques ont pour objectifs d'améliorer la qualité du sol, de limiter l'érosion et d'augmenter le stockage de carbone dans les sols (Bordès, 2019)

3.2.3 L'agriculture de conservation

Dans les années 1930, aux Etats-Unis et en Amérique latine, de sévères préoccupations environnementales ont vu le jour en raison des phénomènes d'érosion considérables observés (Dust Bowl notamment). C'est alors que certains scientifiques ont proposé une alternative au travail intensif du sol : "les techniques culturales sans labour". Ce n'est que vers les années 1970 que certains agriculteurs pionniers dans les pays appartenant au MERCOSUR commencent à adopter ces techniques dans le but de limiter l'érosion et la perte de fertilité des sols (Zanella, 2008). A ce moment, en France, une minorité d'agriculteurs se lancent dans ces techniques surtout pour diminuer le temps nécessaire à la préparation des terres, mais, dû au manque de connaissances, l'agriculture de conservation ne se développe pas significativement. Suite à l'émergence de la nouvelle PAC en 1992, l'objectif principal des agriculteurs craignant une diminution du prix des céréales était la diminution de leurs charges, c'est alors que la diffusion des techniques culturales sans labour s'est accrue. Cependant, l'arrêt du labour a amené progressivement à des problèmes tels que l'apparition des limaces dans les parcelles et des problématiques de salissement dues notamment aux résistances aux herbicides. C'est en se basant sur les techniques agricoles développées en Amérique, qui consistent à coupler la réduction du travail du sol avec les couverts végétaux, que les agriculteurs ont pu surmonter ces derniers problèmes. En effet, les couverts végétaux fournissent des résidus à la fin de leur cycle de végétation. Ceux-ci ont dès lors contribué au relancement de la vie biologique et à l'augmentation du taux de matière organique des sols. Ces bienfaits ont permis d'améliorer la fertilité des agroécosystèmes (Pastoureau, 2012).

Aujourd'hui, cette dénomination « d'agriculture de conservation » est souvent victime de confusion, et a nécessité la mise en place d'une définition générale. C'est pourquoi le CTIC (*Conservation Technology Information Center*) des Etats-Unis (CTIC, 2005) a formulé une première définition concernant le travail du sol de conservation :

Le travail du sol de conservation est un type de travail de sol, ou encore un système de plantation, qui laisse en place une couverture du sol par les résidus de culture d'au moins 30 pourcents après le semis afin de limiter l'érosion hydrique. Il a été également considéré que pour lutter efficacement contre l'érosion éolienne, une masse de 1.1 tonne de résidus doit être présente sur le terrain. Cette définition est basée sur l'objectif du travail du sol et non sur la façon d'y arriver. Une remarque formulée à propos de cette définition (Derpsch, 2003) fut l'importance trop grande apportée au travail du sol plutôt qu'aux résidus de culture. Comme mentionné deux paragraphes plus haut, les résidus de couverts végétaux ou de cultures sont reconnus pour apporter une multitude de bienfaits tels que l'amélioration de la qualité du sol et la diminution du phénomène d'érosion.

La FAO (Derpsch & Benites, 2001; Dubreuil-Hériard et al., 2014) a défini en 2003 l'agriculture de conservation sur base de trois grands principes :

1. La réduction du travail du sol à l'aide des techniques sans labour ou de semis - direct limitent les impacts sur les organismes vivants inhérents au sol.
2. La mise en place d'une couverture permanente ou semi-permanente vivante ou morte. Ce couvert organique est constitué de résidus de la culture précédente ou d'un couvert d'interculture. Le but est de protéger le sol physiquement contre les agents climatiques (pluie, vent, ensoleillement direct) mais aussi de nourrir les organismes telluriques. Ces derniers remplaceront le travail du sol et équilibreront les nutriments du sol.
3. L'utilisation de rotations culturales adaptées et allongées permet de contrôler les maladies, les nuisibles et les adventices

A travers ces trois principes ou objectifs, la pratique de cette agriculture devrait mener à une conservation de l'environnement tout en maintenant une production agricole durable. Bien que ces trois objectifs précités soient clairs et réalistes, un frein important peut être la difficulté de changement de mentalité des agriculteurs, des scientifiques, techniciens. En effet, ils doivent oublier les caractéristiques du système conventionnel afin de réapprendre les différents aspects du nouveau système de production. L'agriculteur doit changer de mentalité avant de changer son semoir (Rolf Derpsch, 2001) !

CHAPITRE 2 : LA BIOLOGIE DU SOL

1. L'intérêt pour l'activité biologique des sols

Chevalier (1924) mettait déjà en évidence l'importance de la biologie du sol qui était autrefois totalement ignorée :

“On a cru longtemps que le sol constituait une masse presque complètement inerte dans laquelle plongent les racines des plantes et où celles-ci trouvent toutes les matières nécessaires à leur vie, sauf le carbone. On pensait donc qu'il suffisait de faire une analyse physique et chimique de ce sol, afin de déceler les éléments constitutifs et d'en établir la proportion pour déterminer le degré de fertilité de ce sol. Le problème apparaît aujourd'hui infiniment plus complexe. (...) Le sol héberge aussi outre les racines des plantes qui le pénètrent de toutes parts, une foule d'organismes : insectes, vers, schizomycètes, protozoaires, champignons, etc., qui s'unissent ou se concurrencent les uns les autres en formant des associations variées, plus ou moins harmonieuses, le plus souvent instables et évolutives”

Comme le cite cet extrait, les sols sont les hôtes d'une biodiversité considérable. Selon certains auteurs cette diversité serait à peu près équivalente à un quart des 1.5 millions d'espèces décrites actuellement (Decaëns et al., 2006; Lavelle et al., 2006). La majorité des animaux du sol sont représentés par les taxons des insectes (80%) et des arachnides (12%) (fig.1). Parmi les espèces vivantes dans le sol, les champignons ne représentent que 4%.

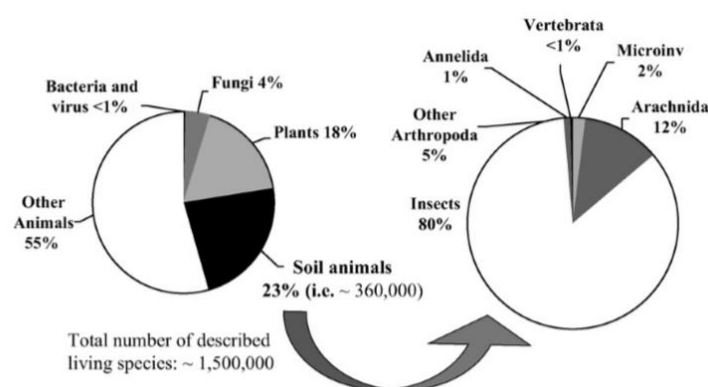


Figure 1: Importance des animaux du sol par rapport à la totalité des organismes décrits sur Terre (gauche). Importance de chacun des taxons parmi l'ensemble des organismes telluriques (droite) (Decaëns et al., 2006).

2. La flore du sol

La flore du sol rassemble une série de groupes tels que les bactéries, champignons, algues et enfin les virus. Dans le cadre de cette étude, nous nous intéresserons principalement aux champignons et plus particulièrement aux champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA). Après une brève description de leurs caractéristiques, les différents impacts positifs, négatifs qu'ils ont sur l'écosystème agricole, ainsi que les impacts des pratiques agricoles sur ces derniers seront aussi abordés. Enfin, une section directement en lien avec le sujet de ce mémoire portera sur les effets des CMA sur la culture de la pomme de terre.

2.1 La symbiose mycorhizienne : Définition

Bien que certains auteurs tels que Gibelli (1883), ont contribué à la description et aux illustrations précises des associations plantes-champignons, c'est au prussien Albert Bernhard Frank (1839-1900) que l'on doit une synthèse des observations réalisées par ses prédécesseurs ainsi que la formulation de la théorie en lien avec les mycorhizes. En effet, en réalisant certaines expériences sur le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*), Frank a mis en évidence le caractère obligatoire et bénéfique pour la plante de la présence d'un champignon. Sur base de cette constatation, il a défini le terme mycorhize (du grec « mycor » pour champignon et « rhiz » pour racine) pour nommer les organes mixtes racines-champignons. L'association racine-champignon fut ensuite qualifiée de symbiose.

D'après Garbaye (2013), une symbiose est une **association intime** (s'accompagnant de la pénétration de tissus d'un des deux organismes dans l'autre ou dans les cellules), **durable** (effective jusqu'à ce que l'un des deux organismes meure) et enfin **mutualiste** (à bénéfices réciproques par l'échange de ressources complémentaires). C'est sur base de ce concept majeur qu'une définition de "mycorhize" peut ainsi être formulée : Une mycorhize est le siège d'une symbiose entre une plante et un champignon".

2.2 Types de mycorhizes et principales connaissances sur les CMA

Il existe sept types de mycorhizes reconnus à ce jour : les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA), les champignons ectomycorhiziens (ECM), les ectendomycorhiziens, les mycorhizes des éricacées, arbutoïdes, monotropoïdes et enfin celles des orchidées. Parmi les nombreux types de mycorhizes connus actuellement, celui des champignons mycorhiziens à arbuscules est celui qui concerne directement cette étude, c'est pourquoi uniquement ce dernier sera détaillé (Declerck, 2019) (Annexe II : Description des sept types de mycorhizes).

2.2.1 Taxonomie des CMA

Les champignons mycorhiziens à arbuscules sont des champignons du règne des Fungi, et qui forment un phylum nommé Gloméromycota. Au sein de ce phylum monophylétique, 4 ordres, 11 familles et 17 genres ont été reconnus à l'heure actuelle (Garbaye, 2013). Il y a 450 millions d'années, lorsque les plantes ont colonisé le milieu terrestre, ces dernières se sont associées à des microorganismes, dont les champignons, les aidant ainsi dans l'absorption de l'eau et des nutriments. Les symbiontes fongiques ont co-évolué avec les plantes d'une telle manière qu'aujourd'hui ils ne peuvent plus se passer de leur plante hôte. A l'heure actuelle, plus de 80 % des espèces de plantes vasculaires réalisent, ou sont susceptibles de réaliser, des symbioses mycorhiziennes avec des champignons mycorhiziens à arbuscules. Parmi ces plantes, on retrouve une grande partie des plantes cultivées.

2.2.2 Structures et développement des CMA

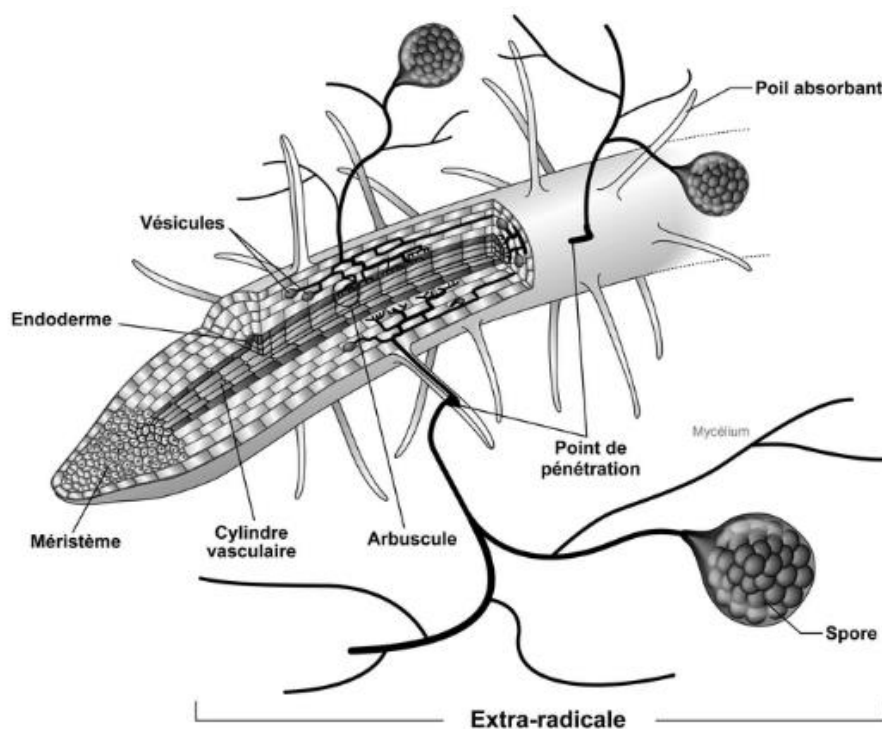


Figure 2: Représentation schématique d'une racine colonisée par des CMA. Phase extra-radical : spore, mycélium; Phase intra-radical : arbuscule, vésicule (Fortin et al., 2016.).

Cette association plantes-champignons est caractérisée par deux phases, la phase intra-racinaire et la phase extra-racinaire (fig.2).

Préalablement à la mise en contact hyphe-racine, des signaux chimiques (ou « branching factor ») sont émis par exsudation racinaire (Requena et al., 2007) et favorisent la

germination de la propagule (une spore de CMA à proximité de la racine qui peut être intégrée dans des débris végétaux, dans des fragments de racines), la croissance et la ramification des hyphes. Ces hyphes sont coenocytiques, c'est une caractéristique propre aux CMA. Le champignon envoie aussi un signal qui déclenche chez la plante l'activation de gènes relatifs à la symbiose. Ensuite, survient la première étape de la colonisation qui consiste en la formation d'un appressorium sur l'épiderme racinaire, le développement de cette structure fongique se réalise après la mise en contact avec ce dernier. C'est à partir de cet appressorium que les hyphes se développent au sein de la racine et leur colonisation du cortex peut se réaliser selon deux modes distincts (fig.3) : le mode « **Arum** » au cours duquel les hyphes croissent longitudinalement suivant les espaces intercellulaires puis se ramifient et portent des arbuscules ou selon le mode « **PARIS** » où les hyphes sont non ramifiés, continus, forment des spires et se propagent de cellules en cellules. Chaque étape de la progression du champignon dans la racine est contrôlée par le génome de la plante hôte. Les hyphes intra-radicaux produisent ensuite, après avoir franchi l'épiderme et le cortex interne, une structure cruciale pour les échanges plante-champignon nommée « l'arbuscule ». Les hyphes franchissent la paroi cellulaire des cellules corticales mais pas la membrane, et cette dernière forme des invaginations tout autour de l'arbuscule afin d'augmenter la surface d'échange. L'arbuscule est le lieu d'échange entre la plante et le champignon, où celui-ci reçoit les composés carbonés tels que les sucres et lipides essentiels à sa croissance aussi bien intra-radicaire qu'extra-radicaire, et c'est à cet endroit que la plante reçoit les éléments minéraux et l'eau que le réseau mycélien externe a pu prélever (Declerck, 2019; Redon, 2009).

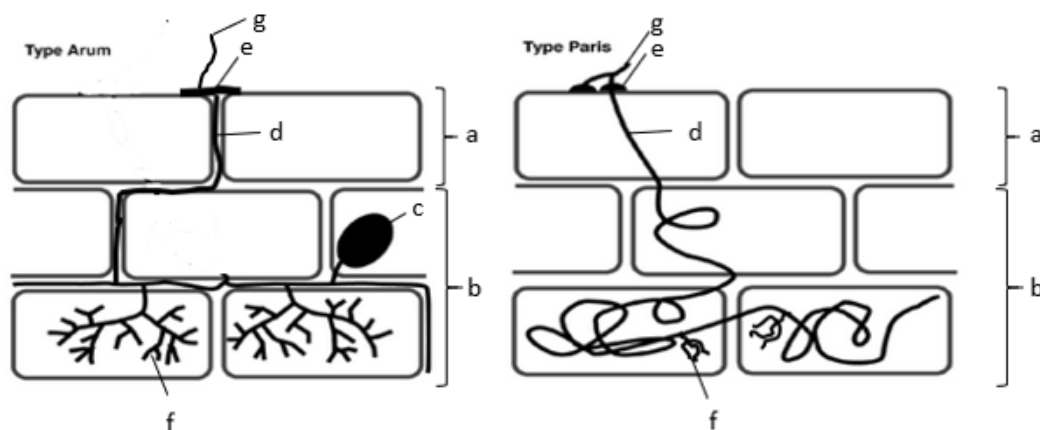


Figure 3: Représentation schématique de 2 types de colonisation des CMA : type "PARIS" et type "ARUM "(adapté de Garbaye, 2013).
a : assise épidermique ; b : assises corticales ; c :vésicule ; d : hyphe intra racinaire ; e :appressorium ; f :arbuscule ; g : hyphe extra racinaire.

Le terme se rapportant à l'interface entre le champignon et la racine est nommé l'apoplaste, en l'occurrence celui-ci est mixte car les deux espèces en symbiose sont des phylums à parois. D'autres organes, tels que des vésicules formées au départ d'hyphes intra-racinaires pourvus de nombreux noyaux et de lipides semblent être des structures de stockage, mais aussi des structures de reproduction. Ces vésicules ne sont cependant présentes que chez certaines familles de Gloméromycètes. Tout comme la phase intra-racinaire, la phase extra-racinaire comporte des hyphes caractérisés par un diamètre fin leur fournissant une surface de contact extraordinaire avec le sol. Des estimations ont été faites, sous un sol de 1m² de prairie, la surface du réseau mycélien représente 90 m² alors que la surface racinaire représente à peine 9 m² (Fortin et al., 2016). C'est à partir des structures hyphales que les cellules auxiliaires sont formées. Ces dernières ne sont cependant rencontrées que chez *Gigaspora* et *Scutellospora*.

2.3 Services apportés à l'agroécosystème par les champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA)

Les champignons mycorhiziens à arbuscules génèrent des hyphes extra-radicaux, ceux-ci permettent une exploration plus importante du volume de sol, fondamentale pour le prélèvement des nutriments. Ces hyphes forment donc un réseau en dehors des racines colonisées créant ainsi une liaison entre le sol et les plantes. Outre l'avantage primaire de cette symbiose champignon-plante consistant au prélèvement des nutriments, une multitude d'autres effets positifs sont notamment, la protection contre les pathogènes des racines, une amélioration de la structure du sol et enfin l'apport d'une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau. Bien que de nombreux avantages soient associés à l'interaction CMA-plantes, dans certains cas cette symbiose peut se transformer en parasitisme suivant l'ampleur du coût en carbone que nécessite une telle association par rapport aux gains en nutriments fournis par les champignons.

2.3.1 Aspect négatif de l'association CMA-plante : les coûts carbonés pour les plantes

Les plantes acquièrent la majorité de leurs nutriments par les racines soit directement soit indirectement à travers l'association avec des microorganismes. Toute plante alloue une quantité importante d'hydrates de carbone vers les racines afin de maintenir leurs activités. Dans le cas des racines mycorhizées, le coût carboné est généralement plus élevé par rapport au cas des racines non-mycorhizées (Tuomi et al., 2001). Ce phénomène est expliqué par des taux de respirations fongiques et des coûts par unité de poids pour la construction des hyphes plus élevés en carbone et azote par rapport aux racines. L'association mycorhizienne est donc une stratégie intéressante pour l'acquisition des nutriments limitants à la condition que les coûts carbonés nécessaires au bon fonctionnement du

partenaire fongique ne soient trop importants. Un rapport quantifiant l'efficacité du coût de l'acquisition des nutriments a été mis au point, celui-ci est défini comme : le coût carboné nécessaire au fonctionnement du CMA/ la quantité de nutriments acquis. Au plus ce rapport est faible, au plus le coût carboné est faible par unité de nutriment acquis et au plus l'association est efficace. Si le rapport est très élevé cela signifie que cela coûte plus de carbone à la plante de recevoir une unité de nutriment minéral que ce qu'elle peut assimiler en carbone grâce à la photosynthèse sur base d'une unité de nutriment minéral. Selon Tuomi et al. (2001), la performance des plantes mycorhizées est plus importante dans les sols pauvres en nutriments, les plantes non-mycorhizées sont quant à elles plus performantes et croissent mieux dans des sols à hautes teneurs en nutriments.

2.3.2 Prélèvement des nutriments

Le phosphore, un élément fondamental dans la nutrition des plantes, n'est généralement présent qu'en faible concentration dans la solution du sol car il est peu soluble et donc peu mobile. Etant donné que la plante ne peut prélever les ions phosphore qu'en solution, sa capacité à absorber le phosphore dépendra d'une part de la concentration d'ions en solution et d'autre part de sa surface d'absorption. De plus, celui-ci migre dans la solution par « *mass-flow* » (quantitativement peu important) emporté par l'eau lorsqu'elle est absorbée par la plante ou encore par un phénomène plus important : la diffusion. Le coefficient de diffusion du phosphore est relativement faible (1/10 de celui de K^+ et NH_4^+ et 1/100 de celui de NO_3^-), ce qui conduit à une diminution rapide de la concentration en phosphore tout autour de la racine créant ainsi une zone dite « de déplétion » formant un gradient de concentration proche de la surface racinaire (Declerck, 2019; Grant et al., 2005; Kabir, 2005). Le phosphore en solution directement accessible pour la plante ne représente à tout moment qu'environ 1% du phosphore total prélevé pour effectuer son cycle, les 99 autres pourcents sont liés aux particules de sol. Différentes formes de phosphore sont présentes dans les sols, le phosphore organique, le phosphore lié aux cristaux et enfin le phosphore inorganique représentant environ 75% du total. Leur mobilisation au départ des constituants du sol et donc l'approvisionnement de la solution du sol va dépendre de mécanismes physico-chimiques (solubilisation, désorption) mais également biologiques (minéralisation).

La racine devrait en théorie ne prélever que 1 à 2 % du phosphore appliqué (Kabir, 2005), toutefois, des recherches ont démontré qu'elles prélèvent en réalité 10 à 15 % du phosphore. Le réseau mycélien a un rôle important dans l'accès de la plante au phosphore grâce à plusieurs mécanismes. Le diamètre des hyphes extra racinaires (Grant et al., 2005) est plus petit que celui des racines, permettant une exploration de pores non accessibles par les racines et la zone de déplétion plus faible autour des hyphes leur permet d'absorber le phosphore en concentration plus faible. Il est important de spécifier que les CMA prélèvent uniquement le phosphore depuis le pool de phosphore soluble. Néanmoins, il existe des

interactions synergiques avec des *PSM* (*Phosphore-solubilizing microorganisms*) qui permettent de solubiliser et relâcher des ions $H_2PO_4^-$ au départ du pool de phosphore indisponible. Il a été montré que la concentration en phosphore dans les tissus des CMA ou des racines est jusqu'à 1000 fois supérieure à celle dans le sol. C'est la raison pour laquelle un transport actif du phosphore est nécessaire depuis le sol vers l'intérieur de l'hyphe. Dès son entrée au sein de l'hyphe, le phosphate inorganique est intégré à des granules polyphosphates et c'est sous cette forme que le phosphore est acheminé vers l'arbuscule au travers du réseau mycélien. A l'extrémité de l'hyphe, les granules polyphosphates libèrent les phosphates inorganiques individuelles et ceux-ci pénètrent dans la plante hôte par un processus actif impliquant des ATP-ases et des phosphatases alcalines. Les CMA permettent donc de prélever le phosphore soluble dans des régions plus éloignées des racines et également d'acheminer du phosphore provenant du pool non disponible grâce à la synergie effectuée avec les PSM (Bagyaraj et al., 2015).

2.3.3 Protection contre les pathogènes racinaires

Les techniques de gestion des pathogènes dans les cultures sont multiples et variées telles que la rotation culturale, l'amélioration de la fertilité des sols, l'utilisation de cultivars résistants et enfin l'utilisation de fongicides. Ceux-ci se montrant parfois nocifs pour les organismes non visés et pour l'environnement en général, des alternatives ont été mises en place telle que l'utilisation d'agents de biocontrôle (Al-Askar & Rashad, 2010). Il a été prouvé que certaines espèces de CMA jouent un rôle dans le contrôle de pathogènes telluriques (Thygesen et al., 2004) tels que *Fusarium*, *Aphanomyces*, *Phytophthora*, *Pithium*...

Plusieurs mécanismes de protection des racines par les CMA ont été mis en évidence. Ceux-ci ont été classés (Whipps, 2004) en quatre catégories : (1) la compétition directe ou l'inhibition ; (2) l'amélioration ou les changements dans la croissance des plantes, leur nutrition et morphologie ; (3) les changements biochimiques liés aux mécanismes de défense de la plante et à la résistance induite et (4) le développement d'un microbiote antagoniste.

(1) Premièrement, pour ce qui est de la compétition directe ou l'inhibition, le développement du champignon mycorhizien à arbuscules, ainsi que de son réseau hyphal s'accompagne d'un accaparement de l'espace autour de la racine, ne laissant que peu de place au développement d'éventuels pathogènes fongiques. En résulte une compétition pour l'espace étant donné que le symbiote fongique et le pathogène occupent la même niche écologique (Declerck, 2019). Cette interaction champignon-pathogène sera d'autant plus forte que les sites d'infection de la racine et que la disponibilité du carbone dans la rhizosphère sont réduits en lien avec la colonisation mycorhizienne. Outre la compétition pour l'espace entre le pathogène et le CMA, il existe la compétition pour les photosynthétats

et les exsudats provenant de la plante. Des substances à base de composés de défense et d'antibiotiques peuvent être exsudées par les racines et les CMA afin d'inhiber les pathogènes (Whipps, 2004).

(2) Un deuxième mécanisme consiste à améliorer et à effectuer des changements du point de vue de la croissance, de la nutrition et de la morphologie des plantes. Comme mentionné ci-dessus au point 2.3.2, les CMA permettent une meilleure exploration du volume de sol environnant des racines, fournissant aux plantes mycorhizées une nutrition minérale renforcée en phosphore, et en éléments trace. Cette dernière permettra de compenser les dégâts engendrés par les pathogènes et de diminuer les symptômes résultants, par un accroissement de la biomasse racinaire et végétale, signes d'une bonne vigueur générale de la plante (Declerck, 2019). Suite à la colonisation des racines par les CMA, des changements hormonaux s'opèrent tels que des modifications des teneurs en acide abscissique, auxine... et des modifications morphologiques des racines en termes de ramifications notamment (Whipps, 2004).

(3) En outre, les CMA mènent à des changements biochimiques liés aux mécanismes de défense de la plante et à la résistance induite. Les mécanismes de défense des plantes consistent entre autres en la production de composés phénoliques, de phytoalexines et des protéines PR (*pathogenesis-related*). Les phénols, en plus d'être des précurseurs importants dans l'élaboration de la lignine qui constitue une barrière structurelle interne, sont également des composés antimicrobiens, des inhibiteurs d'enzymes fongiques extracellulaires et de la phosphorylation oxydative fongique. Bien que l'hypothèse qui suit soit controversée, il a été avancé que leur synthèse et leur accumulation est plus rapide chez les plantes colonisées par les CMA que chez celles non colonisées (Al-Askar & Rashad, 2010). Une explication donnée à ce phénomène serait que l'infection générée par le CMA agit comme un amorçage du système de défense de la plante. D'autres changements au niveau de la plante comme les niveaux d'acides aminés (proline, arginine), les augmentations de méthylation d'ADN et de respiration ont été observés.

(4) Enfin, le quatrième mécanisme est le développement d'un microbiote antagoniste. La colonisation mycorhizienne des racines s'accompagne généralement de modifications des exsudats racinaires ainsi que du pH provoquant une modification qualitative et quantitative des populations microbiennes environnantes de la rhizosphère. Parmi ces populations, des microorganismes antagonistes des pathogènes du sol (exemple : *Pseudomonas fluorescens*) seront favorisés grâce aux synergies avec les CMA. Un contact entre le mycélium extraracinaire et le pathogène peut stimuler la germination des conidies notamment qui dépériront avant d'être en contact avec la racine (interaction *G. intraradices*-*F. oxysporum* f. sp. *Chrysantemi*) (Declerck, 2019).

2.3.4 Stabilité des agrégats du sol

La structure du sol influence de nombreux aspects physiques, biologiques et chimiques des sols. Cette structuration est possible seulement si un phénomène d'agrégation des sols est présent. Parmi les acteurs qui régissent ce dernier, les champignons mycorhiziens à arbuscules jouent un rôle important. Ces derniers agissent à trois niveaux (Rillig & Mummey, 2006).

A grande échelle, les CMA interagissent avec la communauté végétale en influençant sa composition par les différents services rendus, parmi ceux-ci on peut noter l'amélioration de la nutrition minérale des plantes. Les plantes à leur tour ont un impact significatif sur l'agrégation du sol par le carbone qu'elles restituent au sol.

A une échelle plus restreinte, les racines vont avoir une multitude d'impacts sur le sol tels que les changements de régime hydrique du sol, la pénétration racinaire, la rhizodéposition, la décomposition des racines et enfin l'enroulement des racines autour des particules de sol. Il s'avère que les CMA agissent indirectement sur l'ensemble de ces phénomènes par leurs divers effets sur les racines. Les symbiotes fongiques produisent également des composés facilitant directement l'agrégation des sols. Parmi ces composés, une glycoprotéine découverte par Wright et al. (1996) a été dénommée « glomaline ». Cette dernière est synthétisée par les hyphes de CMA actifs et se retrouvent en leur surface pour agir tel le ciment en liant les particules de sol entre elles afin de former *in fine* des agrégats stables. Etant donné qu'environ 80% de la glomaline (Rillig & Mummey, 2006) est liée aux hyphes, elle jouerait dans un premier temps un rôle dans le fonctionnement de l'hyphe (le gène codant correspondant serait notamment exprimé en conditions de stress), seulement dans un deuxième temps, elle serait impliquée dans la stabilisation des sols.

Le rôle des champignons mycorhiziens ne s'arrête pas là, ils interagissent et modifient les populations bactériennes qui ont été reconnues pour réaliser une stabilisation des micro-agrégats présents au niveau des sols. Les CMA étant des réseaux remplis de carbone et donc d'énergie, ceux-ci sont consommés par les micro-arthropodes qui contribuent largement aux processus étroitement liés à la matière organique. En réponse à cette consommation, les populations de CMA sont modifiées et sécrètent des composés qui sont impliqués dans la stabilisation des sols (Rillig & Mummey, 2006).

2.3.5 Amélioration des prélèvements en eau

Malgré les nombreux avantages qu'apportent les CMA aux agroécosystèmes, cette association représente un coût carboné important pour la plante. C'est pourquoi dans les situations où les prélèvements d'eau ou de minéraux sont améliorés par l'association

symbiotique, l'évaluation du concept « bénéfico-coût » de la symbiose est utile. Cette dernière est profitable à la plante si elle produit plus de biomasse grâce aux fournitures en eau et en minéraux apportées par les CMA qu'elle n'en perdrait par le carbone et l'énergie fournis aux CMA ; et ce par rapport à une plante non-mycorhizée dans la même situation. En ce qui concerne l'eau, ce facteur est particulièrement limitant en termes de production dans les régions arides et semi-arides (Al-Karaki, 1998). Il a été démontré notamment pour la culture du blé, qu'une colonisation racinaire par les CMA augmente la matière sèche produite par la plante aussi bien sous des conditions de stress hydrique ou sans stress hydrique par rapport à une plante non-mycorhizée. Il est cependant intéressant de souligner le fait que l'augmentation de biomasse produite n'est pas proportionnelle à la colonisation racinaire par les CMA ; certains auteurs évoquent même l'absence de relation entre ces deux paramètres (Medeiros et al., 1994).

L'efficacité d'utilisation de l'eau ⁴ s'avère améliorée pour des plantes mycorhizées par rapport aux plantes non-mycorhizées. L'explication de ce phénomène provient de l'augmentation de la capacité des racines à absorber l'eau. Cette dernière est accrue par d'une part l'augmentation de volume de sol exploré par les hyphes et d'autre part grâce à la capacité des CMA à modifier la morphologie des racines, une augmentation de la biomasse racinaire propre aux plantes mycorhizées a été relatée (Al-Karaki, 1998) .

2.4 Les impacts de la gestion du système cultivé sur les CMA

2.4.1 Impact du travail du sol

(1) la diversité et la composition des communautés des CMA

Le travail du sol réduit significativement la densité (Kabir, O'Halloran, Fyles, et al., 1997) des hyphes métaboliquement actifs dans les sols. C'est pourquoi, les systèmes de cultures réduisant ou supprimant le travail du sol montrent une richesse plus importante en hyphes fongiques par rapport aux systèmes basés sur le labour. Les CMA, bien plus que les autres champignons saprophytes du sol, sont sensibles à toute perturbation du sol à cause de leur mode de vie biotrophe, en effet une perturbation risque de séparer les CMA du système racinaire de l'hôte ou encore de briser leur réseau hyphal. Malgré l'importance de leur hôte, il leur est possible de survivre pendant la période hivernale dépourvue de végétation en s'accrochant à des racines mortes. Leur taux de survie atteint alors jusqu'à 77%, par contre une minorité seulement survit après avoir subi les travaux d'automne et la séparation avec leur hôte. Dans ce dernier cas, leur taux de survie est limité à 34%. (Z. Kabir, O'Halloran, & Hamel, 1997b).

⁴ L'efficacité d'utilisation de l'eau est définie comme le rapport entre la masse de matière sèche produite (g) et la masse d'eau évapotranspirée (kg). (Al-Karaki, 1998)

Outre l'effet général du travail du sol sur la densité de l'ensemble des CMA, un impact plus spécifique quant à la diversité des espèces de champignons mycorhiziens, présents dans les sols cultivés, a été mis en exergue. En effet, certaines études ont pu montrer qu'une plus faible diversité d'espèces de champignons mycorhiziens à arbuscules résidait dans les champs travaillés conventionnellement par rapport aux champs cultivés en non-labour (Z. Kabir, O'Halloran, & Hamel, 1997a, 1997b) ou dans les sols forestiers (Daniell et al., 2001).

Hamel et al. (1994) ont pu mettre en évidence une diminution du nombre d'espèces du genre *Gigaspora* après trois ans de culture conventionnelle d'un champ initialement non cultivé, les champignons mycorhiziens à arbuscules du genre *Scutellospora* semblent être affectés au même titre que ceux du genre *Gigaspora* par le travail du sol, contrairement à ceux du genre *Glomus* qui persistent dans les sols cultivés (Chiffot, 2008). La persistance de ces CMA du genre *Glomus* est expliquée par leurs mécanismes de réparation. Premièrement, le développement d'un réseau mycélien dense est généré par des fusions entre branches du même ou de différents hyphes, ces connections entre hyphes sont dénommées « anastomoses ». Les champignons *Glomus* ont tendance à former plus d'anastomoses par rapport aux *Gigaspora* et *Scutellospora* suite à une perturbation du sol qui a interrompu le réseau mycélien.

Deuxièmement, ces derniers emploient des mécanismes de réparation plus spécifiques par rapport aux *Glomus* car les fragments d'hyphes se reconnecteront à d'autres faisant partie du même hyphes initial.

Et enfin, les *Glomus* se retrouvent à une plus grande profondeur du profil, et sont donc moins sujets aux perturbations de surface générées par les travaux du sol (Declerck, 2019). Cela signifie que le travail du sol s'accompagne d'une sélection d'espèces de champignons et d'une élimination d'autres. Cette sélection peut par exemple favoriser les espèces à croissance rapide au détriment des espèces parfois moins mutualistes et moins efficaces pour le prélèvement des nutriments (Johnson & Pflieger, 2015)

(2) Perturbation du prélèvement en phosphore

Le phosphore étant un élément peu disponible dans les sols, les champignons mycorhiziens à arbuscules, par leurs multiples mécanismes favorisent l'acquisition du phosphore pour la plante. Kabir et al. (1998) ; Mulligan et al. (1985) ont constaté que l'absorption du phosphore était supérieure pour des plantes menées en systèmes de non-labour par rapport à des systèmes conventionnels basé sur le labour. Après avoir exclu la densité apparente du sol, la température ou encore l'humidité du sol en tant que facteurs explicatifs du phénomène, leurs recherches se sont tournées vers l'étude des mycorhizes. En réalité, c'est la rupture du réseau hyphal extraracinaire causée par le travail du sol qui cause la diminution de l'absorption de phosphore. En effet, les systèmes agricoles excluant tout travail du sol permettent de conserver le réseau hyphal intact, la nouvelle culture peut dès les premiers

stades de son cycle se connecter au réseau initialement formé par la culture précédente afin de profiter de l'acquisition des nutriments par les mycorhizes. Une culture succédant à une éventuelle perturbation du sol ou à une plante non mycotrophe doit quant à elle reformer le réseau d'hyphes extra-racinaires, ne lui permettant pas de profiter d'une meilleure absorption de phosphore lors des premiers stades de la culture. Sur base de ces faits, il serait possible d'augmenter l'efficacité de la symbiose mycorhizienne afin d'améliorer les rendements en conditions de faibles intrants en phosphore ou dans le cas de faibles réserves du sol en cet élément, cependant cet objectif ne peut être atteint que si la cause de la perte de rendement connue en non-labour est éliminée.

(3) Effet de la profondeur de travail du sol

La densité la plus importante des CMA au sein du profil du sol se situe entre 0 et 15 cm, il est aisément compréhensible que tout travail du sol à cette même profondeur ait un impact majeur sur la viabilité de ces organismes fongiques ainsi que sur leur répartition (Kabir et al. 1998b). Un travail du sol en-dessous de 15 cm a pour effet non seulement de perturber le réseau mycélien mais également de diluer les spores et les hyphes extra-racinaires au niveau du lit de germination, car le volume de sol est mélangé.

2.4.2. L'utilisation de pesticides

Le terme pesticide est un terme qui regroupe sous son appellation les produits phytopharmaceutiques et les biocides.

Premièrement, les produits phytopharmaceutiques sont destinés à protéger les végétaux ou les produits végétaux contre tous les organismes nuisibles ou prévenir l'action de ceux-ci, ce terme reprend également les produits agissant sur les processus vitaux des plantes (ex : raccourcisseurs), ceux utilisés pour la conservation des végétaux, ceux utilisés pour détruire des végétaux, une partie des végétaux et enfin les produits destinés à freiner ou prévenir la croissance de végétaux indésirables. Les biocides regroupent les produits pesticides à usage domestique ou industriel (Legrève, 2019).

Les effets des pesticides sur les CMA sont extrêmement variables et dépendent d'une série de facteurs tels que le type de pesticide, le moment d'application, les espèces de CMA en présence, le taux d'application. Certains fongicides systémiques semblent affecter négativement la colonisation racinaire, le développement des spores ainsi que la viabilité des hyphes présents dans les sols, de ce fait ils impactent non seulement la composition des communautés de CMA mais également leurs bienfaits tels que l'agrégation des sols ou encore les prélèvements de nutriments. Alors que d'autres ne montrent aucun effet ou montrent même un effet positif sur la colonisation racinaire, le développement des hyphes et le nombre de spores formées (Jansa et al., 2006). Dans certain cas, ces observations

peuvent être expliquées dans un premier temps par l'élimination d'un pathogène et dans un deuxième temps par la recolonisation de l'espace par les CMA.

Les insecticides quant à eux n'ont que peu d'impacts directs sur les CMA, mais ont plutôt un effet indirect positif se produisant grâce à l'élimination de certains nématodes se nourrissant justement des CMA ou par l'amélioration de la santé de la plante hôte affectée initialement par la présence des nématodes.

Les herbicides, par l'élimination d'hôtes potentiels des CMA, jouent également un rôle dans la diminution de la composition des communautés de CMA (Chiffot, 2008).

2.4.3. Les rotations culturales

Les rotations culturales sont fondamentales pour casser le cycle des maladies, pour le contrôle des adventices, le maintien de la qualité des sols (matière organique) et enfin pour assurer une disponibilité optimale des nutriments tels que l'azote grâce à la fixation biologique (Jansa et al., 2006). Outre les nombreux avantages précités, ces successions culturales, contrairement aux monocultures, permettent de maintenir une diversité et une abondance dans les communautés de CMA. Il est avéré que des associations préférentielles existent entre les CMA et les plantes (Bever et al., 1996), ce fait expliquerait le maintien d'une diversité de champignons lors de l'inclusion de couverts végétaux multi-espèces ou de rotations dans l'itinéraire cultural.

Le maintien de cette diversité et de l'abondance des populations de symbiotes fongiques est essentiel afin d'exploiter au maximum les effets bénéfiques de la relation plante-champignon apportés aux cultures de rente. Boswell et al. (1998) ont pu montrer que la mise en place d'un couvert végétal a pu augmenter le potentiel infectieux des champignons mycorhiziens au niveau du sol par rapport à un sol nu, améliorant ainsi le rendement de la culture suivante (couvert : blé, culture suivante maïs).

Outre le fait d'avoir une rotation culturale incluant diverses espèces de plantes, le choix d'espèces mycotrophes est déterminant pour le maintien des avantages associés aux CMA. Les plantes mycotrophes sont des plantes dites capables de réaliser la symbiose mycorhizienne, au contraire des espèces non-mycotrophes (certaines chénopodiacées et brassicacées) qui en sont incapables ou en réalisent peu. Selon Balzergue (2012), les exsudats racinaires et le mucilage de l'apex des plantes mycotrophes contiennent des molécules capables de stimuler la croissance du champignon et sa ramification, la présence de ces molécules initie l'interaction plante-CMA. Pour les plantes non-mycotrophes qui n'ont pas ou peu besoin de l'association mycorhizienne pour se développer, les exsudats ne provoquent pas de tels effets chez le champignon. Arihara & Karasawa (2000) ont confirmé grâce à une expérimentation l'importance des plantes mycotrophes au sein des rotations en comparant le prélèvement en phosphore et la production de biomasse sèche dans les premiers stades de la culture de maïs. Cette dernière culture était soit incluse dans une

rotation avec du soja ou des tournesols soit dans une rotation maïs-colza (non- mycotrophe) ou maïs- sol nu. Il s'avère que le prélèvement en phosphore et la production de biomasse aérienne étaient plus élevés dans les rotations composées d'espèces mycotrophes.

2.4.4. La fertilisation

Afin d'augmenter la productivité des systèmes agricoles, des applications d'engrais à base de phosphore notamment sont utilisées. Bien que ces dernières puissent améliorer la nutrition végétale, elles sont également responsables de la diminution des associations mycorhiziennes dans les sols initialement pourvus de réserves en phosphore. L'application de phosphore n'a pas un effet à court terme sur sa disponibilité dans les sols, mais plutôt augmente sa concentration dans les tissus de la plante. En conséquence de cela, deux impacts sur les mycorhizes ont été recensés : une réduction d'une part, de la colonisation racinaire et d'autre part, de celle de la longueur du réseau hyphal extra-racinaire. Les bénéfiques provenant de la symbiose en termes de nutrition perdent donc leur intérêt (Grant et al., 2005).

Les applications, en phosphore très soluble, ont un impact négatif élevé sur les associations symbiotiques mycorhiziennes. Toutefois, les sources de phosphore moins solubles relâchant progressivement le fertilisant telles que les phosphates de roche, le fumier ou encore les résidus de plantes, empêchent la concentration en phosphore, dans les tissus, d'atteindre le niveau critique altérant la relation CMA-plante. Il a été également reconnu qu'une fourniture en d'autres éléments fertilisants tels que l'azote et le potassium, à de faibles niveaux de phosphore, favorisent la croissance végétale. Celle-ci, stimulée par l'application de l'engrais, va provoquer une dilution du phosphore au sein des tissus racinaires et une augmentation de l'exsudation d'hydrates de carbone ; ce phénomène est connu pour accroître la stimulation et la colonisation des CMA (Grant et al., 2005).

Sur le long terme, les fertilisations répétées en phosphore conduisent à une augmentation des réserves présentes au niveau du sol menant, *in fine*, à une augmentation de sa concentration au sein des tissus végétaux risquant de nuire à l'interaction champignon-plante. Contrairement au travail du sol qui impacte la diversité des espèces de champignons mycorhiziens, les applications en phosphore, sur le long terme, affectent plutôt la densité de spores ainsi que la colonisation racinaire. Au vu des impacts que les pratiques de fertilisation ont sur la symbiose mycorhizienne, des fournitures adéquates en phosphore sont à adapter suivant l'espèce de la plante, son accessibilité au phosphore disponible et sa réponse à la fertilisation (Grant et al., 2005).

2.5 Effet spécifique des CMA sur la culture de la pomme-de-terre

2.5.1 Résistance contre les pathogènes fongiques

Parmi les ennemis de la culture de la pomme-de-terre, le mildiou causé par l'agent fongique *Phytophthora infestans* est apparu discrètement en Europe dès le 16 et 17 ème siècle avec les

premiers transports de tubercules. Suite à l'extension phénoménale de cette culture dans des régions de l'Europe telles qu'en Irlande, Silésie et même en France au 19^{ème} siècle, cet essor a rendu vulnérable la culture de pomme de terre aux épidémies et notamment à celle du mildiou (Rousselle et al., 1996). C'est une des maladies les plus dévastatrices en culture de pomme de terre, les coûts de contrôle et les pertes s'élèvent à 1 milliard d'euros en Europe. La culture nécessite une utilisation importante de pesticides ce qui est coûteux en temps, en argent, et s'accompagne de conséquences négatives sur l'environnement.

Une nouvelle vision a émergé ces dernières années pour limiter le recours aux pesticides : c'est la « gestion intégrée des pestes ». Cette dernière se base sur l'épandage d'extraits de plantes ou encore l'utilisation d'agents de contrôle biologique. Une expérimentation a été menée par Gallou et al. (2011) consistant à analyser les éventuels bienfaits d'une colonisation mycorhizienne sur des plantes de pommes-de-terre pour la lutte contre le mildiou. Durant cette étude, sous des conditions hautement contrôlées, une inoculation de plantes de pommes-de-terre par des CMA a été réalisée, après 12 jours d'établissement de cette symbiose, ils ont procédé à une nouvelle inoculation sur les feuilles à base de *Phytophthora infestans*. Il a été montré que le CMA (*Glomus sp.*) qui a colonisé les plantes a permis de déclencher une résistance systémique dans les premiers stades de l'infection du pathogène (lorsque le pathogène est dans sa phase biotrophe) en induisant la formation de protéines PR1 et PR2 (voir section 2.3.3) impliquées dans la résistance contre les champignons pathogènes.

2.5.2 Effets positifs sur les rendements

La pomme de terre est une plante exigeante en phosphore, cette caractéristique lui permet de répondre favorablement à l'établissement d'une symbiose mycorhizienne. En effet, Douds et al. (2007) ont montré un effet favorable de l'inoculation des pommes de terre par un mélange de CMA provenant du commerce ou produit sur la ferme, sur les rendements en tubercules malgré des teneurs élevées en phosphore dans le sol. Cependant, des réponses différentes de la pomme de terre à l'inoculation par les CMA peuvent être rencontrées notamment dues au cultivar, à l'inoculum, la saison, la dépendance mycorhizienne du cultivar, et puis suivant des facteurs abiotiques tels que la teneur en phosphore dans les sols. Comme mentionné dans la section 2.4.4, lorsque les teneurs en phosphore dans le sol augmentent, le bénéfice potentiel de croissance fourni par le CMA diminue. Dans ce cas, malgré les teneurs élevées en phosphore, des gains de rendement en lien avec la symbiose mycorhizienne ont été mis en avant. Ceci est expliqué par le contact précoce entre les racines de tubercules (lors de la plantation, l'inoculum a été déposé sous le plant de pomme de terre) et les propagules ainsi qu'une température froide qui a limité le prélèvement en phosphore. Black & Tinker (1977) ont quant à eux relevé une colonisation plus faible des racines de pommes de terre présentes dans les parcelles fertilisées avec du phosphore. L'augmentation de rendement obtenue a été plus faible en réponse à la fertilisation phosphorée dans les parcelles présentant une inoculation des racines par les CMA.

2.5.3 Interaction spécifique plante-champignon

Les associations mycorhiziennes sont généralement considérées comme étant non-spécifiques. Une espèce de CMA est capable de coloniser des racines issues de plantes hôtes différentes, il en est de même pour une racine qui peut être colonisée par une multitude d'espèces de CMA. Il s'avère toutefois, que des associations préférentielles existent entre les deux partenaires de la symbiose (Cesaro et al., 2008). Dans le cas de la pomme de terre, Cesaro et al. (2008) ont démontré que les pratiques culturales ainsi que les espèces de plantes sont capables d'exercer une pression sélective pouvant mener à une interaction spécifique entre un CMA et une plante, dans ce cas-ci ils ont mis en évidence une interaction entre *Glomus intraradices* et les plantes de pommes de terre.

CHAPITRE 3 : LA CULTURE DE LA POMME-DE-TERRE

1. Introduction

La première région ayant accueilli la culture de la pomme de terre (*Solanum tuberosum*) était celle des Andes péruviennes. Ces plantes présentaient à cette époque un goût souvent amer ne plaidant pas en faveur de leur développement. Outre ce goût déplaisant, des quantités plus ou moins variables en alcaloïdes toxiques prenaient part dans la constitution de ces tubercules (Bertin, 2019; Rousselle et al., 1996). Le premier pas dans la domestication de cette plante fut la conjonction de plusieurs éléments, premièrement une sélection et une reconnaissance de clones moins toxiques et moins amers, et deuxièmement l'émergence de technologies éliminant amertume et toxicité. Les espèces de pomme de terre sauvages sont nombreuses et sont surtout diploïdes. Des espèces auto- et allopolyploïdes sont apparues : triploïdes, tétraploïdes, pentaploïdes, plus attractives que les plantes diploïdes du point de vue de la grosseur et de la qualité des tubercules. Ce sont celles-ci, principalement les tétraploïdes, que les Européens découvrirent en premier lieu. Ces plantes sont autotétraploïdes, et parmi les plantes cultivées une espèce est prédominante, l'espèce *Solanum tuberosum*, cette dernière est subdivisée en deux sous-espèces *Solanum tuberosum* spp. *tuberosum* et *Solanum tuberosum* spp. *andigena*.

Leur arrivée en Europe, un peu avant la fin du 16^{ème} siècle, a été effectuée par deux endroits, l'Espagne en premier lieu puis un peu après par les Iles Britanniques. Le développement généralisé de cette culture ne survint réellement que vers le 18^{ème} siècle pour des raisons culturelles, des raisons biologiques et socio-économiques. En effet, les plantes provenant des Andes étaient de jours courts et effectuaient leur tubérisation en octobre- novembre, il a fallu 2 siècles depuis leur arrivée sur le sol européen, pour que la sélection végétale appliquée sur ces plantes soit efficiente. L'arrivée de tubercules de jours longs provenant du Chili a ensuite facilité la culture. Ensuite, le système agraire de la première moitié du 18^{ème} siècle en Europe du Nord était basé sur une rotation triennale ne permettant pas l'inclusion d'une nouvelle culture, il a fallu attendre la Révolution française pour l'arrivée d'un nouveau système agraire revoyant la rotation culturale, le travail du sol, qui ont permis la culture généralisée de la pomme de terre, cela a été également possible grâce à l'intervention de l'illustre Antoine-Augustin Parmentier qui a promu cette culture auprès de l'ensemble des rangs sociaux (Rousselle et al., 1996).

Déjà à partir de la fin du 18^{ème} siècle, les premiers fléaux de la pomme-de-terre sont apparus, des dégénérescences ont été observées sur les pommes de terre dû à l'accumulation de virus. Début du 19^{ème} siècle, avec les progrès dans la navigation, la longueur des trajets fut diminuée et donc les pommes de terre infectées par le mildiou arrivaient encore fraîches en Europe, c'est alors que la maladie a pu s'étendre. Fin du 19^{ème} siècle, le doryphore est apparu en Europe en provenance des Etats -Unis et s'est étendu partout sur le continent notamment à l'aide des vents dominants (Rousselle et al., 1996).

Malgré ces différents problèmes, l'intérêt pour cette culture n'a cessé d'augmenter jusqu'à nos jours en Europe et notamment en Belgique. En effet, la surface emblavée pour cette culture ne cesse d'augmenter d'années en années. Selon les chiffres rapportés par StatBel (StatBel, 2018), la surface octroyée pour cette dernière est passée de 65844 hectares en 2000 à 92854 hectares en 2017 soit une augmentation de 41% en 17 ans. En termes de production, malgré une légère baisse en 2015, le nombre de tonnes produites est passé de 2 455 777 tonnes en 1998 à 4 416 655 en 2017. Cette culture étant sensible aux aléas climatiques favorisant les maladies fongiques notamment, il n'est pas étonnant de s'apercevoir que les rendements soient fluctuants, ceux-ci ont varié de 387.8 quintaux à 526.4 quintaux entre les années 2012 et 2017.

2.Caractéristiques favorables du sol pour l'implantation de la pomme-de-terre
La pomme de terre possède un système racinaire superficiel, en conséquence de cela, c'est une plante fort exigeante en eau surtout lors de la formation des fleurs et de la tubérisation. Outre son exigence au niveau hydrique, elle est exigeante en éléments nutritifs. En ce qui concerne les caractéristiques chimiques du sol, un pH de 6 à 7 est recommandé. Le sol doit être préférentiellement léger à mi-lourd et profond évitant les sols caillouteux fort drainants et créant des obstacles significatifs lors de la phase importante de tubérisation (FIBL, 2011).

La pertinence de l'implantation de la pomme de terre sur une parcelle doit se décider non seulement sur base des caractéristiques physiques et chimiques du sol mais aussi sur base de l'historique parcellaire. Tout d'abord, deux cultures de pommes de terre sur la même parcelle doivent être séparées de quatre à cinq ans (Chambre d'agriculture région Nord- Pas de Calais, 2013) afin d'éviter les appauvrissements des horizons superficiels en nutriments et éviter la prolifération d'ennemis de la culture présents au niveau du sol.

Le précédent cultural est également important. En termes de « qualité du précédent », les céréales suivies d'engrais verts incluant des trèfles seraient très favorables à l'implantation de la pomme de terre (Arvalis, 2011; FIBL, 2011). Ensuite viennent les cultures de légumes avec ou sans graines qui dans la mesure du possible sont suivies d'engrais verts, une attention toute particulière doit être portée à l'éventuelle compaction provoquée par les engins de récolte. Et enfin, les prairies permanentes et le maïs seraient les précédents les

moins favorables. Les prairies temporaires sont quant à elles à éviter à cause des risques accrus de rhizoctone, de vers fils de fer, limace.

3. Le travail du sol conventionnel en vue de la culture de la pomme de terre

Il existe de nombreux itinéraires de travail du sol possibles avant l'implantation de la pomme de terre, variant suivant la texture du sol de la parcelle, des conditions météorologiques, les objectifs de l'agriculteur... La règle générale reste malgré tout que la culture de pomme de terre requiert un ameublissement profond et celui-ci est généralement réalisé par le labour. Arvalis (2011) promeut un labour d'hiver dressé pour les terrains argileux et un labour de printemps quelques jours avant la plantation pour les sols légers et battants. Ensuite, juste avant la plantation, des outils de reprise du labour vont devoir assurer deux fonctions. L'une est un émiettement suffisant afin de former des buttes juste avant la plantation pour qu'un développement optimal des tubercules s'opère et que l'arrachage soit facilité. L'autre, réaliser un travail optimal en un nombre de passages limités tout en évitant le tassement en profondeur. Ces outils varient également suivant la texture du sol (tab.2), pour les sols argileux des outils animés sont utilisés, les sols légers nécessitent quant à eux seulement des outils traînés.

Tableau 2 : Choix indicatif des outils de travail du sol suivant les caractéristiques du sol (Arvalis, 2011)

Caractéristiques du sol	Conseils
Sol léger ou labour bien évolué	2 passages croisés d'outil à dents vibrantes
Sol plus argileux ou labour mal évolué	1 passage de herse alternative ou rotative
Sol très argileux (> 25 %)	1 passage de cultivateur rotatif à axe horizontal (fraise)

In fine, le but est d'obtenir un profil de sol similaire à l'illustration ci-dessous composé de 3 zones (fig.4.).

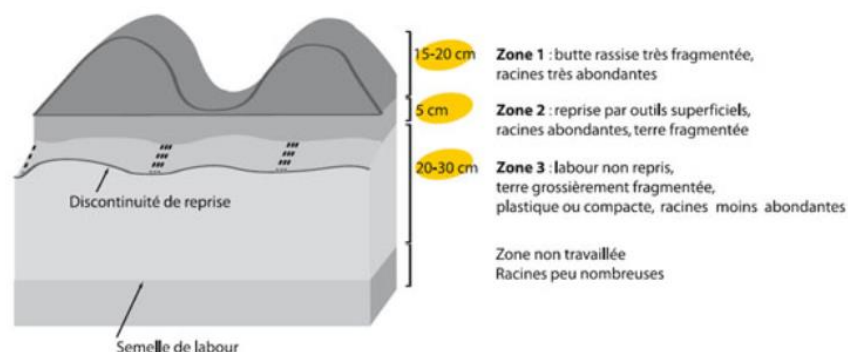


Figure 4: Profil du sol recherché en pomme-de-terre (Arvalis, 2011)

Dans certains cas particuliers tels que les sols caillouteux, un travail du sol supplémentaire va être réalisé, il s'agit de la technique d'épierrage-andainage et tamisage. La technique consiste en l'évacuation de pierres et de mottes par la réalisation de billons qui seront

ensuite tamisés à l'aide d'une machine spécifique, les mottes et pierres seront évacuées latéralement de part et d'autre du billon préalablement formé.

La profondeur de plantation avoisine dans la plupart des cas les 25 cm sous la surface de la butte, parfois la profondeur peut-être plus importante en sol léger afin de bénéficier de l'humidité présente dans le fond du profil, cependant le tubercule doit se situer au-dessus de la zone 3 (fig.4). L'écartement des buttes varie de 75 à 90 cm, l'écartement à 75 cm permet de limiter les compétitions entre plantes voisines, fournissant ainsi des calibres de pommes de terre homogènes. Un écartement de 75 à 80 cm va produire en grande partie des tubercules de calibres moyens et celui à 90 cm, des calibres gros à très gros. La densité de plantation au-delà d'un seuil minimal influe très faiblement le rendement, mais plutôt les calibres. L'écartement des buttes et la densité de plantation varient donc en fonction du débouché choisi par l'agriculteur.

Le buttage se réalise soit en combinaison avec la plantation, dans ce cas, le sol doit être ameubli en profondeur, soit il peut être réalisé une dizaine de jours après la plantation.

4. Les effets négatifs du travail conventionnel en pommes de terre

Comme mentionné plus haut, la culture de pomme de terre requiert un ameublissement profond du sol. La technique traditionnellement utilisée pour la réalisation de cet ameublissement profond est le labour. Cette pratique présente néanmoins plusieurs désavantages (Section 3.2.1 Chapitre 1 : le travail du sol). Parmi ces derniers, la formation d'une semelle de labour est une conséquence majeure de la réalisation d'un labour en conditions humides.

Ensuite, la réalisation des reprises de labour printanières, lorsque le fond du profil du sol n'est pas totalement ressuyé est propice aux lissages et contribuent également à la semelle de labour. De plus, lors de la préparation printanière préliminaire à la plantation, les horizons de surface sont pulvérisés en petits agrégats afin de générer un milieu favorable pour la plantation, le développement des tubercules et enfin pour faciliter la récolte mécanisée. Cependant, cet affinage intensif mène à une augmentation de la sensibilité du sol à l'érosion hydrique et au lessivage des nitrates (FAO, 2008). Les organismes telluriques dont les champignons mycorhiziens à arbuscules sont aussi impactés négativement en raison du bouleversement important du sol. Galvez et al. (2001) ont mis en évidence un impact négatif du travail du sol sur la colonisation des plantes hôtes par les CMA.

Couplé à cet affinage du sol, la formation des buttes spécifiques à la culture de la pomme de terre favorisent d'autant plus le phénomène d'érosion hydrique. De fait, le buttage canalise l'eau et diminue la surface d'infiltration favorisant les ruissellements inter-buttes. La formation des buttes est aussi régulièrement effectuée dans le sens de la pente pour éviter le dévers des machines. Enfin, la couverture tardive du sol (juin) et brève (deux à quatre

mois) expose le sol fortement affiné aux multiples actions du climat le rendant sensible lors d'abondantes précipitations (FIWAP, 2010).

Afin de limiter les impacts négatifs sur le sol de telles pratiques, de nouvelles techniques basées d'une part sur l'abandon du labour et d'autre part sur la couverture des sols ont émergé. Celles-ci sont abordées dans la section suivante.

5. Le travail du sol en non-labour en vue de la culture de pomme-de-terre

Cette section reprend, outre une introduction comprenant des exemples innovants menés par des cultivateurs de pommes-de-terre, un ensemble d'expérimentations scientifiques qui ont permis d'analyser les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des sols dans les systèmes de non-labour incluant la culture de la pomme de terre. Plusieurs parties seront également consacrées aux conséquences des travaux du sol réduits sur la culture de la pomme de terre elle-même.

5.1 Exemples introductifs de systèmes innovants en cultures de pomme de terre

Dans le monde entier, des agriculteurs innovent afin d'améliorer leurs pratiques en culture de pommes de terre afin qu'elles soient plus en accord avec le respect de l'environnement. Un premier exemple est le cas de Brendon Rockey, un cultivateur de pommes de terre dans le Colorado qui a repensé fondamentalement ses pratiques culturales. Il qualifie son système de culture comme étant « biotique » dans lequel il prône la diversité et la résilience. Bien que contradictoire avec ce qui a été mentionné dans la section 2 chapitre 3, sa rotation est biennale. Elle est composée d'une année de couverts végétaux fourragers (incluant de nombreuses espèces). Ces derniers assurent un retour de fertilité important par les déchets végétaux restants, par les apports organiques des vaches qui les pâturent et enfin par les amendements que Brendon Rockey réalise à base de compost. La seconde année est dédiée à la culture de la pomme de terre. Les particularités de cette dernière sont d'une part l'utilisation du non-labour pour la préparation du sol et d'autre part l'association de la culture de tubercules avec des plantes compagnes ainsi que des bandes fleuries. Bien que sa rotation soit courte en termes de temps, elle est par contre très étendue en termes d'espèces végétales. Chaque année, une multitude d'espèces colonisent en même temps ses parcelles aussi bien lors des années consacrées aux cultures fourragères que les années consacrées à la culture de la pomme de terre. La rotation de Brendon Rockey n'est donc pas comparable avec la rotation « classique » comme mentionnée section 2 chapitre 3. Même s'il n'est pas certifié en agriculture biologique, il évite l'utilisation des pesticides qu'il remplace par un ensemble de mesures issues du vivant ; Brendon Rockey mentionne la prolifération d'auxiliaires des cultures par les bandes fleuries, les couverts et les plantes compagnes, le maintien d'une population de microorganismes au niveau du sol favorisant la structure du sol. La gestion des mauvaises herbes est également mécanique (Rockey, 2014).

Un autre exemple provient d'Allemagne. Dans les années 1990, un petit nombre d'agriculteurs se tracassaient des phénomènes d'érosion sévissant dans leurs champs de pommes de terre. C'est pourquoi, ils ont mis au point une technique permettant de maintenir le sol plus longtemps couvert, avant la plantation printanière des pommes de terre (Leforestier et al., 2018).

C'est la technique des « buttes d'automne » (fig. 5), après la récolte de la céréale, une série de déchaumages à une profondeur d'une vingtaine de centimètres sont réalisés avant la formation des buttes. Le passage d'une butteuse munie d'une cape est ensuite réalisé préalablement au semis de l'engrais verts à la volée. Le couvert se développe ainsi pendant la fin de l'été sur les buttes formées. La plantation est ensuite effectuée au printemps selon deux méthodes. La première consiste à planter les tubercules directement dans la butte à l'aide d'une planteuse modifiée. La deuxième nécessite un travail superficiel du sol (herse rotative) avant l'étape finale de plantation. En Belgique, la technique de la butte d'automne est exploitée et développée par l'asbl GREENOTEC depuis 2007 en testant les impacts de diverses modalités de travail du sol incluant la technique des buttes d'automne sur divers paramètres tels que le rendement, l'érosion, la tare terre...

Dans le cas d'une préparation du sol conventionnelle, un engrais vert aurait été implanté suite aux déchaumages et puis labouré en hiver. La formation des buttes aurait été réalisée au moment de la plantation des tubercules au printemps.



Figure 5: Succession des travaux du sol et plantation de pommes -de- terre dans un itinéraire basé sur les buttes d'automne et plantation directe des tubercules. Gauche : déchaumage et semis d'engrais vert; Milieu: buttage; Droite: Plantation directe dans les buttes (Leforestier et al., 2018)

5.2. Vie biologique en lien avec de telles pratiques

La biodiversité et l'abondance de certains organismes telluriques est influencée positivement par la diminution du travail du sol et aussi par la présence de résidus en surface (Carter et al., 2005). C'est le cas pour les populations de microarthropodes, qui sont sensibles à toute perturbation du sol, mais aussi aux facteurs environnementaux et abiotiques ayant une action sur la teneur en humidité du sol et sa température. Ce sont des bio indicateurs intéressants dans l'analyse des effets du travail du sol et pour les effets des

pesticides sur le sol. La culture de la pomme de terre, traditionnellement forte demandeuse en pesticides et en travail du sol, a fait l'objet d'une analyse poussée en ce qui concerne les populations de collemboles et acariens. Les recherches suggèrent (Carter et al., 2005) que la diversité et l'équilibre des populations en acariens et collemboles dépendent en grande partie de la longueur de la rotation culturale appliquée à la parcelle. L'abondance de ces derniers au sein de chacune des familles et des sous-ordres serait quant à elle en lien avec le travail du sol.

Dans une étude ayant pour objet d'analyser l'influence du travail du sol dans un système de culture biologique de pommes de terre, Drakopoulos et al. (2018) ont recensé une augmentation de la biomasse et du nombre de vers de terre de petite taille (<500g). Celle-ci était de deux à quatre fois supérieure par rapport à un itinéraire basé sur le labour selon trois prélèvements à 4, 8 et 13 semaines après la plantation des tubercules. Pour les vers de terre de grandes tailles (>500g) seulement le premier prélèvement montre des quantités plus importantes de vers de terre. Briones & Schmidt (2017) confirment également ces dires en ayant observé un écart significatif en termes d'abondance et biomasse de vers de terre sous des systèmes perturbant moins le sol par rapport à des systèmes retournant les horizons du sol.

5.3. Disponibilité en éléments minéraux

5.3.1 Stratification des horizons

En système de non-labour, le mélange des horizons est réalisé de manière moins intensive que lors de l'utilisation du labour dans le cadre d'une agriculture conventionnelle (Carter, Peters, et al., 2009). En effet, D'Haene et al. (2009) ont remarqué une stratification du stock de carbone organique et de la biomasse microbienne sur les cinq premiers centimètres du sol en travail du sol réduit par rapport au travail du sol conventionnel. Cette constatation a été validée pour une large gamme de cultures. Le travail moins intensif du sol mène également à une incorporation de la fertilisation moins efficace. C'est ce qu'ont constaté Carter, Peters, et al. (2009), des quantités plus importantes de phosphore et de potassium ont été extraites sur une profondeur de 0 à 10 cm lorsque le travail du sol a été réduit en culture de pommes de terre. Cependant, aucune différence du point de vue de la composition minérale des tubercules n'a été détectée selon les pratiques. Cet excès de phosphore et de potasse n'a donc aucun effet positif. Une amélioration dans la distribution des amendements doit donc être réalisée afin d'éviter tout risque de lessivage (Carter, Peters, et al., 2009).

5.3.2 Température et minéralisation

Lors d'un essai de travail du sol réduit en pommes de terre en 2017, les membres de l'asbl GREENOTEC ont observé dès la plantation, un écart de température important de 2,5°C entre la modalité « SD » (détails des modalités fig.6) qui a subi le moins de travail du sol et les autres modalités (GREENOTEC, 2017). Cet écart (fig.6) s'est progressivement réduit au cours des deux mois qui ont suivi, puis a complètement été effacé lorsque la biomasse aérienne a couvert l'ensemble des buttes.

D'après GREENOTEC, cet écart de température a mené à un ralentissement de la minéralisation de la matière organique et donc un relargage ralenti des éléments N, P₂O₅ et K₂O. Ce phénomène a impacté la nutrition minérale des plantes de pommes de terre. En conséquence de l'altération de la nutrition minérale, la taille, le nombre de tubercules ainsi que la biomasse aérienne des plantes ont été réduits.

Des études menées au Danemark et en Finlande (Rasmussen, 1999) ont également montré des écarts de température du sol entre des modalités de labour et de semis-direct. Ces derniers allaient de 0.3 à 1°C pour les 5 à 10 cm premiers centimètres de profondeur, de la période du semis jusqu'à une semaine après la germination. L'explication provient du contenu en eau supérieur du sol et de la présence de résidus en surfaces qui limitent l'évaporation. Celle-ci est d'autant plus faible que les résidus végétaux sont de couleur blanche, ce qui agit sur l'albedo, donc sur la température du sol. Le réchauffement du sol étant fortement corrélé avec le contenu en eau, chaque pourcentage de contenu en eau en plus diminue de 0.3 à 0.5°C la température du sol.

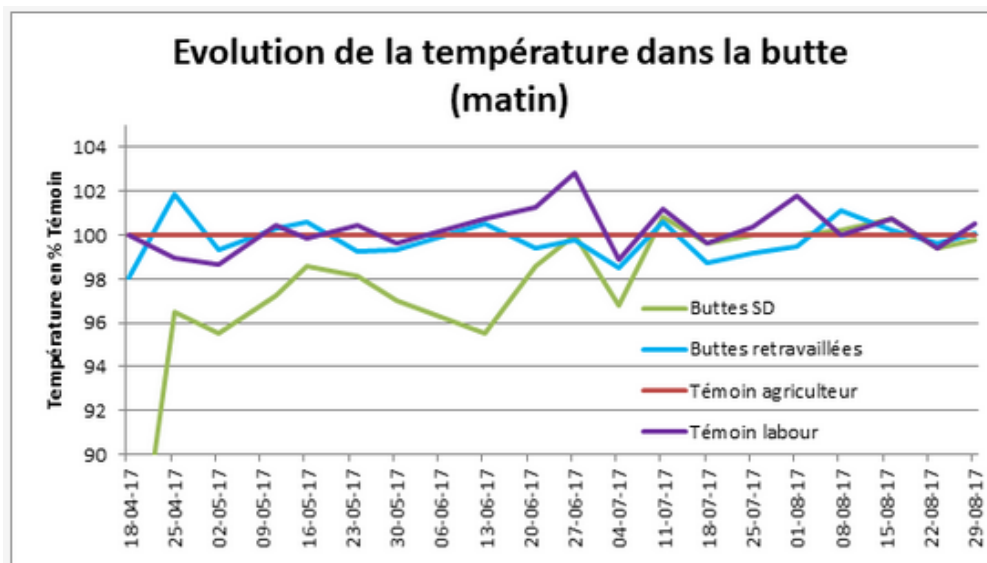


Figure 6: Evolution de la température dans la butte en pourcentage du témoin (Témoin agriculteur). Buttes SD: formation des buttes fin été et plantation directe dans les buttes au printemps; Buttes retravaillées: formation des buttes en été et reprise superficielle avec la herse rotative avant la plantation; Témoin agriculteur : non-labour et reprise au printemps avant plantation ; Témoin labour : labour d'hiver et reprise au printemps avant plantation (GREENOTEC, 2017).

5.4. Pathogènes du sol

Dans le cadre de la gestion des pathogènes en grandes cultures, plusieurs mesures peuvent être prises, parmi celles-ci la mise en place de rotations culturales est courante. Ses multiples bienfaits ont été énumérés à la section 2.4.3 Chapitre 2 (Jansa et al., 2006). Larkin et al. (2011) ont voulu mettre en évidence l'effet des rotations culturales et de la réduction du travail du sol en culture de pommes de terre sur la gestion des pathogènes.

Larkin et al. (2011) n'ont pas identifié d'effet positif à court terme de la limitation du travail du sol sur les pathogènes associés à la culture de la pomme de terre. Bien que les modalités de travail du sol réduit aient permis une préservation des mycorhizes, celles-ci n'ont pas eu d'impact notable sur la gestion des pathogènes (Chapitre 2 section 2.3.2). De leur côté, Carter, Peters, et al. (2009) ont détecté la présence du pathogène fongique *Streptomyces spp* agent causal de la galle commune, spécifiquement dans les parcelles soumises à un travail du sol réduit. Toutefois, aucune corrélation n'a pu être établie entre le pathogène et le travail du sol dans cette étude.

D'autres ravageurs parfois rencontrés en pomme de terre sont les nématodes. Dans le cadre de l'expérimentation de Larkin et al. (2011), les chiffres en termes de densités de population de nématodes phytopathogènes (*Pratylenchus penetrans*) n'ont pas montré de différences significatives, selon la modalité de travail du sol. D'autres familles de nématodes telles que les *Rhabditidae* sont, pour leur part, bénéfiques pour la culture de tubercules. En effet, ils influencent le cycle des nutriments et peuvent améliorer la fertilité des sols. Le travail du sol réduit a dans ce cas-ci eu un rôle bénéfique sur la préservation de ces nématodes par rapport au travail conventionnel.

Le facteur rotation culturale a quant à lui montré une certaine efficacité dans la lutte contre les pathogènes de la culture de la pomme de terre (Carter, Sanderson, et al., 2009; Larkin et al., 2011). Effectivement, un itinéraire cultural basé sur une rotation longue incluant des couvertures végétales et une diversité importante de cultures a permis de diminuer drastiquement les maladies telles que la galle commune et le rhizoctone brun dans la culture de la pomme de terre.

5.5. Stabilité structurale du sol

La structure du sol est particulièrement influente sur la capacité du sol à permettre une croissance correcte des végétaux, à réaliser le cycle du carbone, à la circulation et enfin à la rétention de l'eau (Bartlová et al., 2016). Les techniques utilisées pour évaluer la structure du sol sont généralement la distribution de la taille des agrégats ou la stabilité des agrégats à l'eau. Selon Rasmussen (1999), des agrégats stables face à l'eau présents dans les premiers mm de la surface du sol permettent un bon établissement de la semence et une germination correcte car ils réduisent la croûte de battance et l'érosion. Ceci est possible grâce aux

échanges d'air entre le sol et l'atmosphère et à une meilleure infiltration de l'eau dans le sol. Dans les systèmes non-labourés, la proportion d'agrégats stables en surface du sol (25-30 mm) est plus importante par rapport aux sols labourés. Carter, Peters, et al. (2009) ont mené une étude sur l'impact des rotations culturales et des travaux du sol sur la culture de la pomme de terre. Ils ont très vite remarqué deux phénomènes.

Par rapport au travail du sol conventionnel basé sur le labour, le travail du sol réduit (destruction chimique du couvert et passage au chisel printanier à 15 cm de profondeur) fournit une proportion plus élevée de grands agrégats stables (1mm à 4,8mm) par rapport aux petits agrégats stables (<0.5mm) (fig.7). La même constatation peut être tirée si l'on compare une rotation de trois ans (orge-trèfle-pomme de terre) par rapport à une rotation plus courte (orge-pomme de terre).

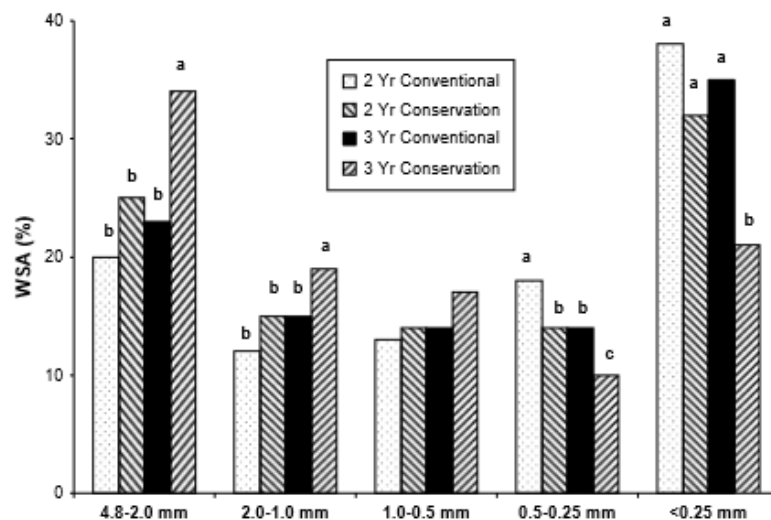


Figure 7: Comparaison de la proportion d'agrégats stables (WSA) en fonction de leur taille (mm) à une profondeur de 0 à 10 cm en fonction de la longueur de la rotation et du travail du sol effectué (Carter, Peters, et al., 2009)

5.6. Densité apparente

La densité apparente (USDA, 2019) d'un sol représente la masse de sol sec par volume, elle est exprimée en g/cm^3 . Elle est un indicateur de la compaction du sol. Ce paramètre du sol affecte la porosité, le contenu en eau disponible, le développement racinaire, la disponibilité des nutriments et enfin l'activité des microorganismes telluriques.

Carter, Peters, et al. (2009) ; Ekeberg (1996) ; Mundy et al. (1999) ont constaté une augmentation de cette densité apparente suivant la réduction du travail du sol en culture de pomme de terre. Grimes & Bishop (1971) ont d'ailleurs découvert que la densité apparente du sol à 20 cm de profondeur est négativement corrélée avec le rendement en pomme de terre.

Mundy et al. (1999) expliquent qu'une densité apparente plus élevée conduit à augmentation de la difficulté des plantes à se développer, ce phénomène se traduit ensuite par une dépression de rendement.

5.7 Humidité du sol

Les pratiques culturales influent sur le contenu en eau des sols. Dans une étude menée par Mundy et al. (1999), une meilleure rétention en eau du sol a été constatée dans les modalités de travail du sol réduit en début de saison, par rapport à un travail du sol conventionnel basé sur le labour.

Ekeberg (1996) a constaté le même phénomène (fig.8), en comparant différentes modalités de travail du sol. L'une consiste en un labour d'automne et des reprises de labour au printemps (Tr1), la deuxième est un labour de printemps suivi de reprise de labour (Tr2), la troisième en un passage de chisel automnale suivi d'une reprise au printemps (Tr3) et enfin un unique travail du sol printanier (Tr4). Ce dernier (Tr4) permet avant et après la plantation de maintenir un contenu en eau significativement supérieur à la technique (Tr1). Alors que les contenus en eau des techniques Tr2 et Tr3 semblaient proches de la technique Tr4 avant les travaux du sols printaniers, après la plantation, Tr2 et Tr3 sont inférieures à Tr4 en termes de contenus en eau.

(Mundy et al., 1999 ; Rasmussen, 1999) expliquent ces observations par une meilleure rétention de l'humidité par les résidus du couvert végétal qui empêchent l'évaporation. D'autres hypothèses peuvent être également formulées telles qu'un volume de macropores plus faible et une présence importante de pores retenant l'eau dans les systèmes non-labourés.

Rasmussen (1999) précise cependant que malgré une meilleure rétention en eau en surface (0-10 cm) par les travaux de non-labour, un contenu supérieur en eau est généralement observé pour les modalités labourées en profondeur (10-20 cm), ce qui n'a pas été recensé dans l'expérimentation de Ekeberg (1996).

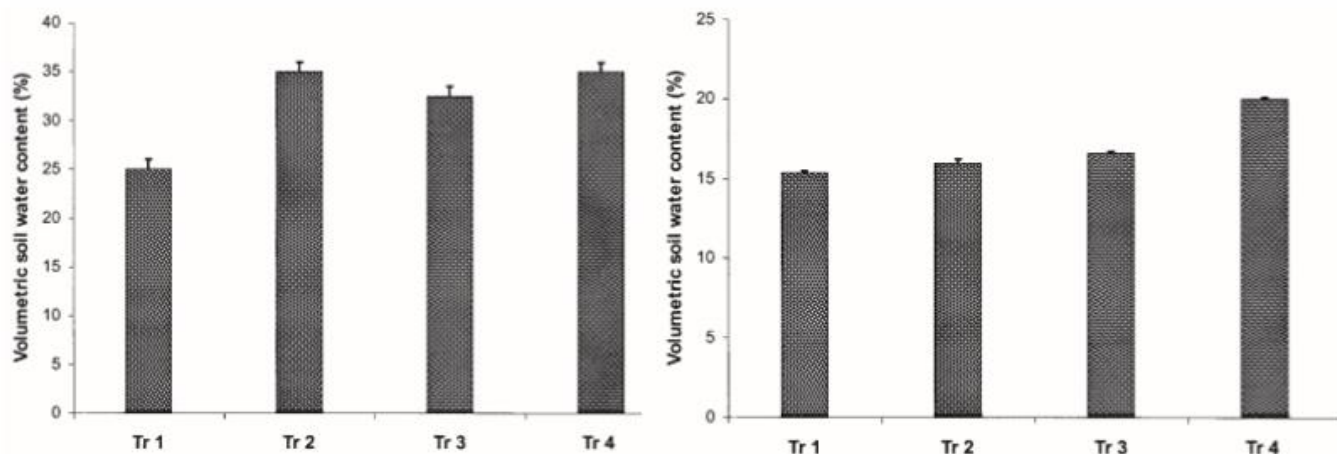


Figure 8: Contenu volumétrique en eau du sol selon diverses modalités de travail du sol (gauche: mesures de 0 à 15 cm avant le travail du sol printanier; droite: mesures de 0 à 30 cm après la plantation maïs avant le buttage) (Tr1: Labour d'automne et reprise de labour au printemps; Tr2: Labour de printemps et reprise de labour; Tr3: Passage automnale au chisel et reprise au printemps ; Tr4 : Travail du sol printanier au chisel uniquement) . Barres verticales= erreur standard de la moyenne(Carter et al., 2005)

5.8. Résistance à la pénétration

La résistance à la pénétration est considérée comme un indicateur important de la compaction des sols, du développement racinaire, de l'infiltration de l'eau dans les sols, de la performance des tracteurs et des outils de travail du sol (Kumar et al., 2012). Il existe une série de facteurs dont dépend la résistance à la pénétration : la profondeur, l'humidité du sol, les paramètres texturaux du sol, ainsi que sa densité apparente.

Les types de travaux du sol influencent aussi la résistance à la pénétration. Il a été constaté que dans les sols non labourés par rapport aux sols menés selon un itinéraire conventionnel, les valeurs de résistance à la pénétration sont généralement plus élevées dans la couche supérieure du profil.

Une expérimentation menée par Carter et al. (2005) compare la résistance à la pénétration sur différents sites. Ceux-ci présentent chacun une texture du sol et une rotation culturale semblable. Sur ces sites, différentes modalités de travail du sol ont été testées. En ce qui concerne les modalités de travail du sol, l'une consiste en un labour d'automne et des reprises de labour au printemps (Tr1), la deuxième est un labour de printemps suivi de reprise de labour (Tr2), la troisième en un passage de chisel automnale suivi d'une reprise au printemps (Tr3) et enfin un unique travail du sol printanier (Tr4). Malgré les ressemblances parcelles (texture et rotations), les résultats sont contradictoires. Sur le site 1, la résistance à la pénétration de la modalité labourée (Tr1) est plus élevée par rapport à la modalité non-labourée (Tr4) jusque 25 cm. Quant au site 2, la parcelle soumise à l'unique travail du sol printanier (Tr4 sur fig.9(b)) présente une résistance à la pénétration plus élevée que les autres modalités, et ce jusqu'à presque 30 cm. Les observations du site 2 sont plus en accord avec les constatations mentionnées plus haut concernant la relation non labour-

résistance à la pénétration élevée (Kumar et al., 2012). Cette expérimentation illustre outre l'effet du travail du sol, les variabilités parcellaires qui peuvent survenir.

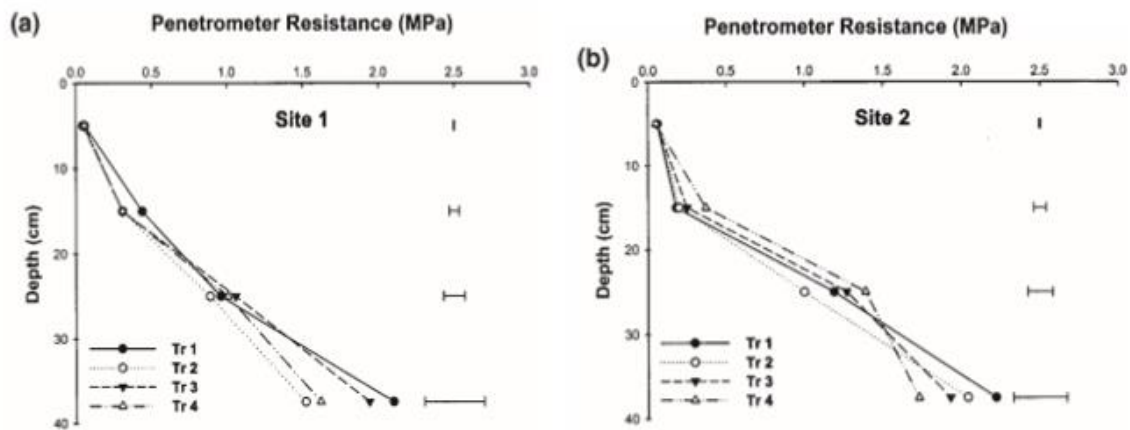


Figure 9: a) et b) Résistance à la pénétration (MPa) en fonction de la profondeur selon les différentes modalités de travail du sol en culture de pomme-de-terre (Tr1: Labour d'automne et reprise de labour au printemps; Tr2: Labour de printemps et reprise de labour; Tr3: Passage automnal au chisel et reprise au printemps; Tr4 : Travail du sol printanier au chisel uniquement). Barres horizontales = erreur standard de la moyenne (Carter et al., 2005)

Dans ce cas présent, les graphes n'ont pas mis en évidence la présence de semelles de labour dans les modalités labourées. Dans la littérature, il est mentionné que des parcelles menées selon des systèmes en non-labour peuvent également présenter des zones compactes en profondeur, dénommées « semelles de non-labour ». GREENOTEC (2012) explique que la formation de ces dernières est favorisée par deux facteurs. Un premier consiste en une utilisation répétitive d'outils munis de socs à ailettes larges exerçant une forte pression en profondeur. Un deuxième facteur est la réalisation de travaux profonds du sol en conditions humides.

5.9 Variation de rendement en tubercules de pommes de terre

Les résultats des expérimentations en ce qui concerne les rendements obtenus sont assez variables.

Nunes et al. (2006) ont constaté que le non-travail du sol a affecté négativement la productivité des pommes de terre, pour les essais menés en plantation directe de tubercules (ouverture d'un sillon et plantation directe) par rapport à un travail du sol conventionnel (labour et deux reprises de labour). En effet, les racines, les tiges ainsi que les tubercules ont montré une certaine difficulté à croître dans les sols non travaillés. Schmidt & Belford (1994) ont fait la même constatation en semis direct avec le blé et ont proposé que pour une gamme de sols, la croissance des plantes est atténuée dans les systèmes peu travaillés par rapport aux systèmes travaillés de manière intensive. Pour la culture de la pomme de terre,

Mundy et al. (1999) soulignent que des sols plus légers et présentant des taux de matière organique plus élevés sont plus propices à la culture de la pomme de terre soumise aux travaux réduits du sol.

Ekeberg (1996) a, quant à lui, constaté que la date de récolte pourrait être un autre facteur responsable d'une dépression de rendements en tubercules. Dans son expérimentation, trois phases de récolte ont été effectuées tout en comparant les modalités de labour et plantation directe de pommes de terre. Il s'avère que les rendements en tubercules à la première date de récolte (28 août) (tab.3) pour le travail du sol conventionnel étaient supérieurs par rapport à l'autre modalité. Par contre pour la dernière date de récolte (23 septembre), le rendement était meilleur pour la plantation directe que pour le travail du sol conventionnel.

Pour la plantation directe, la période de maturation et d'accumulation de rendement est plus longue et continue début de l'automne. Cette prolongation de période de croissance serait expliquée par une germination plus tardive des tubercules en plantation directe dû au réchauffement plus lent et aux conditions humides du printemps (Ekeberg, 1996).

Tableau 3: Poids frais de tubercules (Mg/ha) pour 2 travaux du sol et 3 dates de récolte

Potato tuber freshweight yields (Mg ha ⁻¹) for two soil tillage systems and three times of harvesting								
	Mean harvest dates						Sign.	LSD _{5%}
	28 August		9 September		23 September			
	Tillage system							
	Conv.	Dir.	Conv.	Dir.	Conv.	Dir.		
1987	32.0	28.9	37.0	36.9	34.9	38.8	*	5.0
1988	29.5	29.4	34.1	35.4	33.0	36.0	*	2.0
1989	26.1	24.9	28.9	29.6	29.4	31.5	**	0.9
1990	30.5	29.2	36.0	33.3	37.3	35.8	ns	
1991	21.4	19.7	24.7	22.9	24.8	24.8	*	1.0
1992	22.6	21.2	28.3	27.6	34.0	36.5	**	2.9
1993	28.8	28.4	32.6	33.1	35.1	38.3	***	1.7
Mean	27.3	26.0	31.7	31.2	32.6	34.5	†	2.0

Conv : travail du sol conventionnel ; Dir : plantation directe ; Sign interaction entre le travail du sol et la date de récolte, ns : non significiant, *** p<0.001, ** p<0.01, *p<0.05. LSD entre les différents travaux du sol à la même ou à différentes dates de récolte

Contrairement à ce qui a été mentionné précédemment, Carter et al. (2005) ; Carter, Peters, et al. (2009) expliquent que la pratique de l'agriculture de conservation en culture de pomme de terre n'a pas un impact défavorable concernant le rendement total en tubercules. D'ailleurs, les chercheurs ont remarqué que le travail du sol, en agriculture de conservation, permettait d'améliorer les rendements lors des années sèches. Cela étant dû, en partie, à l'augmentation du taux de matière organique dans les sols.

5.10 Composition minérale des pommes de terre

La composition minérale des pommes de terre est très importante car elle nous permet de diagnostiquer l'efficacité du prélèvement des nutriments. Ekeberg (1996) note une concentration dans la tige et un prélèvement plus important en N, P et K pour les tubercules ayant été plantés directement dans le sol par rapport à la modalité labourée. Nunes et al. (2006) montrent quant à eux exactement l'inverse, sous les conditions de non-labour le sol a accumulé peu d'eau et présente une densité plus élevée. Ceci a réduit la croissance racinaire et aérienne et indirectement le prélèvement en nutriments. Une baisse de pH a été également recensée dans la solution du sol par rapport au travail du sol conventionnel due à la présence plus importante de carbone organique, altérant ainsi la disponibilité des éléments. Carter, Sanderson, et al. (2009) ne montrent pas d'effet notable du travail du sol sur la composition minérale des pommes de terre mais mettent plutôt en exergue l'implication de la rotation qui fournit plus ou moins de reliquats azotés à la culture de la pomme de terre.

CHAPITRE 4 : LES OBJECTIFS DU MEMOIRE

Le nombre limité de données concernant les techniques de travail du sol innovantes pour la production de la pomme de terre pousse à la réalisation d'essais de terrain. Ces derniers sont importants car ils permettent de déceler le ou les impacts de ces techniques émergentes sur les différents paramètres physiques, chimiques, biologiques du sol mais également sur la plante cultivée. L'essai sur lequel les analyses ont été réalisées, a été mis en place par l'asbl GREENOTEC dans le champ d'un agriculteur pionnier en termes de non-labour. Le but de l'asbl GREENOTEC est de mettre au point des techniques de travail du sol accessibles aux agriculteurs tout en étant respectueuses des organismes telluriques, de la structure du sol et en maintenant une productivité en pommes de terre acceptable.

L'objectif de ce mémoire est de comparer les modalités de travail du sol en culture de pomme de terre.

Cette comparaison a pour objectif de définir si les modalités de travail du sol agissent en faveur ou non de la préservation des champignons mycorhiziens à arbuscules ; si elles ont un impact sur les paramètres physico-chimiques des sols et enfin d'identifier les éventuels impacts sur les plantes cultivées. L'atteinte de cet objectif fixé a été possible grâce à la réalisation deux étapes :

La première a consisté à analyser les paramètres des plantes issues de chacune des modalités. Les différentes analyses portaient sur le couvert végétal, sur la partie souterraine (rendements) ainsi que sur la colonisation racinaire par les champignons mycorhiziens à arbuscules.

L'autre partie a consisté en l'analyse du sol propre à chaque modalité. Les aspects physico-chimiques mais également biologiques ont été étudiés.

PARTIE II : MATÉRIEL ET MÉTHODE

CHAPITRE 1 : LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL

1. Localisation du dispositif expérimental

Cet essai en culture de pommes de terre a été mené par l'asbl GREENOTEC (Groupement de Recherche sur l'Environnement et d'Etude de Nouvelles Techniques Culturelles) et l'agriculteur Guibert Dumont de Chassart qui a mis son matériel et une partie de sa parcelle de pommes de terre à disposition.

Le champ dans lequel le dispositif expérimental (fig.10) se trouvait, est situé à Ligny, un village appartenant à la commune de Sombreffe (province de Namur). Les coordonnées (WGS84 DD) du centroïde du champ sont 50,502986°, 4,570768° (respectivement latitude et longitude). Les quatre limites du dispositif expérimental ont été géoréférencées et en voici les coordonnées (WGS84 DD) : 50.50434°, 4.5711° ; 50.50417°, 4.57081° ; 50.50368°, 4.57217° ; 50.50351°, 4.5718° (respectivement latitude et longitude). Le terrain de 24,69 hectares qui a pu accueillir l'essai est cultivé par Guibert Dumont de Chassart qui pratique le non-labour.

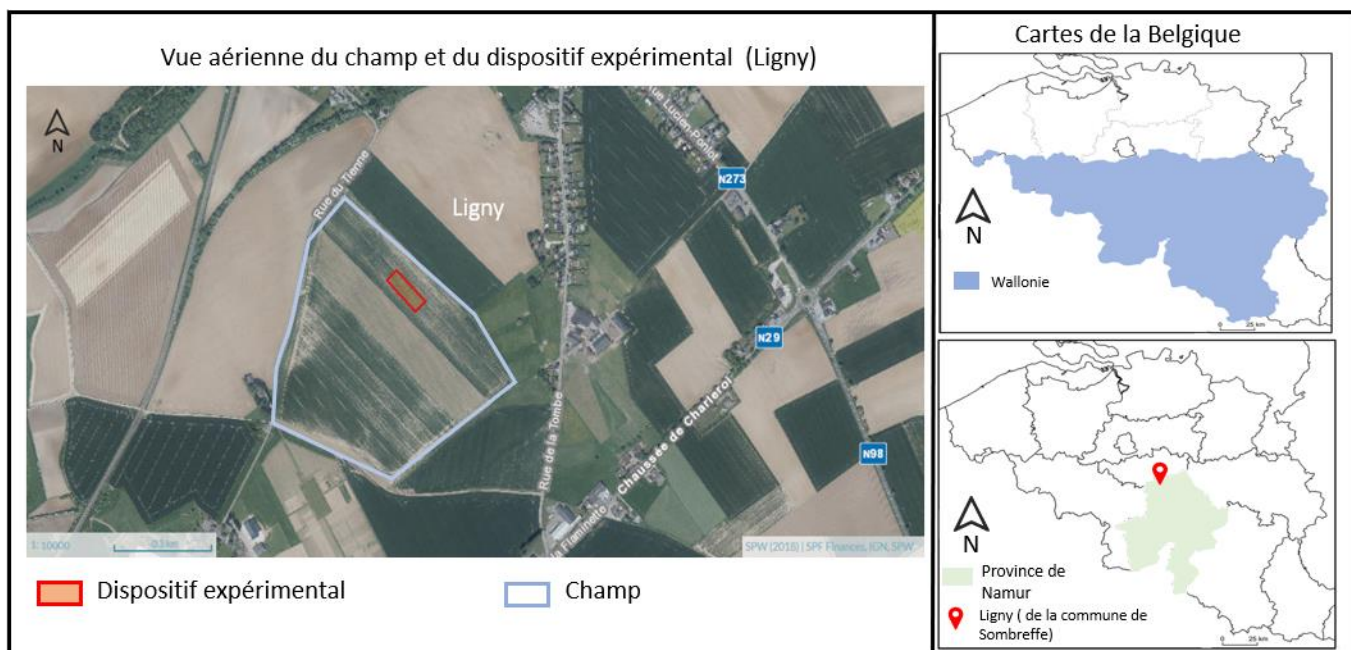


Figure 10: Localisation du dispositif expérimental à l'échelle de la Belgique et du champ (cartes de la Belgique et vue aérienne), échelle des cartes de la Belgique :25km, échelle de la vue aérienne 1 :10000 et 0.3km, adapté de SPW (2018) (Auteur :Florent Matheise)

2.Caractérisation du dispositif expérimental

2.1 Mise en place de l'essai et description des modalités de travail du sol

Dans cette section, la première partie est consacrée à une description de l'historique parcellaire de la récolte de la culture précédente jusqu'au moment de la plantation des pommes de terre. Ensuite, la description des modalités ayant été effectuée, un plan du dispositif expérimental reprenant ces dernières sera présenté.

L'essai a été mis en place suite à la récolte du froment (*Triticum aestivum*). Un passage le 5 septembre 2018 au décompacteur d'une largeur de trois mètres a été réalisé sur les 24,69 hectares. Le même jour et au même endroit l'agriculteur a déchaumé à l'aide d'un outil (fig.11) dénommé "Horsch tiger", à ce déchaumeur est couplé un semoir qui a permis d'implanter le couvert multi-espèces composé de trèfle d'Alexandrie (*Trifolium alexandrinum*) et de phacélie (*Phacelia tanacetifolia*) à raison de cinq kilogrammes par hectare pour chacune des deux espèces. Au printemps, un passage au Roundup® a été réalisé dans toutes les modalités afin d'éliminer les résidus vivants du couvert et les éventuelles adventices. C'est après le semis de l'engrais vert que les itinéraires propres aux travaux du sol ont divergé entre les quatre modalités de travail du sol étudiées. Ces dernières sont décrites ci-après et sont abordées en commençant par les modalités plus « traditionnelles » en termes de préparation du sol pour finir par les modalités plus innovantes.



Figure 11: Photo illustrant le passage du déchaumeur "Horsch Tiger" couplé au semis d'engrais vert GREENOTECH (2017)

2.1.1 La modalité labour (« LAB »)

La modalité labour représente l'intensité de travail du sol la plus élevée parmi l'ensemble des modalités. La culture de la pomme de terre nécessite un ameublissement profond du sol afin d'assurer un développement optimal des tubercules. Cet ameublissement est effectué généralement par le labour. Cependant des effets néfastes peuvent apparaître suite à un labour ; il mène notamment à la formation d'une semelle en profondeur lorsqu'il est réalisé dans des conditions humides. Outre ce problème, le phénomène d'érosion hydrique est

particulièrement marqué dans les parcelles labourées préalablement à la plantation. Ensuite, les charges de mécanisation sont importantes pour le labour mais également pour les reprises du sol printanières. Enfin, étant donné la perturbation des horizons du sol engendrée par un tel travail, celui-ci impacte négativement le réseau hyphal des champignons mycorhiziens

Cette modalité figurant dans l'essai a pour but de comparer la préparation du sol « traditionnelle » de la pomme de terre avec les autres modalités qui présentent des pistes d'amélioration aux problèmes mentionnés ci-dessus.

En ce qui concerne le travail du sol des parcelles « LAB », les opérations de travail du sol qui y sont réalisées avant le 5 septembre sont semblables à celles de toutes les autres modalités. Le 21 janvier 2019, un labour sur sol gelé ("labour d'hiver"), unique à cette modalité, a été réalisé afin d'enfouir le couvert végétal mis en place précédemment. Le sol a ensuite été exposé lors de la fin de l'automne et durant l'hiver aux agents climatiques tels que le gel. Ce dernier a permis de fracturer les mottes de terre indurées. Au printemps, le 26 avril 2019, un travail du sol lourd au chisel (fig.12) puis un passage à la herse rotative à axe vertical ont eu lieu avant la plantation. Cette dernière action a été réalisée à l'aide d'une planteuse classique.



Figure 12: Photos des différents outils utilisés pour l'affinage du sol et la plantation des pommes de terre. Gauche : herse rotative à axe vertical ; Milieu : chisel lourd ; Droite : planteuse à pommes de terre classique.

2.1.2 La modalité Techniques Culturelles Simplifiées (TCS)

La modalité « TCS » est définie par GREENOTEC comme étant les "Techniques de conservation des sols" ; cette signification de l'acronyme est différente de celle énoncée à la section 2.4 Chapitre 1, Partie I (« Techniques culturelles simplifiées »), mais en pratique le principe fondateur de cet acronyme dictant l'interdiction du labour est respecté.

Cette modalité apporte une solution concernant l'aspect « érosion hydrique » rencontré dans le cas de la modalité labour. En effet, la couverture du sol est maintenue sur une période plus longue par rapport à la modalité labour (labour : couverture du sol de septembre jusqu'au 21 janvier 2019 ; TCS : couverture du sol de septembre jusqu'au 26 avril). Ensuite, après la plantation des pommes de terre, l'absence de retournement des

horizons a contribué au maintien des résidus du couvert végétal ; ce qui a permis ainsi de limiter le phénomène d'érosion hydrique pendant la culture (section 2.5 chapitre 1 Partie I). Les autres problématiques telles que les charges de mécanisation importantes et la formation d'une semelle de non-labour ne sont pas solutionnées dans le cadre de cette modalité. Les deux autres modalités ont pour objectifs d'apporter des solutions à ces problématiques.

En pratique, la préparation du sol réalisée dans cette modalité reste semblable à la modalité précédemment décrite, mise à part bien sûr la suppression du labour. L'historique parcellaire consiste au semis de l'engrais vert comme dans les autres modalités le 5 septembre 2018. Au printemps, après un désherbage total des parcelles, l'agriculteur a réalisé le 26 avril 2019 un travail du sol lourd à l'aide d'un chisel à une profondeur de 17 à 20 cm. Une fois cette dernière action terminée, deux étapes se sont succédées : un passage à la rotative à axe vertical et enfin la plantation classique.

2.1.3 La modalité « Semis-direct » (SD)

La modalité « SD » change radicalement la vision classique du travail du sol préalable à la plantation de pommes de terre. Les précédentes modalités étaient caractérisées par un labour d'hiver (pour la première modalité) et des reprises du sol printanières en profondeur (pour les deux précédentes modalités). La réalisation de ces précédents travaux lorsque le profil du sol est humide favorise la formation des semelles de labour et de non-labour. Partant de ce constat, les seuls travaux profonds du sol (décompactage et déchaumage) qui ont été réalisés dans cette modalité ont été effectués en période sèche fin d'été-début automne. Cette mesure a été prise afin de limiter les risques de semelles de non-labour. De plus, l'abandon des travaux profonds printaniers du sol a permis de limiter les charges de mécanisation par rapport aux précédentes modalités.

Un deuxième constat important qui a permis la mise en place d'une telle modalité est l'importance des facteurs biologiques et climatiques dans le travail d'affinage du sol. Sur base de ce fait, la succession des travaux réalisés est la suivante. La formation des buttes (réalisée au printemps pour les deux précédentes modalités juste avant la plantation des pommes de terre) a été déplacée fin d'été-début automne juste après le travail du sol profond (commun à toutes les modalités) afin de bénéficier de l'affinage des buttes fourni par le gel hivernal, les organismes telluriques et enfin des racines du couvert végétal. En effet, la réglementation exige la mise en place d'un couvert végétal avant une culture de printemps ; le semis de l'engrais vert a été réalisé entre le travail du sol en profondeur et le buttage d'automne. Les avantages d'avoir semé le couvert avant de butter et pas l'inverse sont les suivants. Premièrement, les graines du mélange (phacélie - trèfle d'Alexandrie) se sont retrouvées non seulement sur les sommets de chacune des buttes mais aussi sur les deux pans obliques des buttes permettant ainsi d'avoir un couvert homogène sur toute la

surface. Deuxièmement, un matériel spécifique n'est pas requis afin de pouvoir implanter un couvert sur les buttes. A priori, certains questionnements pourraient émerger quant à la levée du couvert. En effet, les graines pourraient être trop ou trop peu recouvertes suite à l'opération de buttage, mais les membres de GREENOTEC n'ont pas rencontré de problèmes de levée.

En conclusion, cette modalité offre un ensemble d'avantages par rapport à la modalité labourée tels que réduction de l'érosion hydrique, une diminution des charges de mécanisation, l'absence de semelle de labour, un affinage naturel des buttes. Cependant, différents problèmes ont été soulevés en lien avec l'application de cette pratique. L'affinage naturel des buttes n'est pas parfait : un certain nombre de mottes de terre persistent au sein des buttes. Cela entrave le développement des tubercules et lors de l'arrachage, des remontées de blocs de terre pouvant blesser les tubercules par frottements. Ensuite, le sol étant remanié légèrement au printemps grâce au disque et à la dent un outils combiné dent-butteuse (fig.14), le réchauffement du sol dans les buttes est dès lors plus lent par rapport aux autres modalités, ce qui ralentit l'émergence des plantules et la minéralisation au sein de la butte. Ces phénomènes ont un impact négatif sur les rendements finaux.

En pratique sur le dispositif expérimental, l'agriculteur a réalisé un buttage (fig.13) juste après le semis du couvert végétal qui a été réalisé le 5 septembre 2018. Le couvert s'est ensuite développé durant tout l'automne et étant un couvert gélif, une partie de ce dernier a été détruite grâce à l'action des agents climatiques, l'autre partie l'a été grâce au passage de Roundup® printanier. Le 23 avril 2019, l'agriculteur est passé avec un outil combiné (dent-butteuse) (fig.14) comprenant d'une part des dents qui ont permis d'ouvrir les buttes précédemment formées en été afin de les réchauffer, d'autre part une butteuse qui a permis, après l'action des dents, de reformer les buttes. La plantation directement dans les buttes a ensuite eu lieu trois jours après, soit le 26 avril 2019 (fig.13).



Figure 13: Photo illustrant le " buttage d'automne" juste après le semis de l'engrais vert à gauche et la plantation directe dans les buttes d'automne à droite, source GREENOTEC (2017)



Figure 14: Photos illustrant les constituants de l'outil combiné « dent-butteuse ». Gauche :ouverture de la butte d'automne par un disque. Milieu: ouverture en profondeur de la butte par une dent; Droite: re-buttage par une cappe

2.1.4 La modalité Buttes Retravaillées (« RETRA »)

Cette dernière technique dérive de la technique « SD » et a pour objectif de remédier aux problèmes rencontrés dans cette même modalité. Comme dans le cas de la modalité « SD » la technique des buttes d'automne est maintenue, de même que l'absence de travail profond hivernal et printanier. Pour remédier d'une part à la persistance de mottes de terre dans les buttes et d'autre part aux problèmes de réchauffement des buttes, un travail du sol printanier superficiel a été effectué. Ce dernier consiste en un passage à la herse rotative à axe vertical qui détruit les buttes formées en automne. Ce travail est effectué avec une grande facilité au vu du volume de terre important présent dans les buttes formées en automne. Un buttage comme dans le cas des modalités « LAB » et « TCS » est ensuite réalisé lors de la plantation des pommes de terre.

L'ensemble des travaux du sol réalisés depuis le 5 septembre jusqu'au 23 avril sont identiques à ceux de la modalité « SD ». En effet, à la place du passage de l'outil combiné dent-butteuse précédemment énoncé, l'agriculteur est passé uniquement le 26 avril avec une rotative à axe verticale (fig.12) détruisant ainsi les buttes formées en automne. La plantation a eu lieu le 26 avril également avec une planteuse classique (fig.12).

Une synthèse des différents travaux du sol selon la modalité est reprise ci-dessous dans le tableau (tab.4).

Tableau 4: Synthèse des différents travaux du sol effectués suivant la date et la modalité de travail du sol

Repère temporel	Travail effectué suivant la modalité de travail du sol			
	LAB	TCS	RETRA	SD
Aout 2018	Récolte du froment			
5 septembre 2018	Déchaumage et semi du couvert végétal (Phacélie et Trèfles d'Alexandrie) avec le Horsch Tiger			
5 septembre 2018			Formation des buttes d'automne	
21 janvier 2019	Labour			
23 avril 2019				Passage à la dent-butteuse
26 avril 2019	Passage au Chisel et à la rotative à axe vertical		Passage à la rotative à axe vertical	
26 avril 2019	Plantation			

Le dispositif expérimental mis au point par GREENOTEC reprend d'autres modalités qui n'ont pas fait l'objet de cette étude. En effet, ces essais exploratoires consistaient à tester des associations pommes de terre-légumineuses-brassicacées, un ajout d'une solution à action stimulante pour les mycorhizes et enfin une plantation selon la modalité « SD » sans ouverture préalable de la butte. Ces dernières ne présentaient pas de répétitions, ce qui rendait inéluctablement les analyses statistiques difficiles ou peu pertinentes.

Voici ci-dessous un schéma (fig.15) illustrant la disposition des différentes parcelles correspondant aux modalités décrites ci-dessus. Le dispositif expérimental est composé de 12 parcelles de 7.20m de large et 25 m de long (180m² de surface pour chacune des parcelles) organisées en 3 blocs. L'ordre des parcelles dans chacun des blocs a été déterminé de manière aléatoire. La délimitation avec le champ du voisin se trouve à exactement 57.6 m du bord gauche (sur le schéma) de l'essai et la rue du Tienne se trouve à 234m du bord inférieur de l'essai. Comme le montre la figure 10, le dispositif expérimental est bordé par le champ de Guibert Dumont de Chassart qui a également emblavé le reste du champ en pomme de terre suivant la modalité « TCS ».

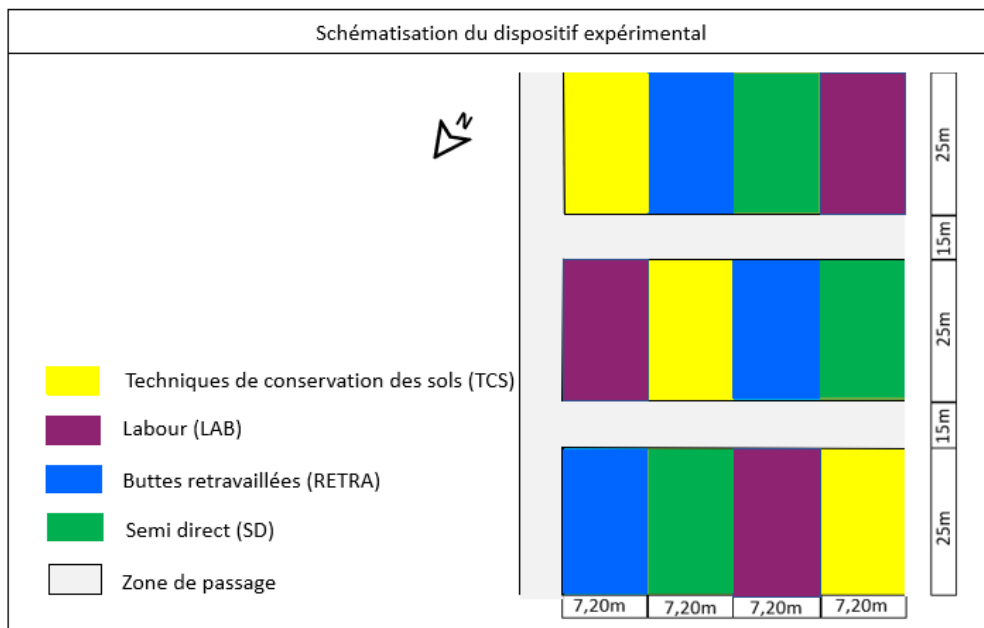
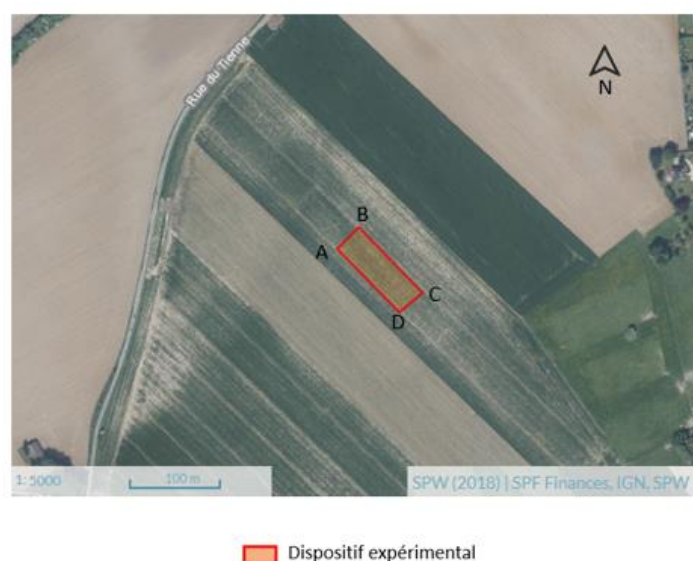


Figure 15: Schématisation du dispositif expérimental adapté du plan fourni par GREENOTEC (Auteur : Florent Matheise)

2.2 Profil altimétrique du dispositif expérimental

Une vue aérienne ci-dessous du dispositif expérimental permet de situer les points de référence A, B, C et D aux quatre extrémités du dispositif, ces points sont importants pour une compréhension aisée du profil altimétrique (SPW, 2018). Ce dernier a été généré sur base des altitudes relevées aux segments AB et CD (fig.16). Il existe un dénivelé positif de 5.26m entre la partie basse (mentionnée par les points A et B) et la partie haute du dispositif (mentionnée par les points C et D). Une distance de 105 m sépare les segments AB et CD (fig.17).



Dispositif expérimental

Figure 16: Localisation des extrémités (A, B, C, D) du dispositif expérimental. Echelle 1 :5000, adapté de SPW (2018), (Auteur : Matheise Florent)

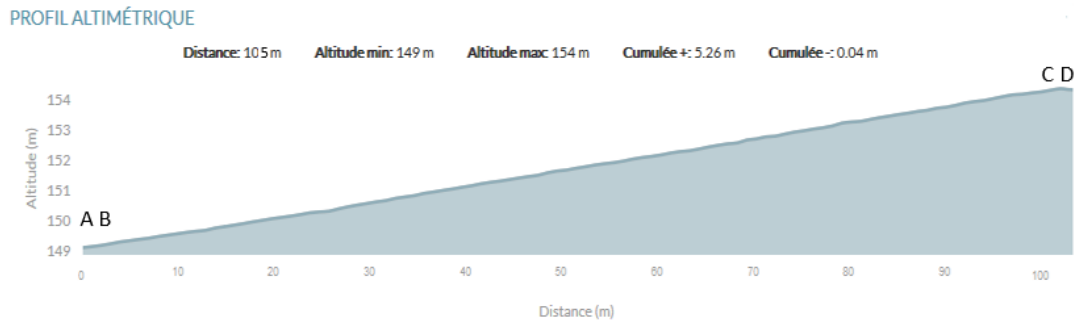


Figure 17: Profil altimétrique du dispositif expérimental entre les segments AB et CD, adapté de SPW (2018) (Auteur : Florent Matheise)

2.3 Texture et drainage du sol du champ et du dispositif expérimental

L'unité cartographique utilisée dans la légende de la carte des sols de Belgique est la série principale, celle-ci a pour objectif de regrouper des profils pédologiques qui ont des caractéristiques communes. Cette série principale est représentée par un sigle de quatre lettres (Legrain & Engels, 2007). La première donne une indication sur la texture du sol des 50 premiers centimètres du profil, la deuxième sur l'état de drainage naturel, la troisième concerne le développement du profil et la dernière informe sur la nature de la charge en éléments grossiers. Sur base de la signification de chaque lettre, le sol du champ (fig.18) est caractérisé par une texture limoneuse (A), à drainage naturel favorable (b), le reste des symboles sont développés ci-après pour le dispositif. Une zone isolée (OE) présente un sol artificiel défini comme une fosse d'extraction. Plus précisément au sein du dispositif expérimental, le sol est limoneux à horizon B textural, phase à horizon A mince (Aba1) ; sol limoneux à horizon B textural tacheté, phase à horizon A mince (Aba(b)1) ; sol limoneux à horizon B textural ou à horizon B structural (AbB). Bien que ces sols diffèrent légèrement par leur développement de profil, notamment, ils présentent malgré tout une texture et un état de drainage naturel semblables.

une sonde à nitrates de faible diamètre a été utilisée et la prise de terre à la dernière profondeur a été modifiée et est passée de 45-60 cm à 30-45 cm.

Une deuxième phase de prélèvements a été consacrée à l'analyse des nitrates (NO_3^-). L'asbl GREENOTEC a pris en charge cette analyse. Afin de réaliser précisément cette dernière, le sol doit être frais. En ce qui concerne la méthode d'échantillonnage, pour chaque parcelle, trois prélèvements à trois profondeurs (0-30, 30-60, 60-90 cm) ont été réalisés le 9 octobre 2019, lorsque les conditions climatiques s'étaient améliorées. Les échantillons ont chacun été regroupés par profondeur et puis par modalité, menant au total à 12 échantillons (4 modalités et 3 profondeurs). Ceux-ci ont été ensuite analysés par le Centre provincial de l'Agriculture et de la Ruralité (CPAR) de La Hulpe. Etant donné le regroupement des échantillons par parcelles et par profondeur, ces analyses n'ont pas pu faire l'objet d'analyses statistiques, elles ne figurent donc pas dans la partie « résultats et discussions » elles sont, cependant, accessibles dans les annexes (Annexe III).



Figure 19: Photo illustrant la méthode de prélèvement du sol. (Auteur : Florent Matheise)

1.2 Pré-traitement

Une première phase a consisté à faire sécher ces sols à l'air libre pendant une semaine. Une fois cette étape réalisée, un tamisage à 2mm a été effectué.

1.3 Analyses chimiques de caractérisation des sols

1.3.1 pH (H_2O)

Le pH d'un sol est la mesure de l'activité en protons (H^+) lorsque celui-ci est mis dans de l'eau. Cette mesure permet d'apprécier l'acidité d'un sol (Delmelle & Delvaux, 2018). Cette mesure aurait dû être effectuée sur les 180 échantillons prélevés, mais en raison de la

fermeture des laboratoires liée à la pandémie Covid-19, elle n'a été réalisée que sur 85 échantillons. Pour chacun des échantillons, 5g de sol a été pesé et disposé dans un contenant de 40 mL. A l'aide d'une éprouvette graduée, 25 mL d'eau déminéralisée ont été ajoutés à ces 5 g de sol. Une agitation vigoureuse a ensuite été réalisée toutes les 20 minutes pendant une heure. Directement après la dernière agitation, l'électrode du pH-mètre a été plongée dans la solution et y est restée jusqu'à une stabilisation de la mesure.

1.3.2 CEC et Bases échangeables

A partir des échantillons de sol mentionnés ci-dessus, des analyses de la capacité d'échange cationique (CEC) et de la garniture cationique (constituée de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ connues sous le nom " des bases échangeables") ont été menées. Tout d'abord, la CEC est une mesure de la capacité du sol à retenir par adsorption des cations nutritifs pour la plante (Delmelle & Delvaux, 2018). Les réservoirs de charges négatives ayant la capacité d'adsorber ces cations sont d'une part les substances organiques et d'autre part, les minéraux argileux. La garniture cationique constitue l'état des réserves directement disponibles pour la nutrition de la plante (Delmelle & Delvaux, 2018). Afin de mesurer la CEC et les bases échangeables, la méthode de Metson (Metson, 1956) a été appliquée. Cette dernière consiste dans un premier temps à percoler de l'acétate d'ammonium 1M ($\text{CH}_3\text{COO-NH}_4$) à pH 7 au travers de colonnes remplies d'un mélange de 5g de sol et 20 g de sable. Ces percolations (6) ont permis de désorber les cations présents sur le complexe d'échange et de les remplacer par de l'ammonium (NH_4^+). Les percolats obtenus ont été ensuite dosés par spectrométrie d'émission plasma à couplage inductif (ICP-AES) afin de déterminer la concentration en cations échangeables. Ensuite, une deuxième série de percolations (6) à base d'éthanol a eu pour but de laver l'excès de sel, non adsorbé. Et enfin une dernière série de percolations (6) à base de chlorure de potassium (KCl) 10% à pH 3 a permis de désorber le cation saturant (l'ammonium) qui a été dosé par colorimétrie (630 nm) au bleu d'indophénol afin de déterminer la CEC.

Ces analyses étant fastidieuses, les échantillons de sol prélevés à la même profondeur ont été rassemblés pour chaque parcelle, fournissant ainsi trois échantillons de sol (correspondant aux trois profondeurs de prélèvements) pour chacune des parcelles. Trente-six analyses de CEC et bases échangeables ont donc été réalisées.

1.3.3 Phosphore disponible

Le phosphore est un élément fondamental pour le développement des plantes mais est cependant peu présent dans la solution du sol. Il a été mis en évidence par diverses expérimentations (voir section 2.3.1 chapitre 2) que les CMA jouent un rôle important dans l'accessibilité du phosphore pour la nutrition végétale. Dans le cadre de cette étude portant

également sur l'évaluation de la densité de population de mycorhizes dans les sols, il était important d'évaluer le phosphore disponible dans les sols.

L'estimation du phosphore assimilable dans les sols, c'est-à-dire celui qui est susceptible d'être prélevé par les racines des plantes a été réalisé par la méthode de Olsen (Olsen, 1954). Parmi les méthodes existantes d'extraction du phosphore assimilable dans les sols, la méthode de Olsen est la plus performante car elle extrait le phosphore de nature physico-chimique le plus proche de celui qui est prélevé par les végétaux (Fardeau et al., 1988). Le phosphore disponible est présent soit en solution soit adsorbé à la surface de particules minérales et organiques (AgroParisTech, 2004) sous trois formes: PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- (respectivement anions phosphates, hydrogénophosphates et dihydrogénophosphates).

Pour procéder à cette analyse, 180 échantillons de deux grammes ont été pesés à partir des 180 échantillons récoltés sur le terrain le 26 septembre. Si le confinement n'avait pas imposé un arrêt des laboratoires, 40 mL d'une solution de bicarbonate de sodium (NaHCO_3) 0.5M à pH 8.5 aurait été ajoutée à chacun de ces échantillons. La solution obtenue aurait ensuite été filtrée à l'aide de papier Whatman puis un dosage du phosphore aurait été effectué par spectrophotométrie (ICP-AES).

1.4 Analyse physiques de caractérisation des sols

1.4.1 Résistance à la pénétration (pénétrométrie)

La résistance à la pénétration est considérée comme un indicateur important de la compaction des sols, du développement racinaire, de l'infiltration de l'eau dans les sols, de la performance des tracteurs et des outils de travail du sol (Kumar et al., 2012). Afin d'évaluer la résistance à la pénétration du sol exprimée en Méga Pascal (MPa), un instrument tel le penetrologger (mis au point aux Pays-Bas en 2013) a été utilisé dans le cas de cette étude. Ce dernier est équipé d'un cône, d'une tige de sonde, d'un profondimètre à ultrasons, d'un enregistreur et enfin d'un capteur de force (Eijkelkamp, 2018). Afin d'utiliser au mieux cet appareil, une programmation de ce dernier a été nécessaire avant d'effectuer les mesures sur le terrain. Cette programmation concernait le nombre de mesures à effectuer par parcelles et le nombre de parcelles présentes sur l'essai. Par parcelle, 10 mesures en des points aléatoires (donc 120 mesures au total) ont été effectuées le 20 août dans les buttes de pommes de terre jusqu'à une profondeur maximale de 87cm. Les mesures ont été effectuées dans les buttes et non dans l'inter-butte afin d'en dégager des données les plus pertinentes dans le cadre de cette étude.

2. Analyse du couvert

Dans cette section, deux analyses seront développées : la mesure du poids sec de la biomasse aérienne et le Green Area Index. Deux autres mesures initialement prévues étaient

la teneur en phosphore et le rapport Carbone/ Azote du couvert. Celles-ci n'ont pas été réalisées à cause de la fermeture du laboratoire en raison du Covid-19.

2.1 Mesure du poids sec de la biomasse aérienne

Cette mesure donnant une indication sur la biomasse sèche du couvert en kg /hectare a été réalisée le 27 août 2019. Pour chaque parcelle composant l'essai, une surface de 2m² a été prise aléatoirement à l'aide de cadres en plastique. Le couvert présent sur cette surface a été coupé à l'aide d'une cisaille puis rassemblé dans une manne (fig. 20). Le contenant de cette dernière correspondant à l'unique prélèvement par parcelle qui a ensuite été pesé. Directement après, une sonde cylindrique a été employée afin de prélever une fraction du matériel végétal présent dans la manne (fig. 20). Un ensemble de coups de sonde a été donné afin d'obtenir des échantillons d'une masse comprise entre 500 et 900 g. Cette quantité a ensuite été pesée à l'aide d'une balance de terrain puis mise à l'étuve à 70 °c pendant une semaine afin de déterminer son poids sec. Ce dernier a été déterminé par une balance de type Sartorius AX2202. A l'aide de ces données, un rapport peut être formulé entre le poids sec et humide de l'échantillon de matériel végétal ; celui-ci a été multiplié par le poids frais des 2 m² de couvert et le tout donne une indication de la matière sèche produite sur la surface de 2m² qui est extrapolée à la surface d'un hectare.



Figure 20: Photos illustrant les étapes de la réalisation de la mesure du poids sec de la biomasse aérienne. De gauche à droite : récolte de 2m² de biomasse ; prélèvement d'un échantillon frais à l'aide d'une sonde et une manne ; pesage de l'échantillon sec (Auteur : Florent Matheise)

1.5.2 Mesure du Green Area Index (GAI)

La mesure du Green Area Index a été effectuée à la fin du mois d'août 2019, plus précisément le 26 et 27 août pour respectivement les blocs 1, puis 2 et 3. Cette mesure retourne une valeur chiffrée adimensionnelle (cm²/cm²) exprimant le rapport entre la

surface d'1 m² de végétation scannée et 1m² de surface au sol. Cet indice prend en compte l'entièreté de la surface aérienne en présence, et pas uniquement la surface foliaire comme dans le cas du Leaf Area Index (LAI). Après avoir coupé 1m² de végétation à l'aide d'une cisaille dans chacune des parcelles (fig. 21), les échantillons ont été stockés dans des sacs micro-perforés. L'instrument de mesure qui a ensuite été utilisé est un scanner du type LI-3100 C (fig. 21). Afin de réaliser des mesures les plus précises possible, plusieurs précautions ont été prises. Premièrement, le matériel végétal devait rester frais pour éviter que les tiges ou les feuilles ne se plissent ; c'est pour cette raison que les prélèvements sur le terrain ont été étalés sur deux jours. Deuxièmement, le scanner a été régulièrement nettoyé dans le but d'éviter tout " bruit de fond" dans les mesures.



Figure 21: Photo illustrant les étapes de la réalisation de la mesure du GAI. De gauche à droite : Prélèvement d'1m² de biomasse à l'aide d'un cadre en plastique ; passage au scanner de l'ensemble de la biomasse récoltée. (Auteur : Florent Matheise)

3. Analyses biologiques du sol et des racines

3.1 La méthode de prélèvement du sol en vue d'une analyse de son contenu en CMA

Deux phases d'échantillonnage de sol se sont succédées afin de réaliser les analyses de densité de population de mycorhizes. L'idée est de comparer la densité de population de mycorhizes dans le temps : proche de la plantation et proche de l'arrachage des pommes-de-terre. La première phase a eu lieu le 22 mai 2019, c'est à dire environ un mois après la



Figure 22: Photo illustrant l'échantillonnage du sol dans la butte à proximité des racines de pommes de terre (Auteur : Florent Matheise).

plantation des pommes de terre (26 avril 2019) et la seconde a eu lieu le 30 août 2019 soit 10 jours exactement avant le défanage des pommes de terre. Pour les deux phases d'échantillonnage, le sol a été prélevé aléatoirement dans chaque parcelle à quatre reprises, toujours à proximité des racines (fig. 22). Le sol provenant des quatre prises a ensuite été mélangé fournissant ainsi 12 échantillons (à raison de un par parcelle) par phase d'échantillonnage.

Les étapes ci-après ont été réalisées à deux reprises, c'est-à-dire pour les deux phases de d'échantillonnage.

3.2 Pré-traitement

Le sol a ensuite été mis à sécher à l'air ambiant puis a été tamisé à 2 mm. Dans un deuxième temps, une partie seulement du sol a été stérilisée par la réalisation d'un autoclavage. Après avoir subi l'autoclavage, les échantillons de sol ont été homogénéisés et séchés à 50°C.

3.3 Analyse

3.3.1 Détermination de la densité de population des CMA par la méthode MPN

Introduction

Cette méthode est régulièrement utilisée pour estimer la densité de population (nombre de propagules le plus probable par gramme de sol) des champignons mycorhiziens à arbuscules (CMA) présents dans le sol (Porter, 1979). Cette analyse biologique permet de détecter toutes les propagules capables d'infecter un hôte, ces dernières peuvent être des spores recouvertes de végétaux, ou encore des propagules n'étant pas des spores. Dans cette étude, la plante hôte sélectionnée a été le maïs (*Zea mays*). Les plantes de maïs se sont développées au sein de plaques de cultures. Ces dernières sont composées de puits qui ont été remplis de substrat (inoculé naturellement de CMA ou dépourvus de ces derniers) et de graines de maïs. L'utilisation de ces plaques de cultures est intéressante car elle permet d'une part un développement des plantes de maïs dans un substrat spécifique. D'autre part, lorsque l'expérience est terminée ; la récupération de ce substrat est aisée pour effectuer les analyses concernant les microorganismes présents dans ce même substrat. Après six semaines de développement des plantes au sein de ces plaques de cultures, une analyse qualitative (présence ou absence) des CMA a été réalisée sur les racines de maïs. Sur base de cette dernière analyse et d'autres informations détaillées ci-dessous, la densité de population des CMA a été déterminée.

Comme toute méthode d'estimation, elle comporte certains inconvénients tels que des effets en lien avec la durée et la température de la période de croissance de l'hôte, la

spécificité des champignons pour l'hôte, et enfin les variables relatives au sol impactant l'analyse (An et al., 1990).

Etapas préparatoires à l'analyse

Premièrement, une phase de stérilisation⁵ des graines de maïs a eu lieu afin d'éviter toute contamination des puits de culture par d'autres microorganismes présents initialement sur les semences, et pouvant mener à une surestimation des densités de population. Les semences ont ensuite été mises en pré-germination sur du papier Whatman humidifié à l'eau stérile et dans une armoire à l'obscurité pendant trois jours.

Ensuite, les plaques de culture - dans lesquelles le substrat et les graines de maïs ont été positionnés - ont été modifiées afin d'assurer un déroulement de l'expérience le plus optimal possible. En effet, des morceaux de toiles de nylon⁶ ont été collés sur la face inférieure de chacun des 55 puits de chacune des plaques afin d'éviter que le substrat et les racines de maïs ne se propagent hors des puits et puissent contaminer d'autres puits.

La préparation du substrat a consisté à mélanger du sol inoculé naturellement avec du sol stérile afin de réaliser des dilutions. Comme mentionné dans la section 2.1, le sol aussi bien inoculé que stérile provient des buttes de la culture de pomme de terre menée par GREENOTEC. Le mélange du sol inoculé aurait pu être réalisé avec du sable mais selon Adelman & Morton (1986), la méthode MPN estime mieux la densité des CMA lorsque le sol contenant l'inoculum et le sol stérile servant de diluant proviennent de la même origine. Afin de réaliser des dilutions allant d'un niveau 0 (100 % de sol inoculé) à un niveau 10 (0.098% de sol inoculé), des quantités précises de sol inoculé et stérile ont été mélangées suivant les données reprises dans le tableau ci-dessous (tab.5). Pour chaque niveau de dilution, cinq puits ont été remplis avec 55 g de substrat. Le témoin négatif uniquement constitué de sol stérile a été répliqué cinq fois comme chaque niveau de dilution. La disposition des différentes dilutions et du témoin négatif ainsi que leurs répliques au niveau des plaques de culture ont été schématisée dans le tableau ci-dessous (tab.6).





























































⁵ Cette phase n'a pas été réalisée pour la première phase MPN et une contamination des puits de culture s'est produite probablement en raison des semences de maïs. C'est pourquoi, lors de la deuxième phase MPN une stérilisation des graines de maïs a été effectuée.




⁶ Un problème est survenu lors de la première phase MPN, les toiles de nylon n'ont pas été suffisamment collées, les racines se sont donc superposées entre puits. Pour la deuxième phase MPN, une attention particulière a été portée au collage correct des toiles de nylon.

Tableau 5: Tableau illustrant les quantités de sol stérile et inoculé qui ont été mélangées suivant le niveau de dilution

Niveau de dilution	Facteur de dilution	Quantité de sol pur ou inoculum ajouté (g)	Quantité de sol stérile (diluant) ajouté (g)	Quantité de substrat ajoutée dans chaque puit (g)	Quantité de substrat restante non-versée dans les puits (g)	Nombre de répliquas
Niveau 0	1	275	0	55	0	5
Niveau 1	1/2	275	275	55	275	5
Niveau 2	1/4	0	275	55	275	5
Niveau 3	1/8	0	275	55	275	5
Niveau 4	1/16	0	275	55	275	5
Niveau 5	1/32	0	275	55	275	5
Niveau 6	1/64	0	275	55	275	5
Niveau 7	1/128	0	275	55	275	5
Niveau 8	1/256	0	275	55	275	5
Niveau 9	1/512	0	275	55	275	5
Niveau 10	1/1024	0	275	55	275	5
Témoin-	0	0	275	55	0	5

Tableau 6: Représentation schématique de la disposition des niveaux de dilution, et témoin négatif ainsi que leurs répliquas sur une plaque de culture de 55 puits

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Répliquat 1											
Répliquat 2											
Répliquat 3											
Répliquat 4											
Répliquat 5											
Témoin négatif											

-  Absence de remplissage de ce puit
-  Présence de substrat et de graines de maïs dans le puit
-  Séparation distincte entre le témoin négatif et le reste de la plaque de culture

Une fois que le maïs a germé et que les plaques de culture étaient finalisées, les graines ont été positionnées à l'aide d'une pince en surface du puit de culture légèrement enterrées (maximum 1 cm) dans le substrat.

Les plaques de culture, une fois finalisées (fig.23), ont été transférées dans des plus grands bacs contenant en leur fond une lame d'eau de 1 cm permettant d'alimenter en eau les différentes plaques de culture. Deux remplissages de ces bacs ont eu lieu par semaine. Six semaines se sont ensuite écoulées entre la mise en serre des plaques de culture et la récolte des racines de maïs.



Figure 23: Photo illustrant à gauche la phase de remplissage du substrat dans la plaque de culture, à droite le développement du maïs dans les plaques de cultures en serre. (Auteur : Florent Matheise)

Récolte des racines de maïs colonisées et non-colonisées par les CMA

Pour procéder à la récolte de ces dernières, chaque plante a été retirée de son pot, les racines rincées à l'eau, et enfin une coupure au niveau du collet a permis de séparer la partie aérienne de la partie racinaire. Les racines ont été mises dans des tubes remplis d'eau déminéralisée en attendant la coloration.

La coloration des racines à l'encre

Les étapes de la méthode employée pour la coloration des racines sont détaillées dans le tableau ci-dessous (tab.7).

Tableau 7: Tableau illustrant les étapes et la durée de ces dernières pour effectuer une coloration des racines

Etapes	Durée de cette étape(minutes)
Trempage des racines dans un bain de KOH 10% à 70°C	60
Rinçage à l'eau de ville et trempage dans un bain HCl 1% à température ambiante	10

Trempage des racines dans un bain d'encre à 2% et HCl 1% à 70°C	45
--	----

Analyse qualitative

Cette analyse étant qualitative, l'observation au binoculaire de la présence d'une structure propre aux champignons mycorhiziens à arbuscules telle qu'une vésicule, un hyphe, ou encore un arbuscule (au microscope) est suffisante pour prouver la présence d'une colonisation racinaire de la plante hôte dans le puits

Détermination de la densité de population de mycorhizes

Sur base d'une série d'hypothèses énoncées dans les travaux de Jarvis et al. (2010) telles que :

- (1) Le microorganisme est distribué aléatoirement dans la matrice, ou échantillon
- (2) Les microorganismes sont indépendants, non groupés et n'interagissent pas entre eux
- (3) Le nombre de microorganismes présent dans chaque quantité infime d'inoculum est indépendant
- (4) Si un puits contient au moins un microorganisme cible, alors il manifestera sa présence après incubation

Une formule permettant de déterminer directement la densité de population de mycorhizes a été mise au point, et donc le nombre le plus probable de microorganismes dans un puits particulier grâce à X_i , d_i , w_i , n_i et enfin k . Voici la formule :

$$\sum_{i=1}^k \left[\frac{x_i d_i w_i}{1 - \exp(-d_i w_i \hat{\mu})} - n_i d_i w_i \right] = 0.$$

Où

X_i = le nombre de puits pour chaque niveau de dilution i pour lesquels l'analyse qualitative a révélé la présence d'une structure de CMA

d_i = le niveau de dilution relatif par tube (ou facteur de dilution)

w_i = le volume ou poids de l'inoculum pour chaque niveau de dilution i (55g)

n_i = le nombre total de tubes pour chaque niveau de dilution i , le nombre de répliques (5)

k = le nombre total de dilutions (10)

μ = la valeur MPN à estimer

3.4 Méthode de prélèvement de racines en vue d'une analyse du taux de colonisation racinaire par les CMA.

Les racines de pommes de terre ont été prélevées à une seule reprise le 3 septembre 2019, soit six jours avant le défanage en vue de réaliser une analyse du taux de colonisation racinaire. La méthode de prélèvement est la suivante (fig.24), par parcelle quatre échantillons ont été prélevés aléatoirement, ces derniers ont ensuite été mélangés afin d'obtenir un échantillon par parcelle, soit 12 au total.



Figure 24: Photo illustrant à gauche le prélèvement de racines, et à droite le conditionnement en sacs microperforés (Auteur : Florent Matheise)

3.5 Pré-traitement (conservation et coloration)

Après leur récolte, les racines ont été mises au frigo avant la réalisation de leur coloration. Le protocole de coloration est le même que cité précédemment dans la section 2.3 (Tab.7).

3.6 Analyse

3.6.1 Détermination de la colonisation racinaire par la méthode Mc Gonigle

Introduction

Il existe une diversité importante de méthodes pour quantifier la proportion de segments de racines colonisés par des champignons mycorhiziens à arbuscules, mais la validation de la présence, ou non, d'une colonisation en chaque point d'analyse est souvent sujette à l'interprétation de l'observateur (McGonigle et al., 1990). Cependant, la méthode McGonigle utilisée dans le cadre de cette étude offre une estimation quantitative objective de la colonisation racinaire malgré les difficultés mentionnées ci-dessus. Celle-ci consiste à compter les intersections entre les structures fongiques au niveau de la racine (arbuscules, vésicules, hyphes) et la section verticale de l'oculaire du microscope au grossissement 200x.

McGonigle et al. (1990) suggèrent de réaliser 150 intersections par sous-échantillons racinaires (par lame) afin de gagner en précision. Cette méthode permet de déterminer plusieurs taux de colonisation. Le premier, le taux de colonisation arbusculaire qui est le rapport entre, d'une part, le nombre d'intersections entre la section verticale de l'oculaire du microscope et un arbuscule et, d'autre part, le nombre d'observations totales effectuées. Le taux de colonisation arbusculaire est le moyen le plus pertinent pour quantifier la colonisation racinaire par les CMA car il met en évidence leur structure fongique propre qui est l'arbuscule. L'évaluation du taux de la colonisation vésiculaire est réalisée de la même manière que la précédente et le taux de colonisation hyphale est déterminé, quant à lui, par le rapport entre le nombre d'intersections positives -mais sans la présence de vésicules ni d'arbuscules- rapporté au nombre d'intersection réalisé.

Analyse quantitative

Pour chacun des échantillons, une quarantaine de fragments racinaires préalablement colorés de 1 cm ont été étalés sur une lame dans une goutte de glycérol. Deux-cents observations au microscope (ou intersections) ont été réalisées au grossissement 200 x.

CHAPITRE 3 : MÉTHODES D'ANALYSES STATISTIQUES

L'ensemble des analyses statistiques a été réalisé grâce à l'utilisation des logiciels JMP Pro© et Excel. La description des méthodes d'analyses statistiques a été basée sur le cours de biométrie (Govaerts & Draye, 2018) et de plan expérimentaux (Govaerts & Bogaert, 2020)

1. Moyenne, écarts-types et erreur standard

Les moyenne, écarts-types et erreurs standards ont été calculés de la manière suivante :

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

μ = la valeur moyenne des résultats

n = le nombre de mesures effectuées pour l'analyse

x_i = Le résultat obtenu pour une mesure i

σ = l'écart-type lié à la moyenne

SE = L'erreur standard

2. Analyse de la variance

2.1 Principe de l'analyse de la variance

Le principe de l'analyse de la variance est de décomposer la variance totale des données en la variance entre les traitements et la variance entre les données d'un même traitement. Les moyennes des traitements sont déclarées différentes si la composante de la variance liée à la variance entre traitements est suffisamment grande. On utilise donc un test sur des variances pour répondre à un questionnement concernant des moyennes. L'hypothèse nulle (H_0) liant les moyennes des traitements est la suivante :

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \dots = \mu_k = \mu$$

$$H_1 = \text{non } H_0$$

Cette égalité entre moyennes est vérifiée ou réfutée à l'aide d'un test de Fisher. Lorsque la p-valeur associée est inférieure à 0.05, cela signifie que l'hypothèse H_0 est rejetée et qu'au moins une des moyennes est différentes des autres.

2.2 Les hypothèses de l'analyse de la variance

Plusieurs hypothèses sont prises lors de la réalisation d'une ANOVA :

- 1) **L'indépendance**, celle-ci est assurée par le design et le bon contrôle des conditions expérimentales
- 2) **La normalité des résidus**, la réalisation d'un QQ plot des résidus permet de valider cette hypothèse rapidement
- 3) **L'égalité des variances (homoscédasticité)**, la vérification de cette hypothèse se fait par la réalisation d'un graphe des résidus en fonction du traitement.

Dans le cadre de cette étude, l'ensemble des données a satisfait à ces trois hypothèses.

2.3 ANOVA à un critère de classification (ANOVA I)

2.3.1 Description du modèle et hypothèses

Dans le cas de l'analyse de la variance à un critère de classification (ou ANOVA I) on suppose que les observations suivent le modèle probabiliste suivant :

$$Y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij} = \mu + \alpha_i + \varepsilon_{ij} \text{ avec } \sum \alpha_i = 0 \text{ et } i = 1, \dots, m \text{ et } j = 1, \dots, n_i$$

Y_{ij} = La réponse quantitative étudiée

μ_i = Résultat moyen du traitement i

ε_{ij} = L'écart résiduel entre l'observation j et la moyenne i et où $\varepsilon_i \sim iN(0, \sigma^2)$

μ = La moyenne générale

α_i = Effet du traitement i

2.3.2 Tests de comparaison de moyennes (Tukey)

Lorsque l'hypothèse nulle de l'analyse de la variance est rejetée, cela signifie qu'au moins un des traitements est différent des autres, cependant, aucune information n'est donnée concernant le ou les traitements qui se distinguent des autres. C'est pourquoi, un test de Tukey ou test de comparaison multiple est réalisé. Celui-ci consiste en la comparaison de moyennes deux à deux. Ce test se base sur la mise en place d'une hypothèse nulle qui considère que les deux moyennes comparées sont égales. Cette hypothèse est testée à l'aide d'un test de Fisher, si celui-ci renvoie une p-valeur inférieure à 0.05 alors, l'hypothèse nulle est rejetée et les deux moyennes comparées peuvent être considérées comme « significativement différentes au niveau de signification 0.05 ». La formalisation mathématique des hypothèses nulles et alternatives pour chacun des tests comparant les moyennes μ_1, μ_2, μ_3 est la suivante :

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 ; H_0 : \mu_2 = \mu_3 ; H_0 : \mu_1 = \mu_3$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2 ; H_1 : \mu_2 \neq \mu_3 ; H_1 : \mu_1 \neq \mu_3$$

2.1 ANOVA à deux critères de classification (ANOVA II)

2.2.1 Description du modèle

Dans le cas de l'analyse de la variance à deux critères de classification (ou ANOVA II), on suppose que les observations suivent le modèle probabiliste suivant :

$$Y_{ijk} = \mu_{ij} + \varepsilon_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

$$\text{avec } \sum \alpha_i = 0, \sum \beta_j = 0, \sum \gamma_{ij} = 0 \text{ et } i = 1, \dots, m \text{ et } j = 1, \dots, n_i$$

Y_{ijk} = La réponse quantitative étudiée

μ_{ij} = Résultat moyen du traitement i et du traitement j

ε_{ijk} = L'écart résiduel entre l'observation k et la moyenne de la combinaison du traitement i et j et où $\varepsilon_i \sim iN(0, \sigma^2)$

μ = La moyenne générale

α_i = Effet du traitement i

β_j = Effet du traitement j

γ_{ij} = Interaction entre les traitements i et j

2.2 Modèle mixte

Lorsque le modèle d'analyse de la variance intègre un critère de classification aléatoire en plus de ses critères de classifications fixes, on suppose que les observations suivent le modèle probabiliste suivant :

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + b_j + (\alpha b)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \text{ où } i = 1 \dots a \quad j = 1 \dots b \quad k = 1 \dots n$$
$$b_j \sim iN(0, \sigma_b^2) \quad (\alpha b)_{ij} \sim iN(0, \sigma_{\alpha\beta}^2) \quad \varepsilon_{ijk} \sim iN(0, \sigma^2)$$

Y_{ijk} = La réponse quantitative étudiée

ε_{ijk} = L'écart résiduel entre l'observation k et la moyenne de la combinaison du traitement i et j et où $\varepsilon_i \sim iN(0, \sigma^2)$

μ = La moyenne générale

α_i = Effet du traitement i

b_j = Effet du facteur aléatoire j

$(\alpha b)_{ij}$ = Interaction entre le traitement i et le facteur aléatoire j

Afin de mettre en place des modèles comportant à la fois des termes fixes, des termes aléatoires et des interactions entre ces termes, la procédure mixte de JMP a été utilisée. La vérification de la significativité des facteurs fixes se réalise toujours de la même façon que précédemment ; cependant en ce qui concerne les facteurs aléatoires, une autre méthode doit être appliquée. Cette dernière consiste à réaliser des tests d'hypothèses par « modèles emboîtés ». La mise en place de ces tests repose sur la notion de modèle restreint et de modèle complet. Lors de la construction d'un modèle, celui-ci est au départ le plus complet possible afin de pouvoir procéder par après à des simplifications pour ensuite obtenir un modèle restreint. Pour ces tests de modèles emboîtés, les modèles restreints résultent de la suppression un à un des paramètres aléatoires intervenant dans le modèle. Ces modèles restreints sont chacun comparés avec le modèle complet. L'hypothèse nulle (H_0) de ce test stipule que le modèle restreint est suffisant pour expliquer la variabilité observée ; si celle-ci n'est pas rejetée, cela signifie que le paramètre peut être ôté du modèle. Si l'hypothèse nulle est rejetée, dans ce cas, le paramètre est significatif et il doit intervenir dans le modèle. La formalisation des hypothèses pour le cas où le modèle restreint est dépourvu de terme aléatoire et le modèle complet possède un terme aléatoire est :

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

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

La comparaison modèle Restreint (R)-modèle Complet (F) se base sur les vraisemblances de chacun des modèles qui sont respectivement L(R) et L(F). Un rapport est formulé entre les logarithmes des vraisemblances de ces deux modèles :

$$LRT = -2[\log_e L(R) - \log_e L(F)] \sim \chi^2_p \text{ où } p = 1$$

$p = 1$ car un seul paramètre est soustrait à la fois du modèle complet.

Si ce rapport LRT est supérieur à la statistique de test χ^2_p alors l'hypothèse nulle est rejetée et le paramètre est considéré comme significatif.

2.3 Modèle aléatoire hiérarchisé

Lorsque le modèle d'analyse de la variance intègre un critère de classification aléatoire hiérarchisé, on suppose que les observations suivent le modèle probabiliste suivant :

$$Y_{ijk} = \mu + a_i + b_j + b_{j(i)} + \varepsilon_{ijk} \text{ où } i = 1 \dots a \quad j = 1 \dots b \quad k = 1 \dots n$$

$$b_{j(i)} \sim iN(0, \sigma_b^2) \quad a_i \sim iN(0, \sigma_a^2) \quad \varepsilon_{ijk} \sim iN(0, \sigma^2)$$

Ces termes étant aléatoires, la vérification de leur significativité a été réalisée sur base du test du rapport de vraisemblance des modèles emboîtés comme mentionné précédemment.

2.4 Corrélation entre variables

Pour deux variables quantitatives X et Y, le coefficient de corrélation $r(X, Y)$ s'obtient en effectuant le rapport entre la covariance de X et Y « COV (X, Y) » et le produit des écarts-types de X et de Y qui sont respectivement σ_x et σ_y .

$$r(X, Y) = \frac{COV(X, Y)}{\sigma_x * \sigma_y} \quad \text{où } COV(X, Y) = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N \frac{X_i - \bar{X}}{Y - \bar{Y}}$$

PARTIE III : LES RÉSULTATS

CHAPITRE 1 : LA PRESENTATION DES RESULTATS ET DES MODELES STATISTIQUES

Avant d'aborder la présentation des résultats, une précision est apportée quant aux différents termes rencontrés dans les modèles statistiques utilisés pour traiter les données. Pour rappel, le dispositif expérimental est composé de 12 parcelles disposées en trois blocs. Dans chacun des blocs, chacune des quatre parcelles a été soumise à une des quatre modalités de travail du sol.

Sur base de ce qui a été mentionné ci-dessus, les facteurs catégoriels fixes intervenant dans les modèles sont les suivants : « Modalité » dont les quatre niveaux sont « LAB » (Labour), « TCS » (Techniques de Culture Simplifiées), « RETRA » (buttes d'automne RETRAvaillées) et enfin « SD » (Semis-Direct). Ce facteur a été croisé pour chaque modèle avec le facteur aléatoire « Bloc » présentant trois niveaux « 1 », « 2 » et « 3 ». Un second terme fixe est « Profondeur », les valeurs catégorielles 0-15, 15-30 et 30-45 lui ont été attribuées représentant les gammes de profondeur en centimètres auxquelles les prélèvements ont été effectués. Lorsque ce facteur est intervenu dans un modèle, celui-ci a été croisé avec le facteur « Modalité » et le facteur aléatoire « Bloc ».

Au sein de cette section, d'abord les analyses chimiques et physique des sols seront abordées afin de dresser un état des lieux général du dispositif expérimental. Ensuite, les résultats des analyses de couverts seront présentés et enfin les résultats en termes de biologie du sol et de rendements en pommes de terre.

1. Les analyses physiques et chimiques de caractérisation du sol

1.1 pH

Le modèle initialement prévu pour effectuer le traitement des données concernant le pH était constitué de plusieurs facteurs fixes : le facteur « Profondeur », le facteur « Modalité », l'interaction « Profondeur*Modalité ». Les facteurs aléatoires étaient : « Bloc », et toutes les interactions de ce dernier facteur avec les facteurs fixes. En raison de la pandémie COVID-19, le modèle a dû être adapté suivant les données mesurées. Les mesures n'ont pu être réalisées que sur les échantillons prélevés au niveau du bloc 1 du dispositif expérimental. Dès lors, l'analyse statistique n'a porté que sur le bloc dans lequel le nombre le plus important de parcelles a été analysé et dans ce bloc seulement les modalités « LAB », « SD » et « TCS » ont été complètement analysées. L'effet « Bloc » n'a donc pas été inclus dans le

nouveau modèle. Ce nouveau modèle a été élaboré sur bases des facteurs fixes « Profondeur » et « Modalité », et l'interaction entre ces deux derniers termes. Un terme aléatoire a malgré tout été inclus afin de prendre en compte les répétitions au sein de chacune des parcelles constituant le bloc 1, ce facteur aléatoire est le facteur « Répétition ». Ce dernier a été croisé avec l'entièreté des autres facteurs fixes. Ce dispositif n'est cependant pas idéal car il ne permet pas de contrôler un gradient éventuel dû au terrain, contrairement au dispositif en blocs aléatoires complets

Après analyse statistique, parmi les facteurs fixes, les trois facteurs « Profondeur », « Modalité » et l'interaction entre ces derniers sont apparus significatifs avec des p-valeurs respectivement de $<0,0001$, $0,0260$ et enfin $0,0067$. Le facteur aléatoire « Répétition » et les interactions avec les facteurs fixes n'ont pas été considérées comme significatifs sur base du test du rapport de vraisemblance. Sur base de la dernière affirmation, le bloc 1 ne semble pas présenter d'hétérogénéité de terrain pour cette analyse. Dès lors, le modèle utilisé est donc une ANOVA III avec comme facteurs explicatifs, le facteur « Profondeur », « Modalité » et « Modalité*Profondeur ». Ce modèle explique $70,39\%$ de la variabilité observée (R^2) et le R^2 ajusté prenant en compte la parcimonie du modèle est lui égal à $0,6381$. Il faut cependant rester prudent quant à l'interprétation de ces données ; les analyses statistiques n'ont pas porté sur l'ensemble du dispositif expérimental, les données statistiques sont donc valables uniquement pour le bloc 1 pour les modalités « LAB », « SD » et « TCS ». Afin d'affiner l'analyse statistique, chacun des facteurs significatifs est développé plus bas.

1.1.1 Les facteurs « Profondeur », « Modalité » et leur interaction

Comme énoncé plus haut, seulement les modalités « LAB », « SD » et « TCS » ont été analysées au sein du bloc 1. Pour les modalités « LAB » et « TCS », la valeur moyenne du pH augmente avec la profondeur (fig.25). Pour la modalité « SD », le pH augmente de 0 à 30 cm, par contre une légère baisse du pH est observable entre la deuxième et troisième gamme de profondeurs.

L'interaction entre les deux facteurs « Modalité » et « Profondeur » est également mise en évidence. En effet, pour la première gamme de profondeurs, le pH de la modalité « SD » est légèrement inférieur aux deux autres modalités. Par contre, pour les deux autres modalités aux deux gammes de profondeurs 15-30 et 30-45cm, le pH de la modalité « SD » est à chaque fois plus élevé que les deux autres modalités.

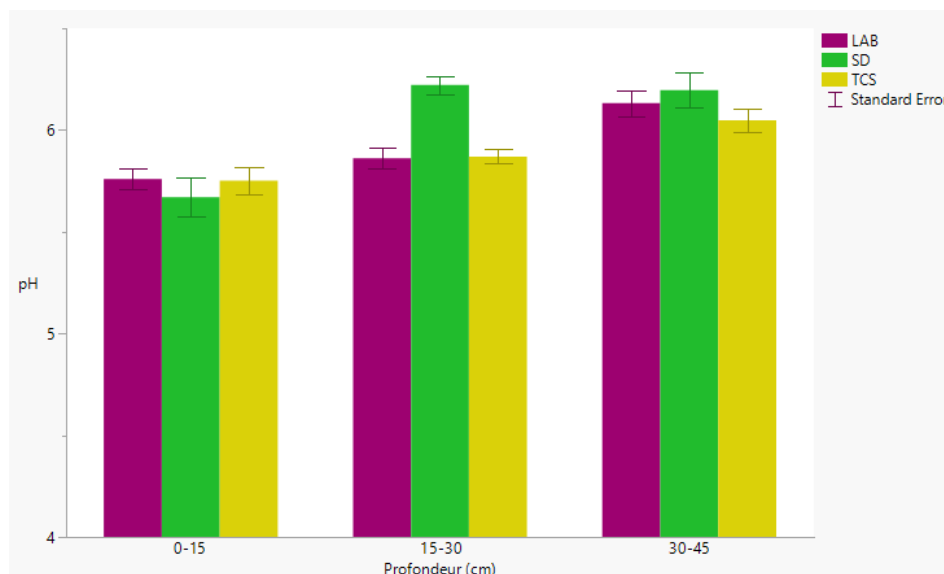


Figure 25: Valeurs moyennes de pH en fonction de la modalité de travail du sol et la profondeur. Les barres d'erreurs correspondent aux erreurs standards. Les couleurs symbolisent les modalités de travail du sol (voir légende)

1.1.2 Test d'égalité des moyennes de pH suivant la profondeur

Le modèle signale que le terme profondeur est significatif. Afin de déterminer les profondeurs qui diffèrent entre elles, un test de Tukey de comparaison de moyenne a été effectué. La valeur moyenne du pH à la profondeur 0-15 cm est significativement différente des valeurs de pH relevées aux profondeurs 15-30 et 30-45 cm (tab.8).

Tableau 8 : Comparaison de moyennes de pH (test de Tukey) au niveau de signification $\alpha=0.05$, les niveaux du facteur "Profondeur" pour lesquels l'appartenance au groupe n'est pas la même sont différents significativement.

Niveaux du facteur « Profondeur (cm) »	pH ($\mu \pm \sigma$)	Groupe (niveau de signification $\alpha = 0.05$)
0-15	5.73 \pm 0.16	A
15-30	5.98 \pm 0.19	B
30-45	6.12 \pm 0.16	B

1.1.3 Test d'égalité des moyennes de pH sur base des modalités

Lorsqu'un test de comparaison de moyenne a été réalisé pour ce facteur « Modalité », aucune des moyennes ne s'est avérée différente (tab.9) des autres malgré sa significativité dans le modèle ANOVA III. Sa significativité est en lien avec la présence des autres facteurs « Modalité » et « Modalité*Profondeur ». Lors de la réalisation d'une comparaison de moyennes, le facteur doit être considéré seul.

Tableau 9: Comparaison de moyennes (test de Tukey) au niveau de signification $\alpha=0.05$. Les niveaux du facteur "Modalité" pour lesquels l'appartenance au groupe n'est pas la même, sont différents significativement.

Niveaux du facteur « Modalité »	pH ($\mu \pm \sigma$)	Groupe (niveau de signification $\alpha = 0.05$)
---------------------------------	-------------------------	---

LAB	5.92±0.2	A
SD	6.03±031	A
TCS	5.89±0.17	A

1.2 Bases échangeables

Comme pour chaque analyse statistique réalisée, chacune s'est d'abord basée sur un modèle complet qui a, par la suite, été simplifié sur base de la significativité des termes. Le modèle complet a consisté en plusieurs facteurs fixes : « Modalité », « Profondeur », « Modalité*Profondeur ». Les facteurs aléatoires étaient « Bloc », « Bloc*Profondeur », « Bloc*Modalité » et enfin « Bloc*Profondeur*Modalité ». Après analyses statistiques, ce modèle a pu être simplifié pour chacune des bases échangeables. Les modèles simplifiés sont décrits ci-dessous.

1.2.1 Le Calcium (Ca²⁺)

Sur base des analyses statistiques, un modèle mixte a été réalisé pour le calcium. En effet, la « Concentration en Calcium » qui est la variable quantitative est uniquement expliquée par le facteur « Profondeur » qui possède une p-valeur de 0.0088. Les facteurs « Modalité » et « Profondeur*Modalité » ne sont pas significatifs car leurs p-valeurs respectives sont égales à 0.9746 et 0.5349. Selon le modèle, la concentration en calcium n'est pas affectée par la modalité de travail du sol. Concernant les facteurs aléatoires, seul le facteur « Bloc » s'est avéré significatif. La significativité de ce dernier terme permet de mettre en évidence une hétérogénéité de terrain pour cette base échangeable. Le modèle simplifié comprend donc le facteur fixe « Profondeur » et le facteur aléatoire « Bloc ». Un tel modèle présente un R² de 0.6406 et le R² ajusté est de 0.4758.

La concentration en calcium augmente avec la profondeur (fig.26). Le test de Tukey (tab.10) démontre que la moyenne de la concentration en calcium pour la profondeur 0-15 cm est significativement différente de la moyenne à la profondeur 30-45 cm.

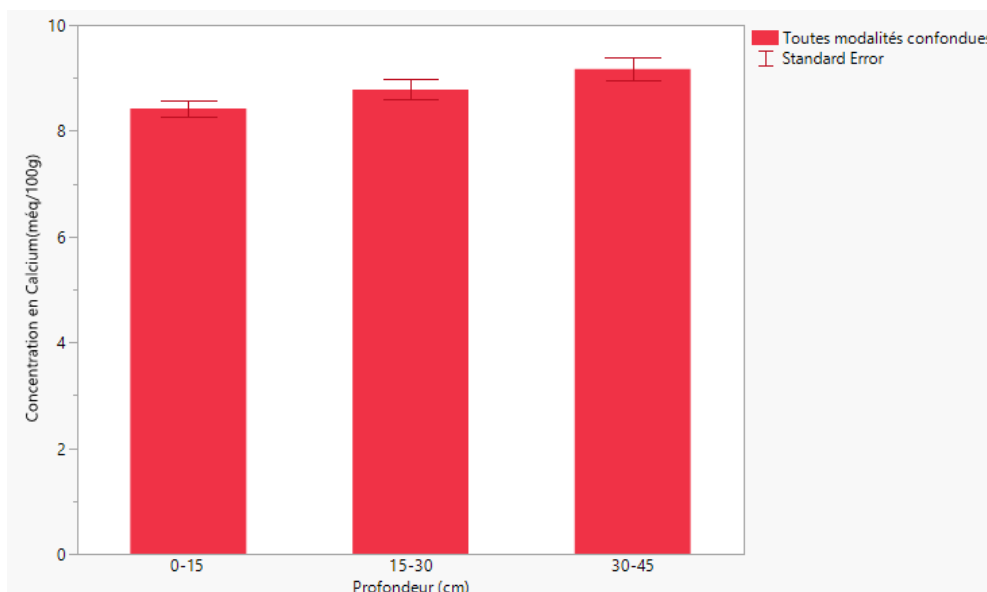


Figure 26: Valeurs moyennes de concentration en Calcium (méq/100g) en fonction de la profondeur (cm) toutes modalités confondues. Les barres d'erreurs correspondent aux erreurs standards.

Tableau 10: Comparaison de moyennes (test de Tukey) au niveau de signification $\alpha=0.05$. Les niveaux du facteur "Profondeur" pour lesquels l'appartenance au groupe n'est pas la même sont différents significativement.

Niveaux du facteur « Profondeur (cm) »	Concentration en calcium (méq/100g) ($\mu \pm \sigma$)	Groupe (niveau de signification $\alpha=0.05$)
0-15	8.42±0.51	A
15-30	8.78±0.65	AB
30-45	9.17±0.78	B

1.2.2 Le Potassium (K^+)

En ce qui concerne le potassium, une ANOVA I a été mise en place car il s'avère que la variable quantitative « Concentration en Potassium » est expliquée uniquement par le facteur « Profondeur » dont la p-valeur est de 0.0061. Les facteurs fixes « Modalité » et « Modalité*Profondeur » ne sont pas apparus significatifs, en effet leur p-valeurs respectives sont de 0.4370, 0.4604. Sur base de la non-significativité de ces précédents termes, la modalité de travail du sol ne semble pas affecter la concentration en potassium. Le facteur aléatoire « Bloc » ainsi que ses interactions avec les facteurs « Modalité », « Profondeur » et « Modalité*Profondeur » ne se sont pas avérés significatifs sur base du test de rapport de vraisemblance. La non-significativité de ces termes permet de considérer le terrain homogène en termes de concentrations en potassium. Ce modèle permet d'expliquer 47.13 % de la variabilité observée. Le R^2 ajusté est de 0.2290.

La concentration moyenne en potassium toutes modalités confondues (fig.27) est plus élevée pour la gamme de profondeurs 0-15 cm que pour les autres gammes de profondeur. Cette constatation est confirmée par le test de Tukey (tab.11) qui confirme que la

concentration moyenne en potasse à 0-15 cm est significativement différente des concentrations moyennes observées de 15 à 45 cm de profondeur.

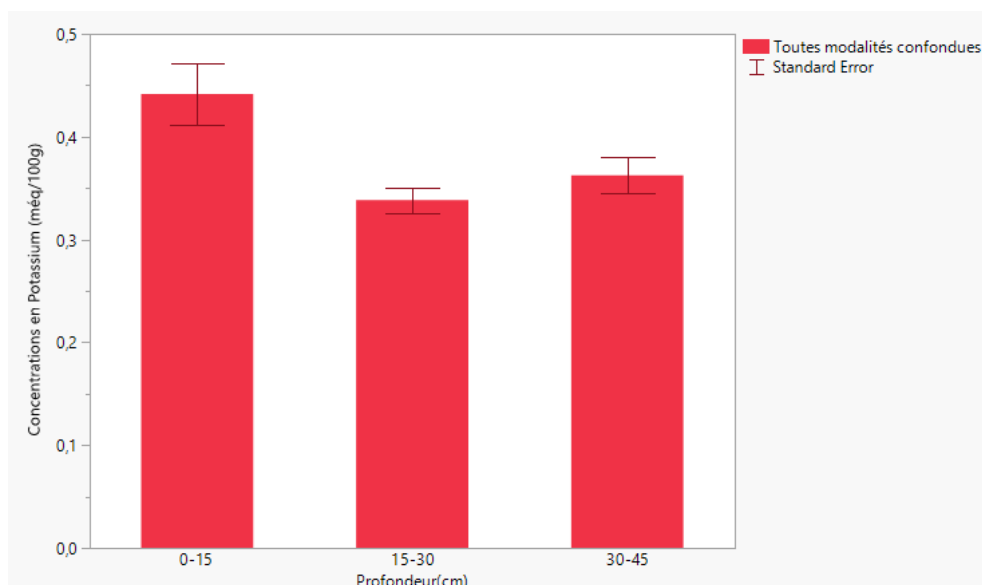


Figure 27: Valeurs moyennes de concentration en potassium (még/100g) en fonction de la profondeur (cm) toutes modalités confondues. Les barres d'erreurs correspondent aux erreurs standards.

Tableau 11: Comparaison de moyennes d'un test de Tukey au niveau de signification $\alpha = 0.05$. Les niveaux du facteur "Profondeur" pour lesquels l'appartenance au groupe n'est pas la même sont différents significativement.

Niveaux du facteur « Profondeur (cm) »	Concentration en potassium (még/100g) ($\mu \pm \sigma$)	Groupe (niveau de signification $\alpha = 0.05$)
0-15	0.44 \pm 0.10	A
15-30	0.33 \pm 0.04	B
30-45	0.36 \pm 0.06	B

1.2.3 Le Magnésium (Mg^{2+})

Pour le magnésium, les facteurs fixes « Profondeur » et « Modalité » ne permettent pas d'expliquer la variable quantitative « Concentration en Magnésium », leurs p-valeurs respectives sont de 0.1409 et 0.9578. Le terme d'interaction « Modalité*Profondeur » est proche de la significativité avec une p-valeur de 0.0737. En ce qui concerne les termes aléatoires seulement le terme « Bloc*Modalité » est significatif sur base du test du rapport de vraisemblance. Le modèle ne permet pas d'expliquer la variable quantitative par les facteurs fixes. Sur base de ces résultats, la concentration en magnésium montre une légère augmentation suivant la profondeur et est homogène suivant la modalité de travail du sol. Malgré que la concentration moyenne en magnésium soit légèrement supérieure à la gamme de profondeurs comprises entre 30 et 45 cm (fig.28), le modèle ne permet pas de

valider cette constatation et considère que la concentration en magnésium est homogène sur les profondeurs allant de 0 à 45 cm.

Un test de Tukey (tab.12) comparant les moyennes de concentration de magnésium aux trois gammes de profondeur a été réalisé ; celui-ci n'a pas montré de différence significative entre concentrations.

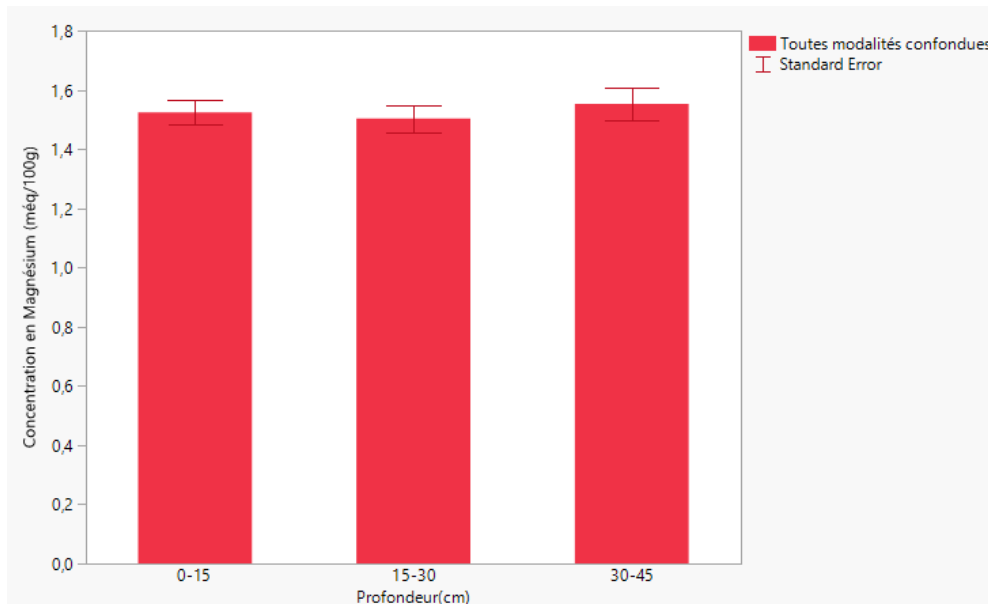


Figure 28: Valeurs moyennes de concentration en magnésium (méq/100g) en fonction de la profondeur (cm) toutes modalités confondues. Les barres d'erreurs correspondent aux erreurs standards.

Tableau 12: Comparaison de moyennes d'un test de Tukey au niveau de signification $\alpha = 0.05$. Les niveaux du facteur "Profondeur" pour lesquels l'appartenance au groupe n'est pas la même sont différents significativement.

Niveaux du facteur « Profondeur(cm) »	Concentration en magnésium (méq/100g)	Groupe (niveau de signification $\alpha = 0.05$)
0-15	1.52±0.15	A
15-30	1.50±0.16	A
30-45	1.55±0.20	A

1.2.4 Le Sodium (Na⁺)

Pour le sodium, la variable quantitative « Concentration en Sodium » n'a pu être expliquée par le facteur « Profondeur », sa p-valeur est de 0.1754. Les autres facteurs fixes tels que les facteurs « Modalité » et « Modalité*Profondeur » ne sont pas non plus significatifs, leurs p-valeurs sont respectivement de 0.9591 et 0.7957. Selon le test du rapport de vraisemblance, les facteurs aléatoires ne sont pas apparus significatifs non plus. Bien que le modèle ne permette d'expliquer la variable quantitative par les facteurs « Modalité », « Profondeur » et

« Modalité*Profondeur », les résultats ont malgré tout été repris dans l’histogramme ci-dessous (fig.29). La concentration moyenne en sodium semble être plus élevée aux profondeurs comprises entre 15 et 30 cm par rapport aux deux autres gammes de profondeur, cependant le test de Tukey ne permet pas de le confirmer (tab.13).

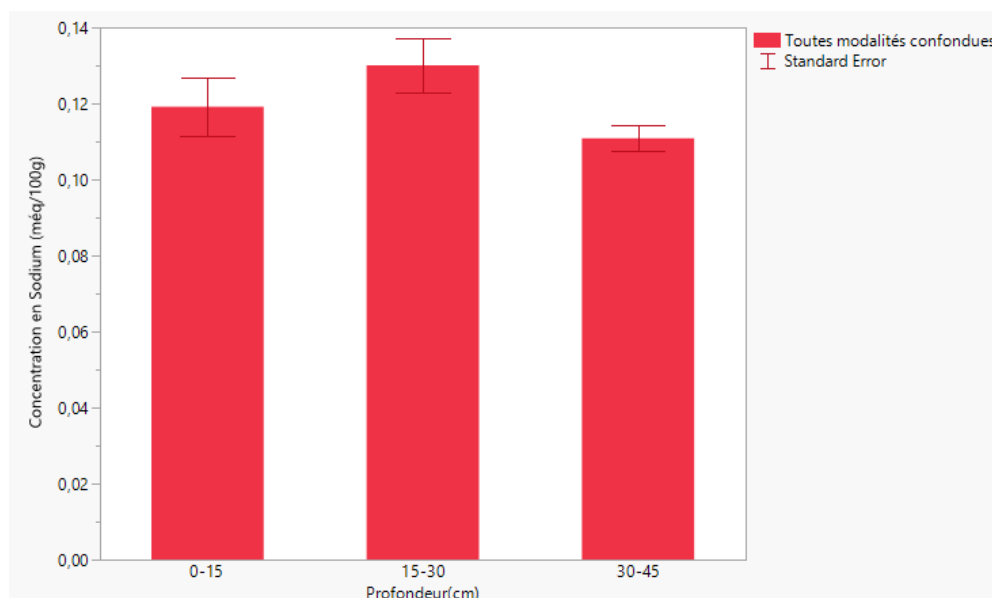


Figure 29: Valeurs moyennes de concentration en sodium (még/100g) en fonction de la profondeur (cm) toutes modalités confondues. Les barres d’erreurs correspondent aux erreurs standards.

Tableau 13: Comparaison de moyennes d’un test de Tukey au niveau de signification $\alpha = 0.05$. Les niveaux du facteur "Profondeur" pour lesquels l’appartenance au groupe n’est pas la même sont différents significativement

Niveaux du facteur « Profondeur(cm) »	Concentration en sodium (még/100g) ($\mu \pm \sigma$)	Groupe (niveau de signification $\alpha = 0.05$)
0-15	0.12±0.03	A
15-30	0.13±0.03	A
30-45	0.11±0.01	A

1.3 La capacité d’échange cationique (CEC)

Le traitement des données concernant la capacité d’échange cationique a été possible grâce à la construction d’un modèle initial composé de facteurs fixes et aléatoires. Les facteurs fixes étaient « Modalité », « Profondeur », l’interaction « Modalité*Profondeur ». Les facteurs « Bloc », « Bloc*Modalité », « Bloc*Profondeur » et enfin « Bloc*Modalité*Profondeur » étaient les termes aléatoires. Suite à la fermeture des laboratoires en raison de la pandémie COVID-19, seulement les Bloc 2 et 3 ont pu être analysés complètement. Le Bloc 1 n’a donc pas pu être utilisé pour le traitement des données. Le modèle initialement prévu n’a donc pas été modifié ; cependant,

l'interprétation des analyses ne pourra être effectuée que sur les blocs 2 et 3 et non sur l'ensemble du dispositif expérimental.

Après analyse statistique, parmi les termes fixes, seulement « Profondeur » s'est avéré significatif avec une p-valeur de 0.0085. Les autres termes fixes « Modalité » et « Modalité*Profondeur » présentaient des p-valeurs de 0.5679 et 0.9781. En ce qui concerne les facteurs aléatoires, ceux-ci se sont montrés non-significatifs sur base du test du rapport de vraisemblance. Sur base de ce qui a été mentionné précédemment un modèle ANOVA I a été réalisé avec comme unique facteur explicatif, le facteur « Profondeur ». La tendance qui se dégage de la figure 30 est une augmentation des valeurs moyennes de CEC en fonction de l'augmentation de la profondeur.

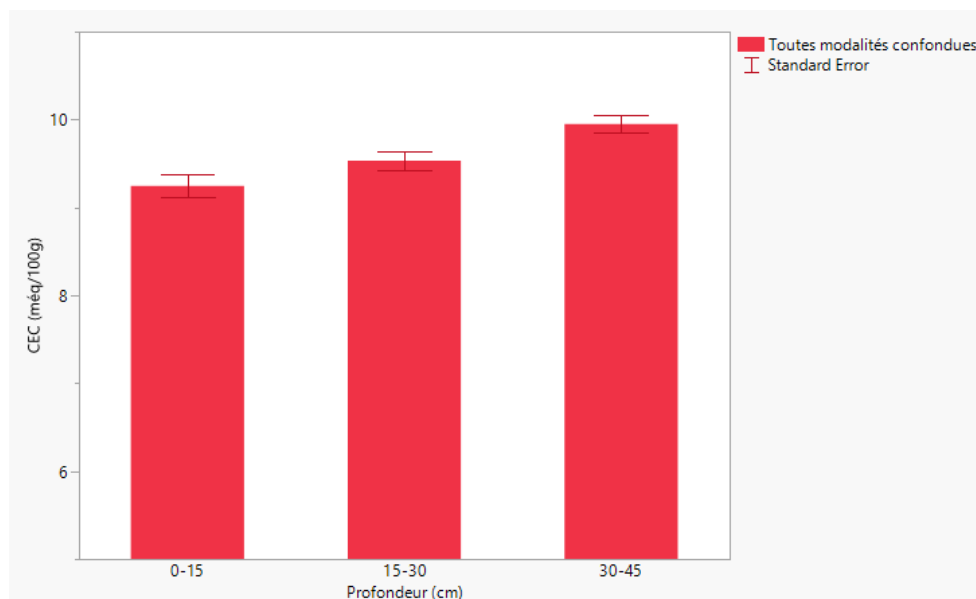


Figure 30: Valeurs moyennes de CEC (még/100g) en fonction de la profondeur (cm) toutes modalités confondues. Les barres d'erreurs sont des erreurs standards.

Un test de comparaison de moyennes a été effectué afin de détecter les différences significatives entre les moyennes de CEC (tab.14). Il s'avère que les moyennes de CEC aux profondeurs 0-15 et 15-30 cm sont significativement différentes de la moyenne de CEC à la profondeur 30-45 cm.

Tableau 14: Comparaison de moyennes d'un test de Tukey au niveau de signification 0.05. Les niveaux du facteur "Profondeur" pour lesquels l'appartenance au groupe n'est pas la même sont différents significativement.

Niveaux du facteur « Profondeur(cm) »	CEC (még/100g) ($\mu \pm \sigma$)	Groupe (niveau de signification $\alpha = 0.05$)
0-15	9.24 ± 0.36	A
15-30	9.53 ± 0.30	A
30-45	9.95 ± 0.28	B

1.4 La pénétrométrie

Afin de traiter les données de pénétrométrie, un premier modèle a été formé sur base des facteurs fixes « Modalité », « Profondeur » et l'interaction « Modalité*Profondeur ». Le facteur « Profondeur » a été élevé à la puissance 4. Cette puissance offre à la fois un ajustement de qualité tout en ne surchargeant pas excessivement le modèle de paramètres (parsimonie du modèle). La mise en place d'un tel modèle a été possible grâce au suivi du cours LSTAT2320. Plusieurs facteurs aléatoires ont été inclus dans le modèle. Le facteur « Bloc », son interaction avec les facteurs « Profondeur » et « Modalité » ont été mis en place. Un deuxième modèle s'est avéré plus performant en ajoutant d'autres facteurs aléatoires tels que des facteurs hiérarchisés : « Parcelle [Bloc] », « Position [Bloc, Parcelle] ». Sur base du test du rapport de vraisemblance seuls les termes aléatoires « Bloc*Profondeur » et « Position [Bloc, Parcelle] » sont significatifs. Ce modèle permet d'expliquer 72,2 % de la variabilité observée (R^2) et le R^2 ajusté est de 0.7210. En ce qui concerne les facteurs fixes, les facteurs « Profondeur », « Modalité » et « Profondeur*Modalité » sont significatifs avec des p-valeurs respectives de 0.0005, <0.0001, <0.0001.

1.4.1 Le facteur « Modalité » et l'interaction « Modalité*Profondeur »

Le terme modalité étant significatif, un test de Tukey (tab.15) a été réalisé afin de déceler quelles modalités de travail du sol diffèrent entre elles. Ce test a révélé que la modalité « SD » était significativement différente des trois autres modalités avec une moyenne de résistance à la pénétration (MPa) de 1,55 par rapport aux résistances à la pénétration des autres modalités qui sont de 1,24 ; 1,17 ; 1,11 pour respectivement « LAB », « RETRA » et « TCS ». Ces trois dernières modalités ne sont pas significativement différentes entre elles sur base du test de Tukey.

Tableau 15: Moyennes et écarts-types de la résistance à la pénétration en fonction de la modalité. Les résultats obtenus par le test de Tukey ont également été répertoriés dans la colonne "Groupe". Les niveaux du facteur "Modalités" pour lesquels l'appartenance au groupe n'est pas la même sont différents significativement.

Niveaux du facteur « Modalité »	Moyenne et Ecart-type($\mu \pm \sigma$)	Groupe (niveau de signification $\alpha = 0.05$)
LAB	1,24 \pm 1,63	A
RETRA	1,17 \pm 1,53	A
SD	1,55 \pm 1,76	B
TCS	1,11 \pm 1,51	A

Les courbes ont un profil semblable (fig.31) pour les modalités « LAB », « RETRA » et « TCS ». Le profil observé pour la modalité « SD » s'éloigne des autres par la présence de deux plateaux et une relation linéaire entre ces deux plateaux.

Le graphique (fig.31) reflète premièrement la résistance à la pénétration plus élevée pour la modalité « SD » par rapport aux autres modalités jusqu'à la profondeur de 38 cm. En effet, la courbe verte correspondant à la modalité « SD » présente une résistance à la pénétration supérieure à toutes les autres modalités jusqu'à la profondeur de 38 cm. Jusqu'à cette même profondeur, la succession des modalités par ordre croissant de résistance à la pénétration est la suivante : « TCS », « RETRA », « LAB » et enfin « SD ».

Ensuite, à 40 cm de profondeur, la succession des résistances à la pénétration par ordre croissant est la suivante : « TCS », « SD », « LAB » et enfin « RETRA », cette dernière modalité qui présentait une résistance à la pénétration faible avant la profondeur de 38 cm a dépassé l'ensemble des autres modalités.

Enfin, aux environs de 50 cm de profondeur, la modalité « SD » est celle qui présente les valeurs de résistance à la pénétration les plus faibles, la modalité « RETRA » surpasse l'ensemble des autres modalités. Et enfin à 60 cm, c'est la modalité « SD » qui est encore en tête suivie des modalités « RETRA », « TCS » et « LAB ».

Deuxièmement, l'interaction significative « Profondeur*Modalité » est illustrée par la position de la courbe verte par rapport aux autres courbes (fig.31). La courbe verte correspondant à la modalité « SD » est jusqu'à 38 cm à une position supérieure par rapport aux autres. Après 38 cm, la tendance est inversée, les trois autres courbes sont positionnées au-dessus de cette courbe verte jusqu'à 55 cm. Le terme d'interaction explique ce phénomène d'inversion de tendance.

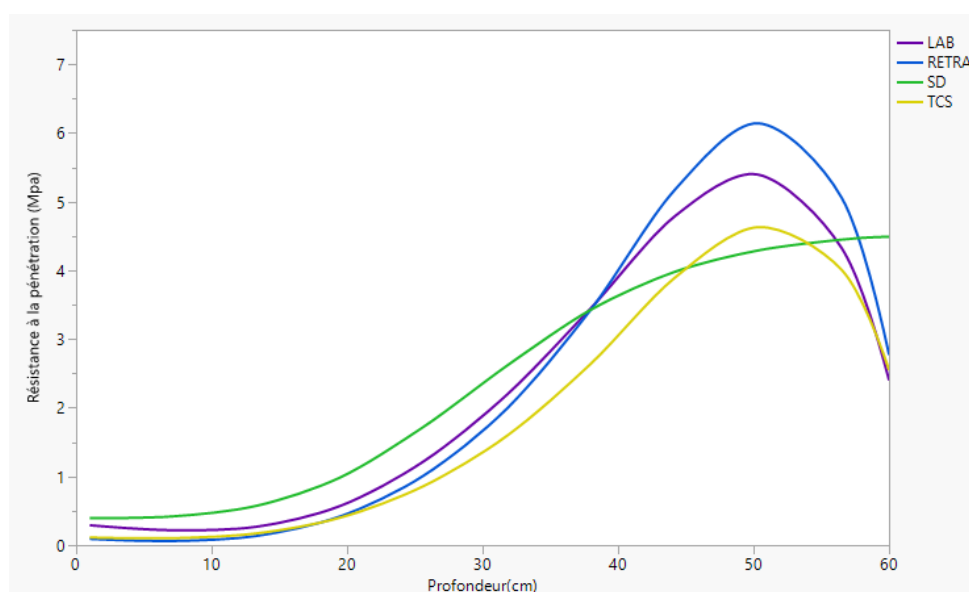


Figure 31: Graphe de la Résistance à la pénétration (MPa) en fonction de la profondeur (cm), les couleurs symbolisent les modalités (voir légende).

1.4.2 Le facteur « Profondeur »

La réalisation d'une régression polynomiale de degré 4 avec le facteur « Profondeur » a été motivée par la significativité de ce terme dans le modèle décrit ci-dessus. Ce modèle (fig.32) présente un R^2 et un R^2 ajusté de 0,58. La corrélation entre la variable quantitative résistance à la pénétration et la variable explicative « Profondeur » est de 0,72. La probabilité de la corrélation est inférieure à 0,0001 ce qui signifie que la corrélation est significative. La courbe présente d'abord une incurvation entre la profondeur de 0 à 20 cm. Une relation linéaire est ensuite observable de 20 à 50 cm et pour finir, un plateau des valeurs de résistance à la pénétration a été atteint entre 50 et 60 cm.

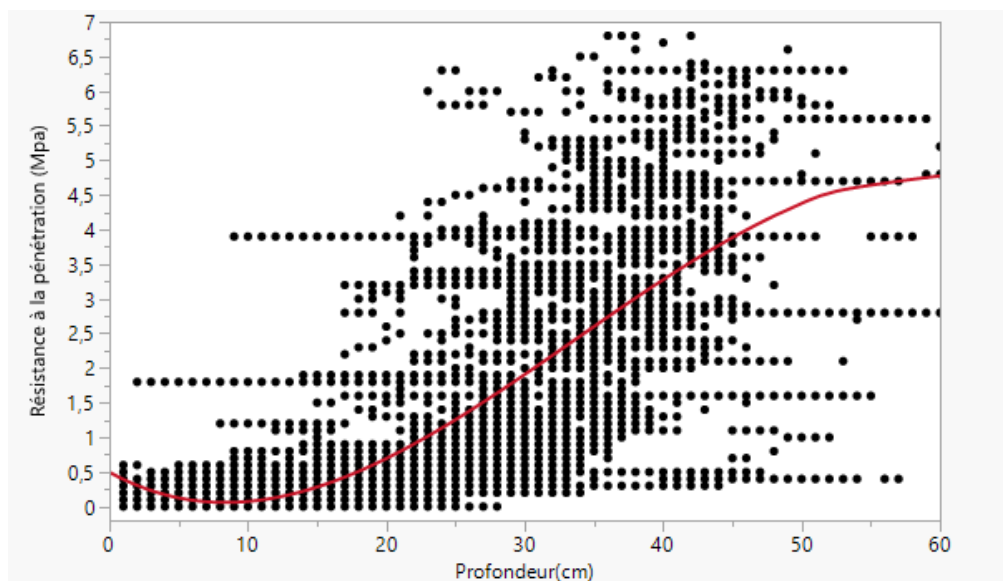


Figure 32: Régression linéaire polynomiale de la Résistance à la pénétration (MPa) en fonction de la profondeur (cm). L'équation de la courbe est la suivante : Résistance à la pénétration (MPa) = $-1,492285 + 0,1089626 * \text{Profondeur}(\text{cm}) + 0,002566 * (\text{Profondeur}(\text{cm}) - 21,7771)^2 - 7,3741e-5 * (\text{Profondeur}(\text{cm}) - 21,7771)^3 + 4,6915e-8 * (\text{Profondeur}(\text{cm}) - 21,7771)^4$.

2. Les analyses de couvert

2.1 Le Green Area Index (GAI)

Pour cette analyse, un premier modèle complet a été élaboré. Celui-ci a fait intervenir un premier facteur fixe : « Modalité ». Un autre facteur fixe « Date » a été ajouté ; les prélèvements de couvert pour la mesure du GAI ont été effectués sur deux jours, ce dernier facteur fixe permet de prendre en compte ce fait. Le facteur « Date » a été considéré comme fixe car l'objectif n'est pas de généraliser l'effet « Date » parmi l'ensemble des dates possibles. Et enfin l'interaction « Modalité*Date ». Plusieurs facteurs aléatoires ont également été ajoutés, le facteur « Bloc » et ses interactions avec les facteurs fixes : « Bloc*date », « Bloc*Modalité » et enfin « Bloc*Modalité*Date »

Après analyse statistique, parmi les facteurs fixes, seul le facteur « Modalité » est apparu significatif avec une p-valeur de 0.0463. Le travail du sol effectué affecte donc significativement la surface de couvert, par contre la date de prélèvement n'a pas eu d'influence notable sur le GAI. Pour les facteurs aléatoires le facteur « Bloc » est le seul facteur significatif selon le test du rapport de vraisemblance. Pour cette analyse, le dispositif expérimental présente donc une hétérogénéité entre blocs. Dès lors, le modèle utilisé pour expliquer la variable quantitative GAI est un modèle mixte, et il explique 88.91 % (R^2) de la variabilité observée avec un R^2 ajusté de 0.8475. Lorsque les modalités de travail du sol (fig.33) sont ordonnées sur base de leurs valeurs de GAI croissantes, la succession qui est observée est la suivante : « SD », « TCS », « RETRA » et enfin « LAB ». La modalité « SD » -la moins travaillée- présente le GAI le plus faible ; *a contrario* la modalité « LAB » -la plus travaillée- présente la valeur moyenne de GAI la plus élevée (tab.9).

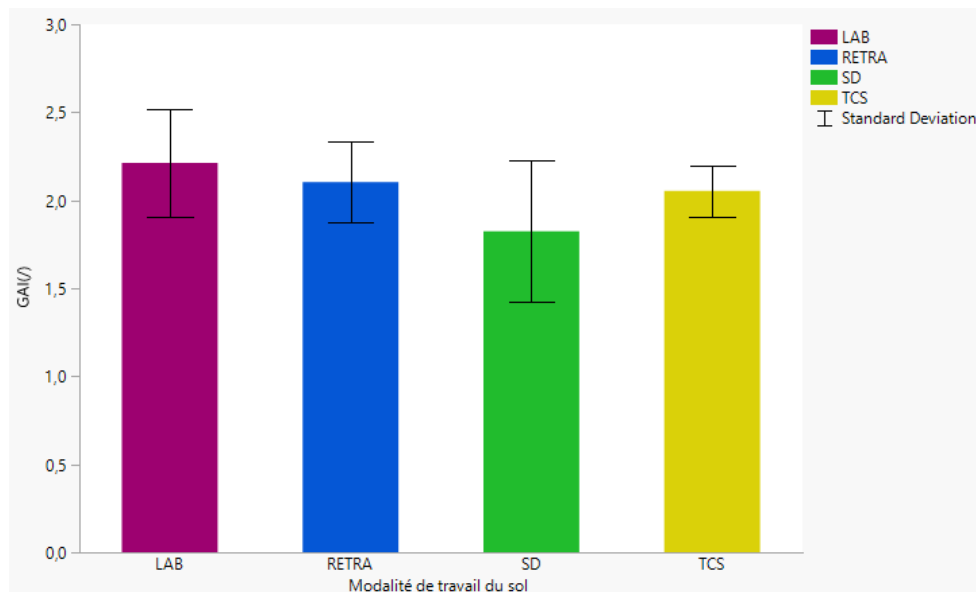


Figure 33: Valeurs moyennes du Green Area Index en fonction des modalités de travail du sol. Les barres d'erreurs correspondent aux écarts-types. Les couleurs symbolisent les modalités de travail du sol (voir légende).

Cette constatation a été vérifiée par la réalisation d'un test de comparaison des moyennes de Tukey (tab.16). Sur base de ce test, le GAI moyen de la modalité « LAB » dont la valeur est 2.21 est significativement différent de celui de la modalité « SD » qui présente une valeur de 1.82, les valeurs du GAI moyennes associées aux modalités « LAB », « RETRA », « TCS » ne sont pas significativement différentes entre elles, de même que « SD », « RETRA », « TCS ».

Tableau 16: Les moyennes, écarts-types du GAI selon la modalité de travail du sol. Les modalités caractérisées par une lettre différente dans la colonne "Groupe" signifient qu'elles sont différentes significativement au niveau de signification 0.05.

Niveaux du facteur « Modalité »	GAI ($\mu \pm \sigma$)	Groupe (niveau de signification =0.05)
LAB	2.21±0.05	A
RETRA	2.10±0.09	AB
SD	1.82±0.14	B
TCS	2.05±0.14	AB

2.2 Le poids sec de la biomasse aérienne

Pour effectuer le traitement des données obtenues suite à cette mesure, un modèle statistique complet a été réalisé afin d'expliquer le poids sec de la biomasse aérienne par un facteur catégoriel fixe « Modalité ». Un facteur aléatoire « Bloc » a également été inclus dans le modèle ainsi que l'interaction « Bloc*Modalité ».

Cependant, le modèle montre que le poids sec de la biomasse aérienne ne peut être expliqué par le facteur « Modalité ». La p-valeur de l'effet fixe est de 0.3150. La non-significativité du terme fixe « Modalité » montre que le travail du sol n'impacte pas le poids sec de la biomasse aérienne. Cette constatation est contradictoire avec les valeurs obtenues dans le cadre de la mesure du GAI qui mesure également le couvert. L'explication la plus plausible de l'obtention de ce modèle non pertinent est la grande variabilité présente dans les données récoltées, en partie liée à l'hétérogénéité du terrain et de l'endroit de prélèvement du couvert. Cette explication est également reflétée par les écarts-type de la modalité « RETRA » et « TCS » (tab.17).

Même si ces moyennes ne sont pas significativement différentes les unes des autres (tab.17), la succession des modalités par ordre croissant des poids secs moyens est la

suivante : « SD », « TCS », « RETRA » et enfin « LAB » (fig.34). Cette dernière est semblable à la succession observée dans le cas du GAI.

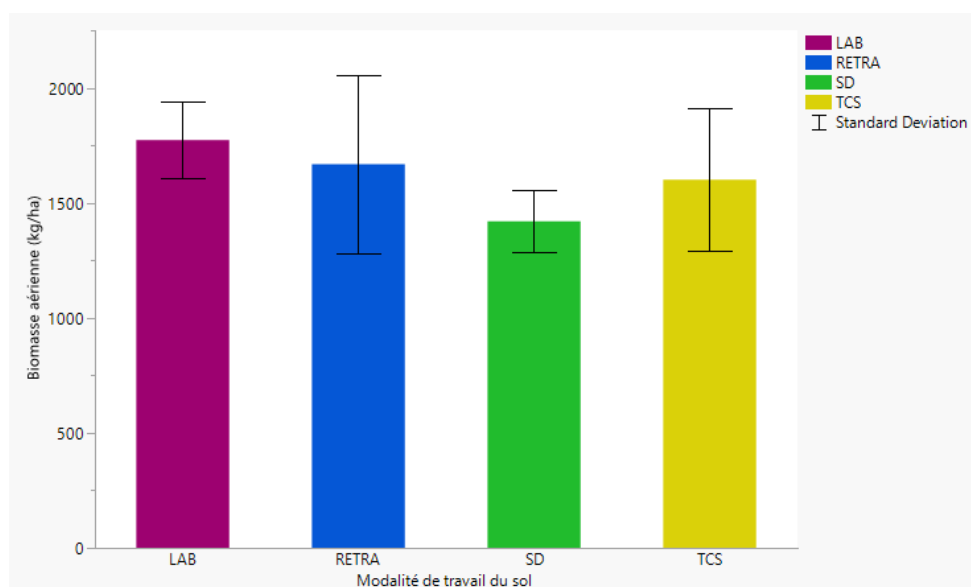


Figure 34: Valeurs moyennes du poids sec de la biomasse aérienne en fonction des modalités de travail du sol. Les barres d'erreurs sont des écarts-types. Les couleurs symbolisent les modalités de travail du sol (voir légende).

Un test de Tukey (tab.17) a malgré tout été réalisé, comme attendu aucune des modalités de travail du sol ne diffère des autres.

Tableau 17: Valeurs moyennes et écarts-types des poids secs de la biomasse aérienne en fonction de la modalité(kg/ha). Une différence est significative entre deux valeurs du poids sec de la biomasse aérienne lorsque les modalités ne sont pas liées pas la même lettre dans la colonne « Groupe ».

Les niveaux du facteur « Modalité »	Poids sec de la biomasse aérienne (kg/ha) ($\mu \pm \sigma$)	Groupe (niveau de signification=0.05)
LAB	1772.43±164.97	A
RETRA	1667.88±386.52	A
SD	1420.38±133.84	A
TCS	1600.84±309.86	A

3. Les rendements obtenus en tubercules de pommes de terre

Le modèle statistique mixte initial utilisé pour traiter les données de rendement en tubercules est le suivant : L'unique facteur catégoriel fixe est le facteur « Modalité ». Ensuite, les facteurs aléatoires inclus dans ce modèle sont les facteurs « Bloc » et son interaction avec le facteur fixe « Bloc*Modalité ». Ce modèle n'a pas permis d'expliquer la

variable quantitative « Rendements totaux en pommes de terre » par le facteur « Modalité », la p-valeur de ce dernier est de 0.3193.

Bien que le modèle ne puisse pas expliquer la variabilité observée par le facteur « Modalité », les valeurs moyennes en rendements totaux ont été mises en graphe en fonction des modalités de travail du sol afin de visualiser d'éventuelles tendances (fig.35). Premièrement, la modalité « RETRA » a fourni des rendements supérieurs aux autres modalités avec une valeur moyenne de 40,67 t/ha (tab.18). Les deux modalités qui suivent directement la modalité « RETRA » en termes de rendements sont « LAB » et « SD » avec des valeurs respectives de 32,7 et 30.83 t/ha. Les rendements les plus faibles ont été recensés au sein de la modalité « TCS » avec une valeur moyenne qui est égale à 29 t/ha.

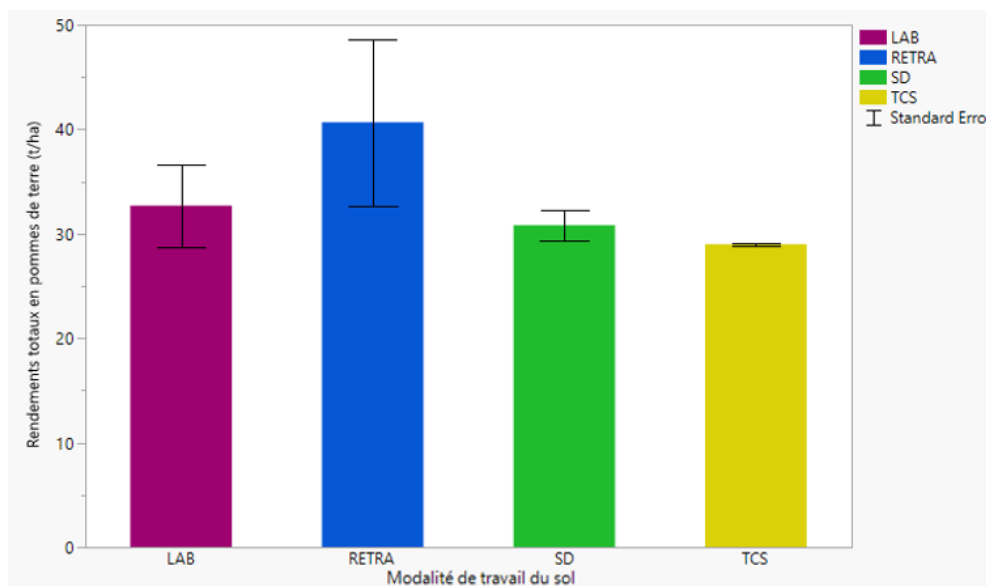


Figure 35: Valeurs moyennes de rendements totaux (t/ha) en pommes de terre en fonction des modalités de travail du sol. Les barres d'erreurs sont des erreurs standards. Les couleurs symbolisent les modalités de travail du sol (voir légende).

Tableau 18: Valeurs moyennes et écarts-type des rendements totaux en pommes de terre, les résultats du Test de Tukey ont également été notés. Une différence est significative entre deux valeurs rendements lorsque les modalités ne sont pas liées pas la même lettre dans la colonne « Groupe ».

Les niveaux du facteur « Modalité »	Rendements totaux (t/ha) ($\mu \pm \sigma$)	Groupe (niveau de signification=0.05)
LAB	32,70±6.86	A
RETRA	40,67±13.82	A
SD	30,83±2.60	A
TCS	29,00±0.20	A

4. Analyses biologiques : Mycorhizes

4.1 Taux de colonisation arbusculaire

Comme mentionné dans chapitre 5 section 3.6, le taux de colonisation racinaire le plus pertinent dans le cadre de l'analyse des champignons à arbuscules est le taux de colonisation arbusculaire. Les données qui sont traitées dans cette section ont été obtenues via les analyses Mc Gonigle qui ont été menées sur les racines de pommes de terre. Un modèle a été généré afin d'expliquer la variable quantitative « Taux de colonisation arbusculaire » en fonction d'un seul facteur fixe « Modalité ». Deux effets aléatoires « Bloc » et « Bloc*Modalité » ont également été ajoutés dans le modèle complet.

Après analyse, il s'est avéré que le facteur fixe « Modalité » était très proche de la significativité avec une p-valeur de 0.0815. Les facteurs aléatoires « Bloc » et « Bloc*Modalité » étaient considérés comme non-significatifs sur base du test du rapport de vraisemblance.

Etant donné que le facteur modalité était proche de la significativité, un test de comparaison de moyenne de Tukey a été réalisé (tab.19). En posant le niveau de signification à 0.05, aucune des moyennes n'est apparue significativement différente des autres. Les différences de moyennes entre modalités sont cependant élevées. Dès lors, pour l'exercice, le niveau de signification a été abaissé à 0.1 ; la moyenne du taux de colonisation arbusculaire des modalités « LAB » et « SD » sont alors apparues significativement différentes. Sur base du tableau (tab.19) et de la figure ci-dessous (fig.36), un constat peut être réalisé : la moyenne du taux de colonisation racinaire pour la modalité « SD » est supérieure à toutes les autres modalités. En effet, cette dernière montre une valeur de 7% en comparaison avec les autres

modalités pour lesquelles les valeurs sont de 3.83, 1.33 et 0.5 % pour respectivement les modalités « TCS », « RETRA » et « LAB ».

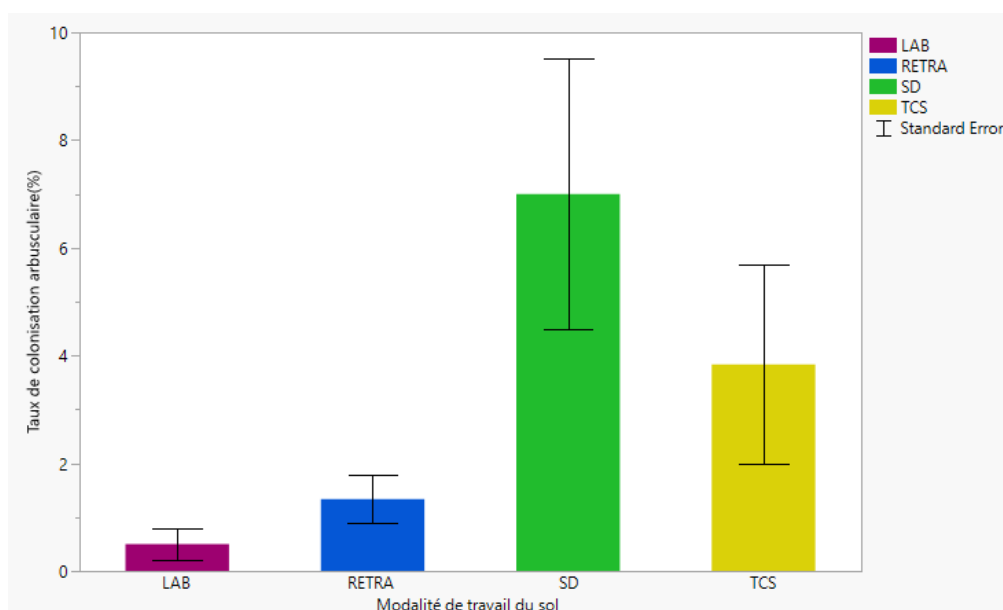


Figure 36 Valeurs moyennes des taux de colonisation arbusculaires en fonction des modalités de travail du sol. Les couleurs symbolisent les modalités comme décrit dans la légende. Les barres d'erreurs sont des erreurs standards.

Tableau 19: Valeurs moyennes et écarts-types du taux de colonisation arbusculaire (%) en fonction de la modalité. Les résultats issus du test de Tukey (niveau de signification 0.05 et 0.1) sont aussi présents. Une différence est significative entre deux valeurs de taux de colonisation arbusculaire lorsque les modalités ne sont pas liées par la même lettre dans la colonne « Groupe ».

Modalité	Taux de colonisation arbusculaire (%) ($\mu \pm \sigma$)	Groupe (niveau de signification $\alpha=0.1$)	Groupe (niveau de signification $\alpha=0.05$)
SD	7.00±4.36	A	A
TCS	3.83±3.21	AB	A
RETRA	1.33±0.76	AB	A
LAB	0.50±0.50	B	A

4.2 Taux de colonisation vésiculaire

Comme pour le taux de colonisation arbusculaire, le taux de colonisation vésiculaire a également été déterminé par la méthode Mc Gonigle à partir de racines de pommes de terre. Pour expliquer la variable quantitative « Taux de colonisation vésiculaire », un modèle statistique a été mis au point. Celui-ci comprend le facteur « Modalité » en tant que facteur fixe. Les facteurs aléatoires sont « Bloc » et « Bloc*Modalité ».

Après analyse statistique, le facteur « Modalité » était très proche de la significativité avec une p-valeur de 0.0645. En ce qui concerne les facteurs aléatoires, ceux-ci ont été considérés comme non-significatifs sur base du test du rapport de vraisemblance.

Tout comme pour le taux de colonisation arbusculaire, le facteur « Modalité » étant proche de la significativité, un test de Tukey a été réalisé. Au niveau de signification 0.05, aucune des modalités ne différait significativement des autres. Pour l'exercice, le niveau de signification a été abaissé à 0.1 ; les taux moyens de colonisation vésiculaires propres aux modalités « SD » et « LAB » sont apparus significativement différents avec des valeurs respectives de 4.67 et 1.5 % (tab.20) (fig.37). Les modalités « RETRA » et « TCS » présentent quant à elles des valeurs respectives de 2.17 et 4.17%, cependant sur base du test de Tukey, elles ne diffèrent ni entre elles ni avec les deux modalités précédemment mentionnées.

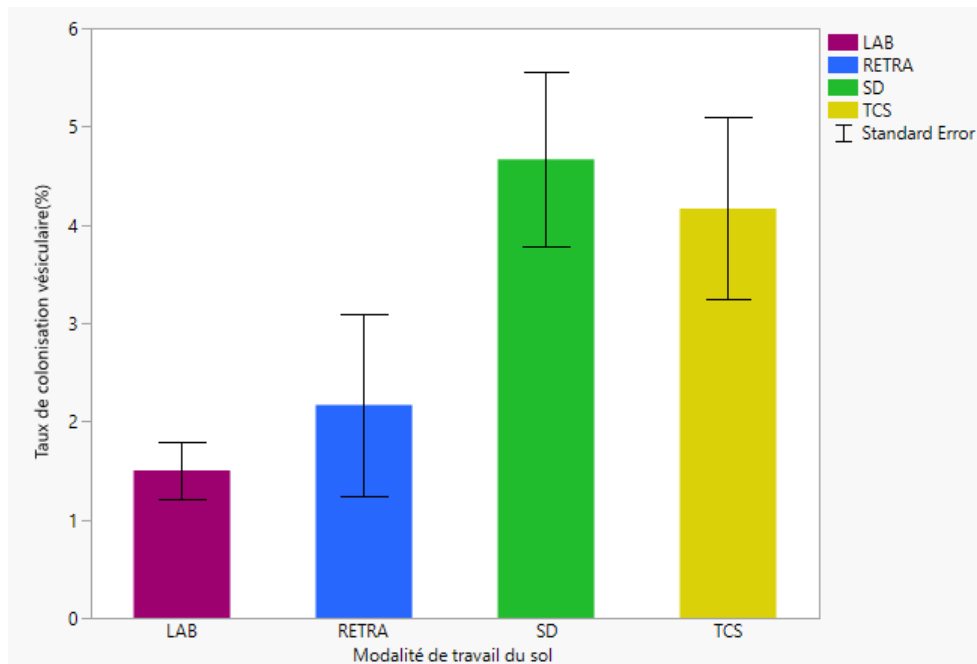


Figure 37: Valeurs moyennes des taux de colonisation vésiculaires en fonction des modalités de travail du sol. Les couleurs symbolisent les modalités comme décrit dans la légende. Les barres d'erreurs sont des erreurs standards.

Tableau 20: Valeurs moyennes et écarts-types du taux de colonisation vésiculaire (%) en fonction de la modalité. Les résultats issus du test de Tukey (niveau de signification 0.05 et 0.1) sont aussi présents. Une différence est significative entre deux valeurs de taux de colonisation vésiculaire lorsque les modalités ne sont pas liées pas la même lettre dans la colonne « Groupe ».

Modalité	Taux de colonisation vésiculaire (%) ($\mu \pm \sigma$)	Groupe (niveau de signification $\alpha=0.1$)	Groupe (niveau de signification $\alpha=0.05$)
SD	4.67±1.53	A	A
TCS	4.17±1.61	AB	A
RETRA	2.17±1.61	AB	A
LAB	1.50±0.50	B	A

4.3 L'évaluation du " Most Probable Number" (MPN)

L'évaluation du nombre le plus probable de propagules actives par gramme de sol a été déterminé par le modèle mis en place par Jarvis et al. (2010). Le modèle initial complet qui a été mis en place consistait en deux facteurs catégoriels fixes « Modalité » et « Temps ». Ce dernier terme a été introduit car comme mentionné dans le chapitre Matériel et Méthodes, un premier prélèvement de sol a été réalisé un mois après la plantation des tubercules (« Temps 0 ») et un deuxième a eu lieu dix jours avant le défanage des pommes de terre (« Temps 1 »). L'interaction entre ces deux facteurs catégoriels n'a pas pu être estimée car le nombre de points supports (quatre Modalités aux Temps 0 et 1 donnent 8 mesures) ne suffisait pas pour réaliser une estimation du terme d'interaction. Le facteur aléatoire « Bloc » n'a pas non plus été pris en compte étant donné que le sol provenant des trois blocs a été regroupé. En effet, un échantillon composite pour chaque modalité aux deux « Temps » de prélèvement a été réalisé afin de limiter l'aspect chronophage de la mise en place de cette analyse.

Après analyse statistique, seul le facteur catégoriel « Temps » est apparu significatif. Dès lors, une ANOVA I a été réalisée. La p-valeur de ce facteur catégoriel est de 0.0284. Ce modèle explique 57.8 % de la variabilité observée, le R^2 ajusté de ce modèle est de 0.5083. Au niveau du « Temps 0 », un mois après la plantation, la moyenne de la densité de propagules actives dans les sols est de 0.0205 propagules par gramme de sol toute modalité confondue (tab.21). Au « Temps 1 », 10 jours avant le défanage des pommes de terre, la

moyenne MPN toutes modalités confondues vaut 0.79 propagules par gramme de sol. L'effet « Temps » affecte donc positivement la densité de population de mycorhizes (fig.38). L'influence du facteur catégoriel « Modalité » n'a pas pu être mise en lumière dans le cadre de cette analyse.

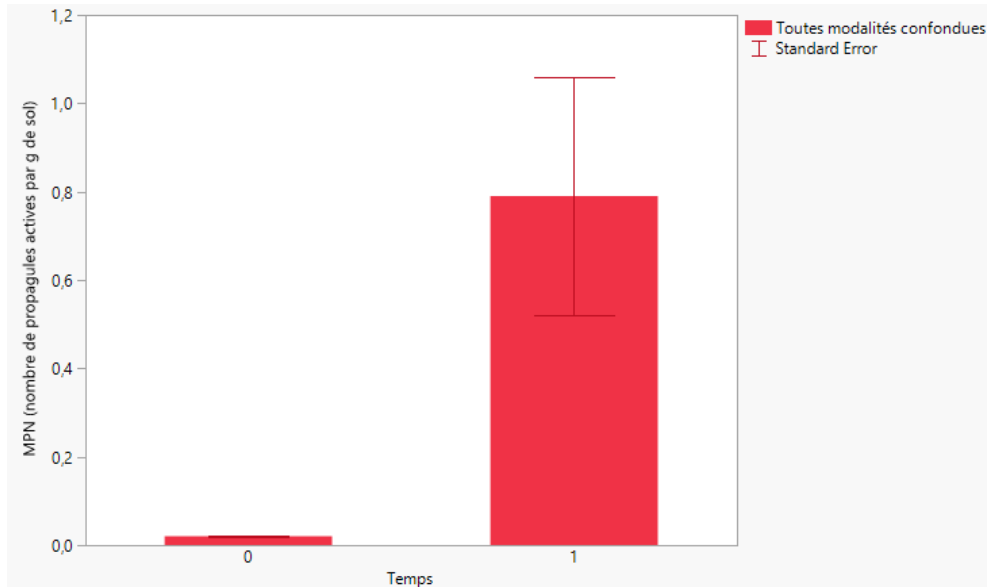


Figure 38: Valeurs moyennes du nombre de plus probable de propagules actives par g de sol en fonction du facteur "Temps" toutes modalités confondues. Les barres d'erreurs sont des erreurs standards.

Tableau 21: Valeurs MPN (nombres de propagules actives /g de sol) moyennes et écarts-types en fonction des niveaux 0 et 1 du facteur « Temps »

Niveau du facteur « Temps »	MPN($\mu \pm \sigma$)	Groupe (niveau de significativité=0.05)
1	0.02±0.00	A
2	0.79±0.54	B

5. Corrélation entre les mesures de biomasse aérienne et rendement en tubercules

Jusqu'à présent, les paramètres mesurés ont été uniquement considérés individuellement. Cette section a pour but de souligner l'existence de corrélations entre ceux-ci. Une première corrélation entre le poids sec de la biomasse aérienne et le rendement en tubercules a été établie. Les prélèvements de la biomasse aérienne ont été effectués le 27 août 2019 dans chacune des modalités et dans chacun des blocs. Grâce au partenariat entre l'ASBL GREENOTEC et la FIWAP (Filière wallonne de la pomme de terre), des prélèvements de pommes de terre ont également été effectués dans chacune des modalités des trois blocs afin d'estimer les rendements totaux, les rendements pour les calibres >35 mm, et les rendements pour les calibres >50mm. Ces prélèvements ont été effectués le 28 août 2019 soit le lendemain du prélèvement de la biomasse aérienne. Sur base des valeurs moyennes des rendements ainsi que sur les valeurs moyennes de biomasse aérienne, différentes relations ont émergé.

Premièrement, une relation linéaire entre les rendements (t/ha) pour les calibres >35 mm et le poids sec de la biomasse aérienne (kg/ha) a été mise en évidence. Le R^2 pour ce modèle est de 0.9030 et le R^2 ajusté est de 0.8545. La valeur de corrélation est de 0.9503 (avec une p-valeur de corrélation de 0.0497). Une observation importante ressort de la visualisation de ce graphe (fig.15), plus le poids sec de la biomasse aérienne augmente, au plus les rendements en calibres >35 mm augmentent.

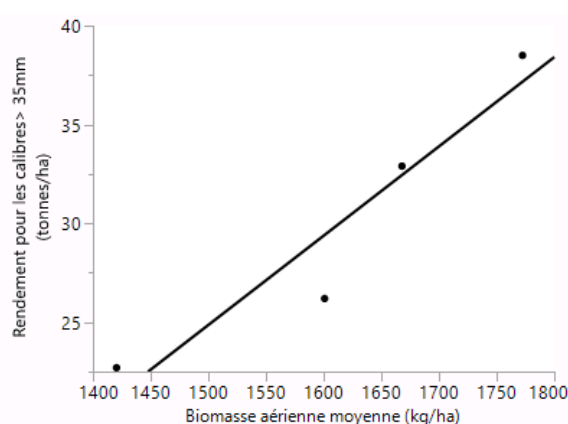


Figure 39: Relation linéaire entre les rendements (t/ha) en pommes de terre pour les calibres >35 mm et le poids sec de la biomasse aérienne (kg/ha). L'équation de la droite est la suivante : Rendements pour les calibres >35mm (t/ha) = -42.8952+0.0451721*Biomasse aérienne moyenne(kg/ha).

Une seconde relation a également été mise en évidence entre les valeurs moyennes de rendements totaux en tubercules (t/ha) et les valeurs moyennes de biomasse aérienne

(kg/ha). Cette fois, c'est une relation quadratique qui lie ces deux variables quantitatives. Le R^2 pour ce modèle est de 0.9965 et le R^2 ajusté est de 0.9895. La valeur de corrélation est égale à 0.9215 avec une p-valeur de corrélation de 0.0785. A nouveau, à partir d'un poids sec de la biomasse aérienne de 1550kg, une augmentation de poids sec de la biomasse aérienne augmente le rendement total (t/ha).

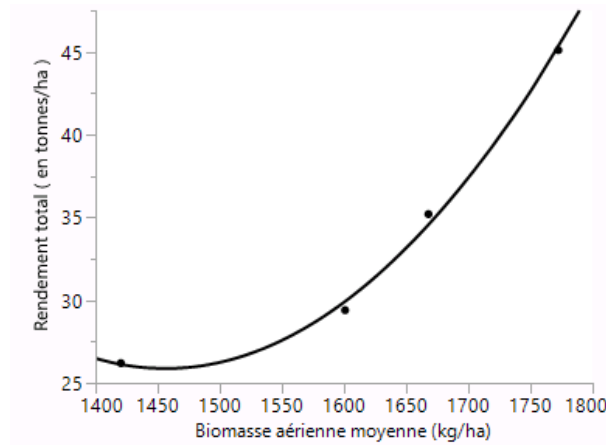


Figure 40:Relation quadratique entre les rendements totaux (t/ha) en pommes de terre et le poids sec de la biomasse aérienne (kg/ha).

L'équation de la droite est la suivante : Rendements totaux (t/ha) = $-68.95894 + 0.0617482 * \text{biomasse aérienne (kg/ha)} + 0.0001942 * (\text{biomasse aérienne (kg/ha)} - 1615.38)^2$

PARTIE IV : DISCUSSION

CHAPITRE 1 : INTERPRETATION DES RESULTATS

Cette section a pour objectif d'interpréter les données statistiques présentées dans la section précédente. Cette interprétation a été réalisée sur base de la littérature. Les valeurs obtenues dans la partie résultats ont été, dans la mesure du possible, comparées avec les données recensées dans la littérature.

1. Analyses chimiques et physiques de caractérisation des sols

1.1 Le pH

Les résultats obtenus suite à l'analyse du pH pour le bloc 1 montrent, premièrement, une stratification verticale des valeurs de pH. Ces dernières augmentent avec la profondeur, en d'autres termes l'acidité est plus importante en surface. Cette observation est confirmée par la littérature. La production d'acides en surface provient de divers phénomènes tels que la minéralisation de la matière organique, l'effet acidifiant lié à la nitrification de l'ammonium apporté par les fertilisants et enfin l'exsudation racinaire. Ces trois phénomènes sont concentrés en surface en raison de la densité racinaire plus élevée, de l'apport de fertilisants et enfin des résidus végétaux (Burle et al., 1997).

Les résultats montrent également une acidification plus importante en surface (0-15 cm) pour la modalité « SD » qui a subi l'intensité de travail du sol la plus faible. Selon Blevins et al. (1977), les valeurs de pH du sol sont significativement inférieures en non-labour par rapport au travail du sol conventionnel pour la couche du sol située entre 0 et 5 cm.

En effet, la concentration en résidus végétaux et en éléments fertilisants est plus importante en surface lorsque le mélange des horizons est absent ou réduit. Gál et al. (2007) signalent que l'acidification de surface est liée à une absence ou à une réduction du mélange des horizons, mais aussi à une moins bonne intégration du chaulage étant donné la faible perturbation des horizons. Tant sous sols labourés que non-labourés, une augmentation de la fertilisation azotée favorise une diminution du pH.

1.2 La capacité d'échange cationique (CEC)

Selon Rhoton et al. (1993), l'adoption des techniques de non-labour favorise une augmentation de la CEC en lien avec l'augmentation du contenu en matière organique propre à ces systèmes. Or, il s'avère que les résultats, concernant la capacité d'échange cationique, n'ont pas montré de différences significatives entre différentes modalités de travail du sol. Une analyse du contenu en matière organique n'a pas pu être réalisée en

raison de la pandémie COVID-19, cependant une explication plausible à cette constatation peut être formulée. Le champ, dans lequel cet essai a été réalisé, est cultivé depuis plusieurs années selon les « Techniques Culturelles Simplifiées ». La mise en place de l'essai d'un an sur ce champ a inclus d'une part, une modalité labourée et d'autre part, trois modalités de travail du sol réduit. Cependant, le laps de temps d'un an est peut-être trop faible pour observer des écarts significatifs, en termes de contenu en matière organique, entre la modalité labourée et les autres.

Une autre constatation sur base des résultats est l'augmentation de la CEC suivant la profondeur. Selon Chapman (2016), la CEC dépend de la matière organique et de la teneur en argiles. La matière organique est riche en phénols, alcools et groupements d'acides carboxyliques qui contribuent à la rétention des cations nutritifs pour la plante ; ces groupements sont caractérisés par un pKa qui indique suivant les valeurs de pH, s'ils possèdent des charges négatives propices à l'adsorption des bases échangeables. D'autre part, la teneur en minéraux argileux contribue également à cette CEC par la présence des multiples sites d'échange en leur surface. L'augmentation significative de la CEC entre les profondeurs 0-30 cm et 30-45 cm est en lien avec ces deux phénomènes. Premièrement, en profondeur la teneur en argiles augmente ce qui fournit une quantité plus importante de sites d'échange. Deuxièmement, le pH augmente suivant la profondeur ; ce facteur permet dès lors une déprotonation de la faible quantité de substances organiques présentes à cette profondeur, leur procurant ainsi des charges négatives propices pour l'adsorption des bases échangeables.

1.3 Les bases échangeables

Tout comme pour les analyses de CEC, aucun impact des modalités de travail du sol n'a pu être mis en évidence. Cependant, une première constatation a émergé des résultats, les cations tels que le calcium et le magnésium ont eu des comportements semblables concernant l'augmentation de leur concentration en fonction de la profondeur. Le calcium est la base échangeable qui présente les concentrations les plus élevées avec des valeurs allant de 8 à 9 méq/100g. Des observations semblables ont été documentées dans la littérature par Limousin & Tessier (2007). Ils ont mis en lien le pH et la concentration en calcium qui suivent tous deux un gradient vertical.

L'explication proviendrait de l'acidification de surface, qui aurait provoqué une désorption du calcium du complexe d'échange, s'accompagnant d'une lixiviation de l'élément vers le fond du profil. Le calcium et le magnésium étant deux éléments de nature similaire du point de vue de leur fixation sur le complexe d'échange ; le magnésium a subi le même phénomène mais dans une moindre mesure.

Le potassium, quant à lui, suit un gradient inverse, sa concentration diminue significativement avec une augmentation de la profondeur. Cette constatation est

documentée dans la littérature et cette stratification s'apparente à celle des systèmes non-labourés (Triplett & Van Doren, 1969).

Dans ces systèmes, une accumulation de fertilisants et de résidus de culture se produit en surface suite à une absence de mélange des horizons. Dans ce cas-ci, aucune distinction n'a été mise en évidence entre modalités de travail du sol ; l'explication serait dès lors en lien avec la méthode utilisée pour incorporer l'agent fertilisant minéral. Ce procédé a été réalisé de manière superficielle et uniforme, pour chaque modalité de travail du sol.

Concernant le sodium, cet élément est peu documenté dans la littérature. Les résultats obtenus au cours de cette étude ont présenté une distribution aléatoire au sein du profil de sol allant de 0 à 45 cm. Il montre cependant une concentration plus importante dans la gamme de profondeurs 15-30 cm. Celui-ci est l'élément le moins présent parmi les bases échangeables avec des concentrations maximales atteignant 0.13 méq/100g. Cette faible présence est documentée comme étant en lien avec la nature minéralogique du sol, sa fixation moindre sur le complexe d'échange et enfin les conditions météorologiques (Triplett & Van Doren, 1969).

1.4 La pénétrométrie

Selon Yasin et al. (1993), il existe plusieurs facteurs qui influencent la résistance à la pénétration. Parmi ceux-ci, les plus importants sont, selon l'auteur : la profondeur, les paramètres texturaux des sols, le travail du sol, l'humidité des sols, et enfin la densité apparente.

Dans le cadre de cette étude, le facteur profondeur a été également considéré par le modèle statistique, comme étant un facteur explicatif de la résistance à la pénétration ; les résultats ont montré qu'une augmentation de la profondeur, toutes modalités de travail du sol confondues, augmente les valeurs de résistance à la pénétration jusqu'à 50 cm. Les profondeurs atteintes, dans la littérature, atteignent souvent la profondeur de 20 cm et jusqu'à cette même profondeur, les résultats montrent la même tendance.

Les résultats ont également permis de mettre en lumière la relation mathématique qui lie ce facteur à la résistance à la pénétration. C'est une relation polynomiale de degré 4 qui a permis d'obtenir le meilleur ajustement des données, compte tenu du nombre de termes nécessaires à la réalisation d'une telle relation. Concernant la relation qui existe entre profondeur et résistance à la pénétration, les résultats sont divergents. Yasin et al. (1993) ont mis en évidence une relation cubique entre la profondeur et la résistance à la pénétration, d'autres ont trouvé une relation linéaire.

En ce qui concerne le travail du sol, ce dernier s'est montré significatif sur base du modèle statistique mis en place. La modalité de travail du sol « SD » est apparue significativement différente de la modalité « LAB ». En effet, la première modalité présente une courbe plus

pentue que la courbe associée à la modalité « LAB » pour la gamme de profondeurs allant de 0 à 38 cm. Cela signifie que la modalité la moins travaillée est caractérisée par une augmentation plus rapide de la résistance à la pénétration par rapport à une modalité travaillée de manière conventionnelle. Ce phénomène est également confirmé dans la littérature lors de la comparaison entre des systèmes labourés et non-labourés.

En ce qui concerne les valeurs de résistance à la pénétration (MPa), Moraes et al. (2014) signalent que les valeurs critiques en termes de résistance à la pénétration, qui entravent la croissance de la plante, se situent à 2 MPa. De récentes recherches ont émis la possibilité d'augmenter cette limite à 3.5 MPa notamment pour des systèmes non-labourés présentant de nombreux pores biologiques et continus favorisant la croissance des racines malgré la compaction importante. Les résultats obtenus montrent une atteinte de la valeur de 2 MPa pour la modalité « SD » à une profondeur de 27 cm alors que pour les autres modalités « LAB », « RETRA », « TCS », les profondeurs sont respectivement de 30, 32.5 et 35 cm. La valeur de 3.5 MPa est quant à elle obtenue à 37.5 cm pour les modalités « LAB », « RETRA » et « SD », contrairement à la modalité « TCS » avec une profondeur de 42.5 cm. Il est important de constater que malgré une atteinte des valeurs critiques de résistance à la pénétration à des profondeurs plus importantes pour la modalité « TCS », celle-ci n'a pas présenté les rendements les plus importants.

Comme mentionné plus haut, le facteur humidité est un facteur impactant fortement la résistance à la pénétration. Cette dernière diminue lorsque le contenu en eau augmente. La pente de la régression linéaire, qui lie ces deux variables, est plus abrupte dans le cas du non-labour par rapport au système labouré, ce qui souligne la plus grande sensibilité de la résistance à la pénétration, au contenu en eau, des sols non labourés. Dans le cadre de ce mémoire, l'humidité présente au sein des buttes n'a pas été mesurée, cependant il est important de préciser que des précipitations importantes de 8.17 et 21.73 mm ont eu lieu le 17 et 18 août 2019 et les mesures ont été effectuées le 20 août 2019.

2. Analyse du couvert

2.1 Green Area Index (GAI) et poids sec de la biomasse aérienne

Concernant le Green Area Index (GAI), un effet significatif des modalités de travail du sol a été mis en exergue. Il s'avère, qu'aux dates de prélèvement du 27 et 28 août 2019, les valeurs de GAI les plus élevées étaient attribuées aux modalités de travail du sol les plus intensives.

Le contraste de valeurs entre la modalité « LAB » la plus travaillée et la modalité « SD » la moins travaillée est assez important ; ce sont, par ailleurs, ces dernières qui diffèrent significativement. La modalité la plus intensive présente une valeur GAI de 2.21 alors que la

moins intensive est de 1.82. Les deux autres modalités ont des valeurs intermédiaires de 2.05 et 2.1 pour respectivement la modalité « TCS » et « RETRA ».

Des valeurs élevées en termes d'indice de couverture indique une surface de couvert plus élevée. Cette dernière est favorable à l'interception de la radiation solaire et informe, dans les limites physiologiques de la plante, d'une croissance et d'une production plus importante en tubercules. Nunes et al. (2006) ont constaté les mêmes tendances concernant la couverture végétale avec l'indice de couvert *Leaf Area Index (LAI)*. Les valeurs que retourne le LAI sont des valeurs issues du rapport entre la surface foliaire d'un mètre carré et la surface d'un mètre carré au sol. Le GAI, quant à lui, est issu du rapport entre la surface verte (tiges et feuilles comprises) et la surface d'un mètre carré au sol. Ces deux indices sont proches, des comparaisons peuvent donc être réalisées entre ceux-ci. Les valeurs de LAI observées entre un système non-labouré et un système de travail du sol intensif en pommes de terre sont respectivement de 1.83 et 2.81 (Nunes et al., 2006). L'ordre de grandeur du LAI pour la culture de la pomme de terre est compris entre 1 et 2.5 (Bala & Islam, 2009). Ces valeurs sont relativement proches des valeurs GAI qui ont été mesurées au cours de ce mémoire.

Concernant les résultats de poids secs de la biomasse aérienne, l'effet modalité de travail du sol n'a conduit à aucune différence significative. Cependant, les valeurs de poids secs suivent la même tendance que les valeurs de GAI. Les parcelles soumises à un travail du sol intensif ont fourni plus de biomasse que les parcelles soumises à un travail du sol réduit avec des valeurs respectives de 1772.43 kg/ha et 1420.38 kg/ha. Les autres modalités « TCS » et « RETRA » ont des valeurs intermédiaires respectives de 1600.84 et 1667.88 kg/ha. Nunes et al. (2006) ont répertorié des poids secs moyens de la biomasse aérienne de 1668 kg/ha et de 2250 kg /ha pour respectivement la modalité la moins travaillée et la plus travaillée en culture de pommes de terre.

L'explication de ce lien, entre les modalités de travail du sol et les couverts, serait en lien avec la résistance à la pénétration. Young et al. (1993) ont constaté que les surfaces foliaires, les stolons, les tiges et les poids secs de tubercules présentent des valeurs plus élevées lorsque la résistance à la pénétration est la plus faible. Stirzaker et al. (1993) ont montré, sous des conditions contrôlées, l'existence d'un signal racinaire inhibiteur qui provoque dans les sols durs et compactés un arrêt de la croissance de la tige, même si les feuilles sont alimentées suffisamment en eau et en minéraux.

Un autre lien a pu également être mis en évidence entre le poids sec de la biomasse aérienne et les rendements. En effet, une relation linéaire lie ces derniers. Une biomasse plus importante mène à des rendements en tubercules supérieurs pour les calibres supérieurs à 35 mm, en accord avec ce qui a été mentionné plus haut ; un couvert plus important mène à une meilleure interception de la radiation solaire. De manière similaire,

une corrélation linéaire a été mise en évidence par Nunes et al. (2006) entre l'indice de couvert LAI et les rendements en tubercules.

3. Les rendements en tubercules pommes de terre

Les traitements statistiques n'ont pas mis en évidence un effet significatif du facteur modalité de travail du sol sur le rendement en tubercules. Cependant, des tendances peuvent malgré tout être dégagées des résultats.

Tout d'abord, la modalité « RETRA » présente les rendements les plus élevés en ayant surpassé la modalité « LAB » avec des valeurs respectives de 40.67 et 32.7 tonnes/ha (fig.25). Selon GREENOTEC (2019), la modalité « RETRA » présente depuis 2018 les rendements les plus élevés parmi l'ensemble des modalités. GREENOTEC explique ces rendements par l'affinage élevé du sol qui résulte d'une part des facteurs climatiques (gel) et biologiques (racines) exercés sur les buttes pendant l'hiver.

Ensuite, l'affinage est favorisé par un facteur mécanique, c'est-à-dire, par l'unique reprise des buttes au printemps par la herse rotative à axe vertical. Depuis 2017, la modalité « SD » présente les rendements les moins satisfaisants. Cependant, en 2019, cette dernière modalité a fourni une performance proche de celle obtenue par la modalité « LAB » avec, respectivement, des rendements de 30.8 et 32.7. Depuis 2017, la technique « SD » a été améliorée à plusieurs égards. La mise en place d'un couvert végétal performant, d'un point de vue racinaire, a permis un meilleur affinage du sol au sein des buttes. La plantation dans cette modalité a nécessité l'attente d'un réchauffement suffisant au sein des buttes afin de fournir, aux tubercules, des conditions propices à leur développement. La modalité « TCS » est, quant à elle, intermédiaire ; en 2017 elle fournissait les meilleurs rendements, puis en 2018 et 2019 des rendements constants d'environ 29 t/ha. Cette modalité a été dépassée par la modalité « SD » en 2019 avec 2.8 t de différence.

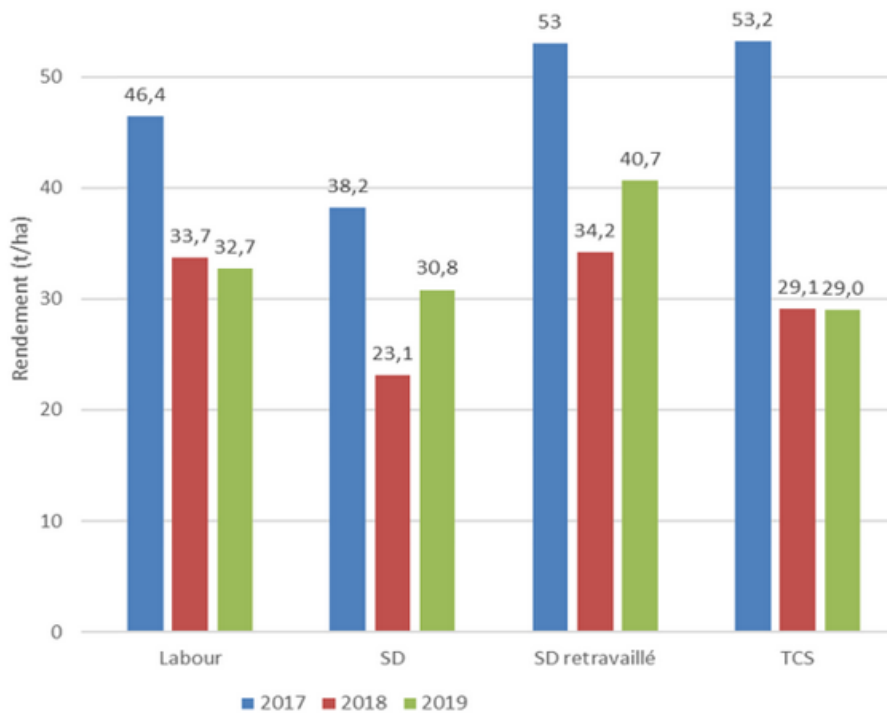


Figure 41: Comparaison des rendements (tonnes/ha) entre les modalités de travail du sol de 2017 à 2019 (GREENOTEC, 2019)

4. Taux de colonisation arbusculaire

Sur base de la partie « Résultats », les taux de colonisation arbusculaire et vésiculaire moyens sont significativement différents, au niveau de signification 0.1 entre la modalité « SD » -la moins travaillée- et la modalité « LAB » la plus travaillée.

Le travail du sol semble donc affecter la colonisation mycorhizienne. Ce phénomène est rapporté dans la littérature ; Castillo et al. (2006) expliquent que parmi l'ensemble des facteurs, qui influencent la dynamique des communautés de CMA et leur association avec les plantes, les pratiques agricoles peuvent être considérées comme les plus importants. Parmi ces pratiques agricoles, le travail du sol, la mise en jachère, l'introduction de plantes hôtes et non-hôtes dans la rotation (D. Douds, 1995; D. D. Douds et al., 2007).

En ce qui concerne le taux de colonisation arbusculaire, celui-ci a présenté une valeur de 7% pour la modalité « SD » contre 0.5% pour la modalité « LAB ». Le taux de la première modalité est donc 14 fois plus élevé que la seconde. Concernant les autres modalités, celles-ci présentent des valeurs moyennes de taux de colonisation de 3.83 et 1.33% respectivement pour les modalités « TCS » et « RETRA » ; cependant, celles-ci ne sont ni différentes entre elles significativement ni avec les deux modalités précédemment mentionnées. Schalamuk & Cabello (2010) ; Sheng et al.(2012); Silvana et al.(2020) ont également répertorié des taux de colonisation arbusculaires plus importants dans les parcelles pour lesquelles le travail du sol est réduit ou absent par rapport à des parcelles soumises à un travail intensif. Les valeurs associées en termes de colonisations arbusculaires

étaient respectivement de 1 % et 9% pour le travail réduit et intensif. Ils considèrent que la colonisation racinaire par les CMA est plus efficace lorsque celle-ci est initiée à partir d'un mycélium extraracinaire intact plutôt que par des spores, des hyphes fragmentés ou encore des segments de racines colonisés. Les techniques favorisant le travail du sol réduit assurent la pérennité de la diversité des CMA mais également l'intégrité du mycélium extraracinaire.

Pour ce qui est du taux moyen de colonisation vésiculaire, il a montré une valeur de 4.67 % pour la modalité « SD » et 1.5% pour la modalité « LAB ». Les autres modalités sont caractérisées par des valeurs de 4.17 et 2.17 % respectivement pour les modalités « TCS » et « RETRA » qui ne sont ni différentes significativement entre elles ni avec les autres. Le classement des valeurs de taux de colonisation vésiculaire moyen par ordre croissant suit exactement la même succession que dans le cas du taux de colonisation arbusculaire : « LAB », « RETRA », « TCS », et enfin « SD ». Cependant, il est important de noter que les taux de colonisation vésiculaires sont plus élevés pour les modalités « LAB », « TCS » et « RETRA » par rapport aux taux de colonisation arbusculaire respectifs.

Selon Schalamuk et al.(2004) et Sheng et al.(2012), le phénomène serait expliqué par le rôle respectif de chacune des structures des CMA. Les arbuscules sont le lieu d'échange de nutriments, d'eau et d'hydrates de carbone, leur présence reflète le fonctionnement correct des CMA. Les vésicules, quant à elles, sont des structures de réserves et de survie ; Schalamuk et al. (2004) ont observé une présence plus importante de ces dernières en fin de cycle de la culture du blé. De façon similaire, c'est en fin de cycle de la culture de la pomme de terre que ces taux ont été déterminés ; c'est aussi la période pendant laquelle les CMA mettent en place leurs structures de survie. Contrairement aux autres modalités, la modalité « SD » est caractérisée par des taux vésiculaires plus faibles que les taux arbusculaires. Sur base des fonctions respectives de chacune des structures fongiques mentionnées plus haut, il semblerait que les CMA présents dans la modalité « SD » n'aient pas été impactés de la même façon que les CMA des autres modalités ; probablement en raison de conditions plus propices à leur développement.

Enfin, il est important de mettre en exergue que le taux de colonisation arbusculaire le plus important n'est pas présent dans la modalité qui a fourni les meilleurs rendements malgré les bienfaits d'une symbiose mycorhizienne efficace tels que décrits à la section 2.3. En effet, la modalité « SD » qui a présenté les meilleurs taux de colonisation (7%) a fourni 30.83 t/ha, à savoir les deuxièmes plus faibles rendements. La modalité « LAB » qui a subi l'intensité de travail du sol la plus importante a présenté des valeurs de colonisation arbusculaire les plus faibles (0.5%) mais n'a pas, pour autant, donné les meilleurs rendements. Aucune corrélation significative n'a pu être dégagée de ces données permettant de refléter un éventuel impact de la colonisation mycorhizienne sur le paramètre rendement. Sheng et al. (2012) ont mis en évidence que, malgré un apport en nutriments apporté par la colonisation mycorhizienne en culture de maïs, la dépression de rendement observée, suite au non-

travail du sol, n'a pu être compensée par le bienfait de la symbiose mycorhizienne. Ce phénomène est également relaté par Schmidt & Belford (1994).

5.MPN (Most Probable Number)

L'estimation du nombre le plus probable de propagules actives dans le sol a mis en évidence un impact significatif du facteur « Temps ». En effet, au « Temps 0 » soit un mois après la plantation, le nombre moyen de propagules actives, par gramme de sol toutes modalités confondues, s'élève à 0,02. Au « Temps 1 », 10 jours avant le défanage des pommes de terre, la valeur moyenne est de 0.79 propagules actives par gramme de sol.

Concernant le « Temps 0 », la contamination des puits de culture par les semences de maïs et la superposition des racines entre puits n'a pas semblé impacter les résultats (écart-type de 0). La valeur observée de 0,02 propagules par gramme de sol est très faible et avoisine l'absence totale de propagules actives. Plusieurs explications à ce phénomène ont été trouvées dans la littérature.

Arya & Perelló (2010) expliquent que tout travail du sol s'accompagne de la rupture du réseau mycélien, or, ce dernier est un inoculum majeur pour la colonisation racinaire. De plus, le travail du sol mélange les horizons, ce qui dilue la quantité de propagules présentes dans les horizons superficiels. Enfin, une accélération de la décomposition des racines défavorise la quantité de propagules présentes dans les sols.

Bien que chacune des modalités de travail du sol ait subi une intensité différente de travail du sol, aucune des modalités de travail du sol ne s'est différenciée des autres de manière significative. De plus, c'est généralement lors des stades précoces de la culture que les différences, en termes de densités de propagules, sont les plus marquées entre les systèmes non-labourés par rapport aux systèmes conventionnels. Ceci limite donc la validité de cette hypothèse.

Une seconde explication pourrait provenir de l'emploi du Glyphosate lors de la destruction printanière du couvert végétal résiduel. Druille et al. (2013) ont constaté que l'épandage de glyphosate, même à des doses faibles (0.8l/ha), impacte négativement la viabilité des spores et la colonisation arbusculaire. En effet, le Glyphosate a pour cible l'inhibition de la 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate (EPSP) synthase. Cette enzyme est présente chez les plantes mais aussi chez les champignons et les bactéries ; en inhibant cette enzyme, le glyphosate stoppe la production d'acides aminés aromatiques et la production de protéines. L'atteinte des spores de CMA par l'herbicide total est possible par le mécanisme d'exsudation racinaire et /ou le lessivage. Cet effet est au moins partiellement responsable de l'effet délétère sur les CMA. En outre, le nombre de propagules peut être affecté par l'altération des flux d'hydrates de carbone alimentant les CMA en raison du stress subi par la plante hôte.

Le stock initial (« Temps 0 ») de propagules dans le sol impacte de manière importante la précocité de la colonisation racinaire. Effectivement, la forme de la courbe du pourcentage de la colonisation racinaire, en fonction du temps, est caractérisée par une allure sigmoïdale composée d'une phase de latence, puis linéaire et enfin d'un plateau. Lorsque le stock de propagules est important, il réduit drastiquement la phase de latence. Il s'avère qu'au plus cette dernière est courte, au plus vite la plante hôte profite des bienfaits de la symbiose mycorhizienne. Dans ce cas-ci, le stock initial de propagules étant relativement faible, les plantes de pommes de terre n'ont pas pu profiter précocement des bénéfices de la mycorhization.

En ce qui concerne le « Temps 1 », la valeur de 0,79 propagules actives par gramme de sol reste faible mais présente une augmentation par rapport au « Temps 0 ».

Arya & Perelló (2010) ont montré que le nombre de propagules augmente durant l'avancement du cycle de la culture en atteignant un pic de production proche du milieu ou de la fin du cycle de la culture. Lorsque la culture atteint un stade avancé, les différences en termes de densité de propagules actives dans le sol, entre techniques de travail du sol conventionnelle et non-labour, tendent à diminuer. De façon similaire, les analyses MPN, réalisées lors de cette étude, n'ont pas montré de différences significatives de densités de propagules actives entre modalités de travail du sol.

CHAPITRE 2 : AMELIORATIONS DU TRAVAIL

Cette section reprend un ensemble d'améliorations qui auraient pu être apportées à cet ouvrage, si un travail similaire devait être, à nouveau réalisé.

1. Le plan expérimental

La modalité « LAB » a été mise en place pour représenter l'itinéraire classique préparatoire à l'implantation de pommes de terre. Or, il s'avère que le champ dans laquelle le dispositif a été mis en place est en « TCS » depuis de nombreuses années, donc le labour d'une parcelle conduite en non-labour a pu être une source de variabilité qui n'a pas pu être prise en compte dans l'étude statistique. L'idéal aurait été de labourer chaque année les parcelles « LAB » afin d'avoir un aperçu réel d'une modalité labourée.

2. Les analyses de couvert

Du point de vue des analyses du couvert, un nombre plus important d'échantillons aurait dû être réalisé au sein de chaque parcelle afin de prendre en compte d'avantage l'hétérogénéité du terrain et ainsi d'augmenter la fiabilité des résultats.

3. Les analyses « Mycorhizes »

Concernant les analyses MPN, bien que celles-ci soient laborieuses, il aurait été intéressant d'ajouter un troisième prélèvement intermédiaire à ceux qui ont été réalisés afin de déterminer de manière plus précise l'évolution de la densité de population mycorhizienne au cours du temps. Pour les analyses des taux de colonisation arbusculaire et vésiculaire, une analyse en début de cycle de la pomme de terre aurait permis de déterminer l'évolution au cours du temps de la colonisation mycorhizienne.

4. Les analyses non réalisées

En raison de la crise sanitaire qu'à engendré la pandémie COVID-19, une série d'analyses initialement prévues n'ont pu être réalisées. Les analyses de phosphore du sol et des parties aériennes auraient permis d'observer si la symbiose mycorhizienne avait mené à une amélioration de la nutrition minérale pour les modalités présentant les colonisations mycorhiziennes les plus importantes. Les analyses de matière organique aurait aussi permis de comparer les modalités de travail du sol de manière plus détaillée.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'agriculture telle qu'elle est pratiquée par un grand nombre d'agriculteurs aujourd'hui a été héritée de la deuxième révolution des Temps Modernes. A cette époque, l'agriculture ne subvenait pas correctement aux besoins des populations. C'est pourquoi, une nouvelle manière de pratiquer l'agriculture avait émergé. Celle-ci était basée sur trois grands principes : la mécanisation, la chimisation et enfin l'amélioration végétale et animale. Ces trois principes ont permis d'augmenter la productivité du travail et de la terre. C'est à ce moment que l'agriculture est passée d'un mode de production basé sur la tradition vers un modèle productiviste où la rentabilité économique des exploitations est devenue un enjeu crucial.

Progressivement, les conséquences environnementales suite à l'application d'un tel modèle de production ont été mises en avant. Parmi ces conséquences, le phénomène d'érosion des sols - toujours observé à l'heure actuelle - est particulièrement marqué pour les cultures qui requièrent un travail intensif du sol. C'est le cas de la culture de pommes de terre. Pour remédier à ce problème croissant en raison de l'attrait économique de cette culture, une poignée d'agriculteurs et de scientifiques soucieux des problèmes environnementaux découlant des pratiques agricoles inappropriées ont développé de nouvelles techniques de travail du sol pour cette culture. Ces dernières sont basées sur l'agriculture de conservation des sols et ont pour objectif de garder un potentiel de production raisonnable tout en réduisant drastiquement les impacts environnementaux.

Ces nouvelles pratiques sont développées et testées par l'asbl GREENOTEC en Belgique et ont été mises en place en 2019 dans le champ de Guibert Dumont de Chassart à Ligny (Seneffe), un agriculteur adepte de l'agriculture de conservation des sols. Quatre modalités de travail du sol dont une présentant l'itinéraire classique (labour) ont été testées. L'objectif de ce mémoire est de comparer ces modalités de travail du sol sur base des caractéristiques physiques, chimiques, biologiques des sols ainsi que des paramètres de la culture.

En ce qui concerne les analyses chimiques du sol, il a été montré à travers ce mémoire que les modalités de travail du sol impactent le pH du sol. Les parcelles soumises à un travail du sol réduit présentent une acidité plus élevée en surface par rapport aux autres modalités. Les valeurs de pH et de CEC, toutes modalités de travail du sol confondues augmentent suivant la profondeur. Concernant les bases échangeables, aucune distinction entre modalités de travail du sol n'a pu être mise en évidence.

Pour ce qui est de l'analyse physique, la résistance à la pénétration a été affectée par les modalités de travail du sol. Les parcelles soumises à la modalité de travail du sol la moins intensive ont montré une augmentation plus rapide de la résistance à la pénétration en

fonction de la profondeur jusqu'à la profondeur de 38 cm. Au-delà de cette profondeur, cette même modalité montre des valeurs de résistance à la pénétration parmi les plus faibles.

Les analyses de couvert ont montré également des différences significatives entre modalités de travail du sol, aussi bien en termes de GAI que de biomasse aérienne entre la modalité labourée et la modalité la moins intensive en travail du sol. Cette dernière a montré des valeurs plus faibles que la modalité labourée. Au moment des prélèvements de la biomasse aérienne, des prélèvements ont été effectués pour estimer les rendements en tubercules. A partir de ces analyses, une corrélation linéaire a pu être établie entre la biomasse aérienne et le rendement en pomme de terre de calibres supérieurs à 35 mm. Une relation quadratique a été quant à elle mise en évidence entre les rendements tous calibres confondus et la biomasse aérienne.

Pour les rendements finaux, des différences significatives n'ont pas été recensées entre modalités. Cependant il est intéressant de mentionner que les rendements les plus faibles n'ont pas été obtenus dans la modalité la moins travaillée. L'écart de rendements entre cette dernière et la modalité la plus travaillée est 1,87 tonne, ce qui est minime. Les rendements les plus élevés ont été recensés dans la modalité « RETRA » avec un tonnage de 40,67.

Enfin pour les analyses relatives à la colonisation mycorhizienne, les résultats ont mis en évidence des taux de colonisation arbusculaire et vésiculaire les plus élevés au sein des parcelles les moins travaillées (modalité « SD »). Les taux les plus faibles ont été recensés dans les modalités les plus travaillées (« LAB »). Les analyses concernant la densité de propagules actives dans les sols ont premièrement montré des valeurs faibles aussi bien un mois après la plantation (0,02 propagules /g de sol) que 10 jours avant le défanage des pommes de terre (0,79 propagules/g de sol). Le traitement statistique n'a pas mis en évidence d'effet significatif des modalités de travail du sol.

En conclusion, le travail du sol impacte de manière significative les propriétés chimiques, physiques et biologiques des sols. Lorsque les propriétés des sols se trouvent modifiées, les plantes qui y sont cultivées se voient également impactées par ces changements. Cela a pu être constaté sur base des mesures de couvert mais aussi sur base des rendements obtenus. Bien que la préparation du sol en lien avec la culture de la pomme de terre requiert traditionnellement un ameublissement et un affinage important du sol, les nouvelles pratiques de travail du sol basées sur le buttage d'automne semblent vouées à un avenir prometteur en termes de réduction de travail du sol tout en gardant une production de pommes de terre raisonnable. La mise en place de ces techniques innovantes en culture de pommes de terre est le fruit d'une étroite collaboration entre scientifiques et agriculteurs, tous conscients et désireux de relever les défis actuels et futurs de l'agriculture.

Bibliographie

Adelman, M. J., & Morton, J. B. (1986). Infectivity of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi :

Influence of host-soil diluent combinations on MPN estimates and percentage colonization. *Soil Biology and Biochemistry*, 18(1), 77-83.

[https://doi.org/10.1016/0038-0717\(86\)90106-9](https://doi.org/10.1016/0038-0717(86)90106-9)

AgroParisTech. (2004). *Gestion des états physique et chimique du sol -Fertilisation phospho-potassique*.

https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/courses/SIAFEEAGRONOMIE5bd9/document/peuplements/sol/part2_PK.htm

AgroParisTech. (2012, mai 2). *Travail du sol*.

<https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/courses/SIAFEEAGRONOMIE9cea/document/machinisme/techniques/tc-tsol.htm>

Al-Askar, A. A., & Rashad, Y. M. (2010). Arbuscular Mycorrhizal Fungi : A Biocontrol Agent against Common Bean Fusarium Root Rot Disease. *Plant Pathology Journal*, 9(1), 31-38. <https://doi.org/10.3923/ppj.2010.31.38>

Al-Karaki, G. N. (1998). Benefit, cost and water-use efficiency of arbuscular mycorrhizal durum wheat grown under drought stress. *Mycorrhiza*, 8(1), 41-45.

<https://doi.org/10.1007/s005720050209>

An, Z.-Q., Hendrix, J. W., Hershman, D. E., & Henson, G. T. (1990). Evaluation of the "Most Probable Number" (Mpn) and Wet-Sieving Methods for Determining Soil-Borne Populations of Endogonaceous Mycorrhizal Fungi. *Mycologia*, 82(5), 576-581.

<https://doi.org/10.1080/00275514.1990.12025932>

- Angonin, B. (2014). *Les bases de l'itinéraire technique Définition des travaux -Choix et fonctionnalité des équipements*.
<https://www.google.be/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwiFgrqfiY3oAhWS-aQKHfv4At0QFjAAegQIARAB&url=https%3A%2F%2Fwww.province-sud.nc%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2FPPAP-Docs%2FMACHINISME%2FLes%2520bases%2520de%2520l%2527itin%25C3%25A9raire%2520technique.pdf&usg=AOvVaw0muRRNVkd-EH5j8WLpSv2t>
- ARCHAMBEAUD, M., & DE TOURDONNET, S. (s. d.-a). *Sol—La structure d'un sol*. Consulté 8 mars 2020, à l'adresse https://www.supagro.fr/ress-pepites/sol/co/2_2_StructureSol.html
- ARCHAMBEAUD, M., & DE TOURDONNET, S. (s. d.-b). *Sol—Texture et travail du sol*. Consulté 8 mars 2020, à l'adresse https://www.supagro.fr/ress-pepites/sol/co/2_1_TextureSol.html
- Arihara, J., & Karasawa, T. (2000). Effect of previous crops on arbuscular mycorrhizal formation and growth of succeeding maize. *Soil Science and Plant Nutrition*, 46(1), 43-51. <https://doi.org/10.1080/00380768.2000.10408760>
- Arvalis. (2011, mars 20). *Guide de production de la pomme de terre : La plantation*.
<https://www.arvalis-infos.fr/les-cles-d-une-bonne-plantation-@/view-6218-arvarticle.html>
- Arya, A., & Perelló, A. E. (2010). *Management of Fungal Plant Pathogens*. CABI.
- Bagyaraj, D., Sharma, M., & Maiti, D. (2015). *Phosphorus nutrition of crops through arbuscular mycorrhizal fungi*. 108(7), 1288-1293.

- Bala, S. K., & Islam, A. S. (2009). Correlation between potato yield and MODIS-derived vegetation indices. *International Journal of Remote Sensing*, 30(10), 2491-2507. <https://doi.org/10.1080/01431160802552744>
- Balzerque, C. (2012). *Régulation de la symbiose endomycorhizienne par le phosphate* [Biologie végétale]. Université Paul Sabatier.
- Bartlová, J., Badalíková, B., Pospíšilová, L., Pokorný, E., & Šarapatka, B. (2016). Water stability of soil aggregates in different systems of tillage. *Soil and Water Research*, 10(No. 3), 147-154. <https://doi.org/10.17221/132/2014-SWR>
- Bertin, P. (2019). *Systèmes Agraires*.
- Bever, J. D., Morton, J. B., Antonovics, J., & Schultz, P. A. (1996). Host-Dependent Sporulation and Species Diversity of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in a Mown Grassland. *The Journal of Ecology*, 84(1), 71. <https://doi.org/10.2307/2261701>
- Black, R. L. B., & Tinker, P. B. (1977). Interaction between effects of vesicular–arbuscular mycorrhiza and fertiliser phosphorus on yields of potatoes in the field. *Nature*, 267(5611), 510-511. <https://doi.org/10.1038/267510b0>
- Blevins, R. L., Thomas, G. W., & Cornelius, P. L. (1977). Influence of No-tillage and Nitrogen Fertilization on Certain Soil Properties after 5 Years of Continuous Corn ¹. *Agronomy Journal*, 69(3), 383-386. <https://doi.org/10.2134/agronj1977.00021962006900030013x>
- Bordès, J.-P. (2019). *Techniques culturales simplifiées (TCS) | Ecophytopic*. <https://ecophytopic.fr/prevenir/techniques-culturales-simplifiées-tcs>
- Boswell, E. P., Koide, R. T., Shumway, D. L., & Addy, H. D. (1998). Winter wheat cover cropping, VA mycorrhizal fungi and maize growth and yield. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 67(1), 55-65. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(97\)00094-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(97)00094-7)

- Briones, M. J. I., & Schmidt, O. (2017). Conventional tillage decreases the abundance and biomass of earthworms and alters their community structure in a global meta-analysis. *Global Change Biology*, 23(10), 4396-4419.
<https://doi.org/10.1111/gcb.13744>
- Burle, M. L., Mielniczuk, J., & Focchi, S. (1997). [No title found]. *Plant and Soil*, 190(2), 309-316. <https://doi.org/10.1023/A:1004266831343>
- Carter, M. R., Holmstrom, D., Sanderson, J. B., Ivany, J., & DeHaan, R. (2005). Comparison of conservation with conventional tillage for potato production in Atlantic Canada : Crop productivity, soil physical properties and weed control. *Canadian Journal of Soil Science*, 85(3), 453-461. <https://doi.org/10.4141/S02-069>
- Carter, M. R., Peters, R. D., Noronha, C., & Kimpinski, J. (2009). Influence of 10 years of conservation tillage on some biological properties of a fine sandy loam in the potato phase of two crop rotations in Atlantic Canada. *Canadian Journal of Soil Science*, 89(4), 391-402. <https://doi.org/10.4141/cjss08054>
- Carter, M. R., Sanderson, J. B., & Peters, R. D. (2009). Long-term conservation tillage in potato rotations in Atlantic Canada : Potato productivity, tuber quality and nutrient content. *Canadian Journal of Plant Science*, 89(2), 273-280.
<https://doi.org/10.4141/CJPS08073>
- Castillo, C. G., Rubio, R., Rouanet, J. L., & Borie, F. (2006). Early effects of tillage and crop rotation on arbuscular mycorrhizal fungal propagules in an Ultisol. *Biology and Fertility of Soils*, 43(1), 83-92. <https://doi.org/10.1007/s00374-005-0067-0>
- Cesaro, P., van Tuinen, D., Copetta, A., Chatagnier, O., Berta, G., Gianinazzi, S., & Lingua, G. (2008). Preferential Colonization of *Solanum tuberosum* L. Roots by the Fungus *Glomus intraradices* in Arable Soil of a Potato Farming Area. *Applied and*

Environmental Microbiology, 74(18), 5776-5783.

<https://doi.org/10.1128/AEM.00719-08>

Chambre d'agriculture région Nord- Pas de Calais. (2013). *Pomme-de-terre : Fiche technique agriculture biologique*.

Chapman, H. D. (2016). Cation-Exchange Capacity. In A. G. Norman (Éd.), *Agronomy Monographs* (p. 891-901). American Society of Agronomy, Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.c6>

Chevalier, A. (1924). Les organismes vivant dans la terre et leurs rapports avec la fertilité des sols. [Aperçu sur les travaux de Sir A. Schipley, Sir J. Russell, Dr J. Stoklasa, E. Miège.] : Aperçu sur les travaux de Sir A. Schipley, Sir J. Russell, Dr J. Stoklasa, E. Miège. *Revue de botanique appliquée et d'agriculture coloniale*, 4(31), 153-163. <https://doi.org/10.3406/jatba.1924.4152>

Chiffлот, V. (2008). *ÉTUDE MOLÉCULAIRE DES CHAMPIGNONS MYCORHIZIENS ARBUSCULAIRES DANS UN SYSTÈME AGRISYLVICOLE* [Thèse, UNIVERSITÉ LAVAL]. <http://hdl.handle.net/20.500.11794/20337>

CTIC. (2005). *CRM :: Conservation Technology Information Center*. <https://www.ctic.org/CRM>

Daniell, T. J., Husband, R., Fitter, A. H., & Young, J. P. W. (2001). Molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi colonising arable crops. *FEMS Microbiology Ecology*, 36(2-3), 203-209. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2001.tb00841.x>

Decaëns, T., Jiménez, J. J., Gioia, C., Measey, G. J., & Lavelle, P. (2006). The values of soil animals for conservation biology. *European Journal of Soil Biology*, 42, S23-S38. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2006.07.001>

Declerck, S. (2019). *Gestion intégrée du système sol-plante (partB) BRES 2106* [Cours].

1336.

Derpsch, R. (2003). Conservation Tillage, No-Tillage and Related Technologies. In L. García-

Torres, J. Benites, A. Martínez-Vilela, & A. Holgado-Cabrera (Éds.), *Conservation*

Agriculture (p. 181-190). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-017->

1143-2_23

Derpsch, Rolf. (2001). *Frontiers in conservation tillage and advances in conservation practice*.

https://www.researchgate.net/publication/228600428_Keynote_frontiers_in_conser

[vation_tillage_and_advances_in_conservation_practice](https://www.researchgate.net/publication/228600428_Keynote_frontiers_in_conser)

Derpsch, Rolf, & Benites, José. R. (2001). *SITUATION OF CONSERVATION AGRICULTURE IN*

THE WORLD.

D'Haene, K., Sleutel, S., De Neve, S., Gabriels, D., & Hofman, G. (2009). The effect of reduced

tillage agriculture on carbon dynamics in silt loam soils. *Nutrient Cycling in*

Agroecosystems, 84(3), 249-265. <https://doi.org/10.1007/s10705-008-9240-9>

Douds, D. (1995). Effect of tillage and farming system upon populations and distribution of

vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *Agriculture, Ecosystems & Environment*,

52(2-3), 111-118. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(94\)00550-X](https://doi.org/10.1016/0167-8809(94)00550-X)

Douds, D. D., Nagahashi, G., Reider, C., & Hepperly, P. R. (2007). Inoculation with Arbuscular

Mycorrhizal Fungi Increases the Yield of Potatoes in a High P Soil. *Biological*

Agriculture & Horticulture, 25(1), 67-78.

<https://doi.org/10.1080/01448765.2007.10823209>

Drakopoulos, D., Scholberg, J. M. S., & Lantinga, E. A. (2018). Influence of reduced tillage and

fertilisation regime on soil quality indicators in an organic potato production system.

Biological Agriculture & Horticulture, 34(2), 132-140.

<https://doi.org/10.1080/01448765.2017.1404495>

Druille, M., Cabello, M. N., Omacini, M., & Golluscio, R. A. (2013). Glyphosate reduces spore viability and root colonization of arbuscular mycorrhizal fungi. *Applied Soil Ecology*, 64, 99-103. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.10.007>

Dubreuil-Hériard, G., Baudé, S., Christin, D., Verhoeven, F., Ollagnon, H., Vankeerberghen, A., Levinson, E., De Montbel, A., & Stassart, P. M. (2014). *SAS-STRAT Sustainable Agriculture and Soil : Comparative study of strategies for managing the integrated quality of agricultural soils in different regions of Europe / Belgium, France, Netherlands* (SN-03/10). <http://hdl.handle.net/2268/165530>

Eijkelkamp. (2018, avril 30). *Penetrologger*. <https://fr.eijkelkamp.com/produit/appareils-de-mesure-sur-le-terrain/penetrologger.html>

Ekeberg, E. (1996). Effects of mouldboard ploughing and direct planting on yield and nutrient uptake of potatoes in Norway. *Soil and Tillage Research*, 39(3-4), 131-142. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(96\)01065-3](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(96)01065-3)

FAO. (2008). *Potato and soil conservation—International Year of the Potato 2008*. <http://www.fao.org/potato-2008/en/potato/soil.html>

Fardeau, J.-C., Morel, C., & Boniface, R. (1988). Pourquoi choisir la méthode Olsen pour estimer le phosphore « assimilable » des sols ? *Agronomie*, 8(7), 577-584. <https://doi.org/10.1051/agro:19880702>

FIBL. (2011). *Pommes de terre – Culture Généralités Climat, sol*.

<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjV0JXk667oAhXNDOWKHZAiCOsQFjAAegQIBRAB&url=https%3A%2F%2Fwww.bioactualites.ch%2Ffileadmin%2Fdocuments%2Fbafr%2Fproduction->

vegetale%2Fgrandes-cultures%2F4.4.11-

73_Pommes_de_terre.pdf&usg=AOvVaw1pBLVRZ8Kese2xNYmxfeR6

FIWAP. (2010). *Stop au ruissellement*.

Fortin, J. A., Plenchette, C., & Piché, Y. (s. d.). *Les mycorhizes : L'essor de la nouvelle révolution verte* (Quae).

Gál, A., Vyn, T. J., Michéli, E., Kladvko, E. J., & McFee, W. W. (2007). Soil carbon and nitrogen accumulation with long-term no-till versus moldboard plowing overestimated with tilled-zone sampling depths. *Soil and Tillage Research*, 96(1-2), 42-51.

<https://doi.org/10.1016/j.still.2007.02.007>

Gallou, A., Lucero Mosquera, H. P., Cranenbrouck, S., Suárez, J. P., & Declerck, S. (2011).

Mycorrhiza induced resistance in potato plantlets challenged by *Phytophthora infestans*. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 76(1), 20-26.

<https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2011.06.005>

Galvez, L., Douds Jr., D. D., Drinkwater, L. E., & Wagoner, P. (2001). Effect of tillage and farming system upon VAM fungus populations and mycorrhizas and nutrient uptake of maize. *Plant and Soil*, 228(2), 299-308. <https://doi.org/10.1023/A:1004810116854>

Garbaye, J. (2013). *La symbiose mycorhizienne : Une association entre les plantes et les champignons* (Quae).

Gérard, B., & Hoogmoed, W. (2014). *Chapitre 13—OUTILS DE TRAVAIL DU SOL*.

<http://www.fao.org/3/w7304f/w7304f0d.htm>

Gilden, R. C., Huffling, K., & Sattler, B. (2010). Pesticides and Health Risks. *Journal of Obstetric, Gynecologic & Neonatal Nursing*, 39(1), 103-110.

<https://doi.org/10.1111/j.1552-6909.2009.01092.x>

Govaerts, B., & Bogaert, P. (2020). *Plans Expérimentaux-LSTAT2320*.

- Govaerts, B., & Draye, X. (2018). *Cours de Biométrie-LBIRA2101*.
- Grant, C., Bittman, S., Montreal, M., Plenchette, C., & Morel, C. (2005). Soil and fertilizer phosphorus : Effects on plant P supply and mycorrhizal development. *Canadian Journal of Plant Science*, 85(1), 3-14. <https://doi.org/10.4141/P03-182>
- 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>
- Greenotec. (2017). *Essais 2017—Plantation direct dans buttes d'automne*.
<http://www.greenotec.be/pages/recherche/pomme-de-terre/essais-2017-semis-direct.html>
- Greenotec. (2019). *Essais 2019—Buttes d'automne*.
<http://www.greenotec.be/pages/recherche/pomme-de-terre/essais-2019-pdt-associees-et-buttes-d-automne.html>
- Grimes, D. W., & Bishop, J. C. (1971). The influence of some soil physical properties on potato yields and grade distribution. *American Potato Journal*, 48(11), 414-422.
<https://doi.org/10.1007/BF02863531>
- Hamel, C., Dalpé, Y., Lapierre, C., Simard, R. R., & Smith, D. L. (1994). Composition of the vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi population in an old meadow as affected by pH, phosphorus and soil disturbance. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 49(3), 223-231. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(94\)90051-5](https://doi.org/10.1016/0167-8809(94)90051-5)
- Havard, M. (1986). *Les principaux types de travaux du sol effectués par la traction animale au Sénégal.. Machinisme agricole tropical*. 93. 6-14. *Machinisme agricole tropical*(93), 6-14.

- Jansa, J., Mozafar, A., Kuhn, G., Anken, T., Ruh, R., Sanders, I. R., & Frossard, E. (2003). SOIL TILLAGE AFFECTS THE COMMUNITY STRUCTURE OF MYCORRHIZAL FUNGI IN MAIZE ROOTS. *Ecological Applications*, 13(4), 1164-1176. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2003\)13\[1164:STATCS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2003)13[1164:STATCS]2.0.CO;2)
- Jansa, Jan, Wiemken, A., & Frossard, E. (2006). The effects of agricultural practices on arbuscular mycorrhizal fungi. *Geological Society, London, Special Publications*, 266(1), 89-115. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2006.266.01.08>
- Jarvis, B., Wilrich, C., & Wilrich, P.-T. (2010). Reconsideration of the derivation of Most Probable Numbers, their standard deviations, confidence bounds and rarity values : Derivation of MPNs and their parameters. *Journal of Applied Microbiology*, no-no. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2010.04792.x>
- Johnson, N. C., & Pflieger, F. L. (2015). Vesicular-Arbuscular Mycorrhizae and Cultural Stresses. In G. J. Bethlenfalvay & R. G. Linderman (Éds.), *ASA Special Publications* (p. 71-99). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/asaspecpub54.c4>
- Kabir, Z., O'Halloran, I. P., Fyles, J. W., & Hamel, C. (1997). Seasonal changes of arbuscular mycorrhizal fungi as affected by tillage practices and fertilization : Hyphal density and mycorrhizal root colonization. *Plant and Soil*, 192(2), 285-293. <https://doi.org/10.1023/A:1004205828485>
- Kabir, Z, O'Halloran, I. P., Fyles, J. W., & Hamel, C. (1998). Dynamics of the mycorrhizal symbiosis of corn (*Zea mays* L.) : Effects of host physiology, tillage practice and fertilization on spatial distribution of extra-radical mycorrhizal hyphae in the field. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 68(1-2), 151-163. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(97\)00155-2](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(97)00155-2)

- Kabir, Z., O'Halloran, I. P., & Hamel, C. (1997a). The proliferation of fungal hyphae in soils supporting mycorrhizal and non-mycorrhizal plants. *Mycorrhiza*, 6(6), 477-480.
<https://doi.org/10.1007/s005720050150>
- Kabir, Z., O'Halloran, I. P., & Hamel, C. (1997b). Overwinter survival of arbuscular mycorrhizal hyphae is favored by attachment to roots but diminished by disturbance. *Mycorrhiza*, 7(4), 197-200. <https://doi.org/10.1007/s005720050181>
- Kabir, Zahangir. (2005). Tillage or no-tillage : Impact on mycorrhizae. *Canadian Journal of Plant Science*, 85(1), 23-29. <https://doi.org/10.4141/P03-160>
- Knittel, F. (2005). LA CHARRUE " DOMBASLE " (C. 1814-C. 1821) : HISTOIRE D'UNE INNOVATION EN MATIERE DE TRAVAIL DU SOL.
- Kumar, A., Chen, Y., Al-AminSadek, M., & Rahman, S. (2012). Soil cone index in relation to soil texture, moisture content, and bulk density for no-tillage and conventional tillage. 14(1). <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/1413>
- Labreuche, Jérôme, Laurent, F., & Roger-Estrade, J. (2014). *Faut-il travailler le sol ? Acquis et innovations pour une agriculture durable* (Quae-Arvalis).
- Labreuche, Jérôme, Richard, G., & Roger-Estrade, J. (2011). *Effets de l'adoption des techniques culturales sans labour (TCSL) sur l'état physique des sols : Conséquences sur la protection contre l'érosion hydrique en milieu tempéré*. 20(3), 187.
- Labreuche, Jerome, Souder, C. L., P Castillon, JF Ouvry, B Real, JC Germon, S De Tourdonnet, C Schubetzer, I Feix, & J Galienne. (2007). *Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturales Sans Labour (TCSL) en France*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34727.65444>
- Larkin, R. P., Honeycutt, C. W., Griffin, T. S., Olanya, O. M., Halloran, J. M., & He, Z. (2011). Effects of Different Potato Cropping System Approaches and Water Management on

- Soilborne Diseases and Soil Microbial Communities. *Phytopathology*, 101(1), 58-67.
<https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-10-0100>
- Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, P., Mora, P., & Rossi, J.-P. (2006). Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology*, 42, S3-S15. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2006.10.002>
- Leforestier, V., De Schorsch, G., & Merchier, M. (2018). *QUAND L'AGRICULTURE DE CONSERVATION A LA PATATE*. 96, 18-27.
- Legrain, X., & Engels, P. (2007). *Légende de la Carte Numérique des Sols de Wallonie (Belgique)*.
- Legrève, A. (2019). *Lutte biologique, protection intégrée et contrôle phytosanitaire (LBRPP2206)*.
- Limousin, G., & Tessier, D. (2007). Effects of no-tillage on chemical gradients and topsoil acidification. *Soil and Tillage Research*, 92(1-2), 167-174.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2006.02.003>
- Liu, Y., Liu, F., Pan, X., & Li, J. (2012). Protecting the Environment and Public Health from Pesticides. *Environmental Science & Technology*, 46(11), 5658-5659.
<https://doi.org/10.1021/es301652v>
- M. Yasin, R. D. Grisso, L. L. Bashford, A. J. Jones, & L. N. Mielke. (1993). Normalizing Cone Resistance Values by Covariance Analysis. *Transactions of the ASAE*, 36(5), 1267-1270. <https://doi.org/10.13031/2013.28458>
- Mazoyer, M. (2011, décembre 6). *Marcel Mazoyer : Une brève histoire des agricultures du monde | TerrEthique*. <https://terrethique.org/petits-dejeuners/marcel-mazoyer-une-breve-histoire-des-agricultures-du-monde/>

- McGonigle, T. P., Miller, M. H., Evans, D. G., Fairchild, G. L., & Swan, J. A. (1990). A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist*, *115*(3), 495-501.
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1990.tb00476.x>
- Medeiros, C. A. B., Clark, R. B., & Ellis, J. R. (1994). Growth and nutrient uptake of sorghum cultivated with vesicular-arbuscular mycorrhiza isolates at varying pH. *Mycorrhiza*, *4*(5), 185-191. <https://doi.org/10.1007/BF00206778>
- Metson, A. J. (1956). *Methods of chemical analysis for soil survey samples*. Wellington, N.Z. : D.S.I.R.
- Moraes, M. T. de, Debiasi, H., Carlesso, R., Franchini, J. C., & Silva, V. R. da. (2014). Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic Eutrudox. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *38*(1), 288-298. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100029>
- Mulligan, M. F., Smucker, A. J. M., & Safir, G. F. (1985). Tillage Modifications of Dry Edible Bean Root Colonization by VAM Fungi ¹. *Agronomy Journal*, *77*(1), 140-144.
<https://doi.org/10.2134/agronj1985.00021962007700010033x>
- Mundy, C., Creamer, N. G., Wilson, L. G., Crozier, C. R., & Morse, R. D. (1999). Soil Physical Properties and Potato Yield in No-till, Subsurface-till, and Conventional-till Systems. *HortTechnology*, *9*(2), 240-247. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.9.2.240>
- Nunes, J. C. S., Fontes, P. C. R., Araújo, E. F., & Sedyama, C. (2006). Potato plant growth and macronutrient uptake as affected by soil tillage and irrigation systems. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, *41*(12), 1787-1792. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006001200014>
- Olsen, S. R. (1954). *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate*. Washington, D.C. : U.S. Dept. of Agriculture, 1954.

- Pastoureau, P. (2012, décembre 21). *Philippe Pastoureau : L'agriculteur contemporain face à la science*.
- Porter, W. (1979). The « most probable number » method for enumerating infective propagules of vesicular arbuscular mycorrhizal fungi in soil. *Soil Research*, 17(3), 515. <https://doi.org/10.1071/SR9790515>
- Rasmussen, K. J. (1999). Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality : A Scandinavian review. *Soil and Tillage Research*, 53(1), 3-14. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00072-0](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00072-0)
- Redon, P.-O. (2009). *Rôle de champignons mycorhiziens à arbuscules dans le transfert du cadmium (Cd) du sol à la luzerne (Medicago truncatula)* [Université Henri Poincaré]. https://www.researchgate.net/publication/324494096_Role_de_champignons_mycorhiziens_a_arbuscules_dans_le_transfert_du_cadmium_Cd_du_sol_a_la_luzerne_Medicago_truncatula
- Requena, N., Serrano, E., Ocón, A., & Breuning, M. (2007). Plant signals and fungal perception during arbuscular mycorrhiza establishment. *Phytochemistry*, 68(1), 33-40. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2006.09.036>
- Rhoton, F. E., Bruce, R. R., Buehring, N. W., Elkins, G. B., Langdale, C. W., & Tyler, D. D. (1993). Chemical and physical characteristics of four soil types under conventional and no-tillage systems. *Soil and Tillage Research*, 28(1), 51-61. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(93\)90055-T](https://doi.org/10.1016/0167-1987(93)90055-T)
- Rillig, M. C., & Mummey, D. L. (2006). Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist*, 171(1), 41-53. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01750.x>
- Rockey, B. (2014). *Rockey Farms*. <http://www.brendonrockey.com/rockey-farms.html>

- Roger-Estrade, J., Anger, C., Bertrand, M., & Richard, G. (2010). Tillage and soil ecology : Partners for sustainable agriculture. *Soil and Tillage Research*, 111(1), 33-40.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2010.08.010>
- Rousselle, P., Robert, Y., & Crosnier, J.-C. (1996). *La pomme de terre : Production, amélioration, ennemis et maladies, utilisations*. Editions Quae.
- Ruf, T. (2000). *Histoire sociale du travail du sol dans le delta du Nil**.
- Schalamuk, S., & Cabello, M. (2010). *Effect of tillage systems on the arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) propagule bank in soils*.
- Schalamuk, S., Velazquez, S., Chidichimo, H., & Cabello, M. (2004). *Effect of no-till and conventional tillage on mycorrhizal colonization in spring wheat*.
- Schmidt, C., & Belford, R. (1994). Increasing the depth of soil disturbance increases yields of direct drilled wheat on the sandplain soils of Western Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 34(6), 777. <https://doi.org/10.1071/EA9940777>
- Sheng, M., Lalande, R., Hamel, C., Ziadi, N., & Shi, Y. (2012). Growth of Corn Roots and Associated Arbuscular Mycorrhizae Are Affected by Long-Term Tillage and Phosphorus Fertilization. *Agronomy Journal*, 104(6), 1672-1678.
<https://doi.org/10.2134/agronj2012.0153>
- Silvana, V. M., Carlos, F. J., Lucía, A. C., Natalia, A., & Marta, C. (2020). Colonization dynamics of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) in *Ilex paraguariensis* crops : Seasonality and influence of management practices. *Journal of King Saud University - Science*, 32(1), 183-188. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2018.03.017>
- SPW. (2018). *Vue générale sur l'environnement en Wallonie*.
<http://geoapps.wallonie.be/Cigale/Public/#BBOX=162767.60254388672,165373.75358952212,131780.4047873471,133113.90745435242>

- StatBel. (2018). *Chiffres clé de l'agriculture 2018* (p. 15). StatBel.
- Stirzaker, R., Passioura, J., Sutton, B., & Collis-George, N. (1993). Soil management for irrigated vegetable production. II. Possible causes for slow vegetative growth of lettuce associated with zero tillage. *Australian Journal of Agricultural Research*, 44(4), 831. <https://doi.org/10.1071/AR9930831>
- Thygesen, K., Larsen, J., & Bødker, L. (2004). Arbuscular Mycorrhizal Fungi Reduce Development of Pea Root-rot caused by *Aphanomyces euteiches* using Oospores as Pathogen Inoculum. *European Journal of Plant Pathology*, 110(4), 411-419. <https://doi.org/10.1023/B:EJPP.0000021070.61574.8b>
- Triplett, G. B., & Van Doren, D. M. (1969). Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Fertilization of Non-Tilled Maize ¹. *Agronomy Journal*, 61(4), 637-639. <https://doi.org/10.2134/agronj1969.00021962006100040047x>
- Tuomi, J., Kytoviita, M.-M., & Hardling, R. (2001). Cost efficiency of nutrient acquisition and the advantage of mycorrhizal symbiosis for the host plant. *Oikos*, 92(1), 62-70. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2001.920108.x>
- Universalis, E. (2020). *AGRICULTURE - Histoire des agricultures jusqu'au XIXe siècle*. Encyclopædia Universalis. <https://www.universalis.fr/encyclopedie/agriculture-histoire-des-agricultures-jusqu-au-xixe-siecle/>
- USDA. (2019). *Soil Bulk Density/Moisture/Aeration*. <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=soil+bulk+density#>
- Whipps, J. M. (2004). Prospects and limitations for mycorrhizas in biocontrol of root pathogens. *Canadian Journal of Botany*, 82(8), 1198-1227. <https://doi.org/10.1139/b04-082>

Wright, S. F., Franke-Snyder, M., Morton, J. B., & Upadhyaya, A. (1996). Time-course study and partial characterization of a protein on hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi during active colonization of roots. *Plant and Soil*, *181*(2), 193-203.

<https://doi.org/10.1007/BF00012053>

Young, I. M., Bengough, A. G., Mackenzie, C. J., & Dickson, J. W. (1993). Differences in potato development (*Solanum tuberosum* cv. Maris Piper) in zero and conventional traffic treatments are related to soil physical conditions and radiation interception. *Soil and Tillage Research*, *26*(4), 341-359. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(93\)90005-A](https://doi.org/10.1016/0167-1987(93)90005-A)

Zanella, C. (2008). *Les Techniques Sans Labour : Des pratiques culturales en réponse à une agriculture plus durable*. <https://agriculture-de-conservation.com/Les-Techniques-Sans-Labour-des.html>

Analyse des impacts de différentes modalités de travail du sol sur les paramètres physiques, chimiques et biologiques du système sol-plante en culture de pommes de terre sur sols limoneux

Présenté par Florent Matheise

Résumé : La culture de la pomme de terre est de plus en plus pratiquée en raison de son attrait économique. Celle-ci est cependant très exigeante en termes d'ameublissement et d'affinage du sol. Le travail du sol intensif préliminaire à la plantation qui la caractérise augmente la sensibilité du sol à l'érosion et à la perte des organismes telluriques. C'est pourquoi l'asbl GREENOTEC a mis en place en collaboration avec des agriculteurs de nouvelles pratiques basées sur l'agriculture de conservation des sols. Ces pratiques ont pour but à la fois de réduire l'érosion hydrique et de préserver les organismes telluriques tout en maintenant une production en tubercules raisonnable. Dans le cadre de ce mémoire, un partenariat a été réalisé avec l'asbl GREENOTEC. Cette dernière a mis en place un essai de pommes de terre comprenant quatre modalités de travail du sol. Parmi ces quatre modalités, la première est basée sur un itinéraire classique (labour : « LAB »), la deuxième sur une suppression du labour (« TCS ») et enfin deux autres basées sur la technique des buttes d'automne, toujours sans labour (« RETRA » et « SD »). L'objectif de ce mémoire était de comparer les modalités de travail du sol sur base des caractéristiques physiques, chimiques, biologiques des sols ainsi sur des paramètres de la culture.

Les résultats des analyses chimiques ont montré pour la plupart des différences significatives entre modalités de travail du sol, plus particulièrement entre la plus et la moins travaillée. L'analyse physique a consisté en une mesure de la pénétrométrie. Cette mesure a permis de montrer une augmentation de la résistance à la pénétration plus rapide en fonction de la profondeur pour la modalité la moins intensive en travail du sol par rapport aux autres modalités.

Les analyses de couvert de la culture de la pomme de terre ont montré une différence significative entre les modalités plus et moins travaillées avec des valeurs plus faibles pour la modalité la moins intensive en travail du sol. Les rendements n'ont pas été significativement impactés par les modalités de travail du sol et il s'avère que l'écart de rendement entre la modalité la plus et la moins travaillée était relativement faible.

Enfin, ce travail a pu également mettre en évidence un effet positif de la réduction du travail du sol sur le développement des champignons mycorhiziens à arbuscules. La modalité « SD », la moins travaillée a fourni un taux de colonisation arbusculaire 14 fois supérieur à la modalité « LAB ». Concernant la densité de population de champignons mycorhiziens à arbuscules dans les sols, aucun effet des modalités de travail n'a pu être décelé de manière significative. Par contre, la densité de population a augmenté suivant l'avancement dans le cycle de la culture.