UCLouvain

AGRO LOUVAIN

Faculté des bioingénieurs

Protection des eaux et du sol dans une culture de maïs ensilage à l'aide d'un couvert végétal associé

Auteur : Nadège Meister
Promoteur : Prof. Pierre Bertin (UCL/ELI/ELIA)
Lecteurs : Prof. Xavier Draye (UCL/ELI/ELIA)
Gilles Manssens (CIPF)
Année académique 2018-2019
Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de Bioingénieur : sciences agronomiques

Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement,

Mon promoteur, M. Pierre Bertin pour l'encadrement et les conseils qu'il m'a apportés durant les mesures et l'écriture de ce présent mémoire. Merci d'avoir proposé un sujet aussi intéressant, couvrant le domaine de l'agriculture et de l'environnement, et d'avoir organisé rapidement la rencontre avec le CIPF pour que je puisse commencer au plus vite.

Le CIPF pour m'avoir permis de réaliser un mémoire sur leurs essais et Gilles Manssens pour son encadrement dès le début, pour ses explications précieuses afin de réaliser les mesures et pour sa disponibilité durant toute l'année.

M. Xavier Draye et M. Frédéric Gaspart pour leur aide et leur patience afin de réaliser mes statistiques qui m'ont donné du fil à retordre.

M. David Becker de Ecosem pour son temps passé à tenter de nettoyer les grains de maïs, en vain.

Romain Millecamps, pour son aide sur le champ à l'occasion et son soutien tout au long de mon mémoire, ainsi que Paul Vanhove pour m'avoir prêté un muscle afin d'égrainer le maïs et pour m'avoir montré le chemin à ne pas suivre concernant la date de commencement de l'écriture d'un mémoire.

Mes cokotteurs du génistroit et les Batman pour tous ces bons moments riches en émotions et en breuvages.

Enfin un grand merci à mes parents et ma grand-mère pour leur immense soutien et leur compréhension tout au long de mes études, que ce soit dans les bons moments et les plus difficiles. Merci tout particulièrement à MC pour la relecture.

Table des matières

Table des figures *1*

Liste des tableaux *4*

Liste des équations *5*

Liste des abréviations *6*

Introduction *7*

Première partie : état de l'art **8**

1. Agriculture durable *9*

2. Description de certains constituants du sol *9*

2.1. L'azote du sol **9**

2.2. La matière organique du sol **10**

2.3. L'eau du sol **10**

2.4. La faune du sol **10**

4. Pollution causée par l'azote *11*

4.1. Enjeux environnementaux de la lixiviation de l'azote **11**

4.2. Causes de la lixiviation de l'azote **12**

4.3. Mesures de contrôle **13**

4.4. Directives Européennes et les applications en Wallonie **14**

5. Problématique de l'érosion *15*

5.1. Définition **15**

5.2. Types d'érosion **16**

5.2.1. Érosion hydrique 16

5.2.2. Érosion éolienne 17

5.2.3. Érosion aratoire 17

5.3. Les risques en Europe et en Belgique **18**

5.4. Méthodes de lutte contre l'érosion **19**

5.4.1. Le taux d'humus 19

5.4.2. Le travail du sol 21

5.4.3. La couverture du sol 22

5.4.4. L'agriculture de conservation 23

5.5. État actuel des méthodes de lutte contre l'érosion **24**

5.5.1. La couverture du sol 24

5.5.2. Les techniques culturales simplifiées 24

5.5.3. Agriculture de conservation 25

6. Caractéristiques culturales du maïs 26

6.1. Physiologie & morphologie 26

6.2. Sensibilité du maïs aux facteurs environnementaux 27

6.3. Phytotechnie & croissance 28

7. Cultures de couverture associées 29

7.1. Cas d'étude 29

7.2. Espèces choisies 30

7.2.1. Fétuque rouge 30

7.2.2. Trèfle blanc 31

8. Objectifs du mémoire 32

Deuxième partie : matériel et méthode 33

1. Caractéristiques du champ expérimental 34

1.1. Essai 1 : la lixiviation de l'azote et la productivité du maïs 35

1.2. Essai 2 : ruissellement et érosion 38

2. Itinéraire phytotechnique 40

2.1. Préparation du sol 40

2.2. Semis 40

2.3. Récolte du maïs 40

2.4. Destruction du sous-semis 41

3. Mesures effectuées 41

3.1. Couverture du sol par les sous-semis 41

3.2. Hauteur du maïs 43

3.3. Mesure du recouvrement des interlignes 44

3.4. Floraisons mâle et femelle 45

3.5. Pluviométrie 46

3.6. Nombre de rangs par épi 46

3.7. Poids de 1000 grains 47

3.8. Teneur en amidon et valeur énergétique du maïs plante entière 48

3.9. Rendement en matière sèche 49

3.10. Mesure spécifique sur l'essai 1B : contenu en azote du sol 50

3.11. Mesures spécifiques sur l'essai 2 : ruissellement et érosion 51

4. Méthode statistique 51

4.1. Les caractéristiques du maïs 51

4.2. Le service environnemental 52

4.3. La couverture du sol 52

Troisième partie : résultats 53

1. Effet de l'objet sur les caractéristiques du maïs 54

1.1. Effet de l'objet sur le rendement en MS 54

1.1.1. Essai 1A 54

1.1.2. Essai 1B 54

1.2. Effet de l'objet sur la hauteur des plants de maïs 55

1.2.1. Évolution de la hauteur des plants de maïs au cours du temps 55

1.2.2. Effet de l'objet sur la hauteur moyenne du maïs au 23 juillet 2018 56

1.2.3. Effet de l'objet sur la croissance journalière en hauteur du maïs 57

1.3. Effet de l'objet sur l'ASI 59

1.3.1. Essai 1A 59

1.3.2. Essai 1B 59

1.4. Effet de l'objet sur la VEM du maïs 60

1.5.2. Essai 1B 62

1.8. Résumé des résultats pour l'effet de l'objet sur les caractéristiques du maïs 64

2. Effet de l'objet sur la couverture du sol 64

2.1. Effet de l'objet sur l'évolution de la couverture du sol au cours du temps 64

2.1.1. Essai 1A 64

2.1.2. Essai 1B 65

2.2. Effet de l'objet sur la vitesse de couverture du sol par les sous-semis 66

2.2.1. Essai 1A 66

2.2.2. Essai 1B 67

2.3. Effet de l'objet sur la couverture du sol au moment de la récolte 69

2.3.1. Essai 1A 69

2.3.2. Essai 1B 71

3. Effet de l'objet sur l'environnement dans l'essai 1B 71

3.1. Effet de l'objet sur le taux d'humus du sol après l'hiver 71

3.2. Effet de l'objet sur le pH du sol après l'hiver 72

3.3. Effet de l'objet sur la quantité d'azote nitrique du sol dans les différents horizons 72

4. Effet de la méthode de semis 75

5. Effet de l'objet sur le ruissellement et l'érosion dans l'essai 2 77

5.1. Effet de l'objet sur le coefficient de ruissellement 77

5.2. Effet de l'objet sur l'érosion 78

Quatrième partie : discussion 79

1. Effet de l'objet sur les caractéristiques du maïs 80

1.1. Effet de l'objet sur le rendement 80

1.2. Effet de l'objet sur le poids de 1000 grains et le nombre de rangs par épi 80

1.3. Effet de l'objet sur qualité fourragère du maïs 81

1.4. Effet de l'objet sur les hauteurs moyennes du maïs au 23 juillet 2018 82

1.5. Effet de l'objet sur l'ASI 83

2. Effet de l'objet sur l'environnement 83

2.1. Effets de l'objet sur la quantité d'azote nitrique dans le sol dans les différents horizons 83

2.2. Taux d'humus après l'hiver 85

2.3. Coefficient de ruissellement et érosion 85

3. Effet de l'objet et de la densité sur la couverture de sol 86

4. Critique de la méthodologie 87

5. Perspectives 88

Conclusion 9292

Bilbiographie 933

Annexes 101

Table des figures

Figure 1 : Flux d'azote au cours du temps vers les eaux souterraines et les eaux de surface en Wallonie. Source : Thysebaert et al (2017) 11
Figure 2 : Localisation des zones vulnérables en Wallonie désignée le PGDA. Source Thysebaert et al (2017). 15
Figure 3 : Géographie des zones en Belgique où la ceinture loessique correspond à « central Belgium ». Source Verstraeten et al (2006) 19
Figure 4 : Evolution de la morphologie du maïs au cours du temps 26
Figure 5 : Photo satellite du champ expérimental, situé à Ottignies-Louvain-la-Neuve en Belgique entouré en orange. Source : GoogleMaps (2019) 34
Figure 6 : La photo de gauche montre le semis avec la machine 1 dans l'essai 1A et celle de droite le semis avec la machine 2 dans l'essai 1B 35
Figure 7 : Disposition des objets pour les essais 1A et 1B pour les trois blocs avec l'espèce, la variété et la densité de semis du couvert végétal 37
Figure 8 : Disposition des objets dans l'essai 2 en pente avec les différentes espèces, variétés et leur densité de semis 38
Figure 9 : Photo aérienne où l'on voit les délimiations en plastique dur sur les parcelles (de droite à gauche) de fétuque rouge Musica, le témoin et de trèfle blanc Tivoli 39
Figure 10 : Photo du dispositif de récupération des eaux de ruissellement 39
Figure 11 : Herse utilisée pour la préparation du sol au semis 40
Figure 12 : Déchaumeuse à disque utilisée dans nos essais, de la marque Disc Roller 41
Figure 13 : Représentation d'un exemple d'endroit de la mesure de couverture du sol au sein de chaque objet pour chacun des essais 42
Figure 14 : Illustration du facteur de discrimination. En 1, la case était comptée comme couverte, contrairement à la case n° 2 43
Figure 15 : Méthode de la mesure de la hauteur du maïs 43
Figure 16 : Photo du LICOR LAI-2200 44
Figure 17 : Représentation du protocole pour la prise de mesure dans les cultures en rangs fournie par le manuel de l'appareil. Le rond dont le quart en bas est noir représente le cache à mettre sur le capteur du manche. Chaque rond représente une mesure. La mesure above est la mesure au-dessus de la canopée et les quatre mesures below sont les mesures en-dessous de la canopée 45
Figure 18 : Représentation de la méthode de récolte des épis de maïs sur chaque parcelle. 46
Figure 19 : Image représentant la non-linéarité des rangées au bas de l'épi (voir cercle rouge). Source : https://www.jardins.biz 47
Figure 20 : Photo du type d'égrenoir manuel utilisé. Source : https://www.ufs-aviculture.fr 47
Figure 21 : Photo de la trieuse avec ventilation appartenant à Ecosem 48
Figure 22 : Carotteuse ayant réalisé les carottages sur les parcelles 38 jours et 174 jours après la récolte 50

Figure 23 : Rendement moyen en fonction de l'objet et son écart-type dans l'essai 1A 54
Figure 24 : Rendement moyen en fonction de l'objet et son écart-type dans l'essai 1B 54
Figure 25 : Evolution de la hauteur des plants de maïs du 26 juin 2018 au 23 juillet 2018 pour l'essai 1A 55
Figure 26 : Evolution de la hauteur des plants de maïs du 26 juin 2018 au 23 juillet 2018 pour l'essai 1B 56
Figure 27 : Moyennes de hauteur pour chaque objet avec chaque écart-type pour l'essai 1A 56
Figure 28 : Moyennes de hauteur pour chaque objet avec chaque écart-type pour l'essai 1B 57
Figure 38 : Croissance journalière moyenne en hauteur des plants de maïs et son écart-type entre le 25 juin 2018 et le 23 juillet 2018 en fonction des objets dans l'essai 1A 57
Figure 39 : Croissance journalière moyenne en hauteur des plants de maïs et son écart-type entre le 25 juin 2018 et le 23 juillet 2018 en fonction des objets dans l'essai 1B 58
Figure 29 : ASI moyen pour chaque objet avec chaque écart-type pour l'essai 1A 59
Figure 30 : ASI moyen pour chaque objet avec chaque écart-type pour l'essai 1B 59
Figure 31 : VEM moyenne pour chaque objet avec chaque écart-type pour l'essai 1A 60
Figure 32 : VEM moyenne pour chaque objet avec chaque écart-type pour l'essai 1B 61
Figure 33 : Teneur moyenne en amidon du maïs pour chaque objet avec chaque écart-type pour l'essai 1A..... 61
Figure 34 : Teneur moyenne en amidon du maïs pour chaque objet avec chaque écart-type pour l'essai 1B..... 62
Figure 35 : graphique des moyennes de teneur en amidon pour chaque objet avec chaque écart-type pour l'essai 1B. 62
Figure 36 : Nombre moyen de rangs par épi pour chaque objet avec chaque écart-type pour l'essai 1A 62
Figure 37 : Nombre moyen de rangs par épi pour chaque objet avec chaque écart-type pour l'essai 1B 63
Figure 40 : Poids sec moyen de 1000 grains pour chaque objet et leur écart-type dans les essais 1A et 1B 64
Figure 41 : Evolution de la couverture du sol par les sous-semis du 26 juin 2018 au 15 novembre 2018 pour l'essai 1A 65
Figure 42 : Evolution de la couverture du sol par les sous-semis du 26 juin 2018 au 15 novembre 2018 pour l'essai 1B 65
Figure 43 : Evolution de la couverture du sol par les sous-semis du 26 juin 2018 au 28 août 2018, soit après la récolte du maïs, et du 21 septembre 2018 au 15 novembre 2018, soit après la récolte pour l'essai 2 66
Figure 44 : Vitesse moyenne de couverture du sol par les sous-semis et son écart-type entre 29 juin 2018 et le 28 août 2018, soit avant la récolte, et le 21 septembre 2018 et le 15 novembre 2018, soit après la récolte dans l'essai 1A..... 67

Figure 45 : Vitesse moyenne de couverture du sol par les sous-semis et son écart-type entre le 29 juin 2018 et le 28 août 2018, soit avant la récolte, et entre le 21 septembre 2018 et le 15 novembre 2018, soit après la récolte en fonction des traitements dans l'essai 1B 68
Figure 46 : Moyennes de couverture de sol en pourcent en fonction de l'objet et chaque écart-type pour l'essai 1A 69
Figure 47 : Moyennes de couverture de sol en pourcent en fonction de l'objet et chaque écart-type pour l'essai 1B 71
Figure 48 : Différence moyenne de contenu en azote nitrique du sol entre la mesure effectuée après l'hiver et celle avant l'hiver en fonction des différents objets et leur écart-type dans les horizons de 0 à 30 cm de profondeur, de 30 à 60 cm de profondeur et enfin de 60 à 90 cm de profondeur dans l'essai 1B 74

Liste des tableaux

Tableau 1 : Facteurs qui influencent les flux d'eau et la dégradation de la matière organique 12
Tableau 2 : Répartition de la surface agricole en semis-direct dans le monde en 2010. Source : Derpsch et al (2010) 25
Tableau 3 : Espèces, variétés et densités des sous-semis des essais 1A et 1B. 36
Tableau 4 : Résultat du test de Tukey comparant les espèces/variétés et leur densité avec une autre espèce/variété et sa densité. Les couples testés repris dans le tableau ont tous une p-valeur significative. La comparaison nous permet de savoir si la couverture du premier objet et supérieure (+) ou inférieure (-) à celle du deuxième. Le tableau se lit de la manière suivante : « le Tw à une densité de 2 kg/ha a une couverture du sol significativement inférieure à celle du Tt à une densité de 2 kg/ha » 70
Tableau 5 : Tableau reprenant les taux d'humus dans les 30 premiers centimètres du sol après l'hiver dans l'essai 1B 72
Tableau 6 : Tableau reprenant les valeurs de pH moyennes pour les 30 premiers centimètres de sol dans l'essai 1B 72
Tableau 7 : Différence de contenu en azote dans le profil de sol de 0 à 90 cm de prodondeur après et avant l'hiver dans l'essai 1B 75
Tableau 8 : Dates des relevés de l'eau dans les bacs en bas de pente mises en parallèle avec les couvertures de sol par le trèfle et la fétuque ainsi que les coefficients de ruissellement 77
Tableau 9 : Dates des relevés de l'eau dans les bacs en bas de pente mises en parallèle avec les couvertures de sol par le trèfle et la fétuque ainsi que l'érosion moyenne (la perte en sol moyenne en kg/ha) 78

Liste des équations

Équation 1 : Réactions de dénitrification où en (1) le donneur d'électron est la matière organique et en (2) le FeS2 est le donneur d'électron……..9

Équation 2 : Equation du modèle RUSLE calculant de la perte en sol moyenne d'un sol……16

Équation 3 : Formule de calcul du rendement frais pour le maïs de nos essais…….49

Liste des abréviations

CIPAN : culture intermédiaire piège à nitrate

GES : gaz à effet de serre

MO : matière organique

MS : matière sèche

PGDA : Programme de gestion durable de l'azote

SAU : surface agricole utile

TCS : technique culturale simplifiée

Introduction

L'agriculture durable fait partie intégrante de l'actualité. Pourtant, les méthodes de lutte via les pratiques agricoles contre la dégradation de l'environnement sont encore peu utilisées en Europe, surtout dans les cultures de maïs. Or il est connu que les cultures sarclées sont sensibles à l'érosion, au ruissellement et à la lixiviation de l'azote à cause de leur faible couverture du sol (Padilla et al, 2018). De telles cultures peuvent donc être à l'origine d'une baisse de fertilité des sols, d'un déclin de la biodiversité, des coulées de boues et d'une détérioration de la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines (Panagos et al, 2015). En Europe, 25 Mha étaient alloués à la culture de maïs en 2013-2014 (Renoux, 2014). Selon le rapport sur l'état de l'environnement wallon, 8,3% de la SAU de Wallonie sont alloués aux cultures de maïs (Thysebaert et al, 2017). Les risques sont donc bien présents dans nos régions. Or, remplacer le maïs par une autre culture semble totalement inapproprié au vu des nombreux avantages de celui-ci : il contient une énergie hautement digestible pour le bétail, une bonne appétence, il est peu sensible aux maladies et aux ravageurs dans nos régions, il a une bonne réponse à la fertilisation et un potentiel de production de biomasse élevé (García-Lara et Serna-Saldivar, 2019). Ainsi les risques pour l'environnement que le maïs engendrent doivent être gérés en changeant les pratiques agricoles.

Nous allons tout d'abord expliciter tous les enjeux environnementaux qui se cachent derrière la dégradation des eaux et des sols et cela surtout en Wallonie. Différentes méthodes de lutte contre l'érosion, le ruissellement et la lixiviation seront présentées, à savoir le non labour, la couverture du sol et l'agriculture de conservation pour ensuite aborder notre méthode : les cultures de couverture associées. L'objectif général du mémoire comprend donc l'étude de l'efficacité des sous-semis contre l'érosion, le ruissellement et la lixiviation de l'azote mais aussi sur la productivité et la qualité du maïs ensilage. Une description détaillée du protocole expérimental sera fournie pour mieux comprendre les essais réalisés. Un essai était réservé à l'évaluation de l'efficacité des cultures de couverture contre la lixiviation de l'azote, et leur effet sur la qualité et la productivité du maïs. Un deuxième essai, en pente cette fois, sert à évaluer l'impact des couverts végétaux associés sur l'érosion et le ruissellement. Dans le premier essai sur la lixiviation et la productivité du maïs, trois variétés de trèfle blanc et deux de fétuque rouge ont été semées. Pour celui en pente, une seule densité a été testée et un type de chaque espèce. Ensuite les résultats mettront en évidence les effets des différentes espèces/variétés et densités de semis des cultures de couverture sur la productivité et la qualité du maïs, sur la couverture du sol et sur leur efficacité dans la lutte contre l'érosion, le ruissellement et la lixiviation de l'azote. La discussion nous permettra d'interpréter les résultats, de comparer les espèces/variétés et densités entre elles pour savoir quelle espèce/variété et/ou densité remplit le mieux les objectifs, de les comparer avec d'autres études, de proposer des améliorations de méthodologie et enfin d'émettre des idées de perspective.

Première partie : état de l’art

1. Agriculture durable

L'agriculture durable se définit comme une agriculture qui assure le bien-être des générations actuelles sans compromettre celui des générations futures. Dans ce cadre, l'utilisation d'intrants en grandes quantités peut s'avérer inadéquate à cause des répercussions sur la faune et la flore, sur la qualité de l'air, des eaux de surfaces et des nappes phréatiques (Power et Schepers, 1989; Stoate et al, 2001). Depuis l'intensification agricole, les variétés utilisées sont cependant adaptées à de grandes quantités d'intrant azoté pour assurer un rendement élevé. Or, cette méthode de production associée à certaines pratiques agricoles à l'heure actuelle engendrent la dégradation des eaux et du sol. Il est donc crucial de lutter contre cette dégradation via de nouvelles pratiques.

2. Description de certains constituants du sol

2.1. L'azote du sol

L'azote est un élément essentiel à la vie des plantes. Il s'agit d'un composant majeur des protéines, de l'ADN, des enzymes, de la chlorophylle et est donc nécessaire à la photosynthèse et au développement de la plante. Les besoins varient selon l'espèce mais dans la plupart des écosystèmes, il s'agit de l'élément limitant (Di et Cameron, 2002). Il peut se retrouver à différents endroits dans le sol : (i) dans la matière organique (ii) dans les micro-organismes et organismes (iii) en ions ammonium (NH_4^+) liés au complexe argilo-humique. Il peut être sous différentes formes minérales libres : NH_4^+, NO_3^- ou NO_2^-. La plante l'utilise préférentiellement sous la forme NO_3^- mais aussi sous la forme NH_4^+(Padilla et al, 2018).

L'azote peut être apporté au sol via des fertilisations minérales, organiques ou via la fixation bactérienne qui désigne la conversion de diazote gazeux en ammoniaque (NH_3) qui sera ensuite converti en NH_4^+, lui-même converti en NO_3^- par les bactéries nitrifiantes. En revanche, la perte des nitrates du sol peut se faire via l'érosion, la dénitrification, la volatilisation, le ruissellement et la lixiviation de l'azote au-delà de la rhizosphère (Power et Schepers, 1989).

- La dénitrification est réalisée par des bactéries dénitrifiantes qui, à l'aide de composants donneurs d'électrons, vont réduire le nitrate en azote gazeux. Voici deux exemples de réactions :

  $5\ C + 4\ NO_3^- + 2\ H_20 \rightarrow 2\ N_2 + 4\ HCO_3^- + CO_2$ (1)

  $5\ FeS_2 + 14\ N0_3^- + 4\ H^+ \rightarrow 7\ N_2 + 10\ SO_4^- + 5\ Fe_2 + 2\ H_20$ (2)

  Équation 1 : Réactions de dénitrification où en (1) le donneur d'électrons est la matière organique et en (2) le FeS_2 est le donneur d'électrons.

- La volatilisation est le processus par lequel du NH_3 sous forme gazeuse est relâché dans l'air. Elle est liée au pH (à des pH supérieurs à 6,5 le NH_4^+ se transforme davantage en

NH_3) et est plus fréquente lors de l'application d'urée (car au moment de l'épandage, le pH augmente instantanément).

2.2. La matière organique du sol

De par ses propriétés chimiques, physiques et biologiques, la matière organique du sol est un déterminant majeur du contenu en nutriments du sol nécessaire à la croissance des plantes. Il s'agit de la source d'énergie et de l'habitat pour une bonne partie des organismes du sol et est donc responsable du maintien de la biodiversité. Il est impliqué dans certains cycles et dans la circulation de l'eau (Kassam, 2014 ; Thysebaert et al, 2017 ; Bongiorno et al, 2019). La matière organique jour un rôle majeur dans la structure du sol. En effet, en se liant à des argiles, elle forme des complexes argilo-humiques qui sont des agrégats très stables. Elle améliore aussi la porosité, donc l'aération, l'infiltration et la réserve en eau. C'est grâce à ces caractéristiques qu'elle est primordiale pour la résistance à la battance et la résistance à l'érosion. Le complexe argilo-humique est également impliqué dans l'immobilisation et/ou la dégradation de certains polluants (Thysebaert et al, 2017). En effet, avec sa charge négative, le complexe argilo-humique est capable d'adsorber de l'azote sous forme NH_4^+ et il est aussi un moyen de le stocker durablement en attendant sa dégradation (Thysebaert et al, 2017 ; Padilla et al, 2018). Le taux matière organique du sol dépend essentiellement des pratiques agricoles, de la température, de l'humidité et de la végétation (Abdalla et al, 2013).

Les taux d'humus du sol entre 2004 et 2014 présentaient une moyenne de 1,3% et 22% du territoire wallon étaient concernés par cette carence pouvant mener à des dégradations de la structure du sol et à une moindre rétention de l'azote dans le sol. En effet, le taux optimal pour une bonne stabilité du sol est de 3,5% (Thysebaert et al, 2017).

2.3. L'eau du sol

La macroporosité, à savoir des pores > 75 pm est essentielle pour l'aération du sol et le drainage. La porosité capillaire, soit des pores avec un diamètre compris entre 0,2 et 30 pm est, quant à elle, essentielle pour la rétention de l'eau (Tisdall et Oade, 1982).

2.4. La faune du sol

La faune du sol est constituée de la microfaune, de la mésofaune et de la macrofaune. La microfaune est constituée d'organismes dont la taille est inférieure à 0,2 mm. Les groupes les plus importants de la microfaune sont les nématodes et les protozoaires. La mésofaune reprend les organismes dont la taille est comprise entre 0,2 et 1 mm et est majoritairement composée de microarthropodes comme les collemboles et les acariens. Enfin la macrofaune est composée d'organismes dont la taille est supérieure à 1 cm et reprend certains insectes (tels que les larves de coléoptère) et arthropodes. Les principaux présents dans le sol sont les vers de terre et les termites (Lal et al, 1992).

3. La texture du sol

La texture d'un sol indique l'abondance relative des particules de dimensions différentes. Les argiles sont les particules avec un diamètre inférieur à 0,002 mm, les limons ont un diamètre entre 0,002 mm et 0,05 mm et le diamètre des sables se situe entre 0,05 mm et 2 mm. Les sols sableux contiennent une majorité de sable. Ils ont une CEC faible et un drainage fort. Les sols plutôt limoneux ont une meilleure CEC que les sols sableux et un drainage moyen. Les sols argileux ont une grande CEC et un drainage très faible. Un sol sablo-limoneux est un intermédiaire entre un sol sableux et un sol limoneux.

4. Pollution causée par l'azote

La pollution des eaux par les nitrates a deux origines : le ruissellement et la lixiviation. Le ruissellement est le processus qui amène à une pollution des eaux de surface tandis que la lixiviation amène à une pollution des eaux souterraines. Les flux d'azote vers les eaux ont diminué depuis les années 1991-1995 mais ils restent importants (Figure 1). La figure montre également que les flux d'azote vont majoritairement vers les eaux de surface mais une partie non négligeable va vers les eaux souterraines.

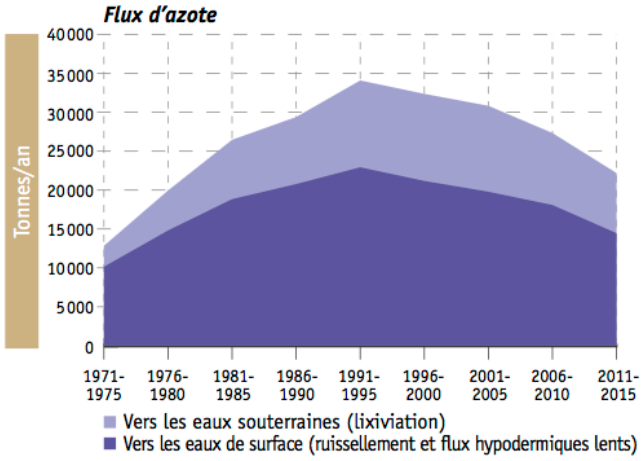


Figure 1 : Flux d'azote au cours du temps vers les eaux souterraines et les eaux de surface en Wallonie. Source : Thysebaert et al (2017)

L'azote minéral total appliqué dans les exploitations wallonnes en 2014 correspondait au double de la moyenne au sein de l'Union Européenne. Malgré ce fait, on remarque une diminution des utilisations de fertilisants, notamment grâce au PGDA. En 2015, les apports d'azote au sein du réseau hydrographique en Wallonie étaient à 61% causés par le ruissellement de surface. Les teneurs en azote les plus élevées en Belgique dans les eaux souterraines sont mesurées dans des zones à forte activité agricole, dont fait partie le Brabant wallon. Il est à noter qu'en plus dans la région sablo-limoneuse en 2017, le sol avait un taux d'humus moyen de 1,14%, ce qui est largement inférieur à 3,5%, et c'est encore 12% de moins que les mesures effectuées sur la période 2004-2014, ce qui mène à une moindre rétention de l'azote dans le sol (Thysebaert et al, 2017).

4.1. Enjeux environnementaux de la lixiviation de l'azote

La lixiviation de l'azote est le processus par lequel des anions nitrates (NO_3^-) entraînés par les pluies descendent le long du profil de sol pour atteindre les nappes phréatiques (Padilla et al, 2018). Cela engendre des pertes de fertilité et une pollution de l'environnement. Durant les dernières décennies, la quantité de nitrates dans les eaux souterraines a augmenté de manière significative dans l'ouest de l'Europe, amenant à une baisse de la qualité de l'eau.

Une grande proportion de ces nitrates a comme origine les terres agricoles. Les risques les plus élevés pour la lixiviation de l'azote se situent durant l'automne, l'hiver et le début du printemps car cette période correspond à la période principale pour la recharge en eau des nappes phréatiques puisque la balance hydrique est positive contrairement à la période entre mai et septembre. De plus, la minéralisation de la matière organique a lieu majoritairement en automne dans les régions humides d'Europe (Strebel et al, 1989).

4.2. Causes de la lixiviation de l'azote

Les raisons de la lixiviation liée à l'agriculture sont multiples : (i) l'intensification de la production est liée à de plus grands niveaux de fertilisation azotée, augmentant le potentiel de perte d'azote (ii) l'intensification de l'élevage augmentent les déjections azotées par unité de surface (iii) la conversion de prairie permanente en surface de culture. Le labour de prairie permanente résulte en une intense minéralisation et une forte nitrification de grandes quantités d'azote organique.

La lixiviation de l'azote est corrélée non seulement à la quantité de nitrates présentes dans un sol mais aussi à la balance hydrique. Une balance hydrique positive engendre la percolation de l'eau dans le profil de sol et elle emporte avec elle les ions nitrates. Ces deux causes sont elles-mêmes liées à de nombreux autres facteurs, qui peuvent être divisées en deux groupes principaux : (i) ceux qui influencent le flux d'eau à travers le sol et ainsi le transport des nitrates (ii) ceux qui influencent la dégradation de la matière organique et ainsi la concentration en nitrates du sol (Tableau 1) (Strebel et al, 1989).

Tableau 1 : Facteurs qui influencent les flux d'eau et la dégradation de la matière organique

<table>
<tr><th></th><th>Facteurs qui influencent le flux d'eau</th><th>Facteurs qui influencent la dégradation de la MO</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Climat</td><td>Précipitations</td><td>Précipitations</td></tr>
<tr><td>Évapotranspiration</td><td>Température</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Sol</td><td>Texture</td><td rowspan="2">Taux de MO</td></tr>
<tr><td>Topographie</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Pratiques agricoles</td><td>Travail du sol</td><td rowspan="3">Travail du sol</td></tr>
<tr><td>Cultures de couverture</td></tr>
<tr><td>Intensité de culture</td></tr>
</table>

- Climat

Une pluie qui suit directement l'application d'un fertilisant conduit à une plus grande lixiviation. En effet, une partie de l'azote appliqué sera volatilisée sous forme de NH_3 lors de conditions sèches. En condition de pluie, une partie de cet azote sera dissous, ce qui amène à

un risque de lixiviation. Cependant, cela permet de limiter la proportion de GES émis lors de l'application de fertilisants, il est donc recommandé d'appliquer le fertilisant juste avant une pluie, sur un sol couvert.

- Sol

Les macropores créés par les lombrics, les racines et les fissures causées par l'alternance d'humidité forte et humidité faible dans les sols peuvent influencer la lixiviation de l'azote. Quand le sol est sec et qu'un fertilisant azoté est appliqué, il peut être rapidement lixivié par les macropores ou les fissures après une pluie. De plus, un été sec et chaud peut amener à une moindre absorption de l'azote par les plantes et à une forte minéralisation après une pluie. De la même manière, sur les sols sableux on s'attend à une recharge en nitrates des eaux souterraines plus importante que pour les autres types de sol à cause de ses propriétés de drainage et sa faible CEC (Di et Cameron, 2002).

- Pratiques agricoles

Le labour augmente l'aération du sol, assèche le sol, favorise la dégradation des agrégats et mélange les résidus de culture au sol. En dégradant le complexe argilo-humique, le labour rend la matière organique disponible pour la dégradation. De plus, comme la densité superficielle augmente, la proportion de matière organique en contact avec l'oxygène augmente aussi. Ainsi la minéralisation et la nitrification sont accélérées dans ces conditions ce qui amène à de plus fortes concentrations de nitrates potentiellement lessivables et une baisse du taux d'humus. Dans les sols non labourés, les agrégats restent stables et la matière organique est inaccessible pour les micro-organismes, ce qui retient davantage d'azote dans le sol (Power et Schepers, 1989).

La fertilisation azotée apportée dans l'agriculture conventionnelle dépasse largement les besoins de la culture pour assurer de bons rendements, ce qui amène à des quantités d'azote résiduel non négligeables après la culture, or cette stratégie ne peut plus être d'application dans le cadre d'une agriculture durable.

4.3. Mesures de contrôle

Afin de limiter la lixiviation de l'azote il faut minimiser l'azote résiduel dans la rhizosphère après la culture principale, et le garder dans cette zone durant les périodes propices à la lixiviation. Cela peut se faire par l'usage de CIPAN qui absorbe l'azote excédentaire après une culture ainsi que celui issu de la minéralisation de la matière organique. En plus de choisir les espèces adéquates, la date de semis des cultures de couverture s'avère très importante. Une étude réalisée par Elers et Hartmann (1986) citée par Strebel et al (1989) montre que le radis oléagineux, le colza, le ray-grass d'Italie et l'orge d'hiver sont très efficaces pour la prise du surplus d'azote dans le sol, mais aussi que plus la date de semis est tardive, moins l'absorption d'azote sera élevée. Un report de quatre

semaines du semis (de début septembre à début octobre) réduit l'absorption d'azote par le radis oléagineux de 83%.

Il est important de prendre en compte la concentration en nitrate dans la rhizosphère avant la période de culture, la minéralisation de l'azote durant la période de croissance et de fractionner les apports en azote durant la culture afin de corréler l'application aux besoins de la plante. De plus, le fractionnement sur les textures fines de sol stimule l'absorption de l'azote par les plantes (Strebel et al, 1989).

L'application ajustée des autres éléments minéraux s'avère être aussi une mesure importante. En effet, si la croissance de la culture ralentit, cela est peut-être dû à une autre carence qu'il faut contrebalancer, sinon l'azote appliqué ne sera pas absorbé et sera sujet à la lixiviation (Di et Cameron, 2002).

Dans un grand pourcentage de cas, les eaux de surface et souterraines sont connectées. Ainsi, toutes les pratiques qui affectent la qualité des eaux de surface ou des eaux souterraines peuvent affecter l'autre. Par conséquent, le contrôle de l'érosion, et donc du ruissellement, via des pratiques telles que le semis direct et le semis de culture de couverture, va souvent de pair avec l'amélioration de la qualité des eaux souterraines (Power et Schepers 1989).

4.4. Directives Européennes et les applications en Wallonie

La rubrique suivante est majoritairement basée sur le rapport sur l'état de l'environnement wallon (Thysebaert et al, 2017) et toutes les informations non référencées proviennent de ce rapport.

Les directives européennes 2000/60/CE en 2000 (directive cadre sur l'eau) et 91/676/CEE en 1991 (directive nitrate) ont toutes les deux pour but de préserver la qualité de l'eau. La directive nitrate a fixé le taux maximal d'azote dans l'eau potable à 50 mg NO_3^-/l, et ce seuil a été repris par la Région wallonne. Cette concentration est à l'origine d'une décision axée sur la toxicologie. En effet, au-delà de ce seuil, les risques de cancer de l'estomac et de méthémoglobinémie augmentent (Padilla et al, 2018).

L'Union Européene a établi la directive nitrate en 1991 afin d'assurer une bonne qualité des eaux en diminuant la pollution causée par les nitrates. Les pays membres doivent prendre différentes mesures telles que désigner des zones vulnérables, définir un taux de liaison maximal, suivre la qualité des eaux ou encore élaborer un code des bonnes pratiques agricoles. Une zone vulnérable se définit comme une zone où la concentration de nitrate dans les eaux souterraines et/ou de surface excède les 50 mg NO_3^-/l ou s'en approche. Ainsi dans ces zones, il y a un contrôle accru de l'azote potentiellement lessivable, des règles strictes quant à la couverture du sol par une CIPAN en période d'interculture et des restrictions quant

à l'épandage des fertilisants azotés, surtout en pente. Le taux de liaison se définit comme le rapport entre l'azote à épandre et l'azote qui peut être valorisé par la culture ou la prairie (Protect'eau, 2019).

Les instructions de la directive nitrate sont reprises dans le PGDA III wallon. Il impose diverses mesures aux agriculteurs telles que des normes d'épandage de fertilisation organique et minérale en termes de date et de quantité, le calcul du taux de liaison au sol, la désignation des zones vulnérables (Figure 2), la création d'infrastructures de stockage adaptées aux types de fertilisants azotés et la mise en place d'un système de surveillance des eaux (Protect'eau en Wallonie).

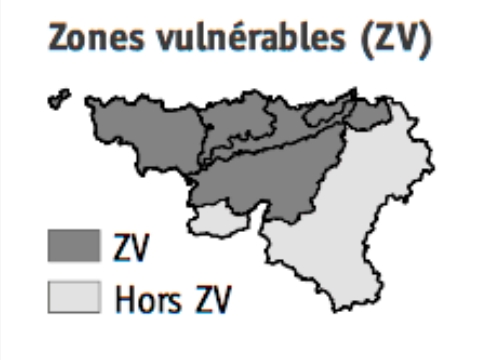


Figure 2 : Localisation des zones vulnérables en Wallonie désignée le PGDA. Source Thysebaert et al (2017).

5. Problématique de l'érosion

5.1. Définition

L'érosion est définie dans l'Encyclopaedia Britannica comme : « le déplacement des matériaux de surface de la croûte terrestre, principalement les débris de sol et de roche, et le transport de ces matériaux érodés par des agents naturels (tels que l'eau ou le vent) à partir du point de retrait. » (Encyclopaedia Britannica, 2019). L'érosion peut être de trois types : hydrique, éolienne et aratoire (Ritter, 2012). Ce phénomène engendre la perte de matière organique, de nutriments, la déstabilisation de l'écosystème et une diminution de la fertilité. Il y a aussi des impacts « hors site » comme les inondations, les coulées de boues, la pollution des eaux de surface, l'eutrophisation et la sédimentation dans les cours d'eau. L'érosion, de par ses conséquences, peut provoquer une perte de revenu chez l'agriculteur via la baisse de productivité des sols et un coût économique conséquent en cas de dommages hors parcelle (PNR des Caps et Marais, 2003 ; Panagos et al, 2015 ; Panagos et al, 2017).

Les propriétés intrinsèques d'un sol déterminent sa sensibilité à l'érosion (soit l'érodabilité). En effet la stabilité des agrégats, la texture et la nature du sol, le taux d'infiltration et la rugosité à la surface du sol déterminent sa sensibilité à l'érosion. Les pratiques agricoles et le contenu en matière organique influencent ces paramètres (Gyssels et al, 2005). Afin d'estimer l'ampleur de l'érosion, différents modèles peuvent être utilisés

mais le plus utilisé est le RUSLE (Panagos et Katsoyiannis, 2019). Il s'agit du Revised Universal Soil Loss Equation, un modèle amélioré de l'équation de base qui était l'USLE (Universal Soil Loss Equation). Le RUSLE diffère de l'USLE car il prend en compte les changements climatiques, les changements d'occupation du sol et les décisions politiques. L'équation de la perte en sol moyenne est la suivante :

$$A = R * K * C * LS * P$$

Équation 2 : Equation du modèle RUSLE calculant de la perte en sol moyenne d'un sol

La perte moyenne en sol (A_w, $t*ha^{-1}*an^{-1}$) due à l'érosion hydrique dans le RUSLE est fonction du facteur R (R-factor, $MJ*mm*ha^{-1}*h^{-1}*an^{-1}$), du facteur K (K-factor, $t*h*MJ^{-1}*mm^{-1}$), du facteur C (C-factor, adimensionnel), du facteur LS (LS-factor, adimensionnel) et du facteur P (P-factor, adimensionnel). Le facteur R définit l'érosivité des pluies (rainfall erosivity) à savoir l'effet de l'intensité des pluies sur l'érosion, il donne la relation entre les précipitations et le rendement en sédiment. Le facteur K est l'érodabilité du sol (soil erodability) et se définit comme la susceptibilité d'un sol à être érodé. Il prend en compte la texture, la structure et la perméabilité du sol. Le facteur C est un facteur de couverture du sol (cover management) et prend en compte l'occupation des terres et leur gestion. Il est calculé en faisant le rapport entre la perte en sol obtenue sur une parcelle avec une gestion et couverture spécifique et celle sur une parcelle en jachère continue, labourée sous les conditions de la parcelle de référence (à savoir une parcelle d'une pente de longueur de 22,1 m et d'un gradient de 9%). Le facteur LS représente la longueur et l'inclinaison de la pente. Il prend donc en compte la topographie de la parcelle. Le facteur L se définit plus précisément comme le rapport entre la perte de sol d'un terrain d'une certaine longueur et celle de référence. Le facteur S quant à lui se définit comme le rapport entre la perte en sol de la parcelle avec un certain gradient et celle obtenue avec une pente de référence. Enfin, le facteur P prend en compte l'effet des mesures de conservation du sol. Il s'agit du ratio entre la perte de sol sous une pratique de conservation et la perte en sol sous une pratique conventionnelle (Agassi, 1996 ; Panagos et al, 2017 ; Ballabio et al, 2017 ; Panagos et Katsoyiannis, 2019). Ainsi les facteurs que l'on peut influencer sont les facteurs K, C et P.

5.2. Types d'érosion

5.2.1. Érosion hydrique

Il s'agit du détachement des particules du sol et le transport de celles-ci par l'eau (Agassi, 1996). Il est le résultat de différents facteurs tels que les propriétés topographiques (longueur et gradient de la pente), la rugosité du sol, la couverture du sol, l'infiltration et enfin l'intensité des pluies (Dautrebande et Sohier, 2006).

L'énergie cinétique des gouttes de pluies engendre un détachement de particules à la surface du sol pour ensuite les transporter via les éclaboussures (effet « splash ») et le ruissellement de surface. La quantité d'énergie cinétique est fonction du diamètre des

gouttes, de leur vitesse et de l'intensité de la pluie. Ces paramètres déterminent donc l'envergure du processus de détachement des particules. Comme le diamètre des gouttes est d'autant plus élevé que les pluies sont intenses, il y a un risque d'érosion important en cas d'orage (Agassi, 1996 ; Gyssels et al, 2005).

Le ruissellement est dû à un manque d'infiltration de l'eau et une faible rugosité de la surface du sol. Le manque d'infiltration pourrait provoquer des inondations et des coulées de boues en milieu urbain si le sol présente une contrainte de cisaillement faible, ce qui est le cas dans un sol avec peu d'agrégats stables (Gyssels et al, 2005). De plus, en quittant leur emplacement initial, les particules peuvent emporter avec elles d'autres éléments : des minéraux (tels que N et K), des pesticides et de la matière organique, qui peuvent à terme, mener à une pollution de l'environnement. Afin de quantifier le ruissellement, il est possible de calculer le coefficient de ruissellement. Il s'agit du rapport entre la hauteur de précipitation et la hauteur d'eau ruisselée (Rodier, 1996).

5.2.2. Érosion éolienne

Environ 12% de la superficie totale des terres en Europe sont soumis à l'érosion hydrique contre environ 3% soumis à l'érosion éolienne (Dautrebande et Sohier, 2006). Ce type d'érosion peut donc être considéré comme mineur. Elle touche essentiellement les terres sableuses en période de sécheresse lorsqu'il n'y a pas de couverture du sol. Ce phénomène a souvent une apparition locale et ponctuelle, ce qui limite les dégâts (Gillijns et al, 2005).

Le vent déplace les particules de sol selon trois méthodes : la suspension, la saltation et le roulement. La suspension se définit comme l'état d'un solide en fines particules divisées dans un liquide ou un gaz. La saltation définit un déplacement par sauts des particules. Le mode varie en fonction de la taille des particules et de la vitesse du vent. L'ampleur et le rythme auxquels l'érosion éolienne agit sont fonction de la rugosité de la surface des sols, du climat et du couvert végétal. La rugosité est un frein au déplacement des particules, puisque celles-ci se déposent dans les sillons du sol. Cependant, après un certain temps les sillons seront remplis par ces particules, le sol sera alors lisse et plus vulnérable à l'érosion éolienne. Le climat définit l'intensité et la fréquence des vents mais aussi l'humidité des sols. Un sol sec sera plus vulnérable à l'érosion éolienne. Enfin, le couvert végétal protège le sol, mais en ce qui concerne les résidus de culture, ils doivent être suffisants et ne pas être emportés par le vent. Il faut donc, dans ces cas-là, se tourner vers de la végétation brise-vent (Ritter, 2012).

5.2.3. Érosion aratoire

L'érosion aratoire se définit comme l'érosion engendrée par le travail du sol au sein d'une parcelle. Ce type d'érosion ne concerne que la surface de terre travaillée et est due à une redistribution du sol au sein de la parcelle (Dautrebande et Sohier, 2006). Elle a de l'effet sur les terrains en pente où le sol se déplace vers le bas de la pente et appauvrit le sol en amont.

Le labour conventionnel peut engendrer des conditions favorables à l'érosion hydrique et éolienne car l'enfouissement des résidus de culture diminue la rugosité de surface (Ritter, 2012). En effet, le labour est basé sur l'inversion de sol, c'est-à-dire que les couches de sol sont redistribuées dans le profil. La couche de profondeur se retrouve alors exposée à la surface et la couche de surface se retrouve à une profondeur d'environ 30 cm (Montgomery, 2007 ; Abdalla et al, 2013) . Cette forme du travail du sol n'est pas considérée comme durable puisqu'elle provoque la dégradation de la structure du sol via la compaction (destruction de la porosité), la perturbation de la macrofaune du sol (telle que les vers de terre), la formation d'une croute de battance et la diminution du contenu en matière organique (la dégradation des complexes argilo-humiques augmente la vitesse de décomposition de la matière organique). Tout cela engendre l'érosion du sol, un rendement moindre et des coûts supplémentaires pour maintenir la fertilité (fertilisants, pulvérisateurs, pétrole) (Montgomery, 2007 ; Kassam et al, 2014). Ce type d'érosion n'est pas négligeable car le labour conventionnel est largement utilisé en Europe (Soane et al, 2012).

5.3. Les risques en Europe et en Belgique

Au sein de l'Europe, la moyenne des pertes en sol pour l'année 2010 est de 2,46 t ha^{-1} an^{-1}, ce qui donne un total de 970 Mt de sol perdu par an. Or cette moyenne est bien supérieure à la moyenne du taux de formation de sol de 1,4 t ha^{-1} an^{-1} en Europe. Cependant, 76% des terres ont un taux de perte en sol inférieur à 2 t ha^{-1} an^{-1}, ce qui est considéré comme durable. Les 24% restants contribuent à hauteur de 87% aux pertes totales de sol en Europe, et méritent donc une plus grande attention. Dans ces 24% on retrouve entre autres l'Italie, l'Espagne, le sud de la France, l'Allemagne et le sud de la Belgique (pour plus de précisions, voir en annexe). On peut aussi citer les sites à haut risque de perte en sol (à savoir des pertes supérieures à 10 t ha^{-1} an^{-1}, ce qui est le cas pour l'Italie et l'ouest de l'Espagne) qui contribuent à 52% de la perte totale en sol en Europe (Panagos et al, 2015) et dont la superficie est estimée à $201*10^3$ km^2 par la Commission Européenne (Panagos et Katsoyiannis, 2019). Des mesures instaurées par la PAC pour 2020 ont montré que des couvertures de sol peuvent réduire l'érosion jusqu'à 15% sur les terres arables.

Cependant, les prédictions pour 2050 restent critiques. Comme les précipitations sont la principale composante de l'érosion des sols, on s'intéresse aux facteurs qui l'influence le plus, à savoir l'érosivité des pluies (facteur R) et la couverture des sols (facteur C). Les estimations se font majoritairement sur le facteur R (Ballabio et al, 2017).

En 2017, le facteur R a été estimé à 857 MJ*mm*ha^{-1}*h^{-1}*an^{-1} pour 2050 par l'Union Européenne, soit 18% de plus que l'érosivité de 2010. Sur base de cette même étude, l'érosivité des pluies augmentera sur 81% du territoire d'ici 2050. Les zones à risques sont celles dont l'estimation de l'augmentation du facteur R est supérieure à 500 MJ*mm*ha^{-1}*h^{-1}*an^{-1} d'ici 2050 (Panagos et al, 2017). Or il est prédit que, dans le nord de l'Europe (Belgique

comprise), l'augmentation du facteur sera comprise entre 300 et 500 MJ*mm*ha^{-1}*h^{-1}*an^{-1} à cause d'une hausse des précipitations annuelles cumulées, de la fréquence et de l'intensité des précipitations durant d'extrêmes évènements pluvieux au cours de l'été. En effet, l'érosivité des pluies en Europe est 4 fois plus élevée durant les mois d'été (315 MJ*mm*ha^{-1}*h^{-1}*an^{-1}) que durant les mois d'hiver (87 MJ*mm*ha^{-1}*h^{-1}*an^{-1}). Elle commence à diminuer durant le mois de septembre et reprend des valeurs plus élevées à partir du mois de mai (Ballabio et al, 2017 ; Panagos et al, 2017).

En ce qui concerne la Belgique, il y a une grande différence entre l'érosion en été et en hiver. Au centre de la Belgique, 60 à 70% des pertes en sol dues à l'érosion hydrique se font entre la fin du printemps et le début de l'été (Verstraeten et al, 2006). En Wallonie les pertes en sol dépassaient les 5 t/ha sur 35% des surfaces agricoles et les 10 t/ha pour 9% de celles-ci en 2015 (Thysebaert et al, 2017). Une étude réalisée au sein de la ceinture loessique belge montre que 75% des pertes en sol se font durant l'été durant des évènements pluvieux intenses et correspondent aux dates de coulées de boues (Beuselinck et al, 2000).

Le lœss est un dépôt limoneux composé de quartz (entre 40 et 80%), de feldspath, carbonates, de mica et d'argiles. Ce dépôt a comme particularités d'être homogène, non stratifié et poreux. Lorsque le loess est saturé en eau sa contrainte de cisaillement est fortement réduite ce qui augmente les risques de glissement de terrain (Pye, 1984 ; Rousseau et al, 2018). En Belgique, la ceinture lœssique correspond au centre du pays (Figure 3). Le sol y est donc composé de lœss et les terres arables sont pentues. Les sols agricoles dans le nord de la Belgique ne sont pas aussi pentus et le sol et moins lœssique. En ce qui concerne le sud, les Ardennes, les terres arables sont allouées à la forêt ou au pâturage. Ainsi, les recherches sur l'érosion hydrique en Belgique se concentrent majoritairement dans la ceinture loessique au vu des risques d'érosion accrus. En effet, dans le centre de la Belgique, les pertes en sol dues à l'érosion hydrique ont augmenté de 24 à 34% entre 1903 et 2002 pour les cultures principales selon l'équation RUSLE (Verstraeten et al, 2006).

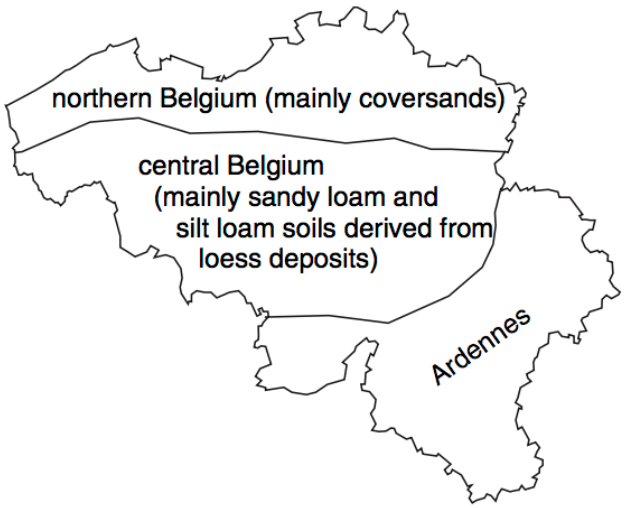


Figure 3 : Géographie des zones en Belgique où la ceinture loessique correspond à « central Belgium ». Source Verstraeten et al (2006)

5.4. Méthodes de lutte contre l'érosion

5.4.1. Le taux d'humus

Il y a une forte corrélation négative entre l'érodabilité d'un sol et le contenu en matière organique. Des sols avec un taux d'humus inférieur à 3,5% ont des agrégats instables. Ainsi, la

perte de matière organique diminue la stabilité du sol, ce qui augmente la propension des particules à se détacher sous l'impact des gouttes de pluies, favorise la formation d'une croûte de battance et donc le ruissellement (Guerra, 1994 ; Jensen et al, 2019). En plus de ses propriétés chimiques, la matière organique est aussi importante pour le maintien de la faune et de la flore du sol. En effet, il s'agit de la source d'énergie principale pour certains micro-organismes et hyphes pour réaliser des processus de décomposition cruciaux pour la croissance de la plante comme par exemple la minéralisation de l'azote (Fontaine et al, 2003 ; Nyawade et al, 2019). La matière organique est un réservoir de nutriments majeur puisqu'il contient de l'azote, du soufre et jusqu'à 65% du phosphate du sol (Bauer et Black, 1994). La MO est aussi importante pour la macrofaune, dont les vers de terre sont les constituants majeurs. Leurs déplacements permet de transférer de la matière organique en profondeur et de créer une macroporosité cruciale pour améliorer l'infiltration de l'eau et l'aération du sol (Busari et al, 2015 ; Dumanski et Peiretti, 2013).

Les racines jouent un rôle important dans la protection des sols en augmentant la macroporosité (et ainsi l'infiltration) et la stabilisation des agrégats via l'apport de matière organique. Cela peut se faire via les poils absorbants sacrifiés par la plante, des cellules de l'apex racinaire ou des exsudas tels que le mucilage ou des lysats. Les racines offrent une stabilité mécanique (via leur liaison physique entre les particules) et chimique (les exsudats racinaires sont des agents de liaison qui fournissent une stabilité au sol) (Gyssels et al, 2005). La matière organique fournit aussi la majorité des substrats pour les micro-organismes et un habitat. Des biomarqueurs de carbone racinaire et de partie aérienne ont été utilisés pour déterminer d'où vient celui des micro-organismes. Ils ont révélé que la majorité des molécules de structure du sol provient des racines et que la majorité du carbone contenu dans les micro-organismes vient du carbone racinaire (Schmidt et al, 2011). Les racines peuvent être aussi un lieu de symbiose entre une légumineuse et une bactérie fixatrice d'azote (Gregory ,2006). Or, le mucilage produit par les bactéries est aussi un stabilisateur des agrégats (Agassi, 1996). Ce mucilage est en effet capable de lier les particules du sol et de les maintenir liées en cas d'humidification (Gregory, 2006). Or ce sont ces macroagrégats, avec un diamètre supérieur à 250 μm, qui restent stables en étant humides, qui influencent l'érodabilité, l'infiltration et l'aération du sol. Les agents de liaison ont été classifiés en trois catégories : transitoires (surtout les polysaccharides), temporaires (tels que les racines et les hyphes) et persistants (composants aromatiques peu dégradables) (Tisdall et Oades, 1982).

Les mycorhizes peuvent aussi jouer ce rôle en émettant des molécules organiques durant leur croissance. Une mycorhize est une association symbiotique entre une racine de plante et un champignon (Gregory, 2006). Les mycorhizes à arbuscules plus particulièrement produisent une glycoprotéine nommée glomaline qui est essentielle dans le développement d'agrégats (Dabney et al, 2001). Ces exsudats jouent également le rôle d'agent de liaison entre les particules du sol (Gregory, 2006). En outre, des études ont montré un effet positif de la matière organique sur le rendement des cultures (Bauer et Black, 1994 ; Jat et al, 2019).

Afin de maintenir ou de favoriser un contenu en matière organique suffisant, il faut procéder à des apports tels que des fumiers, lisiers, du compost, des résidus de culture, de boues de station d'épuration ou encore simplement des cultures où la majorité de la biomasse est retournée au sol (Fontaine et al, 2003). Une couche de végétation à la surface du sol permet de supprimer les adventices, de le protéger de l'érosion (en dissipant l'énergie des gouttes de pluies et donc en diminuant « l'effet splash ») et du ruissellement, d'augmenter le taux de matière organique (et ainsi les macroagrégats comme spécifier plus haut) et de maintenir une bonne humidité du sol. La matière organique en surface laissée par ces méthodes augmente la rugosité de la surface (et donc le facteur K est plus faible), ce qui donne une résistance aux écoulements (Dabney et al, 2001). Les cultures augmentent la porosité non-capillaire via la production de racines qui explorent le sol, ce qui résulte en une meilleure infiltration et donc un ruissellement considérablement réduit (Gyssels et al, 2005).

5.4.2. Le travail du sol

Le labour est une forme de travail du sol qui inverse les couches de sol sur environ 30 cm, originellement utilisée pour incorporer les résidus de culture au sol, préparer le sol au semis (via la dislocation des mottes pour améliorer le contact sol-graine, la réduction de la résistance mécanique du sol et l'amélioration la rétention en eau) et lutter contre les adventices (Lobb, 2008 ; Emmerson et al, 2016). Cependant, comme décrit dans les points 4.2 et 5.2.3, cela affecte la stabilité du sol, la faune, la porosité et donc sa sensibilité à l'érosion. De plus, le sol subit une compaction à l'interface entre l'horizon labouré et l'horizon non labouré, cette zone est appellée « semelle de labour » (Thysebaert et al, 2017).

Les techniques culturales simplifiées (TCS) sont des techniques où l'on ne pratique pas d'inversion de sol, on y retrouve le non-labour et le pseudo-labour. Le non labour, ou semis direct, ne travaille pas le sol et sème directement la culture. Les techniques de pseudo-labour sont des intermédiaires entre le semis direct et le labour. Contrairement au labour, le pseudo-labour n'applique pas d'inversion de sol. Il peut prendre différentes formes : le strip-till, le mulch-till, le travail du sol profond ou moyen mais sans inversion. Le strip-till consiste à travailler uniquement la ligne de sol qui sera cultivée, en laissant donc les résidus de culture sur le reste de la parcelle. Le mulch-till travaille plus le sol et se fait à l'aide de chisel, les résidus de culture restent donc aussi à la surface. Les pseudo-labours profonds (15-25 cm, via l'usage d'un décompacteur par exemple) et superficiels (10-15 cm, via l'usage d'un cultivateur léger par exemple) décompactent le sol et enfouissent les résidus de culture dans le sol (Abdalla et al, 2013). Certaines TCS réduisent les effets négatifs du labour conventionnel en limitant le ruissellement (lorsque la continuité des pores n'est pas détruite on ne limite pas l'infiltration), en gardant une température du sol stable et surtout en préservant les complexes argilo-humiques (Bhatt et Khera, 2006 ; Busari et al, 2015).

D'un point de vue chimique, le pH, la CEC (capacité d'échange cationique) et le contenu en azote total peuvent être affectés par le travail du sol. L'effet sur le pH dépend

principalement des conditions climatiques et du type de sol. En revanche, la CEC est corrélée positivement avec le taux de MO. Comme les TCS préservent les complexes argilo-humiques et n'enfouit pas la matière organique, la CEC est supérieure en surface par rapport au labour (Busari et al. 2015). Cela est expliqué par le fait que les complexes sont porteurs de charges négatives, ce qui permet à des cations tels que Mg^{2+}, Ca^{2+}, K^{+}, NH_4^{+} d'être retenus dans le sol et dès lors d'assurer en partie la nutrition des plantes. En préservant la MO, de telles pratiques favorisent aussi la faune du sol puisqu'il s'agit de leur source d'énergie (Ruiz et al, 2015). Toutefois, certaines pratiques de TCS qui travaillent fortement le sol (comme le pseudo-labour profond) peuvent amener à une dégradation des agrégats.

De manière générale, la manipulation d'engins lourds sur une parcelle engendre une compaction du sol. Le sol est considéré comme élastique jusqu'à un certain seuil de pression appelé contrainte de consolidation, au-delà duquel le réarrangement des particules du sol ne permet plus de restaurer la porosité initiale. Le seuil est d'autant plus bas que le sol est nu, avec une structure médiocre et pauvre en carbone organique. Un sol ayant subi une compaction rendra plus difficile la pénétration des racines dans le sol, les mouvements des vers de terre et l'infiltration de l'eau, d'où l'intérêt de limiter la manipulation d'engins lourds dans les champs (Ruiz et al,2015 ; Thysebaert et al, 2017).

5.4.3. La couverture du sol

Pour maintenir un taux de carbone organique optimal et lutter contre l'érosion, il faut couvrir le sol, que ce soit avec des restes de la culture précédente ou d'une autre culture « mulch », avec une culture intercalaire ou encore avec une culture de couverture.

Le mulching, ou la couverture du sol via des pailles est un sujet étudié dans beaucoup d'expériences à travers le monde où l'érosion, le ruissellement et la lixiviation de l'azote sont des préoccupations. Certaines études montrent que le mulching permet effectivement d'augmenter la porosité, la stabilité et le contenu en matière organique du sol et ainsi diminuer le ruissellement et la perte en sol (Jordán et al, 2010 ; Mulumba et Lal, 2008). On observe aussi des effets bénéfiques sur la vie dans le sol (Tiquia et al, 2002). Cependant, dans certaines conditions, le mulching peut favoriser la perte en sol par rapport à des sols nus (Jin et al, 2009). Cette méthode est donc fortement dépendante des endroits où elle est employée, de la quantité appliquée et du type de mulching.

Une culture de couverture associée est une culture semée sous une culture principale qui a pour but de couvrir le sol afin de lutter contre l'érosion, le ruissellement et la lixiviation de l'azote pendant une culture principale sans pénaliser celle-ci. Les cultures de couverture, pour répondre à ces objectifs, doivent avoir différentes qualités ; (i) être couvrantes (ii) avoir un développement rapide (iii) ne pas être compétitives avec la culture principale, (iv) être compétitives avec les adventices (v) avoir un système racinaire profond pour augmenter la macroporosité (RPC, 1995). Dans des conditions de sécheresse, la culture associée peut entrer

en compétition hydrique avec la culture principale et faire baisser son rendement (Dabney et al, 2001). Dans d'autres cas, cela peut augmenter le rendement. Par exemple, une étude réalisée au Burkina Faso montre qu'une culture associée de niébé et de sorgho donne de bons rendements pour les deux cultures, ce qui peut être attribué au fait que le niébé est une légumineuse (Zougmore et al, 2000). Une étude au Nigéria sur une culture associée de maïs et de manioc montre une augmentation de l'efficacité d'interception de la lumière et que le micro-environnement créé par le maïs améliore le rendement du manioc (Olasantan et al, 1996). La présence d'une culture de couverture associée à la culture principale résulte en une augmentation de la production totale de biomasse, de l'évapotranspiration et ainsi de l'infiltration. Des études montrent aussi que l'érosion et la lixiviation de l'azote sont fortement réduits grâce aux cultures associées (Wall et al, 1991 ; Zougmore et al, 2000 ; Dabney et al, 2001 ; Miguez et Bollero, 2005 ; Quemada et al, 2013 ; Vogeler et al, 2019).

L'interculture est la période entre deux cultures principales. Ainsi, une culture intercalaire est une culture réalisée durant ce laps de temps qui a pour but d'absorber l'excédent d'azote appliqué et celui issu de la minéralisation entre les cultures principales, de réduire l'érosion et, dans certains cas, augmenter le rendement de la culture suivante. La raison de l'efficacité des cultures intercalaires est qu'elles augmentent la part de matière organique dans le sol, donc la stabilité et la porosité de celui-ci. Plusieurs études montrent que la matière organique dans le sol est plus importante dans une parcelle où une culture intercalaire avait été appliquée et retournée au sol avant le semis de la culture principale que dans une parcelle où il n'y avait pas eu de culture intercalaire (Ding et al, 2006 ; Nyawade et al, 2019). Une autre étude montre que la part de carbone apportée par les racines est équivalente à la part de carbone apportée par les parties aériennes dans le sol (Balesdent et Balabane, 1996). Ainsi, si la culture a un faible développement racinaire, il suffit de retourner la matière organique aérienne au sol pour augmenter son contenu en MO. En plus de séquestrer l'azote, les cultures intercalaires promeuvent les associations mycorhiziennes qui peuvent être bénéfiques pour les cultures suivantes. Les mycorhizes à arbuscules forment des relations symbiotiques avec les plantes et augmentent leur efficience en terme d'absorption des nutriments (surtout pour le phosphore). Ceci permet d'assurer un rendement optimal dans certaines cultures (Dabney et al, 2001).

5.4.4. L'agriculture de conservation

La FAO définit l'agriculture de conservation comme « un système d'agriculture qui promeut la maintenance d'une couverture de sol permanente, une perturbation du sol minimale (i.e. sans labour) et la diversification des espèces de végétaux. Cela améliore la biodiversité et les processus biologiques naturels au-dessus et en-dessous de la surface du sol, ce qui contribue à augmenter l'efficience d'utilisation de l'eau et des nutriments et à améliorer la production agricole d'une manière durable» (FAO, 2017). Les trois principes préconisés pour une agriculture de conservation sont les suivants (Kassam et al, 2009 ; Kassam et al, 2014 ; FAO, 2017) : (i) minimiser les perturbations mécaniques engendrées par le labour via le semis

direct ou le pseudo-labour (ii) une couverture du sol (au moins 30%) toute l'année avec des résidus de culture ou des cultures de couverture (iii) la diversification des espèces via des rotations et des associations impliquant au moins trois cultures différentes, incluant des plantes pérennes et annuelles adaptées aux conditions locales, dont des légumineuses. Ce concept réunit donc les deux solutions apportées ci-dessus pour augmenter le taux de carbone organique et ainsi la stabilité d'un sol. La rotation des cultures, en plus de promouvoir une bonne structure du sol, stimule une grande gamme de faune et de flore qui contribue aux cycles des nutriments. De plus, il s'agit d'une méthode de lutte intégrée pour éviter la prolifération de certaines maladies et de certains ravageurs.

Certaines études montrent que les TCS permettent non seulement de limiter les pertes de sol mais aussi d'augmenter les rendements dans certains cas par rapport à une agriculture conventionnelle (Kassam et al, 2015 ; FAO, 2019 ; García-Lara et Serna-Saldivar, 2019). Une autre étude montre une meilleure continuité des pores et une meilleure stabilité hydrique des agrégats avec une agriculture de conservation, ce qui améliore l'infiltration et l'activité microbienne (Abdalla et al, 2013). Sur du long terme, l'agriculture de conservation permet de réduire l'utilisation d'intrants (pesticides et fertilisants), de réapprovisionner les nappes phréatiques grâce à une meilleure infiltration et moins de ruissellement et ainsi diminuer la pollution des eaux de surface (Kassam et al, 2015).

5.5. État actuel des méthodes de lutte contre l'érosion

5.5.1. La couverture du sol

Selon le rapport de l'état de l'environnement wallon, la pratique des cultures de couverture avait un taux de participation de 21,5% des agriculteurs en 2013 pour toute la Wallonie (Thysebaert et al, 2017).

5.5.2. Les techniques culturales simplifiées

Les approches actuelles concernant le travail du sol tendent vers de nouveaux paradigmes dirigés vers la conservation des sols et ainsi vers les TCS (Dumanski et Peiretti, 2013). Au niveau mondial, une extension de l'adoption de TCS de 45 millions d'hectares jusque 111 millions d'hectares a eu lieu entre 1999 et 2009, ce qui montre un intérêt des agriculteurs pour ces pratiques. Son développement est non seulement dû à son service écosystémique mais aussi aux aspects économiques : moins de temps de travail, moins de pétrole et parfois de meilleurs rendements. Le taux de conversion du conventionnel aux TCS a été le plus important en Amérique du Sud, où certains pays voient 70% de leur agriculture réalisée avec ces techniques. La répartition de terres agricoles en TCS au niveau continental est très hétérogène comme le montre le tableau 2.

Tableau 2 : Répartition de la surface agricole en semis-direct dans le monde en 2010. Source : Derpsch et al (2010)

Continent	Surface (ha)	Pourcent du total (%)
Amérique du Sud	49,579,000	46,8
Amérique du Nord	40,074,000	37,8
Australie & Nouvelle Zélande	17,162,000	11,5
Asie	2,530,000	2,3
Europe	1,150,000	1,1
Afrique	368,000	0,3

Les TCS sont pratiquées depuis le cercle arctique (Finlande) jusqu'à une latitude de 50° sud, à des altitudes variant de 0 à 3000 m, dans des conditions d'humidité ou de sécheresse, dans des petites fermes comme dans de grandes exploitations ou encore dans des terres très sableuses ou très argileuses. La raison pour laquelle tous les agriculteurs ne pratiquent pas cette méthode est qu'il y a différentes barrières telles que le manque de connaissance sur le protocole d'utilisation du semis direct et du pseudo-labour, des machines inadéquates (ce qui demande un nouvel investissement, par exemple pour les machines de semis) et la disponibilité de méthodes herbicides alternatives. En Europe, on peut voir que peu de terres sont cultivées avec un travail du sol simplifié. En revanche, l'Espagne est un leader en terme d'adoption de TCS (Derpsch et al, 2010).

5.5.3. Agriculture de conservation

En 2008-2009, la part de terre arable cultivée avec les méthodes d'agriculture de conservation était estimée à 7,5% des terres arables mondiales (soit environ 106 Mha). En 2013-2014 on l'estimait à 11% (soit 157 Mha) et en 2015-2016 à 12,5% (soit 180 Mha). L'augmentation de proportion de terres agricoles en agriculture de conservation au niveau mondial est donc de 69% entre 2008-2009 et 2015-2016 (Kassam et al, 2019). Les estimations de 2015-2016 montrent que l'Amérique du Sud et du Nord ont les proportions les plus élevées de terres en agriculture de conservation (38,7% et 35 % de la surface agricole terrestre respectivement) contrairement à l'Europe et l'Afrique qui ont les plus faibles (2% et 0,8% de la surface agricole terrestre respectivement). L'Afrique et l'Europe sont considérés comme des pays en voie de développement en termes d'adoption de méthode agricole de conservation. Cependant, en Europe l'ECAF (European Conservation Agriculture Federation) promeut cette méthode alternative depuis 1999, et on voit de remarquables évolutions en Espagne, en Italie ou encore en Finlande. En Italie et en Espagne l'agriculture de conservation a augmenté considérablement grâce à son adoption dans les cultures pérennes comme les vergers, les vignes et les oliveraies. En Belgique, la surface agricole en agriculture de

conservation était de 2700 ha ce qui est très faible par rapport aux 900 000 ha d'Espagne en 2015 (Kassam et al, 2015).

On voit donc que l'agriculture de conservation n'est pas adoptée par tous les agriculteurs dans le monde, même si les tendances sont à la hausse. Il existe différents obstacles à l'adoption de telles mesures qui expliquent sa mise en place temporisée. Il y a tout d'abord le manque de connaissance des agriculteurs sur la méthode à employer, ou encore leur attachement émotionnel à leur propre méthode (tradition, etc). Il peut y avoir aussi des politiques inadéquates comme les payements directs au sein de l'Union Européenne ou les subsides. Il peut y avoir une barrière de capital car utiliser de nouvelles machines demande un nouvel investissement. Enfin, des méthodes de luttes alternatives contre les maladies et les ravageurs ne sont pas toujours disponibles or elles doivent être présentes pour diminuer la consommation d'intrants chimiques (Kassam et al, 2015). Ces barrières doivent être franchies non seulement par les agriculteurs mais aussi par les politiques, les chercheurs, les professeurs et l'industrie (Derpsch et al, 2010).

6. Caractéristiques culturales du maïs

6.1. Physiologie & morphologie

Le maïs a comme nom scientifique *Zea mays L*. Zea est un genre appartenant à la famille des poacées, de l'ordre des Cypérales de la classe des monocotylédones. Il s'agit d'une plante en C4 et monoïque, c'est-à-dire qu'elle porte des fleurs mâles et femelles sur des endroits différents d'un même plant. La floraison mâle se situe au sommet de la plante et est une panicule tandis que la floraison femelle est un épi et se situe généralement à l'intersection entre la tige et la plus grande feuille (feuille n°10 à 12) (Figure 4). Il s'agit d'une floraison protandre afin de favoriser la fécondation croisée même si l'autopollinisation est possible. La pollinisation se fait essentiellement par le vent. Cette poacée de grande taille peut mesurer jusqu'à 3 m pour les variétés de nos régions et sa croissance est déterminée, contrairement à l'inflorescence qui, elle, est indéterminée. La profondeur racinaire du maïs varie de 0 à 120 cm de profondeur. Sur chaque nœud s'insère des limbes à feuilles

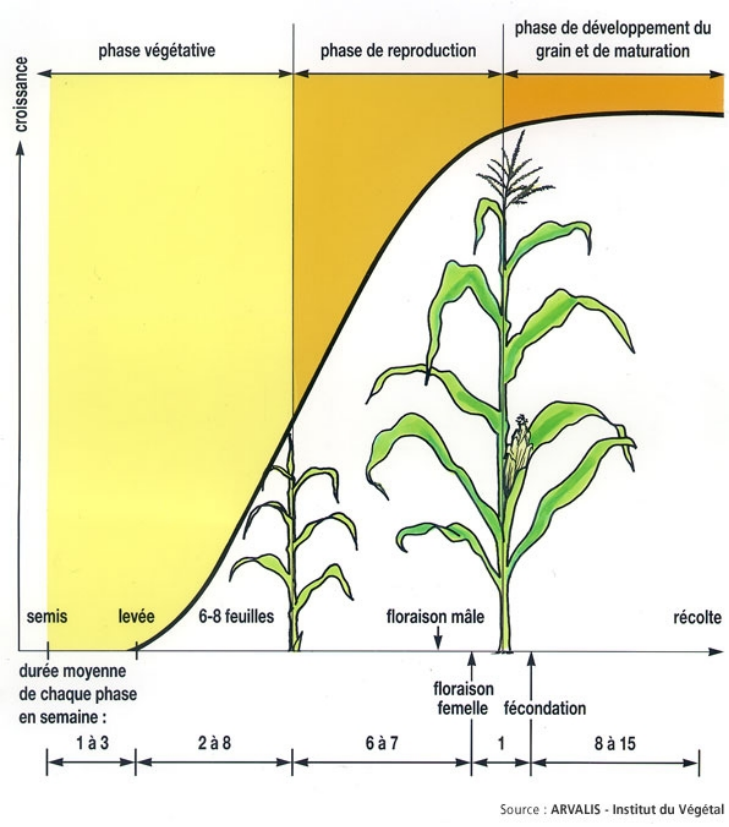


Figure 4 : Evolution de la morphologie du maïs au cours du temps

allongées, à nervures parallèles, plissées sur les bords. Le nœud de la 5ème feuille est le premier au niveau du sol. L'environnement affecte beaucoup la croissance et le rendement de la plante, surtout durant les deux semaines incluant les floraisons et le début du remplissage du grain. Il s'agit d'une plante cultivée dans les régions tropicales et dans les régions tempérées. Les températures optimales pour une croissance des racines $\geq$ 50% du maximum de croissance sont comprises entre 17°C et 37°C. Des journées chaudes et des nuits froides sont idéales pour une bonne croissance de la plante. C'est une plante de jours courts avec un taux de croissance potentiel aérien jusque 520 kg/ha*j et des besoins en eau et en nutriments élevés (Bureau de la biosécurité végétale, 1994 ; Anzana, 2006 ; Gregory, 2006 ; Bertin, 2018).

6.2. Sensibilité du maïs aux facteurs environnementaux

Le maïs est connu pour être sensible à la sécheresse (Adams et al, 1999 ; Khodarahmpour, 2012 ; García-Lara et Serna-Saldivar, 2019;). Un stress hydrique a lieu lorsque la disponibilité en eau est inférieure aux besoins de la plante, ce qui mène à une transpiration effective inférieure à la transpiration potentielle (Adams et al, 1999). Lorsque le maïs se retrouve en déficit hydrique, cela a des conséquences qui peuvent devenir dramatiques sur le rendement. La biomasse totale produite peut diminuer de 25 à 40% sous des conditions de sécheresse par rapport à une irrigation optimale (Khodarahmpour, 2012). Le rendement en grains s'avère aussi affecté, mais surtout lorsque le déficit a lieu durant l'anthèse, l'apparition des soies et la phase de remplissage du grain. En effet, il peut diminuer de 10 à 75% en fonction de la sévérité du déficit hydrique (Adams et al, 1999 ; Khodarahmpour, 2012 ; García-Lara et Serna-Saldivar, 2019). En Belgique, entre le mois de mai 2018 et le 7 septembre 2018 (période des expérimentations du présent travail), 184,6 mm d'eau sont tombés, ce qui est inférieur à la normale de saison qui prévoit sur cette période des précipitations d'environ 201,1 mm (Météo Belgique, 2018). Or, les besoins en maïs ensilage durant la période de culture est de 238 l/kg de MS (Dekalb, 2014). Pour un rendement moyen en Brabant wallon de 18 t MS/ha (Lambert et al, 2014), il faut donc $4{,}284*10^6$ l/ha d'eau. Or les précipitations tombées étant de $1{,}846*10^6$ l/ha, le rapport entre les apports d'eau et les besoins du maïs pour un rendement de 18 t MS/ha ont été de 43%. Météo Belgique a désigné un indice de sécheresse pour tout le nord du sillon Sambre et Meuse qui dit que la période du 4 mai au 22 juillet 2018 dans cette zone était extrêmement sèche.

Le rendement en biomasse est plus sensible à la température que le rendement en grains. Une température optimale (cfr point 5.1.) est nécessaire à une bonne croissance physiologique car elle intervient dans l'initiation et la croissance des feuilles (García-Lara et Serna-Saldivar, 2019).

Le rendement en grains est fonction en partie du poids de 1000 grains, du nombre de rangs par épi et du nombre de grains par rang et donc du nombre total de grains. Une sécheresse peut provoquer la diminution du nombre d'ovules différenciées ou leur avortement après différenciation, l'avortement des grains, une diminution du nombre de

rangs sur l'épi et des mesures de tels paramètres semblent cruciales pour déterminer la présence ou non d'un stress. Ils doivent être pris ensemble car une diminution du nombre de grains peut être compensée par une augmentation du poids de ceux-ci, ce qui ne change pas le rendement en grains et on pourrait passer à côté d'un stress pourtant bien présent (Adams et al, 1999). Un autre indicateur de stress est l'ASI (anthesis-silking-interval). Il s'agit de l'intervalle entre l'anthèse et l'apparition des soies, qui est très affecté par le stress hydrique (Khodarahmpour, 2012 ; Witt et al, 2012 ; Shim et al, 2017). De plus, des hautes températures causent un développement anormal des tissus reproducteurs mâles (Shim et al, 2017).

6.3. Phytotechnie & croissance

Le sol doit être finement préparé à cause des exigences minérale et hydrique du maïs pour ensuite pouvoir procéder au semis pneumatique de précision. Les graines de maïs ont l'avantage d'être grandes et de faciliter ce type de semis. De plus, un semis en ligne permet une bonne interception de la lumière. Il s'agit donc d'une culture sarclée et à fort écartement des lignes. En conventionnel celles-ci sont espacées de 75 cm et les graines dans la ligne de 15 cm. La densité optimale de semis pour le maïs ensilage est entre 90 000-100 000 plantes/ha dans nos régions.

Le maïs est sensible aux températures inférieures à 10°C, c'est la raison pour laquelle on le sème entre le 1er et le 15 mai, et jamais avant le 15 avril. La dormance des semences est généralement nulle et le taux de croissance du maïs est très élevé ce qui lui permet de compenser sa date de semis tardive par rapport à d'autres cultures. Cependant, son maximum de surface foliaire (lorsque le LAI = 4) ne coïncide pas avec la période de l'année où le rayonnement est maximal, en juin. En effet, le recouvrement des interlignes se déroule seulement en juillet (Bertin, 2018).

La récolte se déroule généralement en octobre, ce qui est trop tardif pour envisager de semer une culture intercalaire après celle du maïs. Ainsi, puisque le semis, la levée (qui peut prendre deux à trois semaines) et la récolte sont tardifs tout comme la fermeture des interlignes et que c'est une culture sarclée à grands interlignes, il y a de grands risques d'érosion et de lixiviation au sein de cette culture (Laloy et Bielders, 2010). De plus, les risques de lixiviation de l'azote sont importants étant donné que, jusqu'à 10 feuilles visibles (soit avant le recouvrement des interlignes), le maïs n'absorbe que 10% de ses besoins, et la majorité est absorbée par la suite lors de la floraison et du remplissage des grains (Bertin, 2018).

En ce qui concerne le ruissellement, une culture de maïs peut avoir des taux de ruissellement élevés (Agassi, 1996). De manière générale, les cultures en rangs sont problématiques pour l'érosion, et celle de maïs plus particulièrement. Des études réalisées au Zimbabwe, en Malaisie et en Inde montrent que pour une pente entre 2 et 5%, les pertes annuelles en sol peuvent être de 10 à 120 t/ha (RPC, 1995). De manière plus spécifique, la protection d'un sol en pente en hiver est très importante après une récolte de maïs ensilage

car peu de résidus restent à la surface du sol pour le protéger de l'érosion (Wall et al, 1991). En outre, le maïs ensilage est souvent cultivé sur des pentes abruptes, 50% de la superficie totale consacrée au maïs en Wallonie est en pente avec un gradient supérieur à 10% (Laloy et Bielders, 2010).

7. Cultures de couverture associées

7.1. Cas d'étude

Une étude réalisée aux USA, au Kansas, dans des conditions semi-arides, a utilisé différentes espèces comme cultures intercalaires. Il y avait du mélilot, de la vesce velue, de la lentille, du triticale et du pois protéagineux. Elles ont été comparées dans des conditions de semis-direct. Après cinq ans, l'étude montre que le triticale avait augmenté le taux d'humus de 1,2 fois par rapport à un sol nu, ce qui n'était pas le cas avec la lentille. Les cultures intercalaires n'avaient pas d'effet significatif sur la densité apparente mais avaient un effet significatif sur le diamètre moyen des agrégats stables. Selon les auteurs, les légumineuses et le triticale d'hiver sont les meilleurs cultures intercalaires pour améliorer les propriétés du sol et éviter l'érosion (Blanco-Canqui et al, 2013). En outre, une méta-analyse globale citée dans Jat et al (2019) montre une corrélation positive entre le taux de carbone organique du sol et le rendement en maïs.

En ce qui concerne leur efficacité à absorber l'azote résiduel du sol et celui issu de la minéralisation de la culture principale, un article réalisé par Dabney et al (2001), sur base de nombreux autres articles, met en évidence que les cultures intercalaires, surtout les herbacées et les brassicacées, sont plus efficaces pour capturer l'azote résiduel dans le sol que les légumineuses. En particulier, le seigle (*Secale Cereale L.*), le radis fourrager (*Raphanus Satvus L.*) et le chou champêtre (*Brassica rapa L.*) ont un meilleur potentiel de séquestration de l'azote résiduel que les légumineuses. Certaines légumineuses peuvent aussi être l'hôte de certains insectes ravageurs comme le ver de l'épi du maïs (*Helicoverpa zea*), mais il n'y a aucun risque en Europe concernant ce ravageur. En revanche, les légumineuses accumulent plus longtemps l'azote acquis que les non-légumineuses. Les légumineuses ont un ratio C/N plus faible que les non-légumineuses, ce qui permettrait de diminuer la quantité de fertilisant azoté utilisée. Ils montrent aussi que des cultures intercalaires avec un enracinement profond permettent d'augmenter la rétention de l'eau dans le sol, comme le lupin (*Lupinus angustofolius L.*). Les légumineuses ont l'avantage qu'une fois retournées au sol, elles fournissent des nucléations, c'est-à-dire un centre de développement pour la formation des macroagrégats. Elles fournissent également un habitat favorable pour la micro-faune (Nyawade et al, 2019). Une étude réalisée au Danemark montre que l'efficacité des légumineuses quant à la rétention de l'azote dans le sol après une culture d'orge de printemps est inférieure à celle de non-légumineuses (Vogeler et al, 2019). Une méta-analyse sur l'efficacité des cultures intercalaires sur la lixiviation de l'azote dans les pays nordiques insiste sur le fait que cette technique est adaptée pour la lutte contre la lixiviation mais qu'elle est à

adapter en fonction de la nature du sol, de la fertilisation apportée et avec une phytotechnie optimale (Valkama et al, 2015).

Une expérience réalisée au Canada, qui consistait à mettre du trèfle rouge en culture de couverture associée pendant une culture de maïs ensilage, dans le but de lutter contre l'érosion, montre que le ruissellement et la perte en sol ont été considérablement réduits (de 40 à 87% et de 46 à 78% respectivement) dans le cas de la culture maïs-trèfle rouge. De plus, le rendement observé pour le maïs en culture associée était supérieur à celui observé en monoculture lorsqu'aucune fertilisation n'est apportée. Cet effet est aussi présent lorsqu'une fertilisation azotée est ajoutée, mais pour un même rendement dans les deux tests, il faudra moins d'intrant azoté dans le système maïs-trèfle (Wall et al, 1991).

Une étude réalisée en Angleterre et en Irlande a indiqué que les populations de lombric sont plus importantes dans un système de blé-trèfle en cultures associées que dans le système de monoculture du blé (548 individus/m^2 contre 194 individus/m^2 respectivement). Ils ont aussi remarqué que la diversité d'espèces est supérieure dans le système de culture blé-trèfle (Schmidt et al, 2001). Un article publié en 2015 reprend une étude réalisée en 2011 par Blanco-Canqui et al (2011) selon laquelle une culture de couverture de vesce velue augmente le nombre de lombrics de six fois comparé à une culture sans culture de couverture. Il prouve que l'augmentation du nombre de lombrics est positivement corrélée avec une meilleure infiltration et plus de stabilité des agrégats (Blanco-Canqui et al, 2015). Plus particulièrement, une étude réalisée sur des cultures associées de blé et de trèfle blanc (*Trifolium repens*) montre une plus grande abondance de lombrics que dans une monoculture de blé (Dicks et al, 2014).

7.2. Espèces choisies

7.2.1. Fétuque rouge

La fétuque rouge (*Festuca rubra L.*) fait partie de la famille des poacées. Il s'agit d'une plante vivace qui pousse en touffes lâches ayant une tige souterraine traçante produisant des rejets allongés (plante rhizomateuse) qui peut explorer le sol à une profondeur supérieure à un mètre (Rameau et al, 1989). Les fétuques sont reconnues pour être utilisées pour la lutte contre les adventices car elles produisent un acide aminé non-protéique (la méta-tyrosine) qui est fortement inhibiteur de la croissance des autres plantes (Eshel et Beeckman, 2013).

Plus particulièrement, la fétuque rouge traçante a une bonne tolérance à l'ombre, au froid et aux sols pauvres, une tolérance moyenne au stress hydrique et son installation est assez lente. La fétuque rouge intermédiaire est le type le plus tolérant à l'ombre, a une bonne tolérance aux sols pauvres et au froid et une tolérance légèrement supérieure à la fétuque rouge traçante en termes de stress hydrique (Champion et Greffier, 2018).

7.2.2. Trèfle blanc

Le trèfle blanc (*Trifolium repens L.*), aussi appelé trèfle rampant, fait partie des fabacées. Sa particularité est qu'il est capable de réaliser une symbiose avec des bactéries fixatrices d'azote (bactéries du genre *Rhizobium*). Le processus de fixation de l'azote est le suivant (Eshel et Beeckman, 2013) :

$$N_2 + 8H^+ + 8e^- + 16\ ATP \rightarrow 2\ NH_3 + H_2 + 16\ ADP + 16\ Pi$$

Il s'agit d'une plante vivace herbacée à stolons dont la pousse est plutôt tardive du fait de ses besoins élevés en lumière. Il a un enracinement superficiel (les racines se trouvent majoritairement dans les 20 premiers centimètres du sol) qui ne lui permet pas de pousser en cas de sécheresse mais il y résiste bien. Ils sont divisés en trois grandes familles sur base de leur taille : nain, intermédiaire et grand. Le trèfle blanc nain a des feuilles de très petites tailles contrairement à celles du grand trèfle blanc.

8. Objectifs du mémoire

Au vu des enjeux environnementaux des pratiques agricoles actuelles, il est primordial de trouver des alternatives. Les risques d'érosion et de lixiviation de l'azote sont particulièrement importants durant la culture de maïs pour différentes raisons. De plus, comme les cultures de maïs sont récoltées tardivement, l'implantation d'une culture de couverture après la récolte n'est pas envisageable. C'est pourquoi les essais de ce mémoire sont des parcelles de maïs sur lesquelles des cultures de couverture ont été implantées en même temps que le maïs. On parlera donc de cultures de couverture associées au maïs.

L'objectif général du mémoire est de protéger les eaux et le sol de la lixiviation de l'azote, de l'érosion et du ruissellement à l'aide de culture de couverture associée. Cependant, pour envisager l'adoption d'une telle technique par les agriculteurs, il faut qu'elle assure la rentabilité économique. Dès lors, les objectifs spécifiques sont les suivants :

- Lixiviation de l'azote, productivité et qualité du maïs

Cet essai est implanté dans une zone homogène et est subdivisé en deux sous-essais. Les espèces/variétés semées dans ces deux sous-essais sont les mêmes mais les densités de semis sont différentes. La méthode de semis du couvert et du maïs est différente également. Les espèces utilisées comprennent une légumineuse et une poacée. On pourra donc comparer l'effet de la méthode de semis, de l'espèce/variété, ainsi que de la densité sur les paramètres de croissance et de rendement du maïs, sur la couverture du sol et sur la lutte contre la lixiviation de l'azote.

Ainsi des mesures sur le maïs telles que le rendement en MS du maïs, la hauteur moyenne du maïs, la croissance journalière moyenne en hauteur, l'ASI, le poids de 1000 grains, le nombre de rangs par épi, la VEM et la teneur en amidon du maïs ont été réalisée afin de déterminer l'impact éventuel de l'espèce/variété, de la densité et de la méthode de semis sur la productivité, la croissance et la qualité du maïs. Ensuite, plus la couverture du sol sera élevée, meilleurs seront les services environnementaux fournis. Il est donc judicieux de connaitre quelles sont les espèces/variétés et densité qui permettent une meilleure couverture du sol, ce qui a été mesuré. Enfin, dans un des deux sous-essais des carottages de sol ont été effectués avant et après l'hiver pour mesurer l'efficacité de l'espèce/variété et de leur densité de semis pour la lutte contre la lixiviation de l'azote. Le carottage après l'hiver nous a aussi donné des informations sur le taux d'humus et le pH du sol dans certains objets de ce sous-essai.

- Lutte anti-érosive et contre le ruissellement

Un essai est réalisé en pente où l'on retrouve un objet témoin, un objet avec un sous-semis de trèfle blanc et un autre avec un sous-semis de fétuque rouge. En aval de la pente des mesures de ruissellement et de perte en sol ont été réalisées afin de déterminer l'efficacité des cultures dans la lutte anti-érosive et la lutte contre le ruissellement.

Deuxième partie : Matériel et méthodes

1. Caractéristiques du champ expérimental

Le champ sur lequel l'expérience a été réalisée se situe à la rue de la Malaise à Ottignies-Louvain-la-Neuve en Belgique (50°39'51.5"N 4°35'50.4"E, figure 7). Il se situe en région sablo-limoneuse.



Figure 5 : Photo satellite du champ expérimental, situé à Ottignies-Louvain-la-Neuve en Belgique entouré en orange. Source : GoogleMaps (2019)

Le Géoportail de Wallonie le caractérise comme étant sablo-limoneux à drainage favorable. L'horizon B y est qualifié de textural, à savoir un horizon d'accumulation des éléments lessivés de l'horizon A.

Le champ a une superficie totale d'environ 2 hectares et a été divisé en deux essais séparés. Un essai a été réalisé sur la partie en pente du terrain (environ 0,2 ha) située au Nord et l'autre se fait sur le plateau en amont de la pente sur la partie sud (environ 0,5 ha) (GoogleMaps 2019). La parcelle a été choisie essentiellement pour l'homogénéité de la partie sud et pour les propriétés de la pente. Celle-ci a une inclinaison constante de 15% et une seule direction. Ces caractéristiques étaient essentielles pour l'essai 2. Le champ est alloué à des essais sur maïs depuis au moins cinq ans.

1.1. Essai 1 : la lixiviation de l'azote et la productivité du maïs

Cet essai se divise en deux sous-essais que l'on va nommé essai 1A et 1B. Ils ont pour objectif de mettre en évidence un éventuel effet de l'espèce/variété des sous-semis et de leur densité sur la croissance du maïs, sur sa valeur fourragère et sur son rendement. De plus, on pourra y mesurer l'efficacité des différentes espèces, variétés et densité de sous-semis en tant que lutte contre la lixiviation de l'azote. Ils se différencient par la méthode de semis du maïs et des cultures de couverture et les densités de semis des cultures de couverture.

Dans l'essai 1A, la machine utilisée était le AEROSEM PCS DUPLEX SEED de Pöttinger. Elle sème le maïs en double rang (Figure 6) sur une ligne. Les plants se retrouvent ainsi en quinconce. Il s'agit d'un semis de précision pour les graines de maïs, réalisé à l'aide d'un semoir pneumatique. Ce semoir est couplé à un autre semoir pneumatique de précision qui sème en ligne le sous-semis entre les lignes de maïs (tous les 12,5 cm).

Dans l'essai 1B, l'outil utilisé est une combinaison de plusieurs outils imaginée par le CIPF (centre indépendant de promotion fourragère) et LSM (un atelier de construction mécanique situé à Louvain-la-Neuve). Il s'agit d'une herse rotative de la marque Maschio combinée à un semoir à disques de la marque Monosem, sur lequel un distributeur de sous-semis de la marque APV a été ajouté. Il s'agit donc d'un semis de précision en simple rang (Figure 6) pour le maïs. Le sous-semis était semé ici à la volée.



Figure 6 : La photo de gauche montre le semis avec la machine 1 dans l'essai 1A et celle de droite le semis avec la machine 2 dans l'essai 1B

Les espèces, variétés et densités de semis sont reprises dans le tableau 3.

Tableau 3 : Espèces, variétés et densités des sous-semis des essais 1A et 1B.

	Sigle	Nom scientifique de l'espèce	Nom vernaculaire (espèce et variété)	Densités essai 1A (kg/ha)	Densités essai 1B (kg/ha)
Trèfle	Tw	Trifolium repens	Trèfle blanc nain Winterwhite	2 et 4	5 et 7
	Tm	Trifolium repens	Trèfle blanc intermédiaire Merlin	2 et 4	5 et 7
	Tt	Trifolium repens	Trèfle blanc Tivoli	2 et 4	5 et 7
Fétuque	Fm	Festuca rubra	Fétuque rouge Musica	3 et 6	8 et 13
	Fb	Festuca rubra	Fétuque rouge traçante Barustic	3 et 6	8 et 13

Les essais 1A et 1B ont été réalisés en blocs aléatoires complets pour les espèces et variétés de sous-semis (Figure 7). En revanche, ce n'est pas le cas pour la densité de semis de chacune des variétés, même si cela va être traité en blocs aléatoires complets également. Pour chaque sous-essai, il y avait trois répétitions de 11 objets différents. Il y avait donc ici 72 parcelles tests de 3 mètres de large et de 9 mètres de long.

	Essai 1A						Essai 1B					
BLoc 1	C	C	Fm 5 kg/ha	Fm 7 kg/ha	Fb 5 kg/ha	Fb 7 kg/ha	C	C	Fm 8 kg/ha	Fm 13 kg/ha	Fb 8 kg/ha	Fb 13 kg/ha
	Tm 2 kg/ha	Tm 4 kg/ha	Tt 2 kg/ha	Tt 4 kg/ha	Tw 2 kg/ha	Tw 4 kg/ha	Tm 6 kg/ha	Tm 3 kg/ha	Tt 6 kg/ha	Tw 6 kg/ha	Tw 3 kg/ha	Tt 3 kg/ha
Bloc 2	Fb 5 kg/ha	Fb 7 kg/ha	C	C	Fm 5 kg/ha	Fm 7 kg/ha	Fb 8 kg/ha	Fb 13 kg/ha	C	C	Fm 8 kg/ha	Fm 13 kg/ha
	Tt 2 kg/ha	Tt 4 kg/ha	Tw 2 kg/ha	Tw 4 kg/ha	Tm 2 kg/ha	Tm 4 kg/ha	Tw 6 kg/ha	Tw 3 kg/ha	Tt 6 kg/ha	Tt 3 kg/ha	Tm 6 kg/ha	Tm 3 kg/ha
Bloc 3	Fm 5kg/ha	Fm 7 kg/ha	Fb 5 kg/ha	Fb 7 kg/ha	C	C	Fm 8 kg/ha	Fm 13 kg/ha	Fb 8 kg/ha	Fb 13 kg/ha	C	C
	Tw 2 kg/ha	Tw 4 kg/ha	Tm 2 kg/ha	Tm 4 kg/ha	Tt 2 kg/ha	Tt 4 kg/ha	Tt 6 kg/ha	Tt 3 kg/ha	Tm 6 kg/ha	Tm 3 kg/ha	Tw 6 kg/ha	Tw 3 kg/ha

Figure 7 : Disposition des objets pour les essais 1A et 1B pour les trois blocs avec l'espèce, la variété et la densité de semis du couvert végétal

Légende

- Tw : trèfle blanc nain Winterwhite
- Tm : trèfle blanc intermédiaire Merlin
- Tt : trèfle blanc Tivoli
- Fm : fétuque rouge Musica
- Fb : fétuque rouge traçante Barustic
- C : contrôle

Nous avons constaté durant les mesures que dans l'essai 1B, bloc 1, il y a eu une inversion entre le Tt et le Tw ; le plan ci-dessus a donc été corrigé pour correspondre à la réalité et c'est la raison pour laquelle Tt aux densités de 3 et 6 kg/ha ne sont pas l'un à côté de l'autre. De plus, dans l'essai 1A pour l'objet avec le Tt à une densité de 4 kg/ha dans le bloc

2, une erreur de semis a eu lieu dans la ligne extérieure gauche mélangeant du trèfle blanc avec de la fétuque rouge où des mesures à part entière seront prises.

1.2. Essai 2 : ruissellement et érosion

L'essai 2 se fait sur le même champ que le premier essai mais cette fois le terrain est en pente. La pente est de 15%. Il n'a pas été réalisé en blocs aléatoires complets *sensu stricto*, puisque les différents tests sont toujours dans le même ordre (Figure 8), pour des raisons pratiques. Il y avait neuf parcelles de 3 m sur 24 m, trois blocs de trois sous-semis différents : des parcelles témoins, des parcelles avec de la fétuque rouge Musica (à une densité de 7 kg/ha) et enfin avec du trèfle blanc Tivoli (à une densité de 4 kg/ha). Le semis ici a été effectué avec l'AEROSEM PCS DUPLEX SEED de Pöttinger.

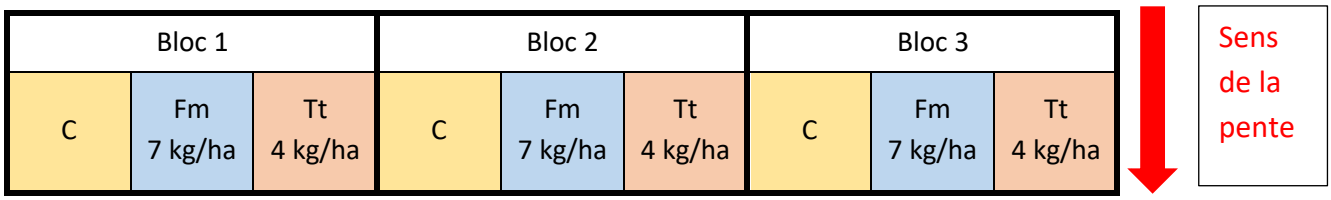


Figure 8 : Disposition des objets dans l'essai 2 en pente avec les différentes espèces, variétés et leur densité de semis

Légende

C : témoin

Fm : fétuque rouge Musica

Tt : trèfle blanc Tivoli

Le dispositif pour chaque parcelle était le suivant : des bordures verticales de plastique dur entouraient la parcelle pour délimiter la zone sur laquelle on allait récolter l'eau de ruissellement (Figure 9), et au bas chaque parcelle se trouvait un versoir en métal qui dirigeait les écoulements d'eau et de sédiments vers un bac dans le sol, d'une capacité de 500 litres (Figure 10). Ces bacs étaient recouverts d'une tôle de métal afin de ne pas fausser les résultats avec de la pluie tombée directement dans ce bac. Toutefois le versoir, lui, n'était pas recouvert par cette tôle de métal et l'eau provenant directement du versoir pouvait amener des erreurs quant à la quantité d'eau ruisselée. Cependant, cette erreur est faible et peut être considérée comme négligeable.



Figure 9 : Photo aérienne où l'on voit les délimiations en plastique dur sur les parcelles (de droite à gauche) de fétuque rouge Musica, le témoin et de trèfle blanc Tivoli

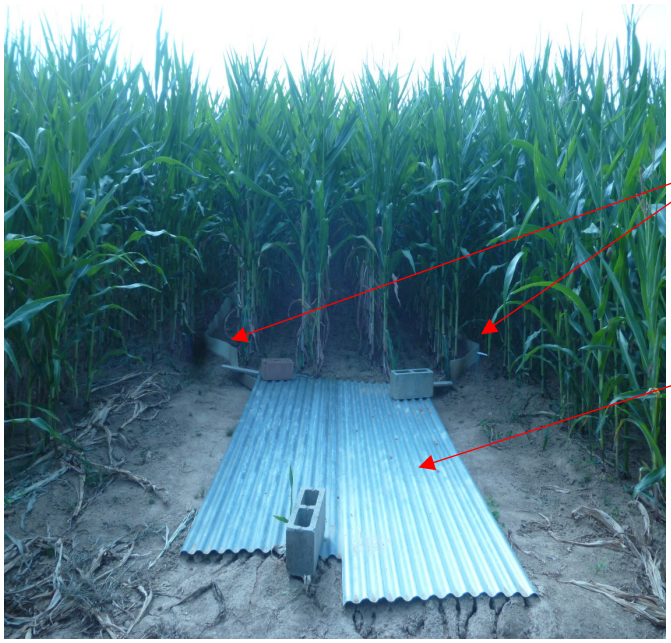


Figure 10 : Photo du dispositif de récupération des eaux de ruissellement

2. Itinéraire phytotechnique

2.1. Préparation du sol

Avant l'hiver 2017, il y a eu un passage avec une herse et pas de labour pour les essais 1A et 1B. En revanche l'essai 2 a été labouré avant l'hiver 2017. Ensuite, le sol a été travaillé avec une herse rotative juste avant le semis, soit le 24 avril 2018. Celle-ci travaillait le sol à une profondeur de 10 cm.



Figure 11 : Herse utilisée pour la préparation du sol au semis

2.2. Semis

Le semis des graines de maïs et des sous-semis s'est déroulé le 25 avril 2018 avec une densité de 91 000 grains/ha pour le maïs, de 2/4/3 ou 6 kg/ha pour les trèfles et de 5/7/8 ou 13 kg/ha pour les fétuques. Le maïs est de la variété ES Metronom (Euralis). Une fertilisation de 1200 kg/ha d'un composé minéral NPK dans les proportions 12-9-22 (soit 144 kg/ha d'azote, 108 kg/ha de phosphore et 264 kg/ha de potassium) a été appliquée à la même date.

Le désherbage est de type chimique. Il s'est déroulé le 7 juin 2018 via l'application de 1 litre/ha de Zeus (Bayer®, diclofop 250 g/L et fénoxaprop-P-éthyle 20 g/L). Chaque parcelle de chaque essai avait quatre lignes de maïs.

2.3. Récolte du maïs

La récolte s'est déroulée le 6 septembre 2018 à l'aide d'une ensileuse Baural adaptée pour la récolte dans de petites parcelles. Les deux rangées du milieu ont été récoltées afin de réaliser les tests de valeur alimentaire du fourrage. Les rangées extérieures ont été récoltées à part mais n'ont pas été utilisées pour les calculs de rendement et de valeur alimentaire afin d'éviter que les effets d'interaction entre parcelles ne soient pris en compte, ce qui aurait pu

biaiser les résultats. L'ensileuse coupe le maïs à une hauteur dite « normale », à savoir environ 15 cm. Les plants sont alors broyés puis amenés vers une balance se situant à l'arrière de l'appareil. Avant le relevé du poids dit « ensileuse », un échantillon était prélevé pour les analyses ultérieures (VEM, teneur en amidon) et conditionné dans un sac microperforé. Ainsi, le « poids parcelle » est le « poids ensileuse » plus le « poids de l'échantillon » qui tourne autour des 800 g. C'est la taille nécessaire que doit avoir l'échantillon pour assurer une bonne représentativité.

2.4. Destruction du sous-semis

La destruction a eu lieu le 4 avril 2019, soit 344 jours après le semis et 210 jours après la récolte du maïs, à l'aide d'une déchaumeuse à disque (Figure 12).



Figure 12 : Déchaumeuse à disque utilisée dans nos essais, de la marque Disc Roller

Une déchaumeuse est un outil agricole qui permet de réaliser un travail superficiel du sol, c'est-à-dire qu'il ameublit le sol sur 10-15 cm de profondeur. Cela permet d'enfouir les résidus, et ainsi de les mélanger à la terre. La déchaumeuse à disque se distingue des charrues à disques de part un travail moins profond, un train de disques plus important et un angle de pénétration nul (les disques sont verticaux par rapport au sol). La destruction des sous-semis s'est faite via plusieurs passages de cet outil sur le champ.

3. Mesures effectuées

3.1. Couverture du sol par les sous-semis

Suivre l'évolution de la couverture du sol par les sous-semis au cours du temps nous permet de détecter quel a été l'impact de l'espèce/variété et de la densité de semis sur cette dynamique. Elle a permis, spécifiquement dans l'essai 1B, de corréler les objets avec la lixiviation de l'azote. Elle a permis également dans l'essai 2 de mettre en évidence des effets sur le ruissellement et l'érosion du sol.

Dans chacun des deux essais, des mesures de densité du sous-semis ont été faites. Celles-ci se faisaient environ tous les quinze jours à partir du 26 juin 2018 jusqu'au 15 novembre 2018. L'outil utilisé est un cadre en bois de 50 centimètres de côté, divisé en 100 cases de 5 cm sur 5 cm. Le cadre était posé dans l'interligne du milieu de manière aléatoire (c'est-à-dire sans regarder l'état du sous-semis pour éviter tout biais d'expérimentateur), dans chaque objet sur le sous-semis (Figure 13).

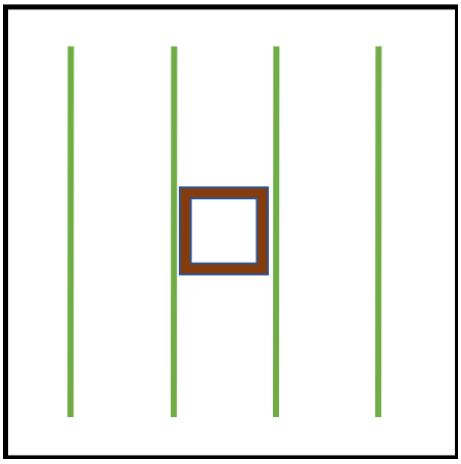


Figure 13 : Représentation d'un exemple d'endroit de la mesure de couverture du sol au sein de chaque objet pour chacun des essais

Une photo était prise du cadre posé ainsi qu'une photo de référence pour ne pas confondre les parcelles. Cette mesure a donc été répétée neuf fois au cours de ce présent mémoire, soit 729 photos des sous-semis. Ensuite, les photos ont été analysées c'est-à-dire un comptage sur chacune des photos du nombre de carrés de 5 cm de côtés remplis à 50% ou plus par le sous-semis, ce qui nous donnait directement un pourcentage de couverture du sol. Attention, lorsqu'une case est remplie par une adventice, celle-ci n'est pas comptée. Pour illustrer le critère de discrimination d'un carré, voir la figure 14.

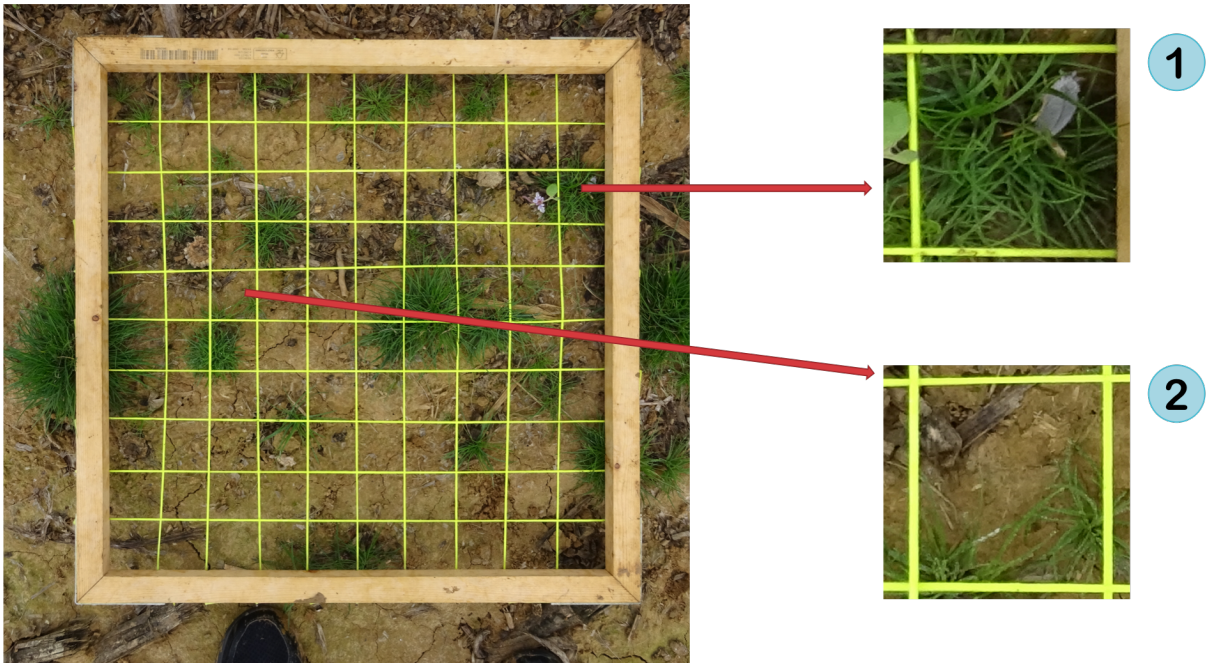


Figure 14 : Illustration du facteur de discrimination. En 1, la case était comptée comme couverte, contrairement à la case n° 2

3.2. Hauteur du maïs

Le but de cette mesure est de mettre en évidence un éventuel impact des sous-semis sur la hauteur et la croissance journalière en hauteur des plants de maïs dans les essais 1A et 1B.

A l'aide d'un mètre, deux plants de maïs par parcelle ont été mesurés depuis la limite sol-atmosphère jusqu'au haut de la plante. Le nombre limité de plants mesurés est lié au grand nombre de parcelles expérimentales (72 au total). Ces plants ont été pris dans la 2ème et 3ème ligne et à au moins un mètre du bord pour éviter les effets de bordures (Figure 15).

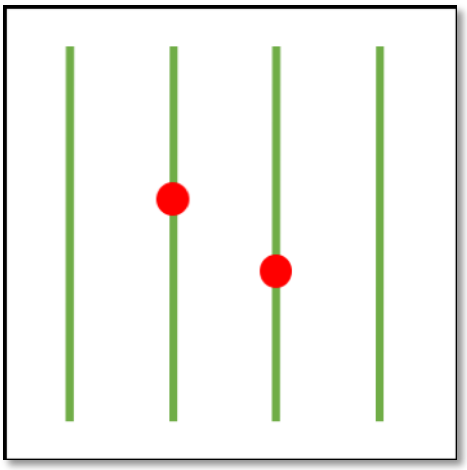


Figure 15 : Méthode de la mesure de la hauteur du maïs

La mesure avant la floraison mâle se faisait avec la dernière feuille dressée tandis qu'après la floraison mâle la hauteur se mesurait au sommet de la panicule (la dernière feuille dressée arrivant plus bas que la panicule).

3.3. Mesure du LAI du maïs

L'objectif de cette mesure est de déterminer le LAI (leaf area index) du maïs. La détermination du LAI permet d'en connaitre davantage sur le métabolisme d'une plante. En effet, l'indice de surface foliaire est un élément clé qui conditionne de nombreux processus tels que la fraction du rayonnement intercepté, la photosynthèse et l'évapotranspiration et, ainsi, les échanges en eau et carbone de la plante avec l'atmosphère. Il se définit comme étant la surface totale de feuillage par m² de sol. Sa mesure a été réalisée à l'aide d'un LICOR LAI-2200 (Figure 16). Cet appareil est un analyseur de couvert végétal et permet de connaitre le LAI. Il est composé d'un manche équipé d'un capteur relié à un boitier électronique qui enregistre les données. Il s'agit d'une méthode simple, non destructrice et peu couteuse. Les mesures devaient être réalisées tous les 15 jours dans toutes les parcelles expérimentales. Cependant, une seule mesure a été effectuée le 3 juillet 2018 car le câble de l'appareil était défectueux lorsque la deuxième prise a été tentée le 23 juillet 2018. Ainsi, des analyses de l'évolution du LAI au cours du temps s'avèrent impossibles. Les données ne seront pas traitées dans la partie résultat.



Figure 16 : Photo du LICOR LAI-2200

La méthode des relevés a été choisie selon les recommandations du manuel de l'appareil pour les cultures sarclées. Il a fallu utiliser un cache laissant passer ¾ de la lumière vers le capteur, avec la partie opaque de 90° vers l'opérateur afin d'éviter des erreurs (Figure 17). Comme chaque parcelle est composée de quatre lignes et donc de trois interlignes, les mesures ont été effectuées dans l'interligne central. Une mesure était réalisée au-dessus de la canopée afin de déterminer la quantité de lumière incidente (above) et 4 mesures étaient réalisées en dessous de la canopée (below) pour déterminer la proportion du rayonnement qui n'était pas absorbé par la canopée. Elles se faisaient en diagonale à partir d'environ 3 mètres du bord des lignes dans les essais 1A et 1B et d'environ 10 mètres dans l'essai 2. La première mesure était faite à la limite de l'interligne et de la ligne de maïs à droite, la deuxième à environ 1/3 de l'interligne, la troisième à environ 2/3 de l'interligne et enfin la quatrième était contre la ligne de maïs à gauche de l'interligne. Environ un mètre séparait chaque mesure.

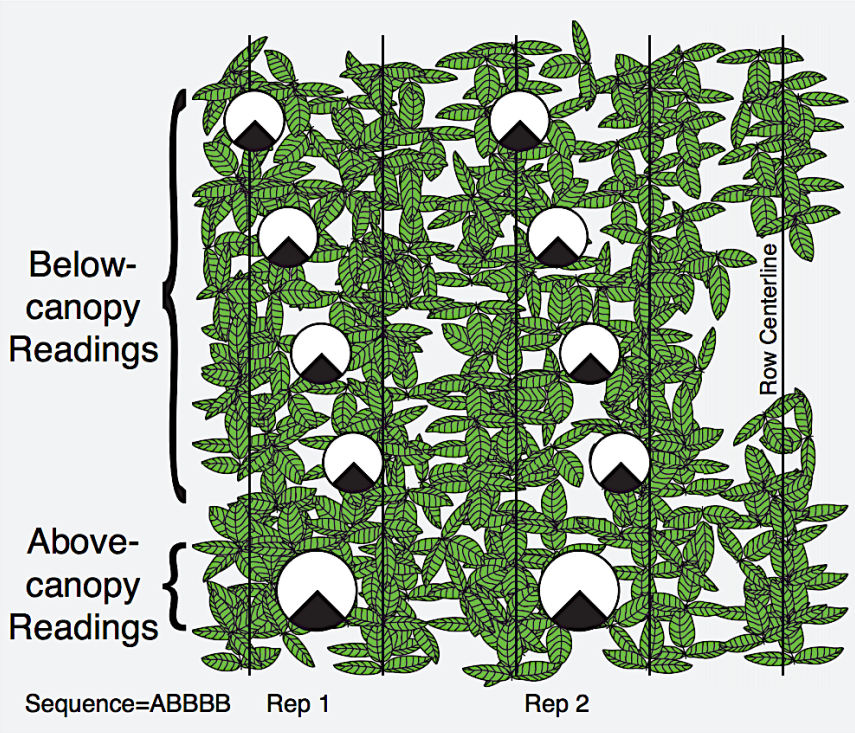


Figure 17 : Représentation du protocole pour la prise de mesure dans les cultures en rangs fournie par le manuel de l'appareil. Le rond dont le quart en bas est noir représente le cache à mettre sur le capteur du manche. Chaque rond représente une mesure. La mesure above est la mesure au-dessus de la canopée et les quatre mesures below sont les mesures en-dessous de la canopée

En pratique, plusieurs contraintes sont survenues :

- Les mesures devaient être réalisées lorsque la nébulosité était abondante et régulière afin d'éviter toute erreur produite par d'éventuels nuages passagers lors d'une journée ensoleillée.
- Les prises en dessous de la canopée ont été faites à environ 30 cm du sol pour éviter tout biais des sous-semis, déjà hauts pour certains, et d'être proche d'une feuille du maïs qui aurait aussi faussé les mesures. Ceci a été appliqué pour chacun des objets.

3.4. Floraisons mâle et femelle

La détection des deux floraisons chez le maïs a pour but de calculer l'ASI (anthesis-silking interval) dans les essais 1A et 1B. Cette mesure est un indicateur de stress chez le maïs car elle est très régulière dans de bonnes conditions de culture. Ainsi, de grandes variations de cette valeur pourraient montrer un stress hydrique généralisé pour toutes les parcelles, pouvant être accentué par la présence des sous-semis, via la compétition pour l'eau. Pour cela, durant le mois de juillet entre le 5/07/2018 et le 14/07/2018 des observations ont été réalisées concernant la floraison. Une parcelle est considérée en floraison lorsque au moins la moitié des plants est en fleur. Il y a donc d'abord eu un comptage du nombre de plants dans une des quatre lignes de chaque parcelle. Puis un comptage des plants en floraison mâle dans

un premier temps, puis en floraison femelle dans un deuxième temps, a été réalisé dans la même ligne que pour le comptage du nombre de plants par ligne. La ligne choisie par défaut était la ligne numéro 2 (Figure 18). Le jour de la floraison pour chacune des parcelles correspond au numéro du jour dans l'année. L'ASI est la différence entre le jour de la floraison femelle et le jour de la floraison mâle.

3.5. Pluviométrie

Les relevés de pluviométrie sont utiles pour mettre en évidence la sécheresse des mois d'été de 2018 et son éventuel impact sur le rendement en matière sèche et/ou la qualité alimentaire du maïs. Les données permettront aussi de corréler les pluies avec les relevés de ruissellement dans les bacs de l'essai 2 via le calcul d'un coefficient de ruissellement. Il y avait deux types de pluviomètres sur le site : un classique et un à augets. Les relevés ont été faits entre le 22 mai 2018 et le 11 mars 2019, et sont au nombre de 37 pour le pluviomètre classique et de 28 pour celui à augets. L'intérêt d'avoir ces deux types de pluviomètre est que les pluviomètres classiques sont soumis à l'évaporation tandis que les pluviomètres à augets ne sont pas soumis aux flux d'air.

3.6. Nombre de rangs par épi

Le but de cette mesure est de mettre en évidence un effet possible des sous-semis sur la fécondation via un éventuel stress causé par la compétition pour les nutriments ou pour l'eau. En effet, l'été 2018 a été très sec, et mesurer une telle variable semblait approprié.

Cinq épis ont été récoltés sur chaque parcelle un jour avant la récolte, soit le 5/09/2018. Ils ont été prélevés sur les lignes 1 et 4 de chaque parcelle (Figure 18), afin d'éviter de biaiser les mesures de valeurs alimentaires et de rendements faites par la suite sur les lignes 2 et 3. Il s'agit de l'épi présent à l'aisselle de la plus longue feuille (F10-F12). Les épis ont été choisis de manière aléatoire dans ces rangs, en excluant tout de même ceux qui étaient atteints du charbon du maïs, ceux qui étaient endommagés par les oiseaux et ceux en bordure de lignes. Ils ont été placés dans un premier temps dans des sachets individuels avec des étiquettes correspondant à leur parcelle.

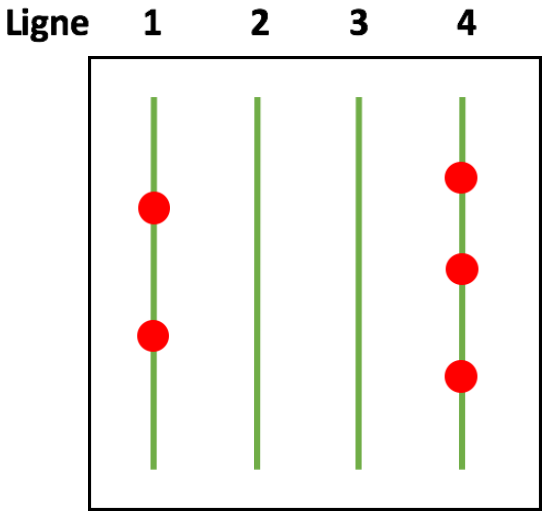


Figure 18 : Représentation de la méthode de récolte des épis de maïs sur chaque parcelle

Au total 405 épis ont été récoltés. Après avoir écarté les spathes de chaque épi, le comptage des rangs a pu être effectué, et se fait au milieu de l'épi afin d'éviter toute erreur due à la non-linéarité des rangées au bas de l'épi (Figure 19) et aux éventuels grains séchés au sommet de celui-ci. Le nombre de grains par rang a été également compté sur un des rangs de l'épi. Durant cette mesure, il a été constaté que le maïs était très mur au moment de la récolte, les grains du haut de l'épi était déjà tombés ou mangés par les oiseaux.

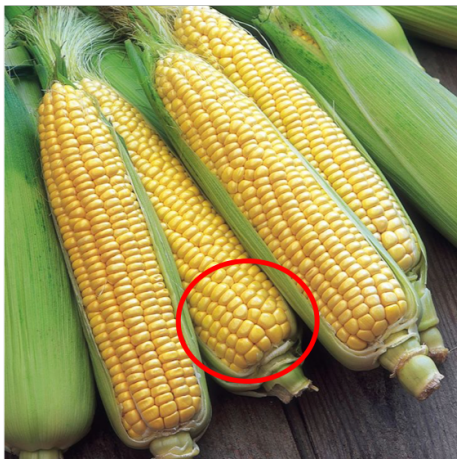


Figure 19 : Image représentant la non-linéarité des rangées au bas de l'épi (voir cercle rouge). Source : https://www.jardins.biz

3.7. Poids de 1000 grains

Afin de quantifier un effet des sous-semis ou du stress hydrique sur le remplissage des grains, la détermination du poids de 1000 grains pour chaque parcelle constitue un indicateur adéquat. Les épis utilisés pour réaliser cette mesure sont les mêmes que ceux utilisés pour le comptage des rangs, ainsi la méthode d'échantillonnage est la même qu'au point 3.6. Après avoir déplié les spathes vers le bas de l'épi (sans les arracher donc), ils ont été introduits un par un dans un égrenoir manuel (Figure 20). Cet égrenoir était fixé sur une table, les grains étaient récupérés dans un bac. Après avoir égrainé les cinq épis d'une parcelle, les grains ont été conditionnés dans un sachet microperforé, lui-même étiqueté. Chaque sachet a été pesé une première fois. Ensuite, tous les sachets ont été mis en chambre froide durant 48h sans être superposés afin de les conserver avant le séchage. Cette étape a dû être réalisée suite à une contrainte matérielle puisque durant la pleine saison les séchoirs sont beaucoup sollicités. Le séchage s'est déroulé à 70°C durant 72 heures. Une fois les grains séchés, les sacs ont été pesés une seconde fois. L'étape suivante consistait à trier les grains des impuretés (telles que l'enveloppe du grain ou des cassures de grains dues à l'égrenage manuel), et pour cela les grains ont été introduits dans une trieuse avec ventilation sur laquelle des réglages multiples ont été nécessaires pour avoir le bon diamètre de tamisage. Les grains ont été récupérés dans des bacs, reconditionnés dans de nouveaux sacs microperforés (pour éviter de remettre des impuretés dans les grains) et repesés. Les impuretés étaient récupérées dans d'autres bacs, et l'enveloppe du grain se retrouvait dans un filtre qui était aspiré tous les 10 sacs environ afin d'éviter son obstruction (Figure 21).

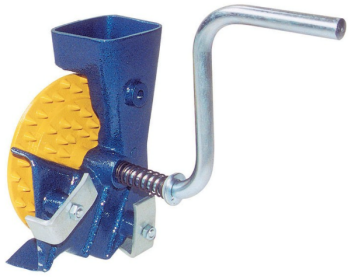


Figure 20 : Photo du type d'égrenoir manuel utilisé. Source : https://www.ufs-aviculture.fr



Figure 21 : Photo de la trieuse avec ventilation appartenant à Ecosem

L'étape suivante consistait à verser les grains dans un compteur de semences et de fixer ce compteur à 1000. Cependant, les grains étaient encore mélangés à des impuretés et celles-ci étaient comptées comme grain entier. Cela aurait donc faussé les résultats du poids de 1000 grains. La méthode envisagée était de compter manuellement 100 grains par sachet et d'extrapoler ce poids pour 1000 grains. Cependant, l'égrenage manuel avait fortement abimé les grains de telle sorte qu'il était difficile de trouver des grains complets sans cassures. Comme le nombre de grains par rang et le nombre de rangs par épi étaient connus, leur produit a donné une approximation du nombre de grains par sachet. En connaissant le poids du contenu du sac et du sac, le poids de 1000 grains a été obtenu en soustrayant le poids du sac au poids total, pour obtenir un poids net. Le poids net a ensuite été divisé par le nombre de grains approximatif dudit sac puis multiplié par 1000.

3.8. Teneur en amidon et valeur énergétique du maïs plante entière

L'objectif ici est de mettre en évidence un éventuel effet des sous-semis sur la qualité alimentaire du fourrage dans les essais 1A et 1B. La valeur énergétique est donnée en VEM par kg MS. VEM signifie Voeder eenheid voor melk, soit l'unité d'alimentation pour les vaches laitières. Le calcul du VEM est une référence pour le maïs ensilage plante entière puisque cet aliment est surtout réservé pour les vaches laitières à haute production. 1 VEM correspond à la quantité d'énergie contenue dans 1 g d'orge, soit 1,65 kcal. La teneur en amidon doit être

optimale afin d'avoir une bonne conservation de l'ensilage et une bonne composition du lait. Des taux trop élevés provoqueraient un lait pauvre en acide gras et des taux trop faibles donneraient des proportions de lactose faibles. En effet, les sucres sont les précurseurs du lactose et des acides gras retrouvés dans le lait. Ces mesures sont effectuées sur des échantillons d'environ 800 g de matière fraiche prélevés dans l'ensileuse pour chaque parcelle, et rebroyés afin de réaliser les mesures. Le maïs de l'ensileuse pour chaque parcelle correspond à la récolte des rangées intérieures (ligne 2 et 3, figure 18) pour éviter tout biais causé par les interactions avec les parcelles adjacentes. La valeur alimentaire a été établie grâce à une analyse via la méthode de spectrométrie dans le proche-infrarouge (SPIR). Cette technique basée sur la réponse spectrale spécifique des constituants de l'échantillon nous permet de connaitre la composition chimique exacte du fourrage via des transformations mathématiques et un étalonnage précis. On obtient notamment la teneur en amidon du maïs (en %) et on peut ainsi en déduire la valeur énergétique par kg de matière sèche.

3.9. Rendement en matière sèche

Outre l'aspect qualitatif du fourrage, l'aspect quantitatif est aussi primordial dans le système de culture. C'est la raison pour laquelle le rendement en tonnes de matière sèche par hectare (t MS/ha) dans les essais 1A et 1B a été calculé pour mettre en évidence, ou non, une influence des sous-semis sur la productivité des parcelles. Le rendement frais se calcule selon la formule suivante :

$$Rendement\ frais\ (t/ha) = \frac{Poids\ frais * 13333}{Longueur\ récoltée * 1000}$$

Équation 3 : Formule de calcul du rendement frais pour le maïs de nos essais

Le poids frais est le poids du maïs plante entière récolté en kg. La longueur récoltée est le nombre de mètres de maïs récolté (à savoir 2*9 m dans nos parcelles puisque 2 lignes ont été récoltées). Le coefficient 13333 correspond au nombre de mètres de maïs à l'hectare et le facteur 1/1000 convertit les kg en tonnes. Le rendement frais est donc en tonnes/ha. Pour le rendement en poids sec, il faut multiplier le rendement frais par le taux de MS. Comme le taux de MS est en pourcent, l'unité du rendement en poids sec sera en tonnes/ha.

3.10. Mesure spécifique sur l'essai 1B : contenu en azote du sol

Le but de cette mesure est d'évaluer la prise d'azote par les sous-semis une fois le maïs récolté, et ainsi mettre en évidence leur efficacité contre la lixiviation de l'azote. Des prélèvements de terre ont été réalisés dans l'essai 1B, pour les trois blocs, dans les parcelles de plus petites densités de sous-semis. Le prélèvement dans chaque parcelle était fait de manière aléatoire au sein de celle-ci mais toujours à au moins un mètre du bord de la parcelle et dans l'interligne central (entre la ligne 2 et 3 du maïs). Il y a eu au total deux prélèvements, un réalisé le 14 novembre 2018, soit 38 jours après la récolte, et l'autre le 27 février 2019, soit 174 jours après la récolte. Ces mesures sont donc dans l'intervalle de temps où le sol est uniquement occupé par les sous-semis. Ils ont été réalisés à l'aide d'une carotteuse hydraulique attachée à un tracteur (Figure 22) qui a pris des échantillons individuels sur trois horizons du sol à savoir les horizons de 0 à 30 cm de profondeur, de 30 à 60 cm de profondeur et de 60 à 90 cm de profondeur. Les échantillons pour chaque horizon de chaque parcelle ont ensuite été conditionnés dans des sachets en plastique pour être envoyés au Centre Provincial de l'Agriculture et de la Ruralité. Sur l'horizon 0-30cm, le pH, la quantité de carbone organique, le taux d'humus et le contenu en azote total ont été déterminés après l'hiver. Les taux de matière sèche et d'azote nitrique ont été déterminés pour les trois horizons.



Figure 22 : Carotteuse ayant réalisé les carottages sur les parcelles 38 jours et 174 jours après la récolte

Un prétraitement a été fait sur tous les échantillons pour la détermination de chacun des paramètres, sauf pour la quantité d'azote nitrique. Il a été réalisé selon la méthode PTCS2 dérivée de la norme ISO 11464. Le sol a été séché à une température inférieure à 40°C et broyé à 2 mm. L'échantillonnage pour la détermination des paramètres au départ des échantillons récoltés en champ s'est fait selon la méthode PTCS1 dérivée des normes NF X 31-115 et ISO 18512. Les méthodes d'analyse utilisées pour calculer ces valeurs sont les suivantes :

- Le pH a été déterminé selon la méthode PTCS3 décrite dans la norme NF ISO 10390. Il s'agit d'une valeur adimensionnelle.
- La quantité de carbone organique a été déterminée selon la méthode PTCS8 expliquée dans la norme NF ISO 10694 (en g/kg de sol)
- Le taux d'humus (%) a été calculé en multipliant la proportion de carbone organique par 2.
- Le contenu en azote total (en g/100g de terre sèche) a été déterminé selon la méthode PTCS8 décrite dans la norme NF ISO 13878.

- Le taux de MS (%) a été calculé selon la méthode PTCS3 décrite dans la norme ISO 11465.
- La quantité d'azote nitrique (kg N-NO3/ha) est une valeur calculée sur base des valeurs obtenues (en mg N-NO3/l) via la méthode PTCS7 décrite dans la norme ISO 14 256-2.

3.11. Mesures spécifiques sur l'essai 2 : ruissellement et érosion

Pour l'essai 2, des mesures ont été réalisées sur l'eau récoltée dans les bacs en fin de pente, afin d'y établir la quantité d'eau ruisselée et la teneur en sédiments et de les mettre en parallèle avec l'objet. La récolte du contenu se faisait après chaque précipitation abondante ou orage. Ensuite, les échantillons de minimum deux litres ont été envoyés à La Hulpe (au Centre Provincial de l'Agriculture et de la Ruralité) pour les analyses. Il y a eu 13 prélèvements dans les bacs de pluie entre le 22 mai 2018 et le 11 mars 2019, qui ont permis l'obtention de données quant au ruissellement moyen par hectare (l/ha) et à l'érosion moyenne par hectare (kg/ha). Avec les données de précipitations, un coefficient de ruissellement moyen a été calculé pour chaque objet.

4. Méthode statistique

L'analyse des résultats a été réalisée avec le logiciel SAS afin de déterminer les éventuels impacts des sous-semis décrits précédemment sur différentes variables à l'aide d'ANOVA I et II. L'ANOVA I est une analyse de la variance à un facteur catégoriel. L'ANOVA II est une analyse de la variance à deux facteurs catégoriels. Les facteurs catégoriels utilisés sont l'espèce/variété et la densité hiérarchisée à l'espèce/variété. L'appellation objet sera utilisée pour définir l'espèce, la variété et la densité de semis d'une parcelle. Les hypothèses d'une ANOVA ont été vérifiées au préalable pour chaque analyse ; à savoir les résidus suivent une loi normale, les observations sont indépendantes et les variances expérimentales peuvent être considérées comme égales. Les observations sont considérées comme indépendantes de par le protocole expérimental. L'analyse s'est faite en trois parties : les caractéristiques du maïs, le service environnemental et la couverture du sol. Une p-valeur sera considérée comme significative lorsqu'elle est inférieure à 0,05. Si elle est supérieure, elle sera donc non significative.

4.1. Les caractéristiques du maïs

Les variables mesurées sont les suivantes : la hauteur du maïs, le nombre de rangs par épi, l'ASI, la teneur en amidon, le poids de 1000 grains, la VEM, le rendement en matière sèche. Les premiers tests permettront de savoir si ces éléments sont affectés de manière significative par l'objet. La croissance journalière moyenne du maïs correspond à la moyenne des croissances journalières durant la période de mesure qui sont les différences de hauteur (cm) entre deux mesures divisées par le nombre de jours entre ces deux mesures. Elle nous permettra d'identifier d'éventuelles baisses de croissance durant l'été, et si cela est lié à l'objet. Un test de Tukey s'avèrera utile pour mettre en évidence les différences de moyennes

entre chacun des objets et voir lesquels donnent des résultats significativement différents les uns des autres.

4.2. Le service environnemental

A l'aide des mesures réalisées sur la quantité d'azote nitrique dans trois horizons du sol, on peut corréler la lixiviation de l'azote avec l'objet en prenant en compte l'effet aléatoire du bloc. En ce qui concerne les mesures de ruissellement et d'érosion, elles seront mises en évidence dans les résultats en comparaison avec les couvertures du sol par les différents objets, mais une analyse statistique n'était pas envisageable à cause du faible nombre de données. Les données de couverture de sol, à ces dates précises, sont des estimations sur base des données récoltées aux autres dates, car les couvertures de sol n'ont pas été mesurées à ces dates précises. Cela s'est fait à l'aide d'une régression polynomiale, que l'on peut voir sur la figure 43. Il a fallu séparer les deux périodes, avant et après récolte, pour avoir un R^2 suffisamment élevé à cause de la chute de couverture du sol après le passage de l'ensileuse. Les coefficients de ruissellement ont été multipliés par 10^3 afin de mieux voir les différences entre les objets.

4.3. La couverture du sol

La couverture du sol est une des solutions trouvées pour limiter l'érosion, favoriser la faune et la flore du sol via l'apport en matière organique et pour augmenter la stabilité du sol. Cela offre une rugosité de la surface supplémentaire et les racines stabilisent et nourrissent le sol (cfr état de l'art). Ainsi la couverture du sol sera expliquée par l'espèce/variété et la densité du sous-semis. La vitesse moyenne de couverture du sol correspond à la moyenne des différences de couverture (%) entre chacune des mesures divisées par le nombre de jours séparant les deux mesures. L'intérêt est de montrer quels sont les sous-semis qui ont le plus grand potentiel de colonisation de l'espace et qui ont assez de ressources sous le maïs et ceux qui sont capables de reprendre correctement malgré la destruction partielle du couvert par le passage de l'ensileuse.

Troisième partie : Résultats

1. Effet de l'objet sur les caractéristiques du maïs

1.1. Effet de l'objet sur le rendement en MS

1.1.1. Essai 1A

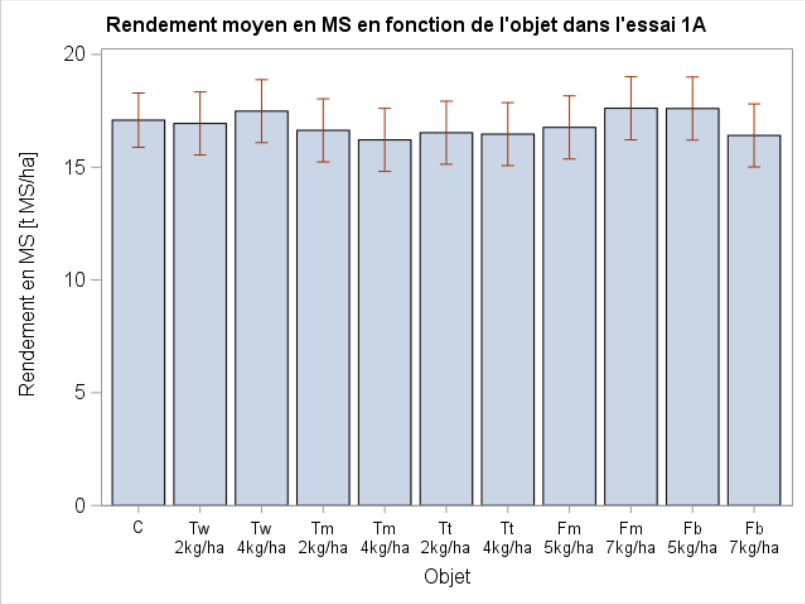


Figure 23 : Rendement moyen en fonction de l'objet et son écart-type dans l'essai 1A

Le rendement moyen en MS varie de 16.2107 ± 0.5816 t MS/ha pour le Tm à une densité de 4 kg/ha à 17.6127 ± 0.5816 t MS/ha pour la Fm à une densité de 7 kg/ha (Figure 23). L'ANOVA II montre que ces deux facteurs - l'espèce/variété et la densité - n'ont pas d'influence sur le rendement en MS.

1.1.2. Essai 1B

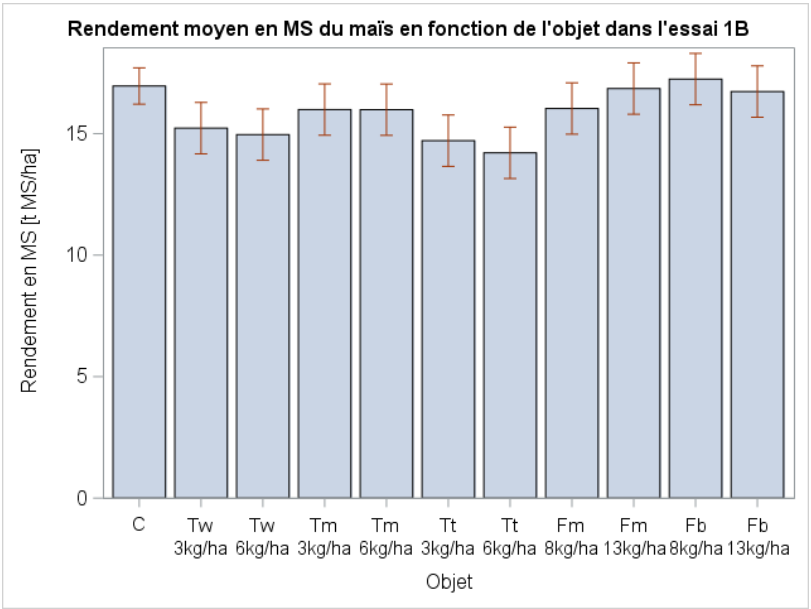


Figure 24 : Rendement moyen en fonction de l'objet et son écart-type dans l'essai 1B

Le rendement moyen du maïs varie entre 14,2103 ± 0,5110 t MS/ha pour le Tt à 6 kg/ha et 17,2448 ± 0,5110 t MS/ha pour la Fb à 8 kg/ha (Figure 24). L'ANOVA II montre que l'espèce/variété a un impact significatif (p-valeur = 0.0002) sur le rendement en MS ce qui n'est pas le cas de la densité. Le test de Tukey compare les espèces/variétés avec les deux densités confondues pour chacune. Il montre que les rendements en MS obtenus dans les objets avec du Tw sont significativement inférieurs à ceux obtenus pour les objets avec de la Fm, de la Fb et le témoin à des p-valeurs de 0,0144 ; 0,012 et 0,0013

respectivement. Les rendements obtenus pour les objets avec du Tm sont significativement supérieurs à ceux obtenus dans les objets avec du Tt. Enfin les rendements obtenus dans les objets avec du Tt sont significativement inférieurs à ceux obtenus pour les objets avec de la Fm, de la Fb et le témoin à des p-valeurs de 0,0007 ; < 0,0001 et < 0,0001 respectivement. Donc les rendements maïs obtenus avec des sous-semis de Tw et de Tt sont significativement plus faibles que ceux obtenus dans les sous-semis de fétuque et le témoin.

1.2. Effet de l'objet sur la hauteur des plants de maïs

1.2.1. Évolution de la hauteur des plants de maïs au cours du temps

1.2.1.1. Essai 1A

La croissance en hauteur du maïs est relativement constante entre le 26 juin 2018 et le 23 juillet 2018 pour tous les objets (Figure 25). Aucun objet ne se démarque en termes de hauteur du maïs des autres.

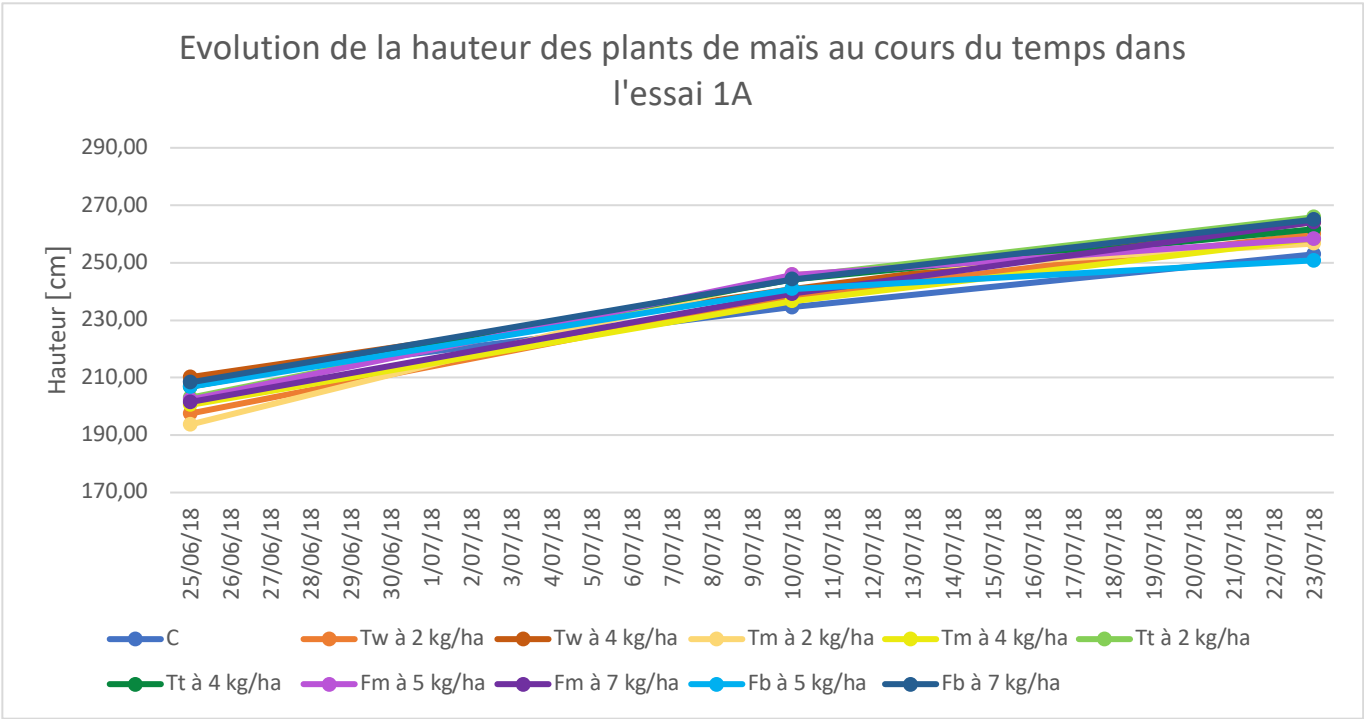


Figure 25 : Evolution de la hauteur des plants de maïs du 26 juin 2018 au 23 juillet 2018 pour l'essai 1A

1.1.1.1. Essai 1B

Sur la figure 26, on constate également que la croissance en hauteur du maïs est relativement constante entre le 26 juin 2018 et le 23 juillet 2018 pour tous les objets. Aucun objet ne se démarque en termes de hauteur du maïs des autres.

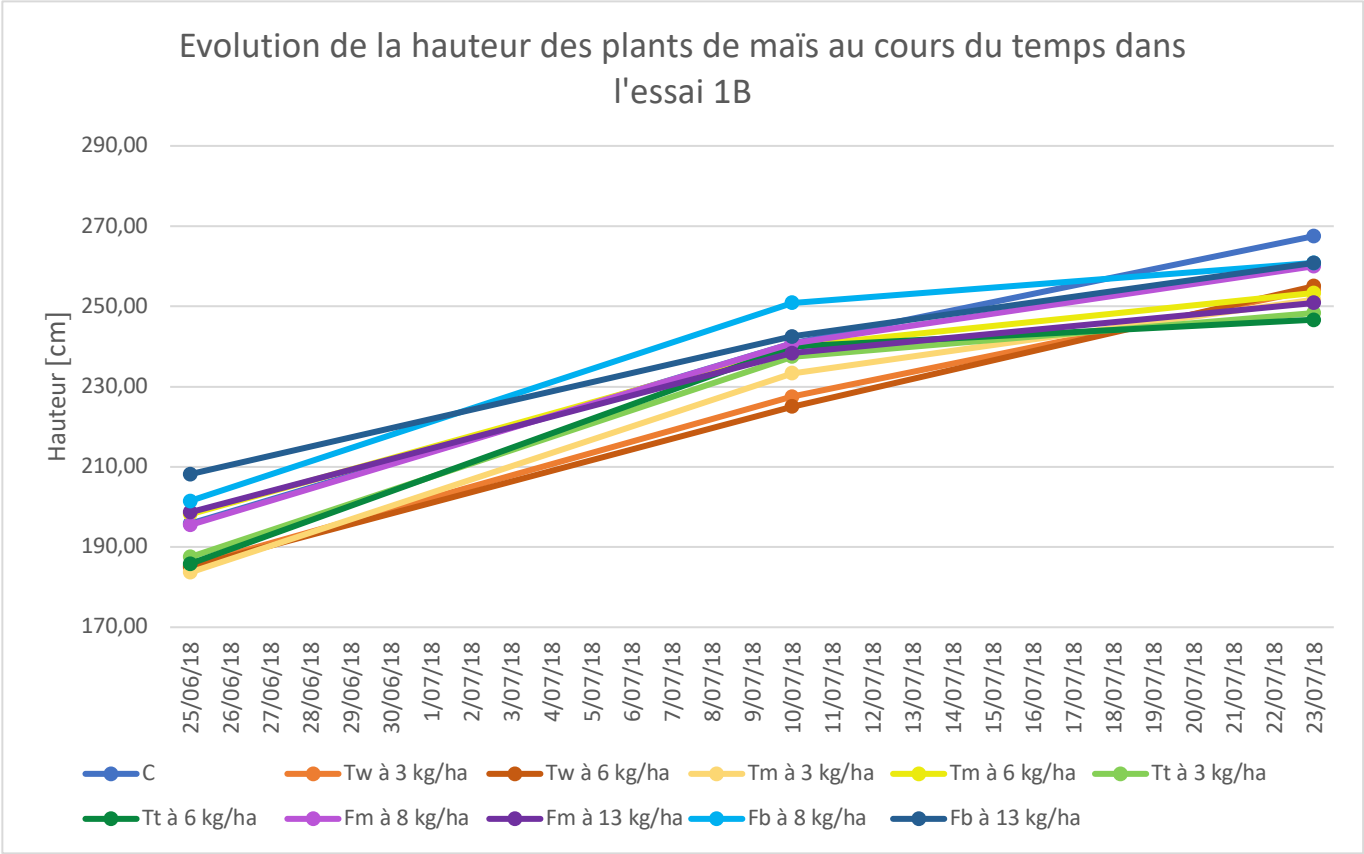


Figure 26 : Evolution de la hauteur des plants de maïs du 26 juin 2018 au 23 juillet 2018 pour l'essai 1B

1.2.2. Effet de l'objet sur la hauteur moyenne du maïs au 23 juillet 2018

1.2.2.1. Essai 1A

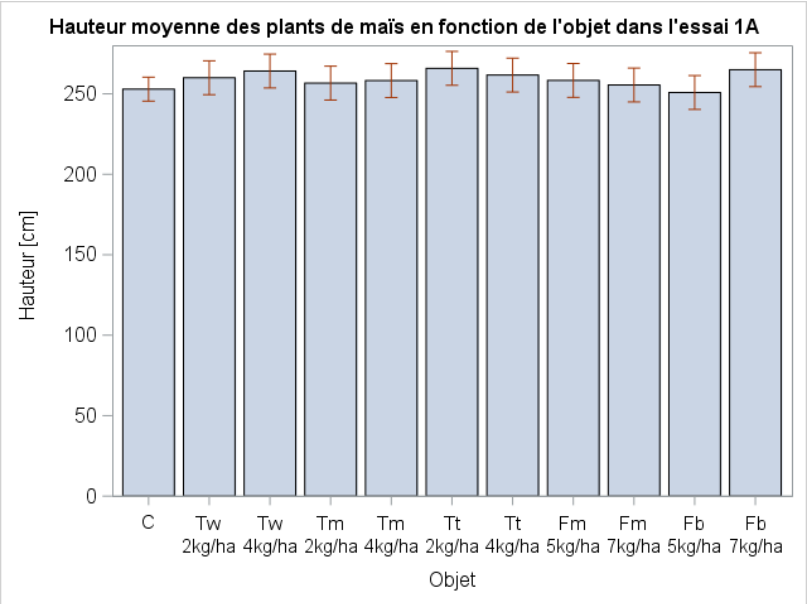


Figure 27 : Moyennes de hauteur pour chaque objet avec chaque écart-type pour l'essai 1A

La hauteur moyenne varie de 252,92 ± 3,59 cm pour le témoin à 265,83 ± 5,08 cm pour le Tt à une densité de 2 kg/ha (Figure 27). L'ANOVA II montre que ni l'espèce/variété ni la densité n'influencent significativement la hauteur du maïs.

1.2.2.2. Essai 1B

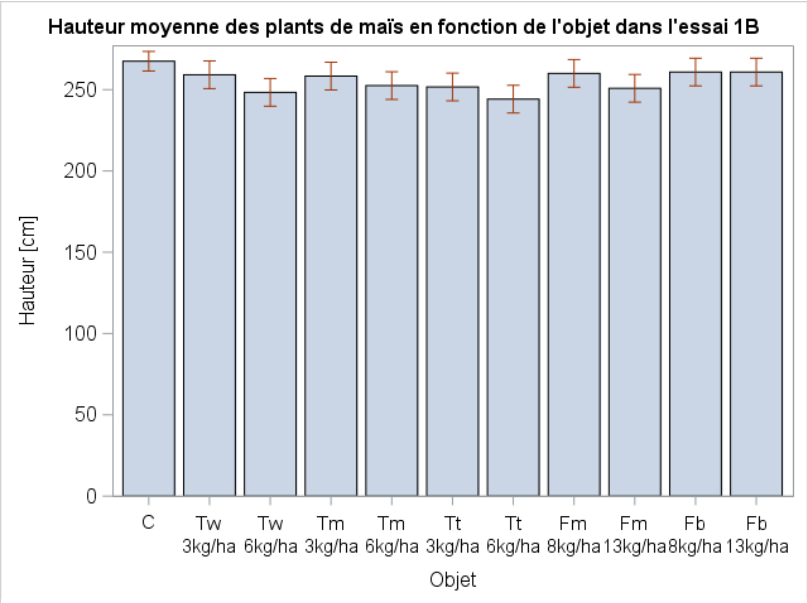


Figure 28 : Moyennes de hauteur pour chaque objet avec chaque écart-type pour l'essai 1B

La hauteur moyenne du maïs varie entre 244,17 ± 4,11 cm pour le Tt à une densité de 6 kg/ha et 267,50 ± 2,97 cm pour le témoin (Figure 28). L'ANOVA II révèle que l'espèce/densité a un effet significatif sur la hauteur du maïs ($p = 0,0023$) ce qui n'est pas le cas de la densité de semis. Le test de Tukey compare donc les espèces/variétés entre elles avec les densités confondues pour chacune. Il montre que le maïs pour les objets avec du Tw, du Tm, du Tt et de la Fm a une hauteur significativement inférieure à celle du maïs témoin à des p-valeurs de 0,0028 ; 0,0074 ; < 0,0001 et de 0,0074 respectivement. Ainsi seule la taille moyenne du maïs avec les objets avec de la Fb est sembable à celle du maïs témoin. Ensuite, le maïs des objets avec du Tt a une taille moyenne significativement plus faible que celle des objets avec de la Fb ($p = 0,0046$).

1.2.3. Effet de l'objet sur la croissance journalière en hauteur du maïs

1.2.3.1. Essai 1A

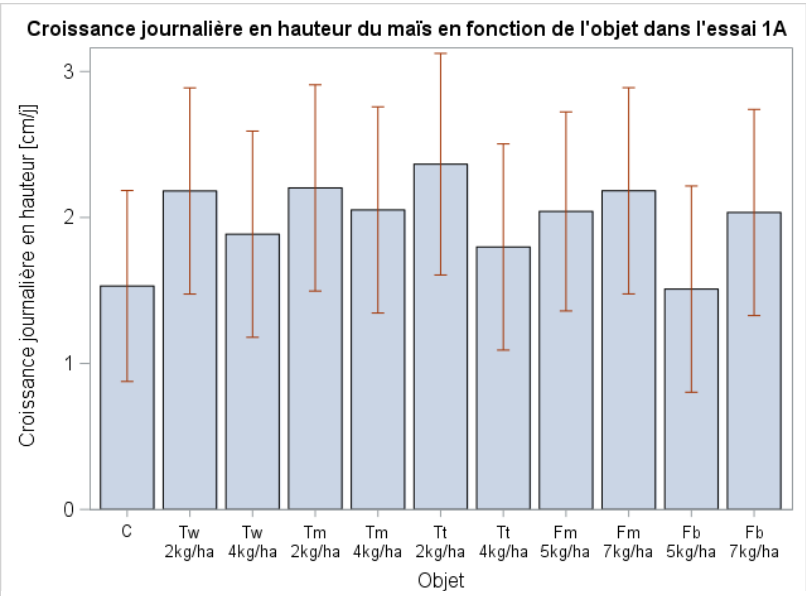


Figure 29 : Croissance journalière moyenne en hauteur des plants de maïs et son écart-type entre le 25 juin 2018 et le 23 juillet 2018 en fonction des objets dans l'essai 1A

La croissance journalière moyenne en hauteur des plants de maïs varie de 1,50 ± 0,35 cm/j pour la Fb à une densité de 5 kg/ha à 2,20 ± 0,35 cm/j pour le Tt à une densité de 2 kg/ha (Figure 38). La croissance entre le 25 juin 2018 et le 23 juillet 2018 est impactée par l'espèce/variété ($p = 0,0186$) mais pas par la densité. Le test de Tukey compare les espèces/variétés avec leurs densités respectives confondues. Il montre que la croissance journalière du maïs

dans les objets avec du Tw, du Tm, du Tt et de la Fm est significativement supérieure à celle des témoins (p-valeurs de 0,0111 ; 0,0029 ; 0,0073 et 0,0061 respectivement).

1.2.3.2. Essai 1B

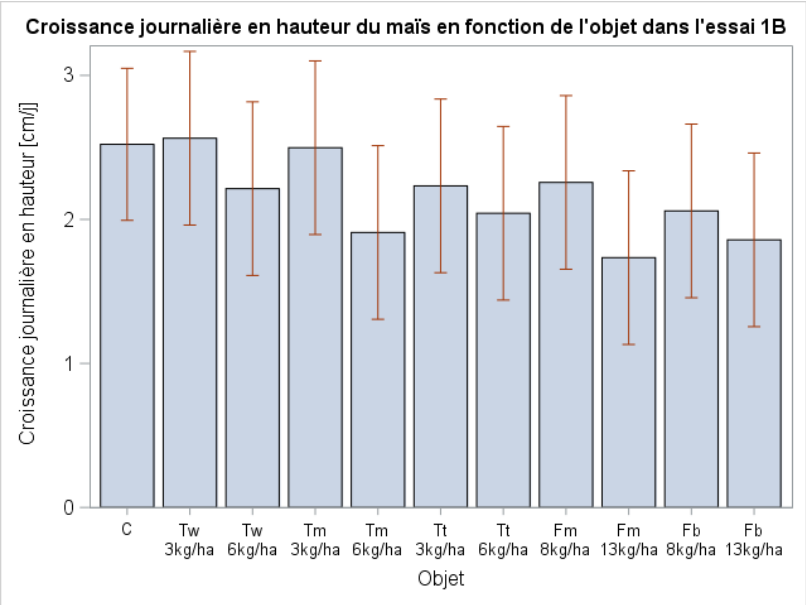


Figure 30 : Croissance journalière moyenne en hauteur des plants de maïs et son écart-type entre le 25 juin 2018 et le 23 juillet 2018 en fonction des objets dans l'essai 1B

La croissance journalière moyenne en hauteur des plants de maïs varie entre 1,73 ± 0,30 cm/j pour la Fm à une densité de 13 kg/ha à 2,56 ± 0,30 cm/j pour le Tw à une densité de 3 kg/ha (Figure 39). L'ANOVA II montre que ni l'espèce/variété (p = 0,0571) ni la densité n'ont d'effet sur la croissance. Cependant, comme la p-valeur pour l'effet de l'espèce/variété est proche de 0,05, un test de Tukey a été réalisé en comparant les espèces/variétés avec leurs densités respectives confondues. Il montre que la croissance journalière du maïs dans les objets avec du Tw est significativement supérieure à celle des objets avec de la Fb (p = 0,0410) et la croissance dans les objets avec sous-semis de Fm et Fb est significativement inférieure à celle du témoin (p = 0,0133 et 0,0083 respectivement). Les objets avec de la fétuque ont donc eu une croissance journalière significativement inférieure à celle des témoins.

1.3. Effet de l'objet sur l'ASI

1.3.1. Essai 1A

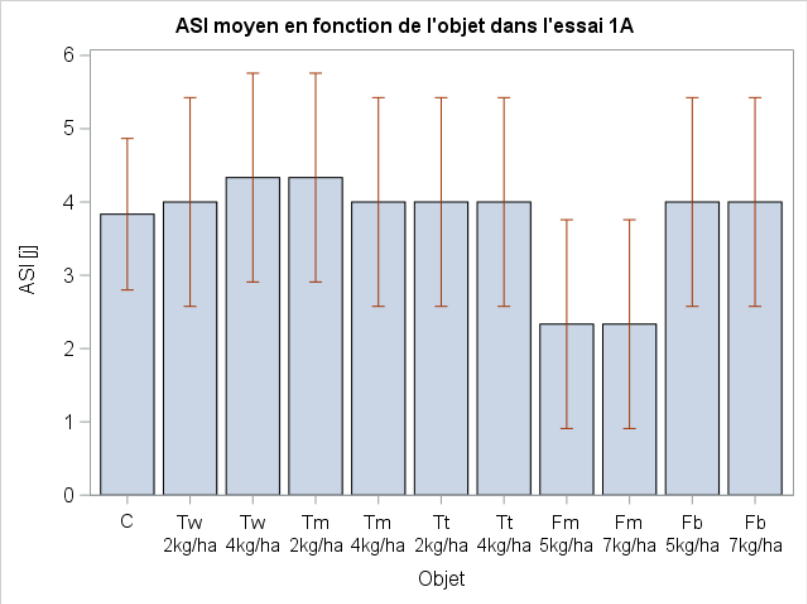


Figure 31 : ASI moyen pour chaque objet avec chaque écart-type pour l'essai 1A

L'ASI moyen varie entre 2,33 ± 0,68 j pour la Fm à 5 et 7 kg/ha et 4,33 ± 0,69 j pour le Tw à 4 kg/ha et le Tm à 2 kg/ha (Figure 29). L'ANOVA II montre que ni l'espèce/variété (p = 0,0877) ni la densité n'ont d'effet sur l'ASI. Cependant, comme la p-valeur de l'influence de l'espèce/variété est proche de 0,05, un test de Tukey comparant les espèces/variétés avec leurs densités respectives confondues pour chacune a été réalisé. Le test nous montre que le maïs avec des objets de Fm a un ASI significativement inférieur à celui des autres objets.

1.3.2. Essai 1B

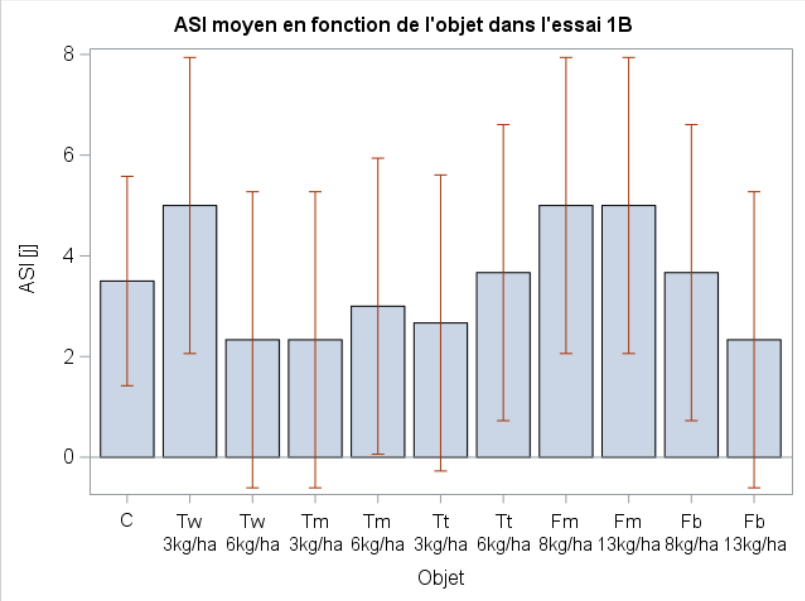


Figure 32 : ASI moyen pour chaque objet avec chaque écart-type pour l'essai 1B

L'ASI moyen varie de 2,33 ± 1,42 j pour le Tw à une densité de 6 kg/ha, le Tm à 3 kg/ha et la Fb à 13 kg/ha jusque 5,00 ± 1,42 j pour le Tw à une densité de 3 kg/ha et la Fm aux densités de 8 et 13kg/ha (Figure 30). Cependant, l'ANOVA II montre que ni l'espèce/variété ni la densité n'impactent significativement l'ASI.

1.4. Effet de l'objet sur la VEM du maïs

1.4.1. Essai 1A

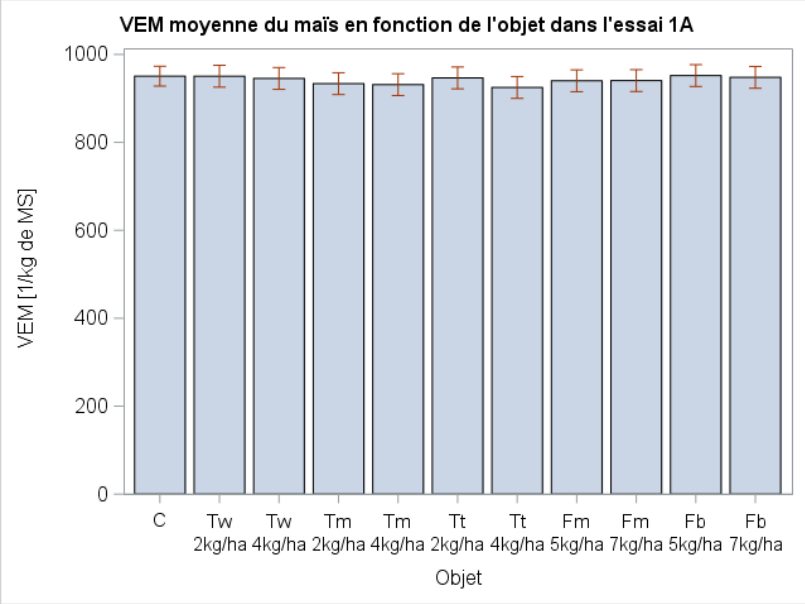


Figure 33 : VEM moyenne pour chaque objet avec chaque écart-type pour l'essai 1A

La VEM moyenne varie seulement entre 924,95 ± 11,998 VEM/kg de MS pour le Tt à une densité de 4 kg/ha et 952,00 ± 11,998 VEM/kg de MS pour la Fb à une densité de 5 kg/ha (Figure 31). L'ANOVA II montre que ni l'espèce/variété (p = 0,0660) ni la densité ont un impact significatif sur la VEM. Néanmoins, comme la p-valeur de l'effet de l'espèce/variété est proche de 0,05, un test de Tukey a été réalisé en comparant les espèces/variétés avec leurs densités respectives confondues. Il montre que le maïs des objets avec du Tw a une VEM significativement supérieure à celle du maïs des objets avec du Tm (p = 0,0384). Ces derniers ont une VEM significativement inférieure à celle du maïs des objets avec de la Fb et celle des maïs témoins (p =0,0208 et p = 0,0169). Enfin le maïs des objets avec du Tt ont une VEM significativement inférieure à celle des maïs témoins (p= 0,0459).

1.4.2. Essai 1B

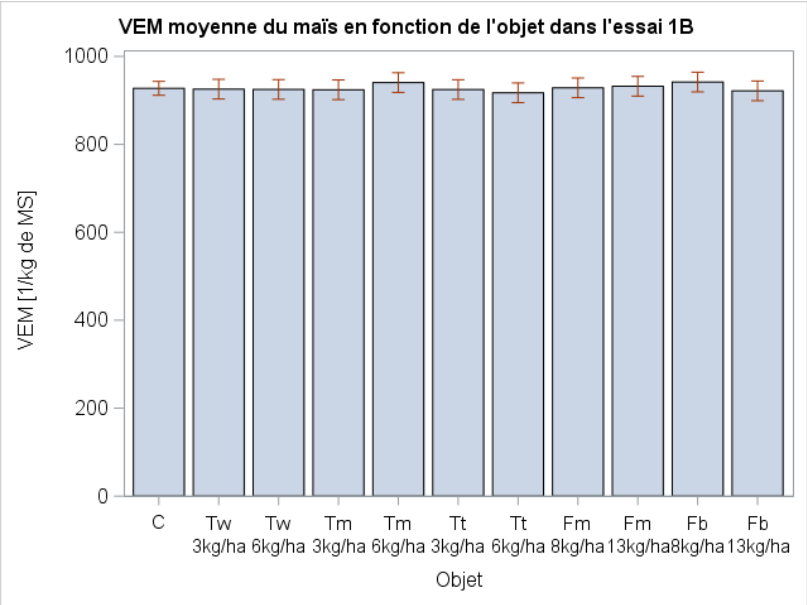


Figure 34 : VEM moyenne pour chaque objet avec chaque écart-type pour l'essai 1B

La VEM moyenne varie entre 917,32 ± 10,8215 VEM/kg de MS pour le Tt à une densité de 6 kg/ha et 941.83 ± 10,8215 VEM/kg de MS pour la Fb à une densité de 8 kg/ha (Figure 32). L'ANOVA II montre que ni l'espèce/variété ni la densité n'ont un effet significatif sur la VEM.

1.5. Effet de l'objet sur la teneur en amidon du maïs

1.5.1. Essai 1A

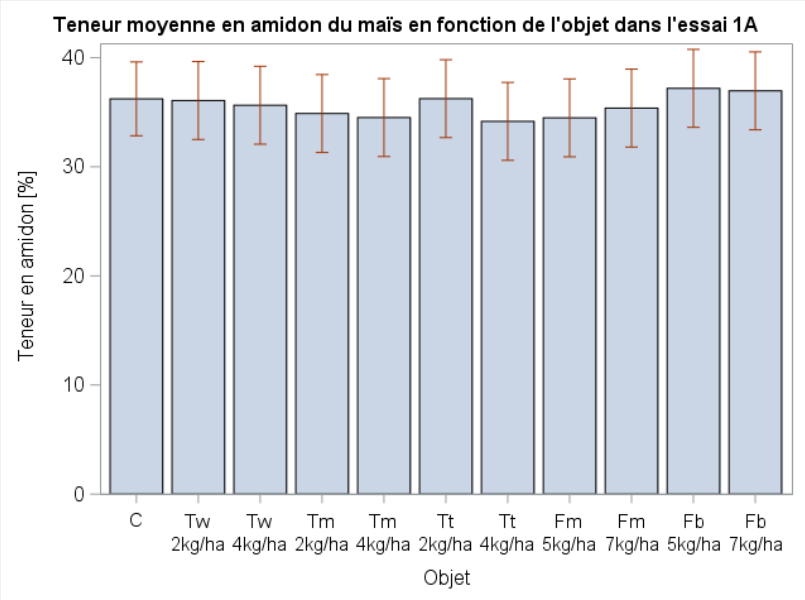


Figure 35 : Teneur moyenne en amidon du maïs pour chaque objet avec chaque écart-type pour l'essai 1A

La teneur moyenne en amidon du maïs varie entre 34,1575 ± 1,7258 % pour le Tt à une densité de 4 kg/ha et 37,1844 ± 1,7258 % pour Fb à une densité de 5 kg/ha (Figure 33). L'ANOVA II montre que ni l'espèce/variété (p = 0,0511) ni la densité n'ont d'effet significatif sur la teneur en amidon du maïs. Cependant, comme la p-valeur concernant l'espèce/variété est très proche de 0.05, un test de Tukey a été réalisé en comparant les espèces/variétés avec leurs densités respectives confondues. Il en ressort que la teneur en amidon du maïs de l'objet avec la Fb est significativement plus élevée que celle des objets avec du Tm, du Tt et de la Fm à des p-valeurs de 0,0059 ; 0,0255 et de 0,0119 respectivement.

1.5.2. Essai 1B

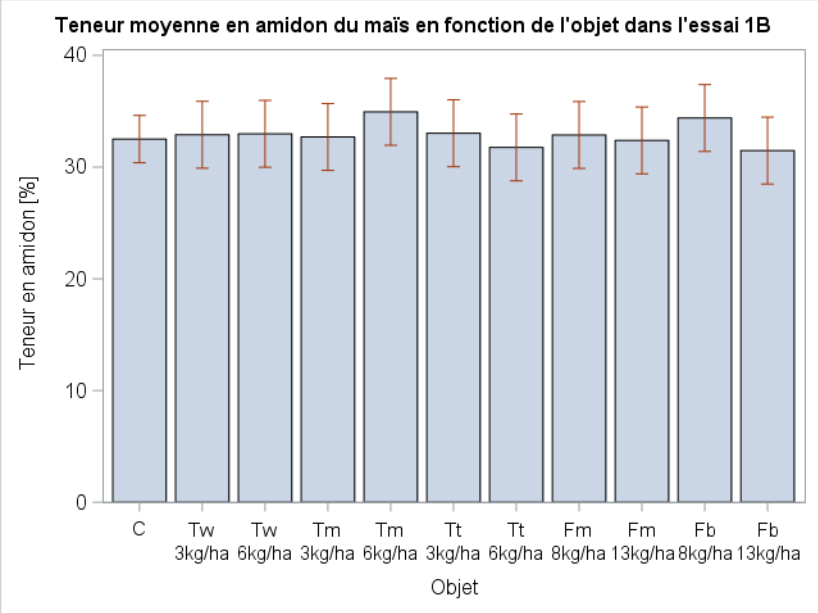


Figure 36 : Teneur moyenne en amidon du maïs pour chaque objet avec chaque écart-type pour l'essai 1B

La teneur moyenne en amidon du maïs varie entre 31,4775 ± 1,4468 % pour la Fb à une densité de 13 kg/ha et 34,9441 ± 1,4468 % pour le Tm à une densité de 6kg/ha (Figure 35). L'ANOVA II montre que ni l'espèce/variété ni la densité influencent de manière significative la teneur en amidon du maïs.

1.6. Effet de l'objet sur le nombre de rangs par épi

1.6.1. Essai 1A

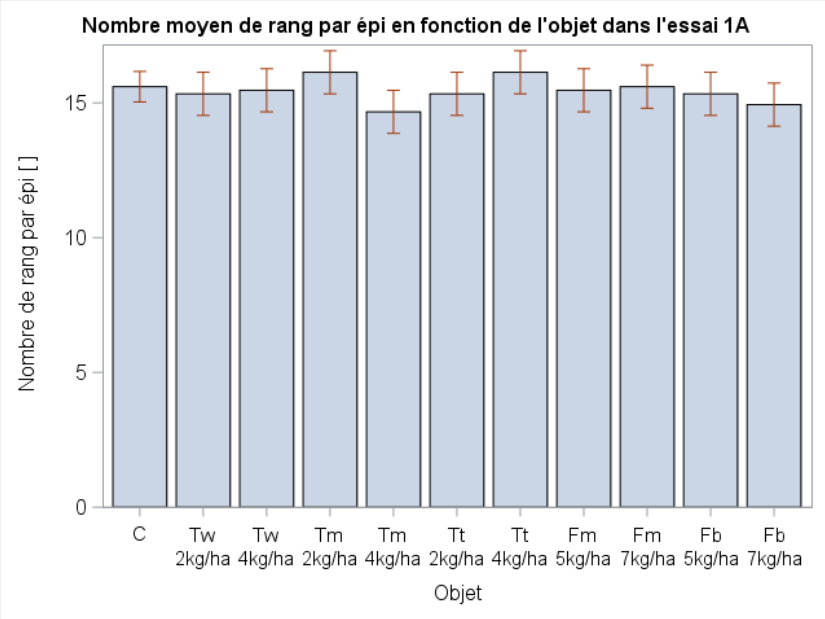


Figure 38 : Nombre moyen de rangs par épi pour chaque objet avec chaque écart-type pour l'essai 1A

Le nombre moyen de rangs par épi varie de 14,66 ± 0,39 pour le Tm à une densité de 4 kg/ha à 16,13 ± 0,39 pour le Tm à une densité de 4 kg/ha (Figure 36). L'ANOVA II montre que le nombre de rangs par épi n'est pas significativement impacté par l'espèce/variété et par la densité.

1.6.2. Essai 1B

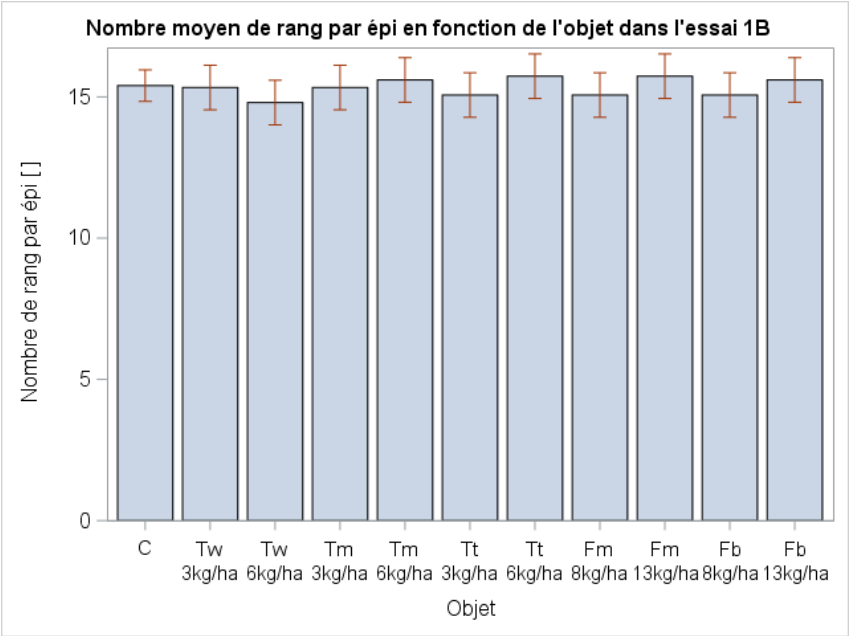


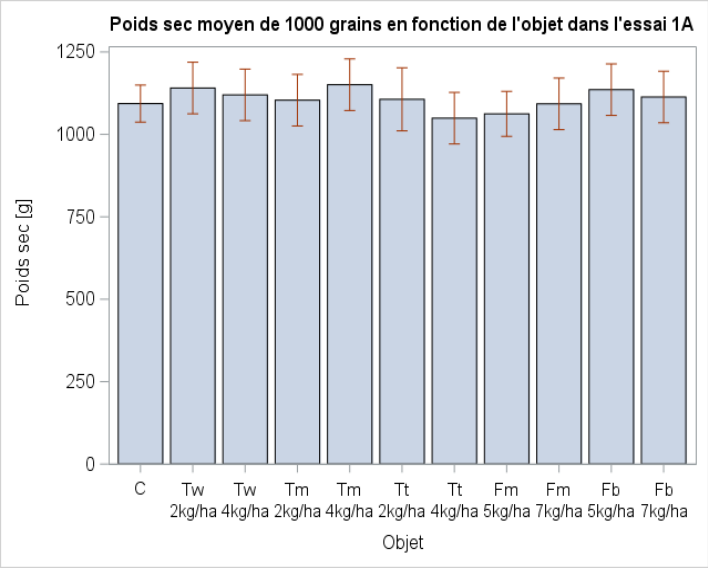
Figure 39 : Nombre moyen de rangs par épi pour chaque objet avec chaque écart-type pour l'essai 1B

Le nombre moyen de rangs par épi varie de 14,80 ± 0,38 pour le Tw à une densité de 6 kg/ha à 15,73 ± 0,38 pour le Tt à une densité de 6 kg/ha et la Fm à une densité de 13 kg/ha (Figure 37). L'ANOVA II montre que ni l'espèce/variété ni la densité influencent de manière significative le nombre de rangs par épi.

1.7. Effet de l'objet sur le poids de 1000 grains

Sur le graphique de gauche de la figure 40, on constate peu de variations entre les poids secs de 1000 grains de chaque objet dans l'essai 1A. Les poids de 1000 grains varient de 1055,80 ± 38,353 g pour l'objet avec de la Fm à une densité de 5 kg/ha à 1150,75 ± 38,353 g pour l'objet avec du Tm à une densité de 4 kg/ha. Le poids de 1000 grains n'est pas affecté par l'espèce/variété ni par la densité.

Sur le graphique de droite de la figure 40, on constate peu de variations entre les poids secs de 1000 grains de chaque objet dans l'essai 1B. Le poids sec moyen de 1000 grains varie de 1013,46 ± 45,129 g pour l'objet avec du Tw à une densité de 3 kg/ha à 1173,09 ± 45,129 g pour l'objet avec de la Fb à 8 kg/ha. Le poids sec moyen de 1000 grains n'est pas influencé par l'espèce/variété ni par la densité.



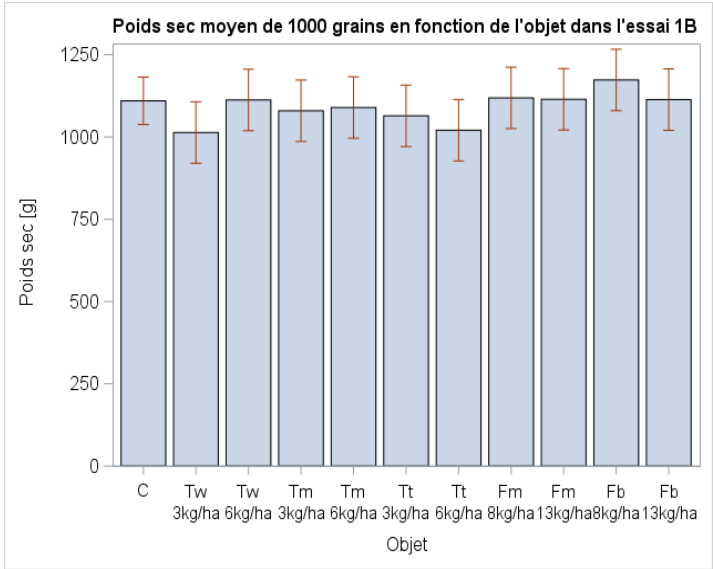


Figure 40 : Poids sec moyen de 1000 grains pour chaque objet et leur écart-type dans les essais 1A et 1B

1.8. Résumé des résultats pour l'effet de l'objet sur les caractéristiques du maïs

La hauteur du maïs n'est pas influencée par l'objet dans l'essai 1A mais l'est dans l'essai 1B où le maïs des objets avec du trèfle et de la Fm a une taille significativement inférieure à celle du témoin. L'ASI n'est globalement pas affecté par les objets dans les deux essais. Ensuite, la VEM et la teneur en amidon ne sont pas affectées par l'objet dans l'essai 1B mais le sont dans l'essai 1A. Pour finir, le nombre de rangs par épi et le poids de 1000 grains ne sont pas affectés par l'objet pour les deux essais.

2. Effet de l'objet sur la couverture du sol

2.1. Effet de l'objet sur l'évolution de la couverture du sol au cours du temps

2.1.1. Essai 1A

L'évolution de la couverture du sol est plus ou moins constante pour tous les objets jusqu'au 27 juillet 2018 (Figure 41). On constate ensuite une légère diminution jusqu'au 10 août, sûrement causée par la sécheresse, qui sera rapidement compensée par une hausse notable commune à chacun des objets jusqu'au 7 septembre 2018. Ensuite, on remarque une chute drastique de la couverture entre cette date et le 21 septembre 2018, ce qui correspond en réalité à la perturbation du sol par le passage de l'ensileuse. La reprise se fait immédiatement jusqu'à la fin des mesures au 15 novembre 2018. On remarque qu'à cette date, le Tm et le Tt se démarquent clairement des autres espèces/variétés en termes de couverture de sol.

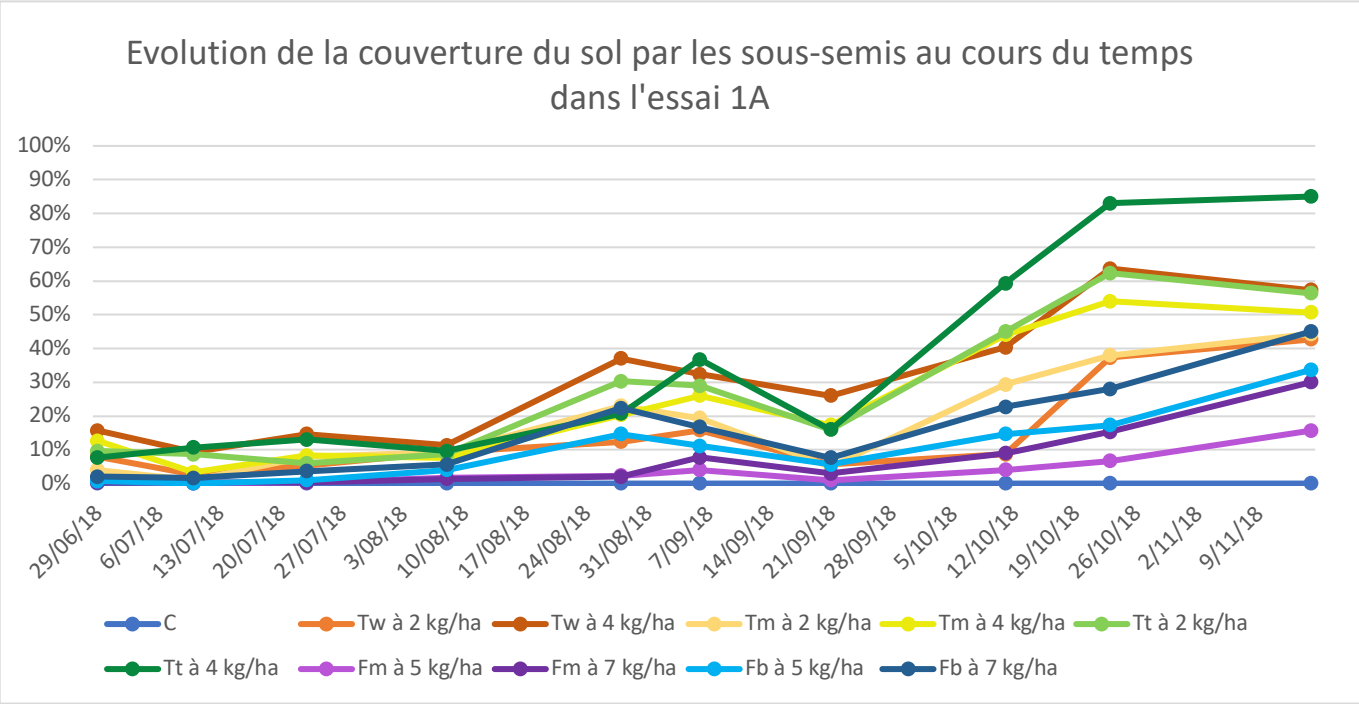


Figure 41 : Evolution de la couverture du sol par les sous-semis du 26 juin 2018 au 15 novembre 2018 pour l'essai 1A

2.1.2. Essai 1B

L'allure du graphique de la figure 42 est semblable à l'allure de celui de la figure 41. En revanche les trèfles se démarquent plus nettement et plus tôt, à savoir à partir du 28 août 2018.

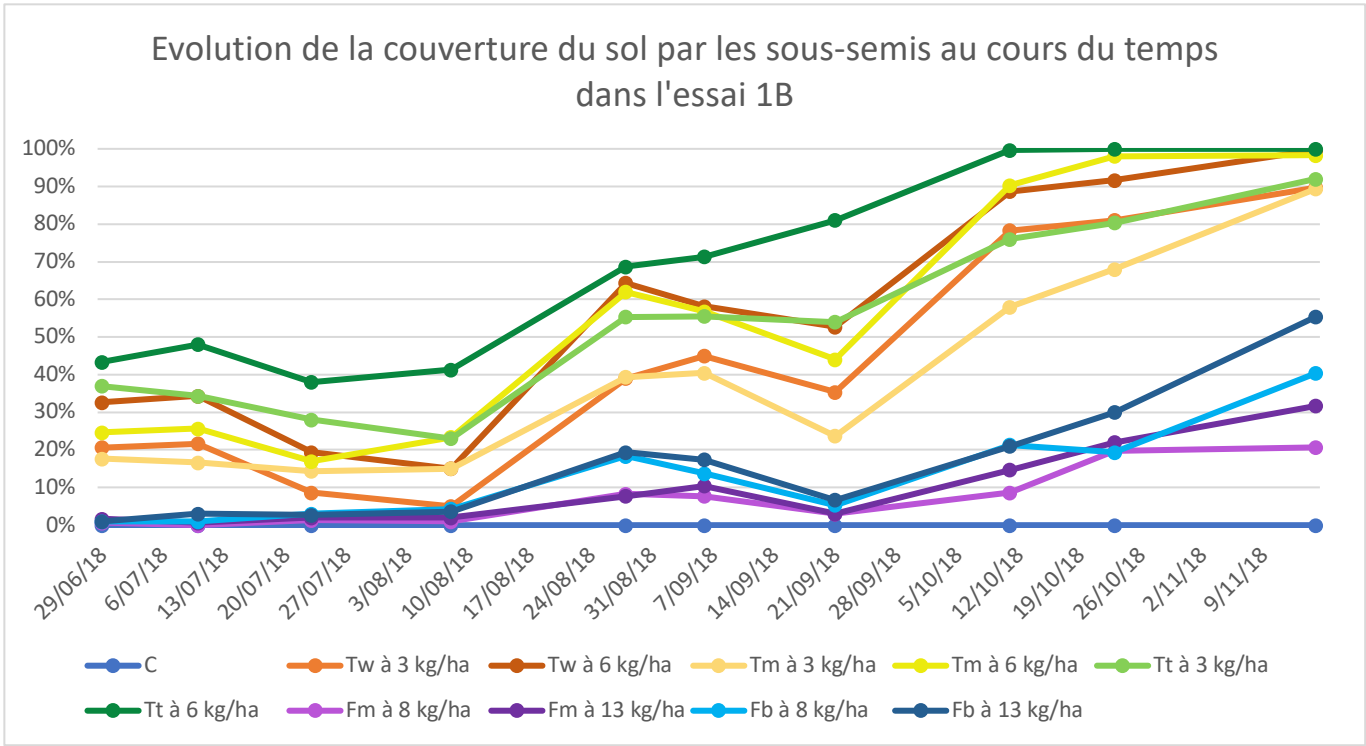


Figure 42 : Evolution de la couverture du sol par les sous-semis du 26 juin 2018 au 15 novembre 2018 pour l'essai 1B

2.1.3. Essai 2

Avant la récolte, l'évolution du trèfle entre le 29 juin 2018 et le 28 août 2018 suit une loi polynomiale, semblable à une parabole (Figure 43). En revanche, pour cette même période, la fétuque a commencé à couvrir le sol seulement à partir du 23 juillet 2018 pour ensuite avoir une évolution quasi linéaire.

Après la récolte, on remarque que l'évolution du trèfle est linéaire entre le 21 septembre et le 12 octobre où la couverture du sol est maximale. L'évolution de la couverture du sol par la fétuque est, quant à elle, relativement linéaire jusqu'au 15 octobre 2018, et n'atteint jamais les 40%.

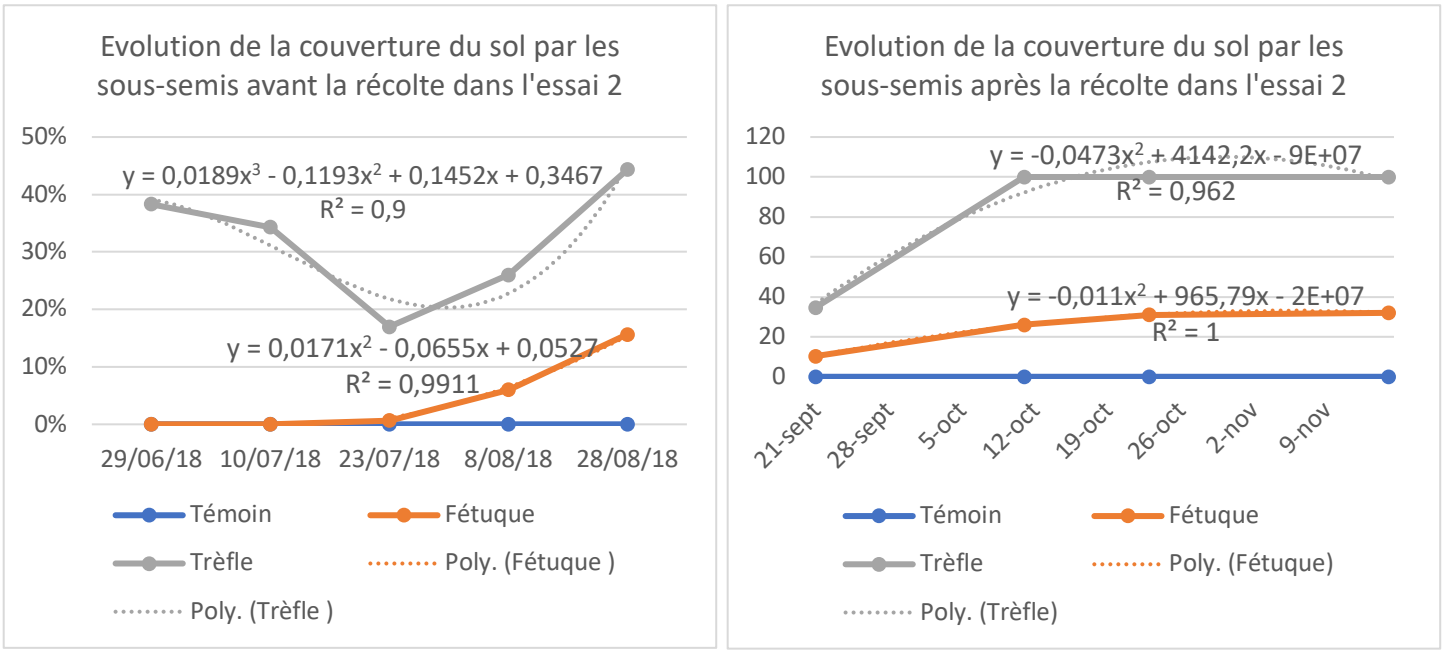


Figure 43 : Evolution de la couverture du sol par les sous-semis du 26 juin 2018 au 28 août 2018, soit après la récolte du maïs, et du 21 septembre 2018 au 15 novembre 2018, soit après la récolte pour l'essai 2

2.2. Effet de l'objet sur la vitesse de couverture du sol par les sous-semis

2.2.1. Essai 1A

Avant la récolte, la vitesse moyenne de couverture du sol par les sous-semis varie entre 0 ± 0,05 %/j pour le témoin et 0,27 ± 0,06 %/j pour la Fb à une densité de 7 kg/ha (Figure 44, à gauche). Cette vitesse de couverture du sol est impactée par l'espèce/variété (p = 0,0055) mais ce n'est pas le cas pour la densité. Le test de Tukey a été réalisé en comparant les espèces/variétés avec leurs densités respectives confondues. Il montre que la vitesse de couverture du sol pour les objets avec Tw, Tm, Tt et Fb est significativement supérieure à celle du témoin (p = 0,0406 ; 0,0232 ; 0,0027 et 0,0017 respectivement). Comme celle du témoin est nulle, cela veut dire que ces vitesses sont significativement non-nulles. Ensuite, les objets

avec du Tt et de la Fb ont une vitesse de couverture significativement supérieure à celle de la Fb (p = 0,0063 et 0,0041).

Après la récolte, la vitesse moyenne de couverture du sol par les sous-semis varie de 0,25 ± 0,18 %/j pour la Fm à une densité de 5 kg/ha à 1,41 ± 0,18 %/j pour le Tt à une densité de 4 kg/ha (Figure 44, à droite). La vitesse est influencée par l'espèce/variété (p < 0,0001) mais pas par la densité. Le test de Tukey a été réalisé en comparant les espèces/variétés avec leurs densités respectives confondues. Il révèle que tous les objets, soit Tw, Tm, Tt, Fm et Fb ont une vitesse significativement supérieure à celle du témoin (p < 0,0001 ; 0,0006 ; < 0,0001 ; 0,0489 et 0,0051 respectivement). Cela revient à dire que les vitesses de couverture sont non-nulles puisque la vitesse du témoin vaut 0 %/j. Ensuite, le Tt a une vitesse de couverture significativement supérieure à celle de la Fm et de la Fb (p = 0,0003 et 0,0031 respectivement). Le Tw a une vitesse de couverture significativement supérieure à celle de la Fm (p = 0,0119). Enfin, le Tt a une vitesse de couverture significativement supérieure à celle du Tm (p = 0,0225). Globalement, seul le Tt a une vitesse supérieure à celle des deux fétuques parmi les trèfles.

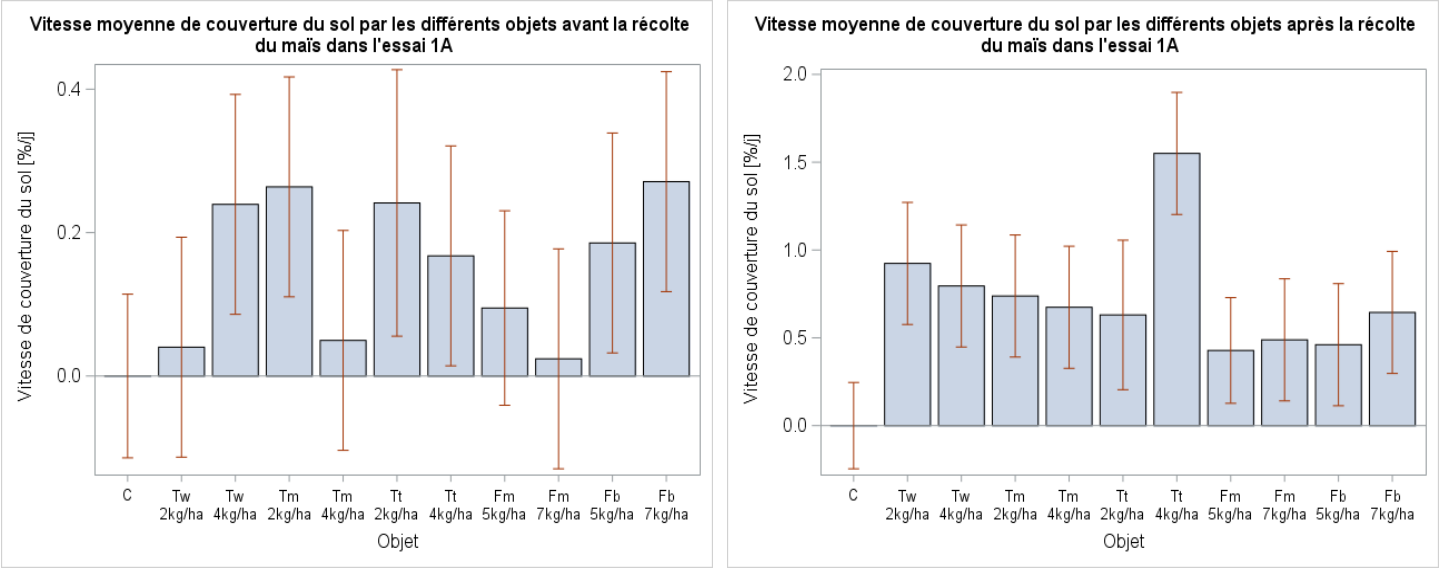


Figure 44 : Vitesse moyenne de couverture du sol par les sous-semis et son écart-type entre 29 juin 2018 et le 28 août 2018, soit avant la récolte, et le 21 septembre 2018 et le 15 novembre 2018, soit après la récolte dans l'essai 1A

2.2.2. Essai 1B

Avant la récolte, la vitesse moyenne de couverture du sol moyenne par les sous-semis varie de 0,07567 ± 0,2016 %/j pour l'objet avec de la Fm à une densité de 13 kg/ha à 0,4365 ± 0,2016 %/j pour l'objet avec du Tm à une densité de 6 kg/ha (Fgiure 45, à gauche). La vitesse n'est ni influencée par l'espèce/variété ni par la densité.

Après la récolte, la vitesse moyenne de couverture du sol moyenne par les sous-semis varie de 0,3204 ± 0,1653 %/j pour l'objet avec du Tt à une densité de 6 kg/ha à 1,1592 ± 0,1653

%/j pour l'objet avec du Tm à une densité de 3 kg/ha (Figure 45, à droite). La vitesse moyenne est impactée par l'espèce/variété ($p < 0,0001$) mais pas par la densité. Le test de Tukey a été réalisé en comparant les espèces/variétés avec leurs densités respectives confondues. Il révèle que la vitesse moyenne de couverture du sol pour tous les objets, soit Tw, Tm, Tt, Fm, Fb, est significativement supérieure à celle du témoin à des p-valeurs $< 0,0001$; $< 0,0001$; 0,0063 ; 0,0075 ; 0,0003 respectivement. Leur vitesse est donc significativement non-nulle puisque celle du témoin vaut 0 %/j. Ensuite, les objets avec du Tt et de la Fm ont une vitesse de couverture significativement inférieure à celle du Tw ($p = 0,0325$ et 0,0278 respectivement) et à celle du Tm ($p = 0,0015$ et 0,0012 respectivement). Enfin, le Tm a une vitesse de couverture significativement supérieure à celle de la Fb ($p = 0,0252$). On peut donc voir que les meilleures vitesses de couverture sont celles du Tm et du Tw.

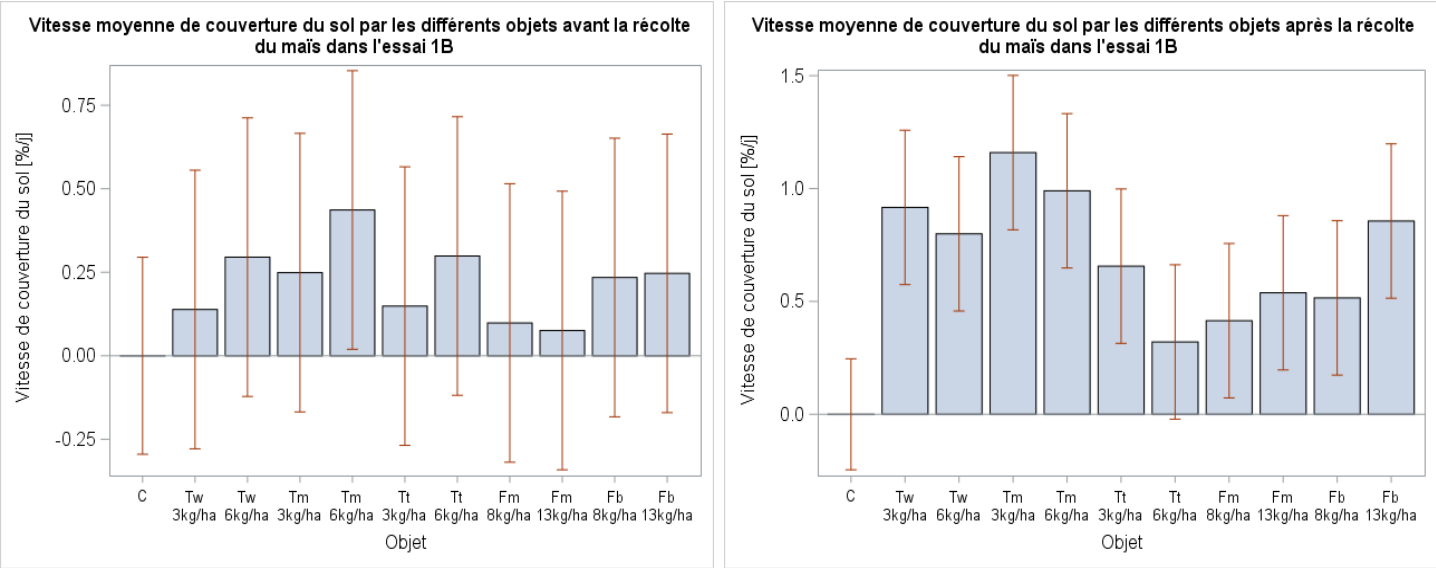


Figure 45 : Vitesse moyenne de couverture du sol par les sous-semis et son écart-type entre le 29 juin 2018 et le 28 août 2018, soit avant la récolte, et entre le 21 septembre 2018 et le 15 novembre 2018, soit après la récolte en fonction des traitements dans l'essai 1B

2.3. Effet de l'objet sur la couverture du sol au moment de la récolte

2.3.1. Essai 1A

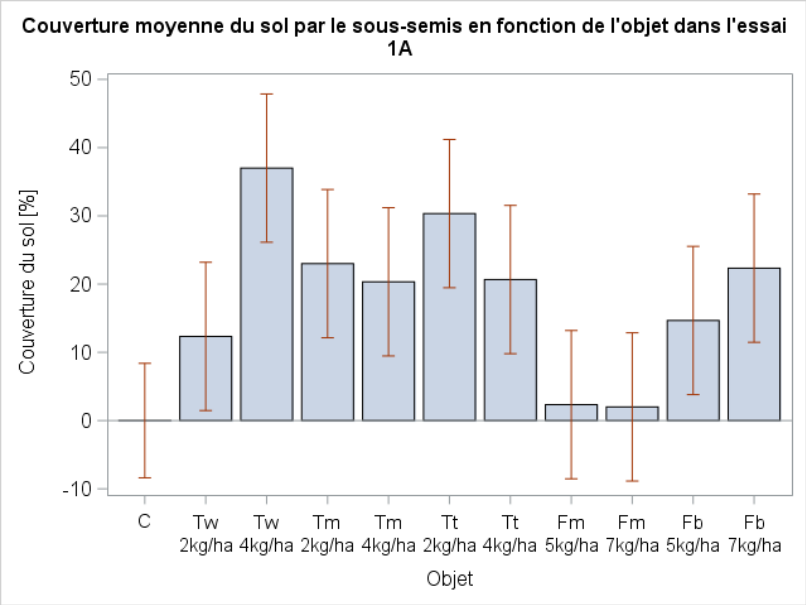


Figure 46 : Moyennes de couverture de sol en pourcent en fonction de l'objet et chaque écart-type pour l'essai 1A

La couverture moyenne du sol varie de 0 ± 4,05 % pour le témoin à 37 ± 5,25 % pour le Tw à une densité de 4 kg/ha (Figure 46). L'ANOVA II montre que l'espèce/variété et la densité sont deux facteurs explicatifs de la couverture du sol à des p-valeurs $p < 0.0001$ et $p = 0.0181$ respectivement. Le test de Tukey révèle que la Fb a une couverture du sol significativement supérieure à celle de la Fm et du témoin. La couverture du sol moyenne par les trèfles est significativement supérieure à celle de la Fm et celle du témoin. Les trèfles sont donc plus couvrants que les fétuques. Ensuite plus précisément, pour les espèces/variétés et la densité, les différences significatives sont répertoriées dans le tableau 4.

Tableau 4 : Résultat du test de Tukey comparant les espèces/variétés et leur densité avec une autre espèce/variété et sa densité. Les couples testés repris dans le tableau ont tous une p-valeur significative. La comparaison nous permet de savoir si la couverture du premier objet et supérieure (+) ou inférieure (-) à celle du deuxième. Le tableau se lit de la manière suivante : « le Tw à une densité de 2 kg/ha a une couverture du sol significativement inférieure à celle du Tt à une densité de 2 kg/ha »

Espèce/variété	Densité (kg/ha)	Espèce/variété	Densité (kg/ha)	Pr > |t|	Comparaison
Tw	**2**	**Tt**	**2**	0.0129	-
Tw	**2**	**C**	**0**	0.0438	+
Tw	**4**	**Tm**	**2**	0.0472	+
Tw	**4**	**Tm**	**4**	0.0202	+
Tw	**4**	**Tt**	**4**	0.0225	+
Tw	**4**	**Fm**	**5**	<.0001	+
Tw	**4**	**Fm**	**7**	<.0001	+
Tw	**4**	**Fb**	**5**	0.0028	+
Tw	**4**	**Fb**	**7**	0.0384	+
Tw	**4**	**C**	**0**	<.0001	+
Tm	**2**	**Fm**	**5**	0.0051	+
Tm	**2**	**Fm**	**7**	0.0045	+
Tm	**2**	**C**	**0**	0.0006	+
Tm	**4**	**Fm**	**5**	0.0129	+
Tm	**4**	**Fm**	**7**	0.0115	+
Tm	**4**	**C**	**0**	0.0019	+
Tt	**2**	**Fm**	**5**	0.0003	+
Tt	**2**	**Fm**	**7**	0.0003	+
Tt	**2**	**Fb**	**5**	0.0279	+
Tt	**2**	**C**	**0**	<.0001	+
Tt	**4**	**Fm**	**5**	0.0115	+
Tt	**4**	**Fm**	**7**	0.0103	+
Tt	**4**	**C**	**0**	0.0016	+
Fm	**5**	**Fb**	**7**	0.0065	-
Fm	**7**	**Fb**	**7**	0.0057	-
Fb	**5**	**C**	**0**	0.0184	+
Fb	**7**	**C**	**0**	0.0008	+

2.3.2. Essai 1B

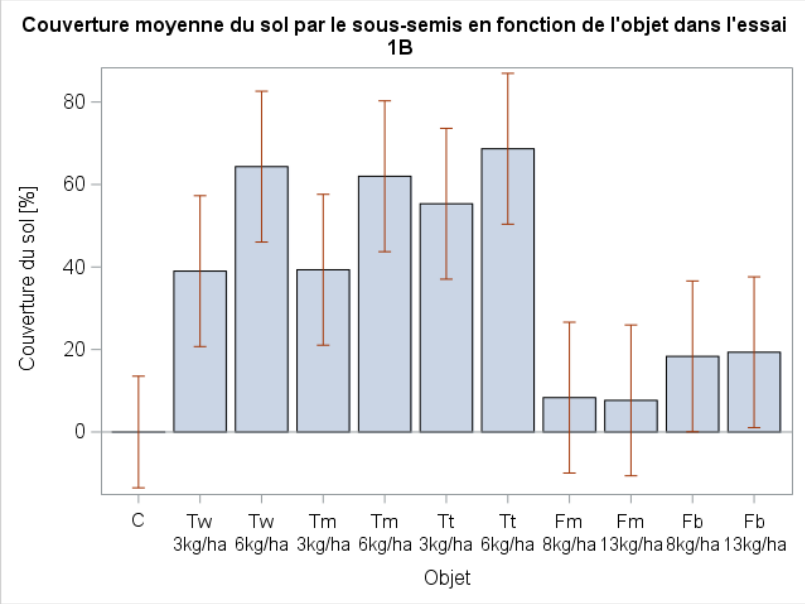


Figure 47 : Moyennes de couverture de sol en pourcent en fonction de l'objet et chaque écart-type pour l'essai 1B

La moyenne de la couverture du sol varie entre 0 ± 6,54 % pour le témoin et 68,66 ± 8,84 % pour le Tt à 6 kg/ha (Figure 47). L'ANOVA II montre que l'espèce/variété est un facteur explicatif significatif ($p < 0.0001$) de la couverture de sol mais pas la densité. Un test de Tukey comparant les espèces/variétés avec leurs densités confondues pour chacune, montre que le Tw a une couverture du sol significativement supérieure à celle de la Fm, de la Fb et du témoin (p valeurs < 0,0001 ; 0,0007 et < 0,0001 respectivement), ce qui est aussi le cas pour le Tm (p-valeurs < 0,0001 ; 0,0010 et < 0,0001 respectivement) et aussi pour le Tt (p-valeurs < 0,0001 pour les trois). Le test montre aussi que la Fb a une couverture significativement supérieure à celle du témoin. Soit les trèfles ont tous significativement une de couverture du sol supérieure à celle des fétuques et du témoin, mais aucune différence significative entre eux n'est à relever.

3. Effet de l'objet sur l'environnement dans l'essai 1B

3.1. Effet de l'objet sur le taux d'humus du sol après l'hiver

Le contenu en humus varie de 1,5333 ± 0,0578 % pour le témoin à 1,8000 ± 0,0578 % pour les objets avec du Tw et de la Fb. L'ANOVA I montre que l'espèce a un impact significatif sur le taux d'humus ($p = 0,0285$). Le test de Tukey révèle que le taux d'humus dans les objets avec du Tt, de la Fm et le témoin est significativement inférieur à celui retrouvé dans les objets avec du Tw ($p = 0,0170$; 0,0343 et 0,085) et à celui retrouvé dans les objets avec de la Fb ($p = 0,0170$; 0,0343 et 0,0085). Le tableau 5 reprend les valeurs du taux d'humus moyen dans les premiers 30 centimètres du sol. On peut voir que toutes ces valeurs sont inférieures à 2%.

Tableau 5 : Tableau reprenant les taux d'humus dans les 30 premiers centimètres du sol après l'hiver dans l'essai 1B

Espèce/variété	Densité (kg/ha)	Moyenne du taux d'humus (%)
Trèfle blanc nain winterwhite (Tw)	2	1,80
Trèfle blanc intermédiaire Merlin ©	2	1,67
Trèfle blanc Tivoli (Tt)	2	1,57
Fétuque rouge Musica (Fm)	8	1,60
Fétuque rouge traçante Barustic (Fb)	8	1,80
Témoin ©	/	1,53

3.2. Effet de l'objet sur le pH du sol après l'hiver

Les analyses du pH dans les 30 premiers centimètres du sol et montrent que le pH varie en 5,77 ± 0,230 pour le Tt et 6,03 ± 0,230 pour la Fb (Tableau 6). Les valeurs sont toutes inférieures à 6,5, le sol est donc acide pour tous les objets. L'ANOVA I montre que l'espèce/variété n'a aucun effet significatif sur le pH.

Tableau 6 : Tableau reprenant les valeurs de pH moyennes pour les 30 premiers centimètres de sol dans l'essai 1B

Espèce/variété	Densité (kg/ha)	Moyenne du pH
Trèfle blanc nain winterwhite (Tw)	2	5,8
Trèfle blanc intermédiaire Merlin ©	2	6,00
Trèfle blanc Tivoli (Tt)	2	5,77
Fétuque rouge Musica (Fm)	8	5,87
Fétuque rouge traçante Barustic (Fb)	8	6,03
Témoin ©	/	5,97

3.3. Effet de l'objet sur la quantité d'azote nitrique du sol dans les différents horizons

Dans l'horizon 1, la différence de quantité d'azote nitrique après et avant l'hiver varie de -32,6667 ± 8,2910 kg/ha pour le témoin (diminution au cours de l'hiver) à 11,3333 ± 8,2910 kg/ha pour le Tt (augmentation au cours de l'hiver) (Figure 48). L'effet de l'espèce/variété sur la teneur en azote du sol dans l'horizon 0-30 cm est significatif (p = 0,0195). Le test de Tukey révèle que les pertes d'azote dans le profil de l'objet témoin sont supérieures à celles des objets Tw (p = 0,0124), Tm (p = 0,0352) et Tt (p = 0,0025). Il montre aussi que dans l'objet Tt, la différence en azote est significativement moins élevée par rapport à la différence en azote

du profil retrouvée dans les objets avec de la Fm (p = 0,0145) et de la Fb (p = 0,0101). On retrouve dans l'horizon de l'objet avec du Tt une différence positive, c'est-à-dire que la quantité d'azote a augmenté entre après et avant l'hiver. De manière générale les différences d'azote sont négatives pour les fétuques et le témoin.

Dans l'horizon 2 (de 30 à 60 cm de profondeur), la différence de quantité d'azote nitrique après et avant l'hiver dans l'horizon de 30 à 60 cm n'est pas significativement impactée par l'espèce/variété. La différence varie de -4,6667 ± 8,5678 kg/ha pour l'objet avec de la Fb à 23,0000 ± 8,5678 kg/ha pour le témoin (Figure 48).

Dans l'horizon 3 (de 60 à 90 cm de profondeur) la différence de quantité d'azote nitrique après et avant l'hiver dans l'horizon de 60 à 90 cm varie de 2,0000 ± 9,0226 kg/ha pour l'objet avec de la Fb à 37,3333 ± 9,0226 kg/ha pour le témoin (Figure 48). Le test de Tukey montre que la différence de contenu en azote entre le témoin est significativement plus grande que celle des autres objets (p = 0,0207 pour les tests avec le Tw, Tm, Tt et Fm, p = 0,0198 pour le test avec la Fb) mais les différences de moyenne entre les autres objets ne sont pas significatives. On remarque que la quantité d'azote a sérieusement augmenté dans cet horizon pour le témoin.

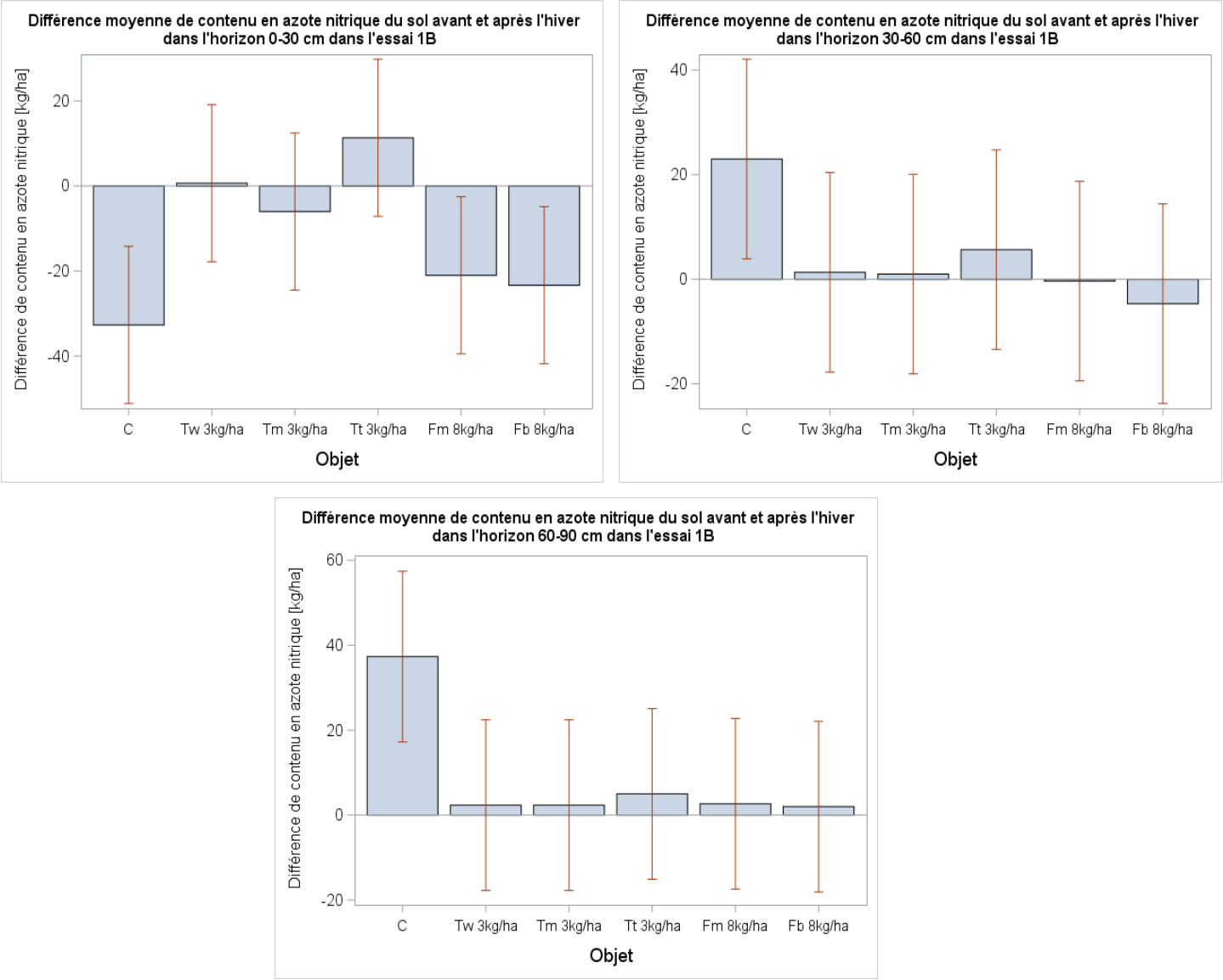


Figure 48 : Différence moyenne de contenu en azote nitrique du sol entre la mesure effectuée après l'hiver et celle avant l'hiver en fonction des différents objets et leur écart-type dans les horizons de 0 à 30 cm de profondeur, de 30 à 60 cm de profondeur et enfin de 60 à 90 cm de profondeur dans l'essai 1B

Afin de s'assurer que l'azote n'ait pas traversé le profil est ne s'est pas retrouvé plus bas, la somme des quantités d'azote nitrique pour chacun des objets a été réalisée. Ensuite la différence de quantité d'azote pour chacun des objets de l'essai 1B après et avant l'hiver montre les pertes nettes d'azote. Les résultats sont fournis dans le tableau 7. On voit que les pertes d'azote dans le profil de sol vers des profondeurs supérieures à 90 cm sont élevées pour les fétuques. En revanche, les profils de sol des parcelles avec des sous-semis de trèfles blanc nain et Tivoli voient leur quantité d'azote augmenter durant l'hiver. La perte d'azote dans le profil de sol du trèfle blanc intermédiaire est minime comparée à celles des fétuques. Le témoin, quant à lui, a une teneur qui a augmenté considérablement, et bien plus que pour les autres parcelles.

Tableau 7 : Différence de contenu en azote dans le profil de sol de 0 à 90 cm de prodondeur après et avant l'hiver dans l'essai 1B

Espèce/variété	Densité (kg/ha)	Moyenne de la différence en N sur tout le profil (kg/ha)
Trèfle blanc nain winterwhite (Tw)	2	4
Trèfle blanc intermédiaire Merlin (Tm)	2	-2,67
Trèfle blanc Tivoli (Tt)	2	22
Fétuque rouge Musica (Fm)	8	-18,67
Fétuque rouge traçante Barustic (Fb)	8	-26
Témoin (C)	/	27,67

4. Effet de la méthode de semis

- Sur le rendement en MS

La méthode de semis n'a pas d'effet significatif sur le rendement en MS. Le rendement en MS pour le témoin de l'essai 1A est de 17,0861 ± 0,4584 T MS/ha et celui pour le témoin de l'essai 1B est de 16,9608 ± 0,4584 T MS/ha.

- Sur la hauteur du maïs

La méthode de semis a un effet significatif sur la hauteur du maïs ($p = 0,0028$). La hauteur moyenne des témoins de l'essai 1A est de 252,92 ± 3,2725 cm et celle des témoins de l'essai 1B est de 267,50 ± 3,2725 cm. Donc la hauteur moyenne des témoins de l'essai 1B est significativement plus élevée que la hauteur moyenne de ceux de l'essai 1A.

- Sur l'ASI

La méthode de semis n'a pas d'effet significatif sur l'ASI. L'ASI moyen pour les témoins de l'essai 1A est de 3,8333 ± 0,7895 j et pour ceux de l'essai 1B il est de 3,5000 ± 0,7895 j.

- Sur la VEM du maïs

La méthode de semis a un effet significatif sur la VEM ($p = 0,0357$). La VEM moyenne des témoins de l'essai 1A est de 950,62 ± 8,4779 VEM/kg MS et celle des témoins de l'essai 1B est de 927,48 ± 8,4779 VEM/kg MS. Donc la VEM moyenne des témoins de l'essai 1A est significativement plus élevée que la VEM moyenne de ceux de l'essai 1B.

- Sur la teneur en amidon du maïs

La méthode de semis a un effet significatif sur la teneur en amidon du maïs ($p = 0,0121$). La teneur en amidon moyenne des témoins de l'essai 1A est de 36,2245 ± 1,2217 % et celle des témoins de l'essai 1B est de 32,5077 ± 1,2217 %. Donc la teneur en amidon

moyenne des témoins de l'essai 1A est significativement plus élevée que la teneur moyenne de ceux de l'essai 1B.

- Sur le nombre de rangs par épi

La méthode de semis n'a pas d'effet significatif sur le nombre de rang par épi. Le nombre de rang par épi moyen pour les témoins de l'essai 1A est de 15,6000 +- 0,2715 et pour ceux de l'essai 1B, il est de 15,4000 $\pm$ 0,2715.

- Sur le poids de 1000 grains

La méthode de semis n'a pas d'effet sur le poids de 1000 grains. Le poids de 1000 grains moyen pour les témoins de l'essai 1A est de 1093,44 $\pm$ 29,3585 g et pour les témoins de l'essai 1B, il est de 1109,65 $\pm$ 29,3585 g.

- Sur la croissance jounalière en hauteur du maïs

La méthode de semis a un effet significatif sur la croissance en hauteur du maïs. Les témoins dans l'essai 1A ont une vitesse de croissance moyenne inférieure à celle des témoins de l'essai 1B ($p < 0,0001$). La vitesse moyenne pour l'essai 1A est de 1,5306 ± 0,2949 cm/j et pour l'essai 1B elle est de 2,5214 ± 0,2949 cm/j.

5. Effet de l'objet sur le ruissellement et l'érosion dans l'essai 2

5.1. Effet de l'objet sur le coefficient de ruissellement

On remarque tout d'abord dans le tableau 8 que la couverture du sol par le trèfle est relativement supérieure à celle de la fétuque. De la même manière, ce tableau montre que le coefficient de ruissellement diminue lorsque la couverture du sol augmente, soit quand on passe d'une couverture nulle (pour le témoin) à une couverture plus importante (pour les objets de fétuque et de trèfle, dans l'ordre croissant). En revanche, on remarque que la fétuque n'est pas toujours efficace et que parfois le coefficient de ruissellement des parcelles avec un sous-semis de fétuque est plus élevé que celui d'un sol nu.

Tableau 8 : Dates des relevés de l'eau dans les bacs en bas de pente mises en parallèle avec les couvertures de sol par le trèfle et la fétuque ainsi que les coefficients de ruissellement

Dates des relevés	Coefficient de ruissellement sur le témoin (* 10^3)	Coefficient de ruissellement moyen sur l'objet Fm (* 10^3)	Coefficient de ruissellement moyen sur l'objet Tt (* 10^3)	Couverture du sol moyenne du sol nu (%)	Couverture moyenne du sol par la Fm (%)	Couverture moyenne du sol par le Tt (%)
5-juil	8,875	8,875	4,242	0	0	30,455151
13-août	4,808	3,204	1,069	0	9,20645352	33,3241563
24-sept	1,248	1,300	0,364	0	15,6306917	57,5081141
31-oct	2,056	1,964	0,548	0	29,9674387	98,2603855
14-nov	0,393	0,262	0,109	0	35,3921538	100
30-nov	4,628	6,172	2,317	/	/	/
7-déc	23,469	18,679	0,383	/	/	/
4-janv	13,888	17,156	6,944	/	/	/
17-janv	12,627	12,627	2,527	/	/	/
13-févr	32,895	14,619	8,772	/	/	/
8-mars	25,361	0,483	5,435	/	/	/
11-mars	2,558	1,826	1,463	/	/	/

5.2. Effet de l'objet sur l'érosion

Dans le tableau 9, on peut voir que l'érosion moyenne diminue fortement entre la couverture du sol nulle et la couverture du sol par le trèfle. En revanche pour ce qui est de la fétuque, cela dépend des évènements pluvieux, et dans certains cas l'érosion peut même être supérieure à celle de la parcelle témoin. Cela est en parallèle avec une différence de couverture du sol marquée entre celle de la fétuque et celle du trèfle. L'érosion nulle du 14 novembre, 30 novembre, 4 janvier, 17 janvier et 11 mars peuvent s'expliquer par des précipitations plus faibles que pour les autres évènements pluvieux ou encore une énergie cinétique des gouttes plus faible.

Tableau 9 : Dates des relevés de l'eau dans les bacs en bas de pente mises en parallèle avec les couvertures de sol par le trèfle et la fétuque ainsi que l'érosion moyenne (la perte en sol moyenne en kg/ha)

Dates des relevés	Érosion sur le sol nu (kg/ha)	Érosion moyenne sur l'objet Fm (kg/ha)	Érosion moyenne sur l'objet Tt (kg/ha)	Couverture du sol moyenne du sol nu (%)	Couverture moyenne du sol par la Fm (%)	Couverture moyenne du sol par le Tt (%)
5-juil	2	3	1	0	0	30,455151
13-août	7	5	1	0	9,20645352	33,3241563
24-sept	27	23	4	0	15,6306917	57,5081141
31-oct	6	12	0	0	29,9674387	98,2603855
14-nov	0	0	0	0	35,3921538	100
30-nov	0	0	0	/	/	/
7-déc	17	16	3	/	/	/
4-janv	0	0	0	/	/	/
17-janv	0	0	0	/	/	/
13-févr	225	67	25	/	/	/
8-mars	12	0	0	/	/	/
11-mars	0	0	0	/	/	/

Quatrième partie : Discussion

1. Effet de l'objet sur les caractéristiques du maïs

1.1. Effet de l'objet sur le rendement

Comme nous avons pu le constater dans la partie résultats, l'espèce/variété et la densité de semis n'ont aucun impact sur le rendement moyen en MS dans l'essai 1A. En revanche, dans l'essai 1B, l'espèce/variété avait un impact sur le rendement en MS. Les rendements en MS des parcelles avec une culture de couverture de Tw et de Tm sont significativement inférieurs à ceux obtenus dans les parcelles avec des sous-semis de fétuque et le témoin. La comparaison entre les témoins de chaque essai montre que la méthode de semis n'avait aucun impact sur le rendement en MS. Ainsi, on peut attribuer la différence de rendement observée dans l'essai 1B et pas dans l'essai 1A par le fait que les densités de semis des trèfles sont plus élevées dans l'essai 1B. Cette hypothèse est plausible d'après une méta-analyse de Yu et al (2016) citée par Voegeler et al (2019) qui dit que la densité de semis affecte la compétition entre espèces semées en même temps dans une même parcelle. Cela pourrait être causé par une compétition hydrique entre les trèfles plus abondants (cela est visible dans l'analyse de couverture du sol par le Tw et le Tm dans les essais 1A et 1B) et le maïs durant la sécheresse du 4 mai au 22 juillet 2018. Le trèfle est normalement résistant à la sécheresse, mais il stagne dans sa croissance. Durant cette période, la croissance des trèfles blancs était quasi nulle, ce qui prouve que la sécheresse a bien eu un impact sur le trèfle et qu'une compétition pour l'eau a été possible. Une compétition hydrique de ce type a été aussi remarqué dans l'étude réalisée par Laloy et Bielders en 2010 où des sous-semis de ray-grass d'Italie ont engendré une perte de rendement de 24% à cause d'une plus grande absorption de celui-ci comparé à une culture de couverture de seigle et d'une sécheresse lors du semis du maïs. Une étude montre que le stress hydrique peut conduire à une diminution du rendement par rapport à des années où les précipitations sont suffisantes (Gabriel et Quemada, 2011). Dans une autre étude réalisée aux Pays-Bas dans un sol loessique, où le maïs était semé avec du trèfle, aucune perte de rendement n'a été décelée (RPC, 1995). Ainsi les pertes de rendements dues au sous-semis de trèfle sont sûrement liées en grande partie à la compétition hydrique de cette année en Belgique avec des conditions de sécheresse inhabituelles et à leur densité plus élevée dans l'essai 1B.

1.2. Effet de l'objet sur le poids de 1000 grains et le nombre de rangs par épi

Le poids de 1000 grains et le nombre de rangs par épi ne sont pas influencés par les différents objets dans les essais 1A et 1B. Cela montre qu'il n'y a pas eu de différences de disponibilité en ressources lors de la floraison et du remplissage des grains. Ainsi, les cultures de couverture n'ont pas créé de manque en nutriments ou en eau suffisamment grands pour que cela impacte le poids de 1000 grains et le nombre de rangs par épi. Cependant, selon une méta-analyse réalisée par Valkama et al, des cultures de couverture de non-légumineuses peuvent réduire en moyenne le rendement en grains de 3% d'une céréale de printemps alors que des légumineuses ou des mélanges de légumineuses et non-légumineuses peuvent

améliorer le rendement en grains de 6%. Les densités de semis des cultures de couverture ne changent pas l'effet de celles-ci sur le rendement en grains.

Le fait que le trèfle n'ait pas influencé le rendement en grains peut s'expliquer par sa profondeur racinaire restreinte, tandis que le maïs va puiser ses ressources bien plus profondément dans le sol. L'eau était donc puisée dans des horizons différents, la disponibilité de celle-ci pour le maïs n'était donc pas diminuée par la présence du trèfle. Pourtant, le manque de précipitations durant l'été 2018 était bien présent. Cependant, nous n'avons pas la valeur de la réserve en eau utile du sol au moment du semis du maïs, peut être que celle-ci était suffisante pour atténuer la sécheresse du mois de juillet. Le trèfle dépose de l'azote en abondance à la surface et non à proximité du système racinaire du maïs, ce qui explique pourquoi le rendement en grains n'a pas augmenté. En effet, la minéralisation entre mai et septembre est faible, donc la libération de nitrates dans le sol est restreinte.

Pour ce qui est des sous-semis de fétuque, même si leur système racinaire est profond, la couverture faible du sol de manière générale de ces cultures montre une faible densité de plantes qui ont émergées et ainsi les ressources nécessaires à la croissance du sous-semis étaient faibles, que ce soit pour l'azote ou pour l'eau. C'est ce qui expliquerait que cette espèce n'a pas diminué le rendement en grains.

1.3. Effet de l'objet sur qualité fourragère du maïs

La VEM et la teneur en amidon du maïs sont influencées par l'espèce/variété en sous-semis dans l'essai 1A, ce qui n'est pas le cas pour l'essai 1B. Le fait qu'ils soient tous les deux impactés ou non, est dû au fait que la VEM est une unité d'énergie, et l'amidon est de loin la principale source d'énergie du grain et de l'ensilage de maïs. Ensuite, pour les espèces/variétés qui influencent le résultat dans l'essai 1A, on retrouve que le maïs des parcelles avec du Tm a une VEM significativement supérieure à celle du maïs avec de la Fb et le maïs témoin. Parallèlement, la VEM du maïs avec du Tw est significativement supérieure à celle obtenue avec un sous-semis de Tm. Pour finir, la VEM moyenne du témoin est supérieure à la VEM du maïs ensilage semé avec du Tt. Cependant, malgré cette différence significative de VEM, la VEM dans l'essai 1A varie seulement entre 924,95 et 952,00 VEM/kg de MS, ce qui selon Lambert et al (2014), est une bonne teneur pour le maïs ensilage. La différence de VEM entre les objets n'est donc pas très importante pour la qualité du fourrage.

En ce qui concerne la teneur en amidon dans l'essai 1A, le maïs avec les objets de fétuque rouge traçante a une teneur significativement supérieure à celles des objets avec du trèfle blanc nain, du trèfle blanc Tivoli et de la fétuque rouge Musica. En conclusion, la fétuque rouge traçante Barustic offre un meilleur microenvironnement au maïs pour assurer de bonnes conditions de photosynthèse. Le fait que certains sous-semis de trèfles diminuent la teneur en amidon du maïs doit être dû à la compétition hydrique entre ceux-ci et le maïs, ce qui diminue l'évapotranspiration du maïs et donc la quantité de carbone stockée sous forme d'amidon. En effet, une étude montre qu'une culture de couverture de haricot n'influence pas

la teneur en amidon des grains du maïs ensilage pour une fertilisation plus faible et de bonnes conditions hydriques (Dawo et al, 2007).

Cependant, les teneurs en amidon de l'essai 1A dépassent les 30%, ce qui est considéré comme largement suffisant pour assurer un bon ensilage du maïs (Lambert et al, 2014). Le fourrage est donc considéré comme de bonne qualité.

Ensuite, la VEM moyenne et la teneur en amidon moyenne du maïs témoin de l'essai 1A sont supérieures à celles du maïs témoin de l'essai 1B. Cependant, on remarque que la quantité d'énergie moyenne du maïs dans l'essai 1B est aussi considérée comme étant une bonne teneur. Pour la teneur en amidon, dans les deux essais elle dépasse les 30%. Donc la méthode de semis et l'objet n'ont pas un impact important en termes de qualité fourragère même si l'effet est présent.

1.4. Effet de l'objet sur les hauteurs moyennes du maïs au 23 juillet 2018

La hauteur moyenne du maïs n'est pas influencée par l'espèce/variété ni par la densité des sous-semis dans l'essai 1A ce qui n'est pas le cas dans l'essai 1B où l'espèce/variété influence la hauteur. Toutes les hauteurs de maïs, avec une culture de couverture de trèfle blanc ou de fétuque rouge Musica, sont inférieures à celles du témoin et de la fétuque rouge traçante Barustic. Or, une étude réalisée par Dawo et al montre qu'une légumineuse (qui était du haricot dans ce cas-ci) augmente la taille des plants de maïs en augmentant la disponibilité en azote pour le maïs (Dawo et al. 2007). Ce type de résultat n'est peut-être pas obtenu dans nos essais car l'élément limitant pour le maïs n'était sans doute pas l'azote, mais l'eau.

La comparaison des témoins des deux essais montre que la méthode de semis a un effet sur la hauteur et qu'elle est en moyenne plus élevée dans l'essai 1B. Pour rappel, dans l'essai 1B le maïs était semé en simple rang et dans l'essai 1A il était en double rang. La différence de hauteur engendrée par la méthode de semis pourrait être causée par le fait que les maïs en double rang souffrent plus de l'ombrage des plantes avoisinantes, contrairement à celui semé en simple rang. En effet, les feuilles du maïs sont alternes, et le recouvrement partiel d'une partie des feuilles peut engendrer un retard de croissance.

Au cours du temps, on remarque que la croissance journalière en hauteur est plutôt linéaire dans l'essai 1A, elle semble l'être un peu moins dans l'essai 1B. Cependant, les croissances journalières dans les essais 1A et 1B montrent un effet du type d'objet. Dans l'essai 1A, on remarque que les maïs avec les sous-semis de trèfles et de fétuque rouge Musica ont une croissance journalière significativement supérieure à celle du témoin. Ainsi, la hauteur n'est pas affectée mais la croissance l'est. Cela pourrait vouloir dire que la fermeture des interlignes a eu lieu plus tôt dans ces objets que pour le témoin. On pourrait aussi envisager que les interactions entre les sous-semis et le maïs sont bénéfiques, en termes d'inoculum de mycorhizes ou via une meilleure infiltration de l'eau en cas de pluie, ce qui améliore l'apport hydrique du maïs et donc sa croissance.

Dans l'essai 1B, le test de Tukey révèle que la vitesse de croissance est supérieure chez le témoin par rapport à la vitesse de croissance dans les parcelles où les fétuques sont appliquées en couverture de sol, ce qui n'est pas le cas pour les sous-semis de trèfles. On pourrait allouer cela au fait que le trèfle prend moins d'azote minéral que le maïs et lui a donc permis de maintenir une bonne vitesse de croissance, alors que les fétuques ont peut-être puisé dans les ressources azotées nécessaires au maïs. Cela est assez étonnant puisque la couverture de celles-ci durant cette période de l'année était très faible.

La différence de croissance journalière entre les témoins des essais 1A et 1B montre que la méthode de semis a un impact et que globalement les témoins de l'essai 1A (lignes doubles) ont une croissance à celle de l'essai 1B (lignes simples). On remarque donc encore une fois l'effet du recouvrement foliaire dans l'essai 1A. Le manque de lumière engendre une baisse de régime de la photosynthèse d'où la croissance journalière plus faible.

1.5. Effet de l'objet sur l'ASI

L'effet de l'objet sur l'ASI est globalement nul dans les essais 1A et 1B, et il n'y pas d'effet de la méthode de semis sur entre les deux essais. On remarque uniquement dans l'essai 1A un ASI significativement plus faible pour l'objet 4, qui est la fétuque rouge Musica. Il s'agit d'une bonne nouvelle puisque l'ASI est un indicateur très fiable de stress hydrique, cela montre une compétition faible pour l'eau, si elle a eu lieu, entre le maïs et les cultures de couverture lors des floraisons

2. Effet de l'objet sur l'environnement

2.1. Effets de l'objet sur la quantité d'azote nitrique dans le sol dans les différents horizons

La différence de teneur en azote nitrique, dans le premier horizon (0-30 cm), est significativement impactée par l'espèce/variété. Les différences de quantité d'azote retrouvée dans cet horizon étaient faibles pour les trèfles blancs nain et Tivoli, et significativement moins importantes que pour les fétuques et le témoin. On retrouve dans l'horizon de l'objet avec le trèfle blanc Tivoli une différence positive, c'est-à-dire que la quantité d'azote après l'hiver est plus élevée qu'avant l'hiver. Cette différence est significativement différente de celle rencontrée pour le trèfle blanc intermédiaire. De manière générale les différences d'azote sont négatives pour les fétuques et le témoin. Cela est expliqué par le fait que le trèfle est une légumineuse, il a donc la capacité de fixer l'azote, ce qui réapprovisionne le sol en azote.

Dans le deuxième horizon, les différences entre objet ne sont pas significatives. En revanche le graphique montre que la quantité d'azote, à cette profondeur, a augmenté. Ceci est à mettre en lien avec la diminution de cette quantité en surface.

Dans le troisième horizon, l'augmentation de la quantité d'azote est cette fois significative comparée aux autres différences de teneurs en azote des différents objets. Ce

dernier résultat prouve l'efficacité des cultures de couverture contre la lixiviation de l'azote durant l'automne et l'hiver. De plus, on peut voir que même si les légumineuses augmentent le taux d'azote en surface, elles sont quand même efficaces contre la lixiviation de l'azote. En revanche, les fétuques montrent les taux les plus bas d'azote à cette profondeur, ce qui pourrait montrer qu'elles sont encore plus efficaces que les trèfles, même si la couverture du sol était moindre. Un étude de Tonitto et al (2006) citée dans une méta-analyse montre que la couverture du sol par des non-légumineuses réduit la lixiviation de l'azote de 70% par rapport à un sol nu (Valkama et al, 2015). Une étude réalisée montre que les poacées peuvent capturer jusque 150 kg d'azote/ha, en fonction du stade de développement de la plante. En effet, il faut un accroissement du système racinaire important pour une telle absorption (Vogeler et al, 2019). Cette condition n'est malheureusement pas remplie puisque la couverture du sol de la fétuque est faible. C'est pourquoi, quand on fait le bilan d'azote dans tout le profil de sol pour les parcelles avec fétuque, on remarque que les quantités d'azote sont étonnamment plus faibles après l'hiver. Cela peut s'expliquer par (i) l'absorption de l'azote par la plante, ce qui semble peu probable (ii) par la volatilisation de l'azote, ce qui est peu problable comme les pH sont tous inférieurs à 6,5 (iii) par la lixiviation de l'azote vers les profondeurs du sol, ce qui semble plausible car la croissance de la fétuque stagne durant l'hiver (iv) par le fait que le ruissellement est supérieur dans les parcelles avec fétuque, ce qui peut emporter de l'azote hors de la parcelle. Ainsi, les risques sont dirigés soit vers les eaux souterraines, soit vers les eaux de surface, mais dans les deux cas l'impact environnemental est présent. Pour le même bilan pour les trèfles, il est positif pour deux d'entre eux et légèrement négatif pour le troisième. Cela montre qu'il n'y a pas eu ou peu de pertes d'azote vers les profondeurs du sol, ou que celles-ci sont cachées par la production d'azote des nodules et la minéralisation de la matière organique produite par les trèfles (cellules de coiffe, etc). Cette hypothèse est à prendre en compte car dans la même étude de Voegeler et al (2019), il est précisé que les légumineuses captent moins l'azote résiduel du sol que les non-légumineuses durant l'hiver. Cependant, les légumineuses ne fixent l'azote que si le contenu en azote du sol est insuffisant et prend de préférence celui qui est directement disponible (Ding et al, 2006). Ainsi, l'hypothèse de la lixiviation cachée par la production d'azote semble peu probable.

Des résultats semblables ont été obtenus dans différentes études. Un article réalisé par Strebel et al (1989), montre qu'une couverture de sol réduit considérablement la concentration en azote dans les eaux souterraines comparé à une terre arable laissée nue durant l'hiver. Ils reportent aussi qu'une application de 150 kg NO_3^-/ha sur un sol loessique à destination de la culture céréalière apporte entre 7 et 14 mg NO_3^-/l dans les eaux souterraines durant la culture. A moyen terme, un tel apport provoquerait des pollutions des nappes phréatiques puisque la teneur de 50 mg NO_3^-/l serait vite atteinte. Pour le témoin dans notre essai, l'apport dans l'horizon qui correspond à la zone racinaire (90 cm) est d'environ 37,33 kg/ha, ce qui est colossal et encore supérieur aux données obtenues pour le même type de sol par Strebel et al, qui variait de 14 à 27 kg N/ha*an. On remarque donc encore plus l'importance et l'efficacité de maintenir un sol couvert pendant l'hiver.

2.2. Taux d'humus après l'hiver

Tout d'abord le contenu en humus moyen des parcelles (varie entre 1,5333 et 1,8000%) est supérieur à la moyenne prédite par le rapport de l'état de l'environnement wallon qui était de 1,14%. Cependant, cette teneur reste inférieure au taux minimal pour une bonne stabilité qui est de 3,5%. Les taux d'humus le plus élevés sont observés dans les parcelles qui ont été couvertes par le trèfle blanc nain et la fétuque rouge traçante Barustic. Cela est assez étonnant puisque tous les trèfles avaient les meilleures couvertures au début de l'hiver comparées à celles des fétuques. Cette constatation devrait être appuyée avec le taux d'humus initial sur la parcelle, afin de voir si celui-ci était homogène pour pouvoir évaluer l'apport de chacune des cultures. Il est possible que ce ne soit pas ces deux cultures là qui ont apporté le plus de carbone organique car les différents types de plantes ne contribuent pas de la même manière à l'apport de MO. Une étude réalisée aux Etats-Unis montre que le taux d'humus est plus élevé dans les sols avec des cultures de couverture de vesce et de seigle, ou de seigle uniquement, que pour un sol nu (Ding et al, 2006). Une autre étude montre que l'augmentation du taux de carbone organique peut aller jusqu'à 7% dans les 20 premiers centimètres de sol avec la pratique de cultures de couverture durant cinq années consécutives (Alvarez et al, 2017). Il est prouvé que les cultures de couverture séquestrent du carbone afin de le convertir en carbone organique (Dabney et al, 2001). Même si le taux d'humus de certains objets est significativement supérieur à celui d'autres objets, dans les faits cela ne représente pas une différence importante puisque, dans tous les cas, on reste à un taux inférieur à 2%, ce qui est encore loin des 3,5% recommandés pour une bonne stabilité et porosité du sol. Il faudrait suivre les résultats sur plusieurs années comme l'ont fait Alvarez et al (2017).

2.3. Coefficient de ruissellement et érosion

On remarque que le coefficient de ruissellement est plus élevé lorsque le sol est nu, sauf dans certains cas où le coefficient de ruissellement sur le sol couvert de fétuque est supérieur à celui du sol nu. Le trèfle est le plus efficace contre le ruissellement. Un résultat similaire a été obtenu dans une étude avec une culture couverture associée de trèfle rouge dans une culture de maïs ensilage dans une pente de 5% sur un sol limoneux (Wall et al, 1991). Comme la couverture du trèfle est supérieure à celle de la fétuque, on pouvait s'attendre à ce type de résultat puisque c'est la couverture du sol qui offre une résistance à l'impact et l'écoulement de l'eau et qui favorise son infiltration. Une étude montre qu'en effet c'est la couverture du sol, plus que le système racinaire, qui importe pour la réduction du ruissellement (Zhou et Shangguan, 2008). Avec une couverture de 30%, le trèfle a diminué le ruissellement de 52,2% le 5 juillet 2018. Lorsque la couverture était d'environ 100% entre le 31 octobre et le 14 novembre, le ruissellement avait diminué d'environ 73%. Pour la fétuque, aux mêmes dates, elle avait diminué le ruissellement de 0% et de 44%, respectivement. Pour ce qui est des cas où le coefficient de ruissellement est supérieur pour les sols couverts de fétuques, il faut prendre en compte qu'il n'y a pas uniquement la quantité d'eau tombée qui

influence ce coefficient. En effet, une averse est caractérisée par sa répartition spatiale, temporelle et les conditions d'humidité du sol avant l'averse (Rodier, 1996). Ainsi, si le couvert de fétuque a gardé une humidité supérieure à celle du sol nu à la surface du sol, en plus de ne pas augmenter l'infiltration en surface avec son système racinaire, cela explique les coefficients de ruissellement parfois plus élevés dans les sous-semis de fétuque en comparaison au témoin.

La perte en sol dans les parcelles couvertes de fétuques et de trèfles est en moyenne plus faible que pour le sol nu. Cependant, on remarque que la fétuque est moins efficace pour protéger de l'érosion. En effet, comme sa couverture est plus faible, le sol est plus exposé au risque de détachement des particules à sa surface (effet « splash »). Ensuite, comme le ruissellement sous-jacent est aussi élevé, le transport de ces particules est facilité. De plus, une faible couverture du sol par la fétuque signifie qu'il y a une faible proportion de racines sur la parcelle. Or, selon Zhou et Shangguan (2008), c'est la proportion de racine dans le sol qui importe plus que la couverture pour réduire l'érosion en augmentant la stabilité des agrégats. Une autre étude relève que les sols avec des cultures de couverture ont une biomasse racinaire bien supérieure à celle des sols nus (Gabriel et Quemada, 2011). Ainsi, le développement supérieur du trèfle en termes de couverture du sol implique une plus grande biomasse racinaire. Ceci explique que, pour les objets couverts avec du trèfle, l'érosion est fortement diminuée. Avec une couverture de 30%, le trèfle a diminué l'érosion de 50% le 5 juillet 2018 et de 100% pour l'événement pluvieux du 31 octobre 2018. Pour la fétuque, aux mêmes dates, elle a augmenté la perte en sol de 50% et elle a doublé la perte en sol au 31 octobre 2018.

Une étude réalisée en 2010 sur deux sites situés sur la ceinture loessique de Belgique où la pente était de 12 et 9% où était cultivé du maïs ensilage avec des cultures de couverture montre que le ruissellement a été réduit de 95% et la perte en sol de 99% avec le semis de ces dernières. Dans cette étude, même les faibles couvertures de sol (< 30%) sont efficaces pour maintenir de faibles taux d'érosion et de ruissellement, ce qui est le cas pour notre étude sur le trèfle (Laloy et Bielders, 2010). Une étude réalisée aux Pays-Bas montre aussi que les pertes en sol sur des tests sur un sol loessique sont considérablement diminuées avec un sous-semis de trèfle. Elles ont été réduites de 89% (RPC, 1995).

Globalement, le trèfle blanc est plus efficace pour la lutte anti-érosion et contre le ruissellement que la fétuque rouge. Cela est comparable à des résultats obtenus dans un étude réalisée au Canada, où le maïs avec une culture de couverture de trèfle rouge voit son ruissellement diminué de 40 à 87% et sa perte en sol de 47 à 78% comparé à un sol nu (Wall et al, 1991).

3. Effet de l'objet et de la densité sur la couverture de sol

En termes de couverture de sol des différents sous-semis au moment de la récolte, nous avons remarqué de grandes différences. De manière générale dans l'essai 1A, la

couverture du sol moyenne par les trèfles étaient significativement supérieure à celle de la fétuque rouge Musica et à celle du témoin. La couverture du sol par la fétuque rouge traçante Barustic quant à elle est significativement supérieure à celle de la fétuque rouge Musica et à celle du témoin. La fétuque rouge Musica avait en fait une couverture de sol non significativement différente de celle du témoin et donc équivalente à zéro. Pour un même objet, la couverture du sol n'est pas influencée par la densité de semis. L'influence de la densité est révélée uniquement dans les comparaisons croisées de deux objets différents.

Dans l'essai 1B, les trèfles ont tous une couverture du sol supérieure à celles des fétuques et du témoin, mais aucune différence significative entre eux n'est à déceler.

La différence majeure entre les deux essais est que la couverture du sol de la Fm est significativement inférieure à celle de tous les autres objets (sauf pour le témoin) dans l'essai 1B et pas dans l'essai 1A. Comme la couverture du sol par la Fb était plus élevée dans l'essai 1B dans l'essai 1A, cela explique qu'il y ait une différence entre les deux fétuques. Cependant, la tendance générale reste la même pour les deux essais, les trèfles sont plus couvrants que les fétuques. Il est peu étonnant que les trèfles blancs aient une couverture de sol globalement supérieure à la fétuque rouge Musica puisqu'ils sont rampants contrairement à ce dernier, et que ce type de fétuque est connu pour avoir une croissance lente. De plus, les fétuques poussent en touffes éparses, ce qui n'est pas le cas des trèfles.

En termes de couverture globale du sol, on voit que jusqu'à la récolte, la couverture ne dépasse pas les 40% pour tous les objets. Cependant, on voit que la couverture du sol était supérieure à 30% durant l'automne, comme c'est recommandé par la FAO, période de minéralisation la plus importante, sauf juste après la récolte en raison de l'écrasement des cultures de couverture durant celle-ci. L'étude réalisée par Laloy et Bielders en 2010 montre qu'une couverture du sol de seulement 30% avec des cultures de couverture en maïs ensilage peut réduire les taux d'érosion de 50 à 80% en fonction du type de couverture du sol. Après la récolte, on remarque que la couverture du sol augmente rapidement pour les trèfles dans les essais 1A et 1B, ce qui est sans doute dû à un meilleur accès à la lumière et à l'eau.

4. Critique de la méthodologie

Pour pouvoir comparer l'effet de la méthode de semis sur la couverture du sol par les sous-semis, il faudrait semer ceux-ci aux mêmes densités. Ainsi, nous pourrions évaluer si le semis à la volée est plus efficace que le semis en ligne ou inversément.

Les analyses du taux de carbone organique avant l'hiver auraient été intéressantes pour connaitre l'apport de chacune des cultures de couverture et pouvoir les corréler avec les taux de carbone organique après l'hiver. On aurait pu suivre l'évolution du pH, et surtout du rapport C/N. En effet, les légumineuses ont un rapport C/N plus faible que les non-légumineuses. Cette mesure est donc à prévoir dans les prochaines études puisqu'il s'agit d'un élément clé pour l'atteinte des objectifs.

Les mesures de LAI auraient été intéressantes pour déterminer la lumière disponible pour les sous-semis une fois les interlignes fermées et corréler cela avec leur couverture du sol. En effet, si ceux-ci avaient une quantité de lumière insuffisante, cela aurait pu expliquer aussi le faible développement de la fétuque rouge au cours de la saison de culture du maïs.

Les mesures de la couverture du sol devraient être continuées jusque la fin de l'hiver pour s'assurer qu'une régression de la couverture du sol n'est pas à craindre. En effet, le sol a été recouvert plusieurs fois de neige durant l'hiver 2018, et son impact aurait été intéressant à vérifier car les estimations de couverture du sol se basent sur l'écophysiologie des sous-semis et sur la dernière mesure de leur couverture du sol au début de l'hiver. Ainsi, nous aurions pu corréler la lixiviation de l'azote avec la couverture du sol plutôt qu'avec l'espèce car dans la littérature, les résultats obtenus sont contraires à ceux obtenus dans notre étude.

La date de destruction du couvert était judicieuse dans cette expérience. En effet, décaler le travail du sol à la fin de l'automne ou au début du printemps diminue les risques de lixiviation de l'azote car la minéralisation n'est pas facilitée par l'apport de MO durant l'automne. De plus une destruction trop précoce diminue la quantité de MO apportée au sol (Kramberger et al, 2014 ; Valkama et al, 2015).

5. Perspectives

L'intérêt des cultures de couverture durant l'hiver ne se montre pas seulement durant l'hiver où elles sont implantées. En effet, certaines études montrent que les effets post-culturaux de telles cultures peuvent être bénéfiques. Dans une étude réalisée par Dufey et al (1986), le trèfle induit une stabilité structurale durant l'hiver, qui est maintenue pour la culture suivante. Cela est probablement dû à l'augmentation à long-terme du taux de carbone organique dans le sol (Ding et al, 2006). Une autre étude montre que l'intérêt des cultures de couverture se voit aussi à moyen-terme. Ils montrent qu'après sept ans de pratique de culture de couverture pendant l'hiver avec une culture suivante de maïs diminue les concentrations d'azote dans les eaux souterraines de 10-20 à moins de 5 mg NO_3^-/l (Di et Cameron, 2002). Une étude réalisée avec des légumineuses comme culture intercalaire, avant une culture de maïs, montre que l'effet bénéfique ne s'arrête par à l'apport d'azote au sol. Cela est encore plus marqué pour les sols où les teneurs en carbone organique sont faibles et où la rétention en eau est faible, car l'apport de MO va avoir un effet positif considérable sur le maïs (Decker et al, 1994). Plusieurs études montrent que la matière organique dans le sol est plus élevée dans une parcelle où une culture de couverture a été appliquée et retournée au sol avant le semis de la culture principale que dans une parcelle où il n'y avait pas de culture de couverture (Ding et al, 2006; Nyawade et al, 2019). Ainsi, continuer les mesures sur le maïs durant l'année 2019 nous permettrait de savoir si l'impact (positif, négatif ou nul) que les sous-semis ont eu en 2018 sur le maïs, serait égal ou différent pour la culture suivante, notamment en mesurant l'apport ou non de MO. Cela pourrait avoir un impact sur l'eau disponible pour la plante. Or, nous avons vu que le manque d'eau pouvait réduire le rendement en maïs car il est sensible au stress hydrique. Cet impact a déjà été étudié dans une étude réalisée par Alvarez et al

(2017) où la couverture du sol a eu un impact négatif sur les couches de sol profondes (1 à 2,5m). L'eau disponible a cette profondeur pour la culture suivante a diminué de 15 à 30% en fonction du type de couverture. Or comme il s'agit de la zone racinaire du maïs, cela a eu pour conséquence de faire baisser son rendement. Pour des couverts végétaux de non-légumineuses, le rendement du maïs diminue d'environ 8%, mais augmente de 7% avec une culture de couverture d'une légumineuse. L'augmentation par la légumineuse est due à un apport d'environ 15 kg d'azote/ha pour la culture suivante. Cependant cela est à nuancer car ce même article cite une méta-analyse de plusieurs expériences réalisées aux USA qui montre que les couverts végétaux de légumineuses n'affectent par le rendement en maïs à de faibles applications d'azote, mais peut le diminuer de 12% en cas de forte fertilisation azotée. L'impact sur la culture suivante est donc variable en fonction des conditions et des pratiques agricoles sur chaque parcelle. C'est pourquoi une étude reliée à celle réalisée dans ce présent mémoire sur les cultures de maïs de 2019 serait intéressante.

La séparation des légumineuses et des non-légumineuses dans les tests de culture de couverture n'est pas forcément nécessaire. En effet, on pourrait envisager des mélanges de ces deux types de plantes pour allier les impacts positifs du trèfle blanc sur l'érosion et le ruissellemment et les impacts positifs de la fétuque rouge sur le rendement. Une méta-analyse montre que les couverts végétaux en hiver composés d'un mélange entre des légmineuses et des poacées peuvent augmenter le rendement de 20% (Valkama et al, 2015). Cependant cette méta-analyse montre que le lessivage de l'azote n'est pas significativement réduit avec ce type de mélange (contenant du trèfle). Il faudrait donc faire des recherches pour trouver les bonnes combinaisons et proportions de légumineuses et non-légumineuses. Dans notre étude, le semis accidentel de fétuque et de trèfle en même temps dans l'essai 1A a montré que la couverture du sol se fait plus rapidement que pour tous les objets de l'essai 1A puisque la couverture du sol dépasse les 30% à partir du 8 août 2018 (résultats en annexe). De plus, le mélange de ces deux types de plantes ajuste le rapport C/N qui est plus faible pour les cultures de couverture de légumineuses que pour celles avec des poacées (Kramberger et al, 2014). Des mesures complémentaires sont à faire, mais en tout cas il s'agit d'un premier bon point pour les mélanges de trèfle blanc et de fétuque rouge.

L'augmentation de la stabilité strucurale du sol est une des explications plausibles qui expliquent les baisses de pertes en sédiments dans nos essais. Comme décrites dans l'état de l'art, les mycorhizes peuvent aussi être à l'origine de la stabilisation du sol. Une étude réalisée par Kabier et Koide (2000) où des cultures de couverture de pissenlit et de blé d'hiver ont été mises durant l'hiver, avant la culture de maïs, montre une interaction positive significative entre la colonisation des racines de maïs par les mycorhizes et les cultures de couverture comparées à un sol laissé nu durant l'hiver. Après 25 à 54 jours après l'émergence du maïs, le pourcentage de racines du maïs colonisés était supérieur pour les parcelles où la culture de couverture était le pissenlit par rapport à celle où il s'agissait de blé d'hiver, mais cela restait toujours supérieur à la colonisation dans les sols où aucune couverture n'avait été appliquée en hiver. En parallèle, 54 jours après l'émergence du maïs, la teneur en agrégats stables dans

l'eau était significativement supérieure dans les parcelles couvertes en hiver que pour les parcelles nues. Ainsi la correlation calculée entre la colonisation et la quantité d'agrégats stables dans le sol est positive et significative. Une autre étude appuie le fait que les cultures de couverture augmentent l'inoculum de mycorhizes dans le sol (Dabney et al, 2001). De plus, les mycorhizes apportent une nutrition supplémentaire à la plante, comme le phosphore, ce qui pourrait potentiellement augmenter le rendement. Ainsi, une mesure supplémentaire sur l'inoculum de mycorhizes en parallèle avec le type d'espèce semée dans la culture et sa densité nous permettrait de mieux évaluer les espèces compatibles avec une meilleure colonisation de mycorhizes pour assurer la formation d'agrégats stables dans le sol et ainsi lutter contre l'érosion. Il s'agit d'un essai à envisager à l'avenir.

Le maïs ensilage est une source importante d'énergie mais il est pauvre en protéines. L'apport de légumineuses dans la ration des vaches laitières à haute production permet donc de compléter les besoins en matière azotée. De plus, l'autonomie protéique à l'heure actuelle pour les éleveurs laitiers est une préoccupation afin de résister aux fluctuations du prix des matières premières mais aussi pour éviter de donner du soja ayant parcouru près de 10 000 km après avoir été récolté dans des conditions inconnues. Ainsi, envisager de faire une culture de couverture associée avec du trèfle blanc avec un objectif supplémentaire, celui de donner plus d'autonomie protéique aux éleveurs, semble être judicieux. En effet, le trèfle blanc remplit plusieurs critères intéressants : une bonne ingestibilité, une bonne digestibilité, une forte teneur en minéraux ainsi qu'en matière azotée. Cette perspective mérite d'être étudiée pour s'assurer que les services environnementaux et la fauche du trèfle blanc au printemps sont compatibles (Vergonjeanne, 2014 ; Froidmont, 2019).

D'un point de vue économique, l'excès de fertilisation azotée, en plus de provoquer la lixiviation de l'azote, peut nuire à la qualité et au rendement de certaines cultures et ainsi induire une perte financière pour l'agriculteur (Strebel et al, 1989). Dans le futur, la capacité des cultures de couverture telles que les légumineuses de fournir de l'azote au sol peut faire diminuer les coûts liés à la fertiliation azotée pour l'agriculteur, surtout en cas d'augmentation des prix des fertilisants (Valkama et al, 2015). Les cultures de couverture, comme le trèfle, durant la culture peuvent diminuer les besoins en azote jusque 42 kg N/ha pour un même rendement de maïs (Wall et al, 1991). Comme elles ont aussi le rôle de contrôle des adventices lorsqu'elles sont semées en même temps que la culture, l'application d'herbicide peut être considérablement réduite (Dabney et al, 2001). En effet, des observations non systématiques des adventices au cours de ce travail ont été réalisée et la quantité d'adventices (qui étaient majoritairement de la camomille, du chénopode blanc et de la prêle des champs) était subjectivement supérieure dans les témoins, où aucune couverture du sol n'était appliquée, par rapport aux objets avec des cultures de couverture associées. De plus, il s'agit d'une alternative pour l'agriculture durable et moins d'intrants signifie moins de pollution par la fabrication et le transport de ceux-ci. Cependant changer les pratiques d'un agriculteur pour l'application de culture de couverture ne doit pas être un coût supplémentaire en dehors des bénéfices qu'elle peut apporter. En effet, le prix des semences des cultures de couverture

associées doit être raisonnable et l'investissement nécessaire pour leur semis doit être minime.

Conclusion

En conclusion, l'objectif général de déterminer l'efficacité des cultures de couverture associées pour la protection des eaux et du sol des processus de lixiviation de l'azote, d'érosion et de ruissellement tout en assurant la productivité et la qualité du maïs ensilage a été atteint.

Plus particulièrement concernant le premier sous-objectif qui était de déterminer l'effet de l'espèce, de la variété, de la densité du couvert et de la méthode de semis du maïs et du couvert sur la lixiviation de l'azote, la productivité et la qualité du maïs, nous avons vu que certains trèfles diminuaient le rendement en MS du maïs et qu'aucun effet de la méthode du semis du maïs sur le rendement n'était à déceler. L'espèce/variété, la densité de semis du couvert et la méthode de semis n'ont pas impacté le poids de 1000 grains et le nombre de rangs par épi, malgré la sécheresse de l'été 2018. Globalement, la VEM et la teneur en amidon du maïs n'étaient pas impactées de façon à compromettre la qualité fourragère du maïs. Ainsi, les résultats sont prometteurs quant au faible impact des sous-semis sur la qualité et la productivité du maïs, ce qui est primordial pour promouvoir cette technique auprès des agriculteurs. Pour ce qui est de la croissance du maïs, les résultats montrent que la méthode de semis a un effet significatif, la méthode en simple rang semble plus judicieuse à utiliser. En ce qui concerne la lixiviation, la fétuque rouge semble être moins efficace que le trèfle blanc pour garder l'azote dans le sol. Cependant, cela est contraire à ce qui a été trouvé dans la littérature. Il est possible que les fétuques aient été peu efficaces à cause de leur faible développement. En effet, la couverture du sol par les sous-semis était meilleure pour les trèfles que pour les fétuques. Aucune différence n'est à déceler pour les différents trèfles blancs, par contre la fétuque rouge traçante Barustic couvre significativement plus que la fétuque rouge Musica. L'impact de la densité sur la couverture du sol n'était pas significatif dans l'essai 1B, mais l'était dans l'essai 1A. Cependant, elle influençait la couverture lorsqu'on comparait la densité de deux variétés et pas au sein de la même.

Le deuxième sous-objectif était de déterminer l'efficacité des couverts dans la lutte contre l'érosion et le ruissellement. Nous avons constaté que le trèfle blanc réduit considérablement ces phénomènes, ce qui est très encourageant.

Pour finir, cette étude est très prometteuse pour montrer les services environnementaux que peuvent fournir les cultures de couverture en maïs. L'absence d'impact sur le maïs à court-terme pour l'agriculteur lorsque celles-ci sont semées en même temps est aussi un bon point. L'efficacité des cultures de couverture contre l'érosion, le ruissellement et la lixiviation de l'azote est notable.

Bilbiographie

1) Abdalla, M., B. Osborne, G. Lanigan, D. Forristal, M. Williams, P. Smith, et M. B. Jones. 2013. « Conservation Tillage Systems: A Review of Its Consequences for Greenhouse Gas Emissions ». *Soil Use and Management* 29 (2): 199-209. https://doi.org/10.1111/sum.12030.
2) Adams, Karen R., Deborah A. Muenchrath, et Dylan M. Schwindt. 1999. « Moisture Effects on the Morphology of Ears, Cobs and Kernels of a South-Western U.S. Maize (Zea MaysL.) Cultivar, and Implications for the Interpretation of Archaeological Maize ». *Journal of Archaeological Science* 26 (5): 483-96. https://doi.org/10.1006/jasc.1998.0320.
3) Agassi, Menachem. 1996. *Soil erosion, conservation and rehabilitation*. US: Marcel Dekker.
4) Alvarez, Roberto, Haydee S. Steinbach, et Josefina L. De Paepe. 2017. « Cover Crop Effects on Soils and Subsequent Crops in the Pampas: A Meta-Analysis ». *Soil and Tillage Research* 170 (juillet): 53-65. https://doi.org/10.1016/j.still.2017.03.005.
5) Anzana, Fabiola. 2006. « Contrôle de la vitesse de germination chez le maïs (Zea mays) : étude de la voie de biosynthèse des acides aminés issus de l'aspartate et recherche de QTLs ». Angers: université d'Angers.
6) Balesdent, Jérôme, et May Balabane. 1996. « Major Contribution of Roots to Soil Carbon Storage Inferred from Maize Cultivated Soils ». *Soil Biology and Biochemistry* 28 (9): 1261-63. https://doi.org/10.1016/0038-0717(96)00112-5.
7) Ballabio, Cristiano, Pasquale Borrelli, Jonathan Spinoni, Katrin Meusburger, Silas Michaelides, Santiago Beguería, Andreas Klik, et al. 2017. « Mapping Monthly Rainfall Erosivity in Europe ». *Science of The Total Environment* 579 (février): 1298-1315. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.123.
8) Bauer, Armand, et A. L. Black. 1994. « Quantification of the Effect of Soil Organic Matter Content on Soil Productivity ». *Soil Science Society of America Journal* 58 (1): 185. https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800010027x.
9) Bertin, P., 2018, LBRAI2106 : phytotechnie, Partim A.
10) Beuselinck, L, A Steegen, G Govers, J Nachtergaele, I Takken, et J Poesen. 2000. « Characteristics of Sediment Deposits Formed by Intense Rainfall Events in Small Catchments in the Belgian Loam Belt ». *Geomorphology* 32 (1-2): 69-82. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00068-9.
11) Bhatt, Rajan, et K.L. Khera. 2006. « Effect of Tillage and Mode of Straw Mulch Application on Soil Erosion in the Submontaneous Tract of Punjab, India ». *Soil and Tillage Research* 88 (1-2): 107-15. https://doi.org/10.1016/j.still.2005.05.004.
12) Blanco-Canqui, Humberto, John D. Holman, Alan J. Schlegel, John Tatarko, et Tim M. Shaver. 2013. « Replacing Fallow with Cover Crops in a Semiarid Soil: Effects on Soil Properties ». *Soil Science Society of America Journal* 77 (3): 1026. https://doi.org/10.2136/sssaj2013.01.0006.
13) Blanco-Canqui, Humberto, Tim M. Shaver, John L. Lindquist, Charles A. Shapiro, Roger W. Elmore, Charles A. Francis, et Gary W. Hergert. 2015. « Cover Crops and Ecosystem Services: Insights from Studies in Temperate Soils ». *Agronomy Journal*

107 (6): 2449. https://doi.org/10.2134/agronj15.0086.
14) Bongiorno, Giulia, Else K. Bünemann, Chidinma U. Oguejiofor, Jennifer Meier, Gerrit Gort, Rob Comans, Paul Mäder, Lijbert Brussaard, et Ron de Goede. 2019. « Sensitivity of Labile Carbon Fractions to Tillage and Organic Matter Management and Their Potential as Comprehensive Soil Quality Indicators across Pedoclimatic Conditions in Europe ». *Ecological Indicators* 99 (avril): 38-50. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.008.
15) Bureau de la biosécurité végétale. 1994. « La biologie de Zea mays L. (Maïs) ». Agence canadienne d'inspection des aliments.
16) Busari, Mutiu Abolanle, Surinder Singh Kukal, Amanpreet Kaur, Rajan Bhatt, et Ashura Ally Dulazi. 2015. « Conservation Tillage Impacts on Soil, Crop and the Environment ». *International Soil and Water Conservation Research* 3 (2): 119-29. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.05.002.
17) Champion, S., et J. Greffier. 2018. « Les graminées à gazon ». GNIS.
18) « Conservation Agriculture ». 2019. In *Sustainable Food and Agriculture*, 213-17. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812134-4.00020-0.
19) Dabney, S. M., J. A. Delgado, et D. W. Reeves. 2001. « USING WINTER COVER CROPS TO IMPROVE SOIL AND WATER QUALITY ». *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32 (7-8): 1221-50. https://doi.org/10.1081/CSS-100104110.
20) Dautrebande, Sylvia, et Catherine Sohier. 2006. « L'érosion hydrique et les pertes en sol agricoles en Région Wallonne ». Expertise. Etat de l'Environnement wallon. Gembloux.
21) Dawo, Mohamed I, J Michael Wilkinson, Francis ET Sanders, et David J Pilbeam. 2007. « The Yield and Quality of Fresh and Ensiled Plant Material from Intercropped Maize (Zea Mays) and Beans (Phaseolus Vulgaris) ». *Journal of the Science of Food and Agriculture* 87 (7): 1391-99. https://doi.org/10.1002/jsfa.2879.
22) Decker, A. Morris, Andrew J. Clark, John J. Meisinger, F. Ronald Mulford, et Marla S. McIntosh. 1994. « Legume Cover Crop Contributions to No-Tillage Corn Production ». *Agronomy Journal* 86 (1): 126. https://doi.org/10.2134/agronj1994.00021962008600010024x.
23) Dekalb. 2014. « Maïs et eau ». https://www.dekalb.fr/mais-ensilage/conseils-pour-le-mais-ensilage/culture-du-mais-ensilage/mais-et-eau.
24) Derpsch, R., Theodor Friedrich, Amir Kassam, et Li Hongwen. 2010. « Current Status of Adoption of No-till Farming in the World and Some of Its Main Benefits ». *Int J Agric & Biol Eng* 3 (1): 26. https://doi.org/10.3965/j.issn.1934-6344.2010.01.001-025.
25) Di, H.J., et K.C. Cameron. 2002. « Nitrate leaching in temperate agroecosystems: sources, factors and mitigating strategies ». *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 64 (3): 237-56. https://doi.org/10.1023/A:1021471531188.
26) Dicks, Lynn, Annelie Ashpole, Juliana Dänhardt, Katy James, Annelie Jönsson, Nicolas Randall, David Showler, et al. 2014. *Farmland Conservation ; Evidence for the Effects of Interventions in Northern and Western Europe*. Vol. 3. Synopses of Conservation Evidence. UK: Pelagic publishing.
27) Ding, Guangwei, Xiaobing Liu, Stephen Herbert, Jeffrey Novak, Dula Amarasiriwardena, et Baoshan Xing. 2006. « Effect of Cover Crop Management on

Soil Organic Matter ». *Geoderma* 130 (3-4): 229-39. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.01.019.
28) Dufey, Joseph E., Henri Halen, et Raymond Frankart. 1986. « Evolution de la stabilité structurale du sol sous l'influence des racines de trèfle (Trifolium pratense L.) et de ray-grass (Lolium multiflorum Lmk.). Observations pendant et après culture ». *Agronomie* 6 (9): 811-17. https://doi.org/10.1051/agro:19860905.
29) Dumanski, J., et R. Peiretti. 2013. « Modern Concepts of Soil Conservation ». *International Soil and Water Conservation Research* 1 (1): 19-23. https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30046-0.
30) Emmerson, M., M.B. Morales, J.J. Oñate, P. Batáry, F. Berendse, J. Liira, T. Aavik, et al. 2016. « How Agricultural Intensification Affects Biodiversity and Ecosystem Services ». In Advances in Ecological Research, 55:43-97. Elsevier. https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2016.08.005.
31) Encyclopaedia Britannica. Encyclopædia Britannica, inc. Consulté le 2 mars 2019. https://www.britannica.com/science/erosion-geology.
32) Eshel, Amram, et Tom Beeckman. 2013. *Plant Roots ; the Hidden Half*. 4th éd. USA: CRC press.
33) FAO. 2017. « Conservation Agriculture ». FAO. http://www.fao.org/publications/card/en/c/981ab2a0-f3c6-4de3-a058-f0df6658e69f/.
34) Fontaine, Sébastien, André Mariotti, et Luc Abbadie. 2003. « The Priming Effect of Organic Matter: A Question of Microbial Competition? » *Soil Biology and Biochemistry* 35 (6): 837-43. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00123-8.
35) Froidmont, E. 2019. LBRAI2207 : Prairies et parcours
36) Gabriel, J.L., et M. Quemada. 2011. « Replacing Bare Fallow with Cover Crops in a Maize Cropping System: Yield, N Uptake and Fertiliser Fate ». *European Journal of Agronomy* 34 (3): 133-43. https://doi.org/10.1016/j.eja.2010.11.006.
37) García-Lara, Silverio, et Sergio O. Serna-Saldivar. 2019. « Corn History and Culture ». In *Corn*, 1-18. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811971-6.00001-2.
38) GoogleMaps. 2019. « Données cartographiques ». Image satellite. Belgique: Google Map. https://www.google.be/maps/place/Rue+de+la+Malaise,+1340+Ottignies-Louvain-la-Neuve/@50.6636144,4.5967055,276m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x47c17e11f1c8af01:0x738222a1ffafc049!8m2!3d50.6608811!4d4.5965435?hl=fr&authuser=0.
39) Gregory, Peter. 2006. *Plant root ; Growth, activity and interaction with soils*. Oxford, England: Backwell.
40) Guerra, A. 1994. « The Effect of Organic Matter Content on Soil Erosion in Simulated Rainfall Experiments in W. Sussex, UK ». *Soil Use and Management* 10 (2): 60-64. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1994.tb00460.x.
41) Gyssels, G., J. Poesen, E. Bochet, et Y. Li. 2005. « Impact of Plant Roots on the Resistance of Soils to Erosion by Water: A Review ». *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 29 (2): 189-217. https://doi.org/10.1191/0309133305pp443ra.
42) J. Ritter, ing. 2012. « L'érosion du sol - causes et effet ». Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales.

43) Jat, H.S., Ashim Datta, M. Choudhary, A.K. Yadav, V. Choudhary, P.C. Sharma, M.K. Gathala, M.L. Jat, et A. McDonald. 2019. « Effects of Tillage, Crop Establishment and Diversification on Soil Organic Carbon, Aggregation, Aggregate Associated Carbon and Productivity in Cereal Systems of Semi-Arid Northwest India ». *Soil and Tillage Research* 190 (juillet): 128-38. https://doi.org/10.1016/j.still.2019.03.005.
44) Jensen, Johannes L., Per Schjønning, Christopher W. Watts, Bent T. Christensen, Clément Peltre, et Lars J. Munkholm. 2019. « Relating Soil C and Organic Matter Fractions to Soil Structural Stability ». *Geoderma* 337 (mars): 834-43. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.034.
45) Jin, K., W.M. Cornelis, D. Gabriels, M. Baert, H.J. Wu, W. Schiettecatte, D.X. Cai, et al. 2009. « Residue Cover and Rainfall Intensity Effects on Runoff Soil Organic Carbon Losses ». *CATENA* 78 (1): 81-86. https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.03.001.
46) Jordán, Antonio, Lorena M. Zavala, et Juan Gil. 2010. « Effects of Mulching on Soil Physical Properties and Runoff under Semi-Arid Conditions in Southern Spain ». *CATENA* 81 (1): 77-85. https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.01.007.
47) Kabir, Z., et R.T. Koide. 2000. « The Effect of Dandelion or a Cover Crop on Mycorrhiza Inoculum Potential, Soil Aggregation and Yield of Maize ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 78 (2): 167-74. https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00121-8.
48) Kassam, A., R. Derpsch, et T. Friedrich. 2014. « Global Achievements in Soil and Water Conservation: The Case of Conservation Agriculture ». *International Soil and Water Conservation Research* 2 (1): 5-13. https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30009-5.
49) Kassam, A., T. Friedrich, et R. Derpsch. 2019. « Global Spread of Conservation Agriculture ». *International Journal of Environmental Studies* 76 (1): 29-51. https://doi.org/10.1080/00207233.2018.1494927.
50) Kassam, Amir, Theodor Friedrich, R. Derpsch, et J. Kienzle. 2015. « Overview of the Worldwide Spread of Conservation Agriculture ». *Field Actions Science Reports* 8. https://journals.openedition.org/factsreports/3966.
51) Kassam, Amir, Theodor Friedrich, Francis Shaxson, et Jules Pretty. 2009. « The Spread of Conservation Agriculture: Justification, Sustainability and Uptake ». *International Journal of Agricultural Sustainability* 7 (4): 292-320. https://doi.org/10.3763/ijas.2009.0477.
52) Katleen Gillijns et al. 2005. « Erosion des sols en Belgique ». 10. Leuven: Institut royal pour la Gestion durable des Ressources naturelles et la Promotion des Technologies propres.
53) Kramberger, B., A. Gselman, J. Kristl, M. Lešnik, V. Šuštar, M. Muršec, et M. Podvršnik. 2014. « Winter Cover Crop: The Effects of Grass–Clover Mixture Proportion and Biomass Management on Maize and the Apparent Residual N in the Soil ». *European Journal of Agronomy* 55 (avril): 63-71. https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.01.001.
54) Lal, R., P. A. Sanchez, P. Lavelle, E. Blanchart, A. Martin, A. V. Spain, et S. Martin. 1992. « Impact of Soil Fauna on the Properties of Soils in the Humid Tropics ». In

SSSA Special Publication. USA: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy. https://doi.org/10.2136/sssaspecpub29.c9.
55) Laloy, Eric, et C. L. Bielders. 2010. « Effect of Intercropping Period Management on Runoff and Erosion in a Maize Cropping System ». *Journal of Environment Quality* 39 (3): 1001. https://doi.org/10.2134/jeq2009.0239.
56) Lambert, Richard, Guy Foucart, Michaël Mary, Jean-François Oost, Fabien Renard, Sébastien Cremer, David Knoden, et Jérôme Widar. 2014. « La culture du maïs en Ardenne, le cas du parc naturel Haute-Sûre Forêt d'Anlier ». Groupe d'Action Locale Haute-Sûre Forêt d'Anlier. http://www.fourragesmieux.be/Documents_telechargeables/Brochure_Mais_GAL.pdf
57) Lobb, D.A. 2008. « Soil Movement by Tillage and Other Agricultural Activities ». In Encyclopedia of Ecology, 3295-3303. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00832-6.
58) Météo Belgique. 2018. « Relevés et analyses 2018 ». https://www.meteobelgique.be/article/releves-et-analyses/annee-2018.html.
59) Miguez, Fernando E., et Germán A. Bollero. 2005. « Review of Corn Yield Response under Winter Cover Cropping Systems Using Meta-Analytic Methods ». *Crop Science* 45 (6): 2318. https://doi.org/10.2135/cropsci2005.0014.
60) Montgomery, D. R. 2007. « Soil Erosion and Agricultural Sustainability ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104 (33): 13268-72. https://doi.org/10.1073/pnas.0611508104.
61) Mulumba, Lukman Nagaya, et Rattan Lal. 2008. « Mulching Effects on Selected Soil Physical Properties ». *Soil and Tillage Research* 98 (1): 106-11. https://doi.org/10.1016/j.still.2007.10.011.
62) Nyawade, Shadrack O., Nancy N. Karanja, Charles K.K. Gachene, Harun I. Gitari, Elmar Schulte-Geldermann, et Monica L. Parker. 2019. « Short-Term Dynamics of Soil Organic Matter Fractions and Microbial Activity in Smallholder Potato-Legume Intercropping Systems ». *Applied Soil Ecology*, mai. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.04.015.
63) Olasantan, F.O., H.C. Ezumah, et E.O. Lucas. 1996. « Effects of Intercropping with Maize on the Micro-Environment, Growth and Yield of Cassava ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 57 (2-3): 149-58. https://doi.org/10.1016/0167-8809(96)01019-5.
64) Padilla, Francisco M., Marisa Gallardo, et Francisco Manzano-Agugliaro. 2018. « Global Trends in Nitrate Leaching Research in the 1960–2017 Period ». *Science of The Total Environment* 643 (décembre): 400-413. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.215.
65) Panagos, Panos, Cristiano Ballabio, Pasquale Borrelli, Katrin Meusburger, Andreas Klik, Svetla Rousseva, Melita Perčec Tadić, et al. 2015. « Rainfall Erosivity in Europe ». *Science of The Total Environment* 511 (avril): 801-14. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.008.
66) Panagos, Panos, Cristiano Ballabio, Katrin Meusburger, Jonathan Spinoni, Christine Alewell, et Pasquale Borrelli. 2017. « Towards Estimates of Future Rainfall Erosivity in Europe Based on REDES and WorldClim Datasets ». *Journal of Hydrology* 548 (mai): 251-62. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.006.

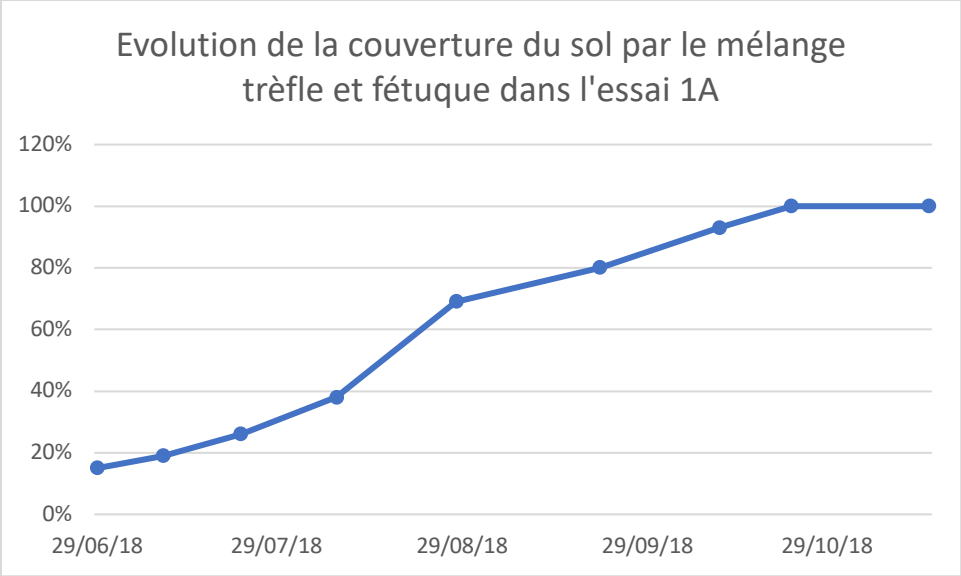
67) Panagos, Panos, Pasquale Borrelli, Jean Poesen, Cristiano Ballabio, Emanuele Lugato, Katrin Meusburger, Luca Montanarella, et Christine Alewell. 2015. « The New Assessment of Soil Loss by Water Erosion in Europe ». *Environmental Science & Policy* 54 (décembre): 438-47. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012.
68) Panagos, Panos, et Athanasios Katsoyiannis. 2019. « Soil Erosion Modelling: The New Challenges as the Result of Policy Developments in Europe ». *Environmental Research* 172 (mai): 470-74. https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.02.043.
69) PNR des Caps et Marais. 2003. « Guide technique de la lutte contre l'érosion des sols en Caps et Marais d'Opale », novembre. http://www.giser.be/wp-content/uploads/2013/02/guide-lutte_erosion_parc_opale.pdf.
70) Power, J.F., et J.S. Schepers. 1989. « Nitrate Contamination of Groundwater in North America ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 26 (3-4): 165-87. https://doi.org/10.1016/0167-8809(89)90012-1.
71) Protect'eau. 2019. « Taux de liaison au sol (LS) ». SPW. https://protecteau.be/fr/agriculteurs/taux-de-liaison.
72) Pye, Kenneth. 1984. « Loess ». *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 8 (2): 176-217. https://doi.org/10.1177/030913338400800202.
73) Quemada, M., M. Baranski, M.N.J. Nobel-de Lange, A. Vallejo, et J.M. Cooper. 2013. « Meta-Analysis of Strategies to Control Nitrate Leaching in Irrigated Agricultural Systems and Their Effects on Crop Yield ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 174 (juillet): 1-10. https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.04.018.
74) Rameau, J-C, D. Mansion, et G. Dumé. 1989. *Flore forestière française*. Vol. 1. Paris, france: IDF.
75) Renoux, Jean-Paul. 2014. *Le maïs*. Agriproduction. Paris, france: France Agricole.
76) Rodier, Jean. 1996. « Méthodes utilisées pour le calcul du coef cient de ruissellement sur les bassins représentatifs et expérimentaux. »
77) Rousseau, Denis-Didier, Edward Derbyshire, Pierre Antoine, et Christine Hatté. 2018. « European Loess Records ☆ ». In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11136-4.
78) RPC, Morgan. 1995. *Soil Erosion and Conservation*. 2ème. Harlow, England: Longman.
79) Ruiz, Siul, Dani Or, et Stanislaus J. Schymanski. 2015. « Soil Penetration by Earthworms and Plant Roots—Mechanical Energetics of Bioturbation of Compacted Soils ». Édité par Raffaella Balestrini. *PLOS ONE* 10 (6): e0128914. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0128914.
80) Schmidt, Michael W. I., Margaret S. Torn, Samuel Abiven, Thorsten Dittmar, Georg Guggenberger, Ivan A. Janssens, Markus Kleber, et al. 2011. « Persistence of Soil Organic Matter as an Ecosystem Property ». *Nature* 478 (7367): 49-56. https://doi.org/10.1038/nature10386.
81) Schmidt, O, J P Curry, R A Hackett, G Purvis, et R O Clements. 2001. « Earthworm Communities in Conventional Wheat Monocropping and Low-Input Wheat-Clover Intercropping Systems ». *Annals of Applied Biology* 138 (3): 377-88. https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2001.tb00123.x.
82) Shim, Dana, Kyu-Jong Lee, et Byun-Woo Lee. 2017. « Response of Phenology- and

Yield-Related Traits of Maize to Elevated Temperature in a Temperate Region ». *The Crop Journal* 5 (4): 305-16. https://doi.org/10.1016/j.cj.2017.01.004.
83) Soane, B.D., B.C. Ball, J. Arvidsson, G. Basch, F. Moreno, et J. Roger-Estrade. 2012. « No-till in Northern, Western and South-Western Europe: A Review of Problems and Opportunities for Crop Production and the Environment ». *Soil and Tillage Research* 118 (janvier): 66-87. https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.015.
84) Stoate, C, N.D Boatman, R.J Borralho, C.Rio Carvalho, G.R.de Snoo, et P Eden. 2001. « Ecological Impacts of Arable Intensification in Europe ». *Journal of Environmental Management* 63 (4): 337-65. https://doi.org/10.1006/jema.2001.0473.
85) Strebel, O., W.H.M. Duynisveld, et J. Böttcher. 1989. « Nitrate Pollution of Groundwater in Western Europe ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 26 (3-4): 189-214. https://doi.org/10.1016/0167-8809(89)90013-3.
86) Thysebaert, D, A. Bellayachi, C. Cuvelier, J. Dejemeppe, C. Généreux, E. Maes, G. Marzo, et al. 2017. « Rapport sur l'état de l'environnement wallon ». SPW. http://etat.environnement.wallonie.be/files/Publications/.
87) Tiquia, Sonia M., John Lloyd, Daniel A. Herms, Harry A.J. Hoitink, et Frederick C. Michel. 2002. « Effects of Mulching and Fertilization on Soil Nutrients, Microbial Activity and Rhizosphere Bacterial Community Structure Determined by Analysis of TRFLPs of PCR-Amplified 16S RRNA Genes ». *Applied Soil Ecology* 21 (1): 31-48. https://doi.org/10.1016/S0929-1393(02)00040-9.
88) Tisdall et Oades. 1982. « Journal of Soil Science ». *Organic Matter and Water-Stable Aggregates in Soils*, 1982.
89) Valkama, Elena, Riitta Lemola, Hannu Känkänen, et Eila Turtola. 2015. « Meta-Analysis of the Effects of Undersown Catch Crops on Nitrogen Leaching Loss and Grain Yields in the Nordic Countries ». *Agriculture, Ecosystems & Environment* 203 (mai): 93-101. https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.01.023.
90) Vergonjeanne, Robin. « Alimentation des bovins, protéines maison au menu ». Web-agri. Consulté le 10 juin 2019. http://www.web-agri.fr/conduite-elevage/alimentation/article/proteines-maison-au-menu-1172-103151.html.
91) Verstraeten, Gert, Jean Poesen, Gaston Demarée, et Christian Salles. 2006. « Long-Term (105 Years) Variability in Rain Erosivity as Derived from 10-Min Rainfall Depth Data for Ukkel (Brussels, Belgium): Implications for Assessing Soil Erosion Rates ». *Journal of Geophysical Research* 111 (D22). https://doi.org/10.1029/2006JD007169.
92) Verstraeten, Gert, Jean Poesen, Dirk Goossens, Katleen Gillijns, Charles Bielders, Donald Gabriels, Greet Ruysschaert, Miet Van Den Eeckhaut, Tom Vanwalleghem, et Gerard Govers. 2006. « Belgium ». In *Soil Erosion in Europe*, édité par John Boardman et Jean Poesen, 385-411. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. https://doi.org/10.1002/0470859202.ch30.
93) Vogeler, Iris, Elly M. Hansen, Ingrid K. Thomsen, et Hans S. Østergaard. 2019. « Legumes in Catch Crop Mixtures: Effects on Nitrogen Retention and Availability, and Leaching Losses ». *Journal of Environmental Management* 239 (juin): 324-32. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.077.
94) Wall, G. J., E. A. Pringle, et R. W. Sheard. 1991. « Intercropping Red Clover with Silage Corn for Soil Erosion Control ». *Canadian Journal of Soil Science* 71 (2):

137-45. https://doi.org/10.4141/cjss91-013.
95) Witt, Sandra, Luis Galicia, Jan Lisec, Jill Cairns, Axel Tiessen, Jose Luis Araus, Natalia Palacios-Rojas, et Alisdair R. Fernie. 2012. « Metabolic and Phenotypic Responses of Greenhouse-Grown Maize Hybrids to Experimentally Controlled Drought Stress ». *Molecular Plant* 5 (2): 401-17. https://doi.org/10.1093/mp/ssr102.
96) Zahra Khodarahmpour. 2012. « Study of yield and yield components of corn (Zea mays L.) inbred lines to drought stress ». *AFRICAN JOURNAL OF BIOTECHNOLOGY* 11 (13). https://doi.org/10.5897/AJB11.2974.
97) Zhou, Zheng-Chao, et Zhou-Ping Shangguan. 2008. « Effect of Ryegrasses on Soil Runoff and Sediment Control ». *Pedosphere* 18 (1): 131-36. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(07)60111-8.
98) Zougmore, R., F. N. Kambou, K. Ouattara, et S. Guillobez. 2000. « Sorghum-Cowpea Intercropping: An Effective Technique Against Runoff and Soil Erosion in the Sahel (Saria, Burkina Faso) ». *Arid Soil Research and Rehabilitation* 14 (4): 329-42. https://doi.org/10.1080/08903060050136441.

Annexes

A. Résultats de la couverture du sol par le semis accidentel de fétuque et de trèfle dans l'essai 1A



B. Observations complémentaires subjectives

Le 3 juillet 2018, les plants de maïs en bordure étaient déjà en floraison femelle. Il y avait quelques maïs atteints du charbon du maïs, environ 2-3 par ligne par parcelle. Les adventices présentes étaient la camomille, la prêle des champs et le chénopode blanc. Cependant, il y en avait très peu dans les sous-semis comparé à ceux présents dans les témoins.

Le 8 août 2018, les épis ont gonflés et les grains sortent des spathes. Quelques oiseaux sont déjà venus manger les grains mûrs. Suite à l'orage survenu le 7 août 2018, on remarque des coulées de boues au bas des pentes de l'essai 2 et quelques maïs couchés ou arrachés par l'orage. Le 14 août 2018, le maïs semblait déjà très mur.

C. Calendrier du mémoire

Date	Action
24-avr-18	Passage à la herse rotative
25-avr-18	Semis
7-juin-18	Désherbage chimique
29-juin-18	Mesure de la couverture du sol par les sous-semis et de la hauteur du maïs
3-juil-18	Mesure du recouvrement des interlignes avec le LAI-2200
5-juil-18	Relevé des eaux de ruissellement dans l'essai 2
Du 5-juil-2018 au 14-juil-2018	Passages fréquents pour détecter les floraisons mâle et femelle
10-juil-18	Mesure de la couverture du sol par les sous-semis et de la hauteur du maïs
23-juil-18	Mesure de la couverture du sol par les sous-semis, de la hauteur du maïs et tentative de mesure du recouvrement des interlignes avec le LAI2200
8-août-18	Mesure de la couverture du sol par les sous-semis
13-août-18	Relevé des eaux de ruissellement dans l'essai 2
28-août-18	Mesure de la couverture du sol par les sous-semis
5-sept-18	Récolte des 5 épis de maïs par parcelle
6-sept-18	Récolte du maïs
Du 5-sept-2018 au 7-sept-2018	Comptage du nombre de rangs par épi et du nombre de grain par rang
7-sept-18	Egrainage des épis et mesure du poids frais
10-sept-18	Mise des grains en chambre froide
Du 21-sept-2018 au 24-sept-2018	Mise à l'étuve pour 72h des grains
21-sept-18	Mesure de la couverture du sol par les sous-semis
24-sept-18	Relevé des eaux de ruissellement dans l'essai 2
11-oct-18	Mesure de la couverture du sol par les sous-semis
22-oct-18	Nettoyage des grains avec la trieuse à ventilation chez Ecosem
23-oct-18	Mesure de la couverture du sol par les sous-semis
31-oct-18	Relevé des eaux de ruissellement dans l'essai 2
14-nov-18	Carottage de sol sur la parcelle 1B + relevé des eaux de ruissellement dans l'essai 2
15-nov-18	Mesure de la couverture du sol par les sous-semis
7-déc-18	Relevé des eaux de ruissellement dans l'essai 2
4-janv-19	Relevé des eaux de ruissellement dans l'essai 2
17-janv-19	Relevé des eaux de ruissellement dans l'essai 2
13-févr-19	Relevé des eaux de ruissellement dans l'essai 2
27-févr-19	Carottage de sol sur la parcelle 1B
8-mars-19	Relevé des eaux de ruissellement dans l'essai 2
11-mars-19	Relevé des eaux de ruissellement dans l'essai 2
4-avr-19	Destruction du sous-semis à l'aide de la déchaumeuse Disc roller

D. Code SAS

```
PROC IMPORT DATAFILE="Z:\memoire\Donnees\MEF essai1et2.xlsx"
OUT=VEM_SOUSSEMIS DBMS=xlsx  REPLACE ;
      Getnames =  YES;
      datarow= 2 ;
      RUN ;

ODS GRAPHICS ON ;
 PROC MIXED data= VEM_SOUSSEMIS PLOTS = studentpanel;
 CLASS densite1 espece bloc;
 MODEL x = espece densite1(espece) ;
RANDOM bloc ;
 WHERE essai = 1 ;
 LSMEANS espece / CL ADJUST = TUKEY ;
LSMEANS densite1(espece) / CL ADJUST = TUKEY ;
RUN;
ODS GRAPHICS OFF ;

PROC FORMAT ;
VALUE traitement 1 = "C"
                 2 = "Tw 2kg/ha"
                 3 = "Tw 4kg/ha"
                 4  = "Tm 2kg/ha"
                 5 = "Tm 4kg/ha"
                 6 = "Tt 2kg/ha"
                 7 = "Tt 4kg/ha"
                 8 = "Fm 5kg/ha"
                 9 = "Fm 7kg/ha"
                 10 = "Fb 5kg/ha"
                 11 = "Fb 7kg/ha"
                 0 = "C"
                 12 = "Tw 3kg/ha"
                 13 = "Tw 6kg/ha"
                 14  = "Tm 3kg/ha"
                 15 = "Tm 6kg/ha"
                 16 = "Tt 3kg/ha"
                 17 = "Tt 6kg/ha"
                 18 = "Fm 8kg/ha"
                 19 = "Fm 13kg/ha"
                 20 = "Fb 8kg/ha"
                 21 = "Fb 13kg/ha";

RUN;


ODS GRAPHICS ON ;
 PROC MIXED data= VEM_SOUSSEMIS PLOTS = studentpanel;
 CLASS traitement bloc;
 MODEL x = traitement ;
RANDOM bloc ;
 WHERE essai = y ;
 LSMEANS traitement / CL ADJUST = TUKEY ;
ODS OUTPUT lsmeans = lsmeanshaut1;
RUN;
ODS GRAPHICS OFF ;


 PROC SGPLOT DATA = lsmeanshaut1;
 TITLE HEIGHT = 1.4 j= center "titre ";
```

```
  VBARPARM RESPONSE = Estimate CATEGORY = traitement / GROUPDISPLAY =
CLUSTER LIMITLOWER = Lower LIMITUPPER = Upper;
  FORMAT traitement traitement. ;
XAXIS LABEL = "Objet" labelattrs=(size=12 ) valueattrs=(size=11
style=NORMAL )FITPOLICY = SPLIT ;
YAXIS LABEL=" z [ ]" labelattrs=(size=12 ) valueattrs=(size=12 style=NORMAL
);
RUN;
```

E. Carte des pertes en sol moyennes en Europe

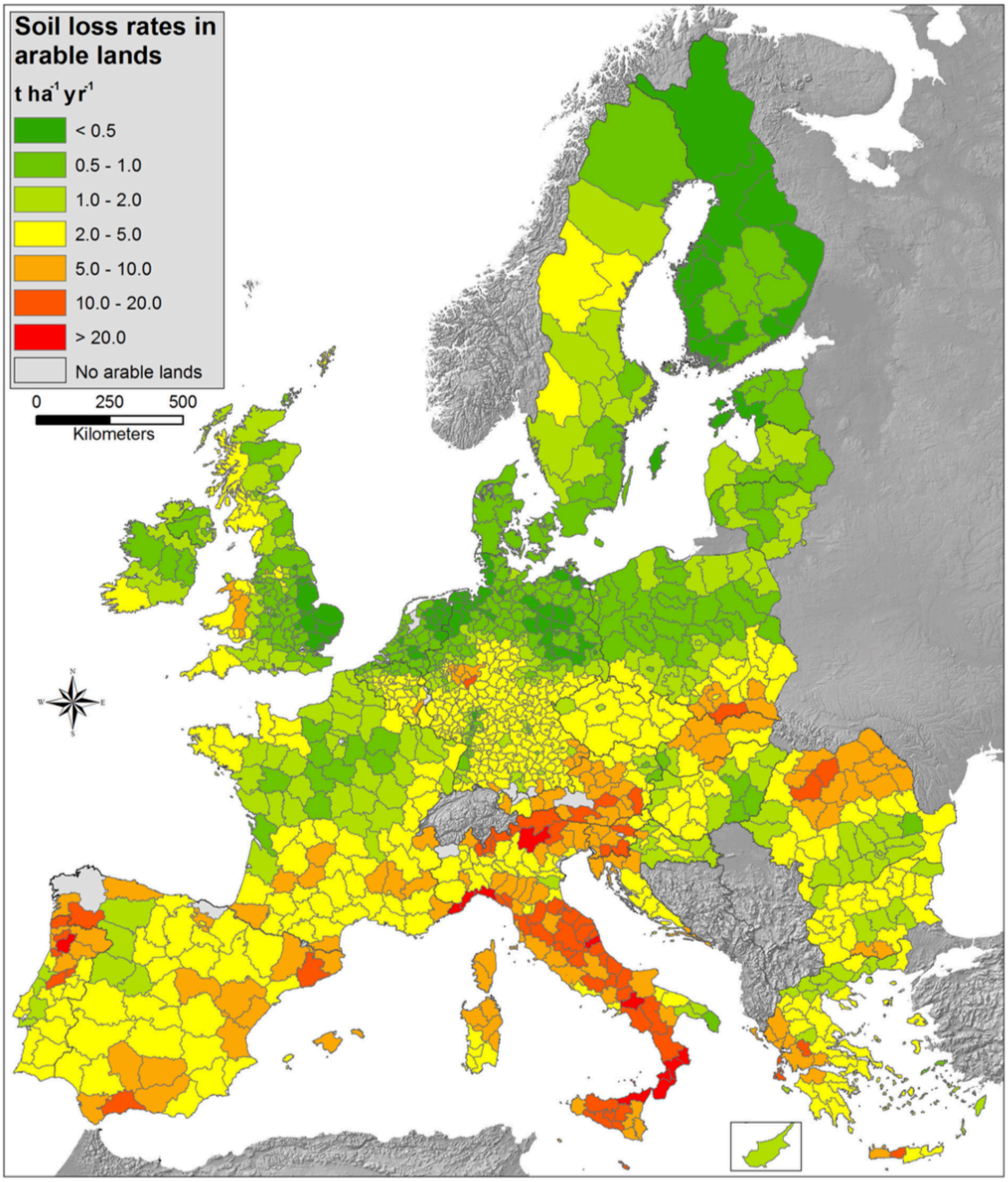


Fig. 4. Mean soil loss rates at province (NUTS3) level for arable lands in the EU.

Source : Panagos et al, 2015.

F. Résultats similaires dans la littérature

Mean annual values	Bare ground	Soil protected with mosquito-gauze
Soil loss (t/ha per year)	127	1
Runoff (mm)	271	21
Runoff as % rainfall	32.2	2.5

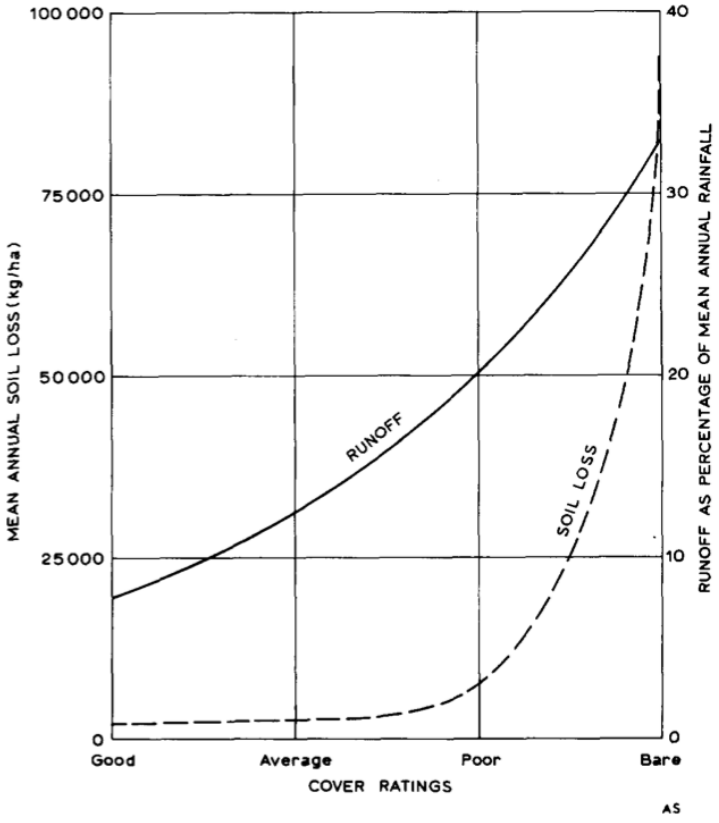


Fig.1. Runoff and soil loss on arable land for different crop-cover values. For sandy-clay loam on 4.5% slopes, average of five years. Good cover rating corresponds to high-density maize, average to medium-density maize and poor to late planted legumes.

Source : Elwell et Stocking, 1976

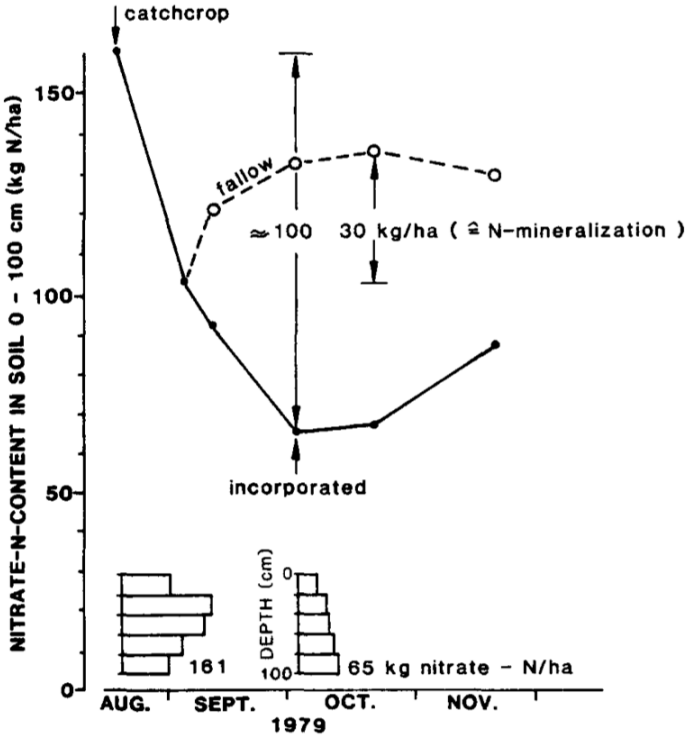
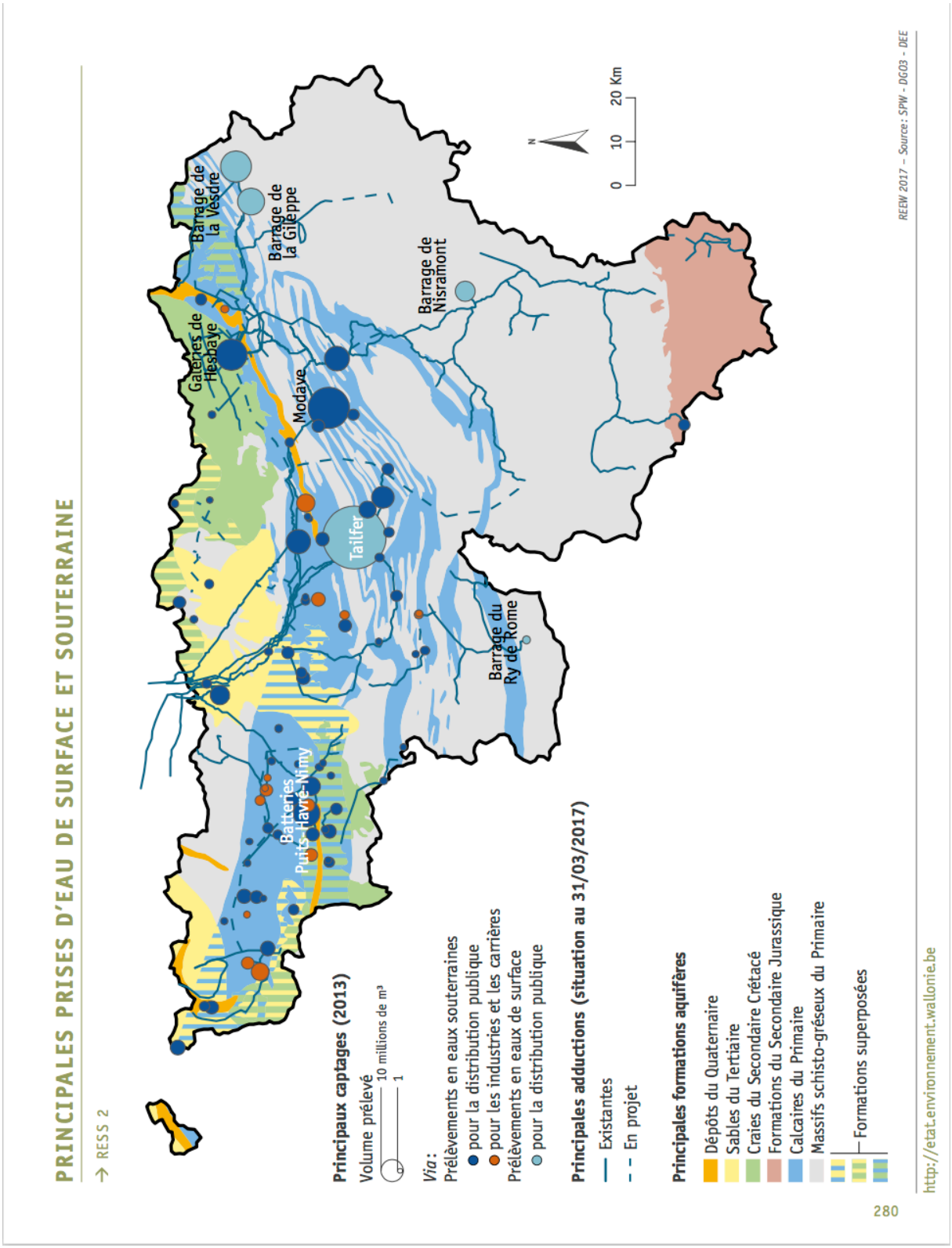


Fig. 10. Decrease of nitrate N content of the soil under a catch crop (*Raphanus sativus*) after harvest of potatoes; silty sand soil; (- - -) N mineralization at a fallow plot (Molitor, 1982; Wehrmann and Scharpf, 1983).

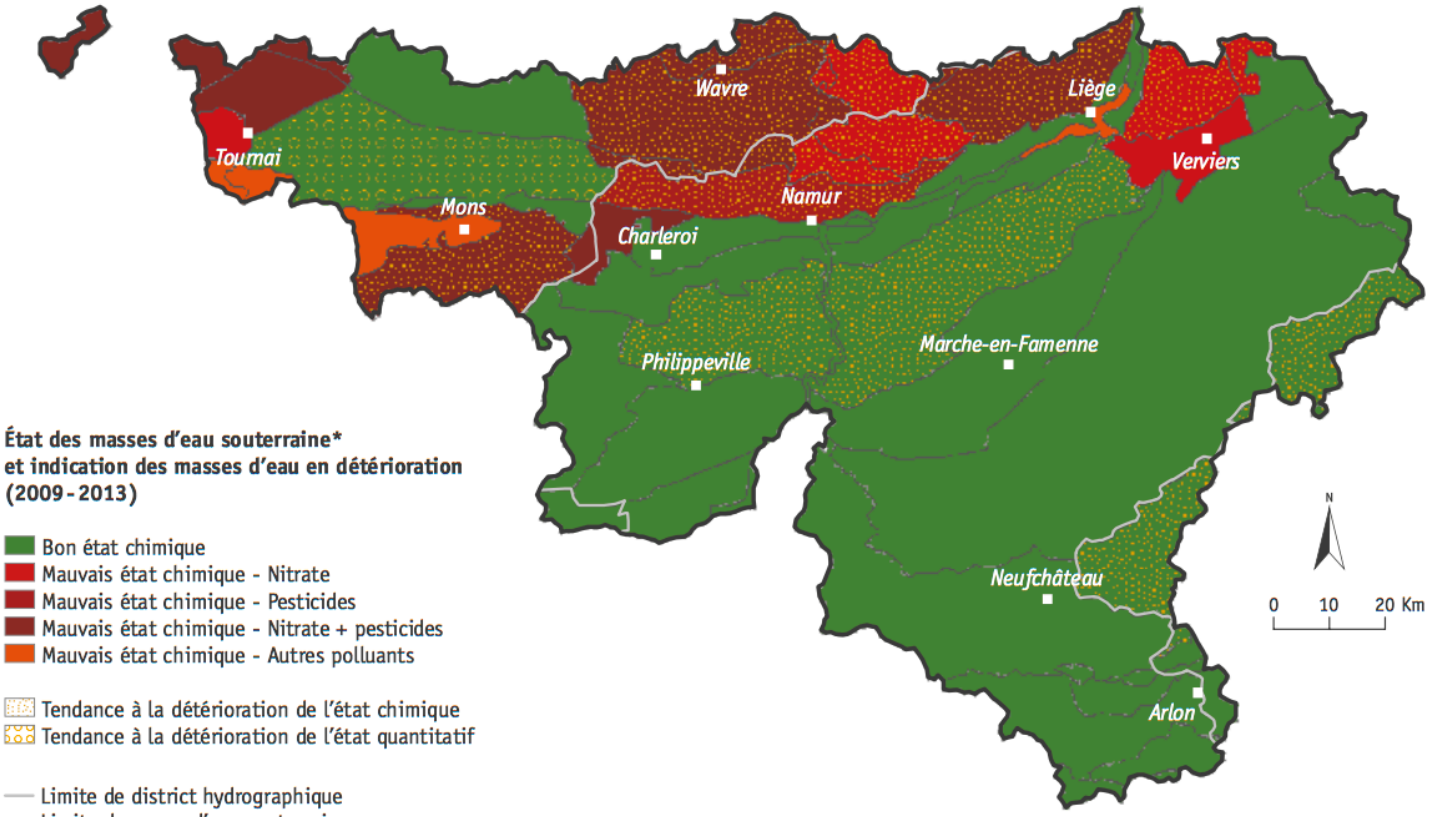
Source : Strebel et al, 1989

G. Etat de l'environnement en Wallonie (source : Thysebaert et al)



ÉTAT DES MASSES D'EAU SOUTERRAINE

→ EAU 1



294

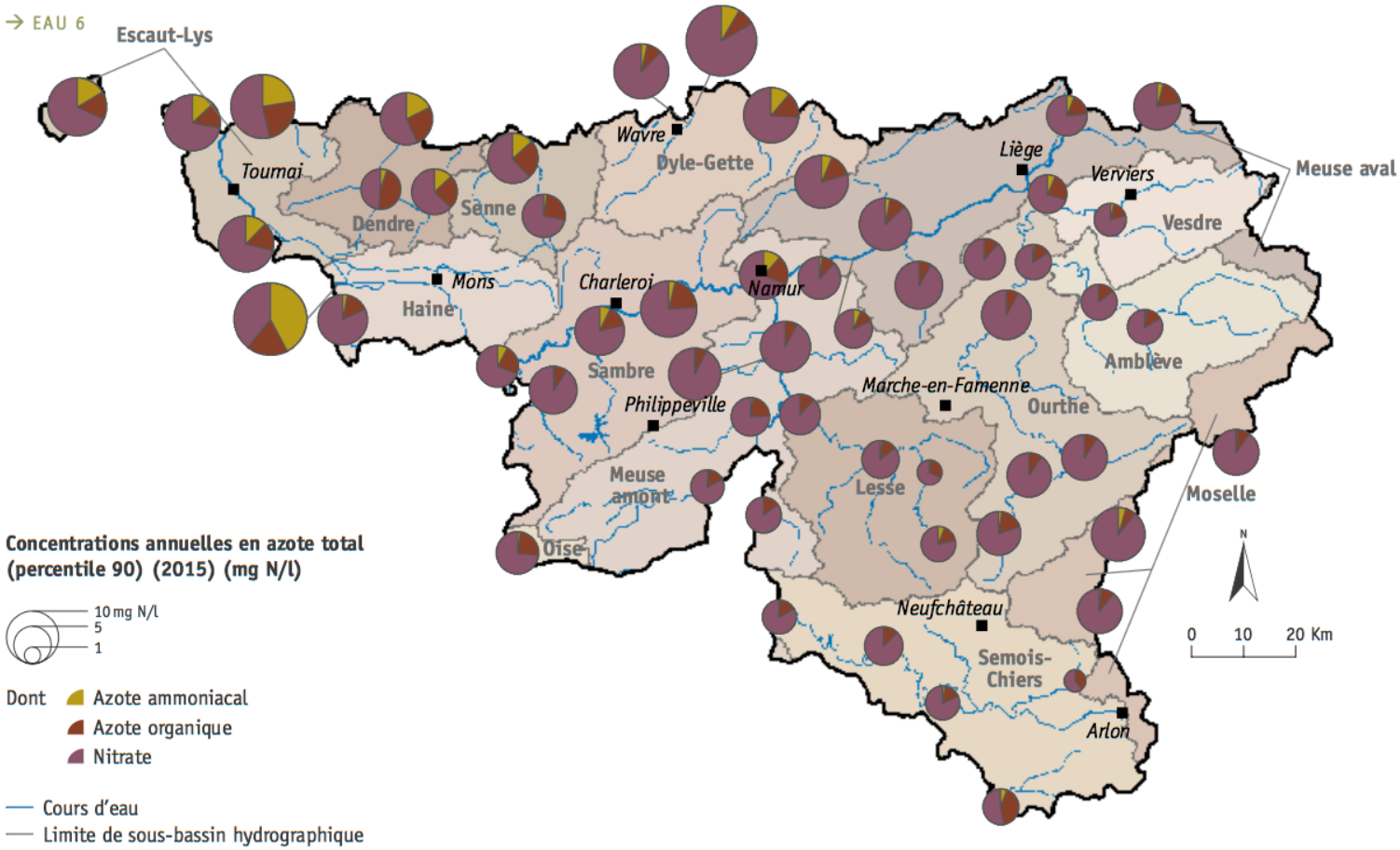
** État qui tient compte à la fois de l'état chimique et de l'état quantitatif de la masse d'eau (directive 2000/60/CE). Toutes les masses d'eau présentent un bon état quantitatif.*

REEW 2017 – Source: SPW - DGO3 - DEE

http://etat.environnement.wallonie.be

ÉTAT DES COURS D'EAU SELON LA CONCENTRATION EN MATIÈRES AZOTÉES

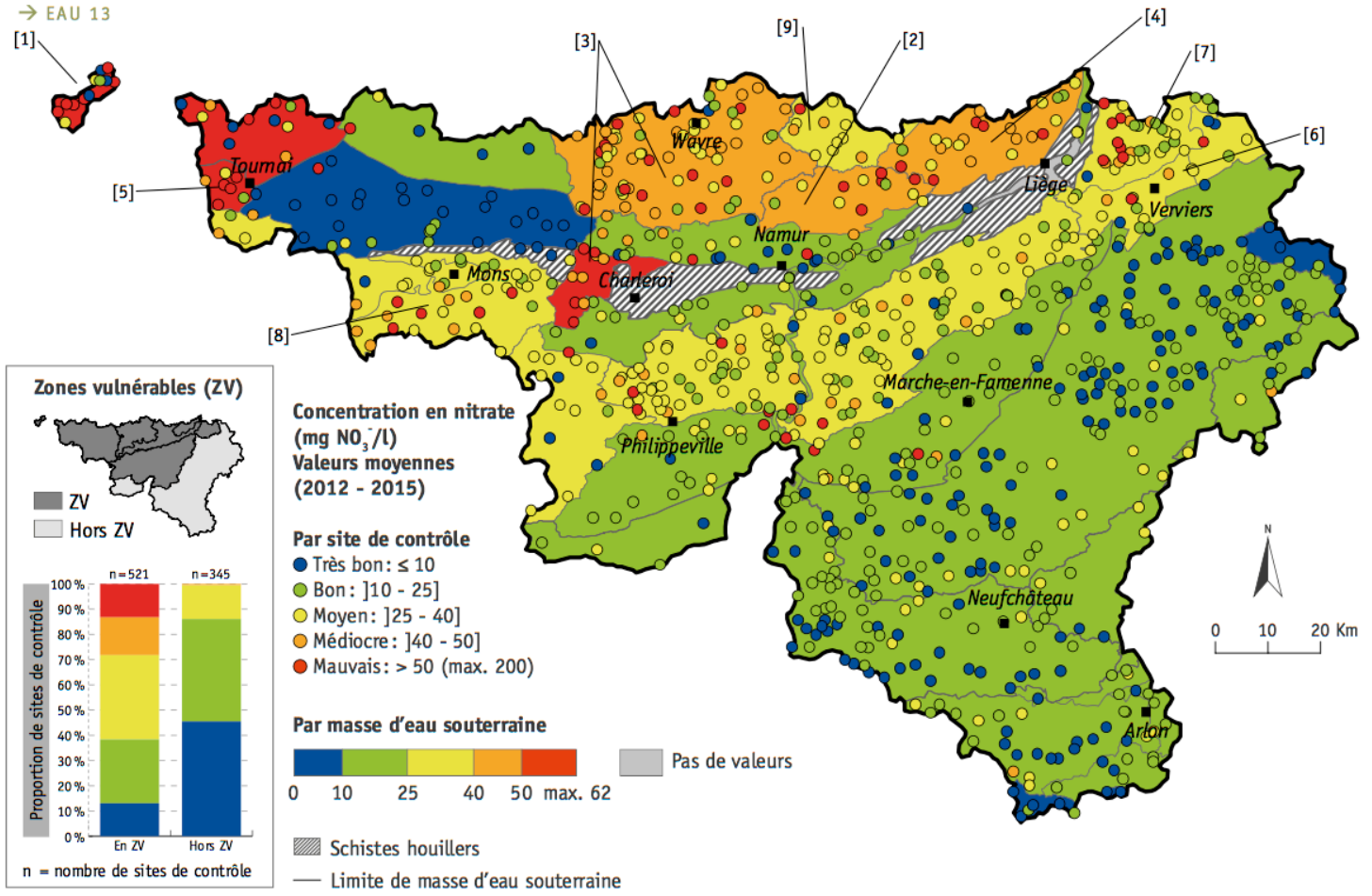
→ EAU 6



REEW 2017 – Source: SPW - DGO3 - DEE (base de données AQUAPHYC)

ÉTAT DES EAUX SOUTERRAINES SELON LA CONCENTRATION EN NITRATE

→ EAU 13



Masses d'eau souterraines ([NO_3^-] > 30 mg/l)

[1] Sables du Thanétien des Flandres (Comines-Wameton) [2] Sables et Craies de la Mehaigne [3] Sables du Bruxellien [4] Crétacé du Geer
[5] Craies de la vallée de la Deûle [6] Calcaires et Grès de la Vesdre [7] Crétacé du Pays de Herve [8] Craies de la Haine [9] Sables du Landénien

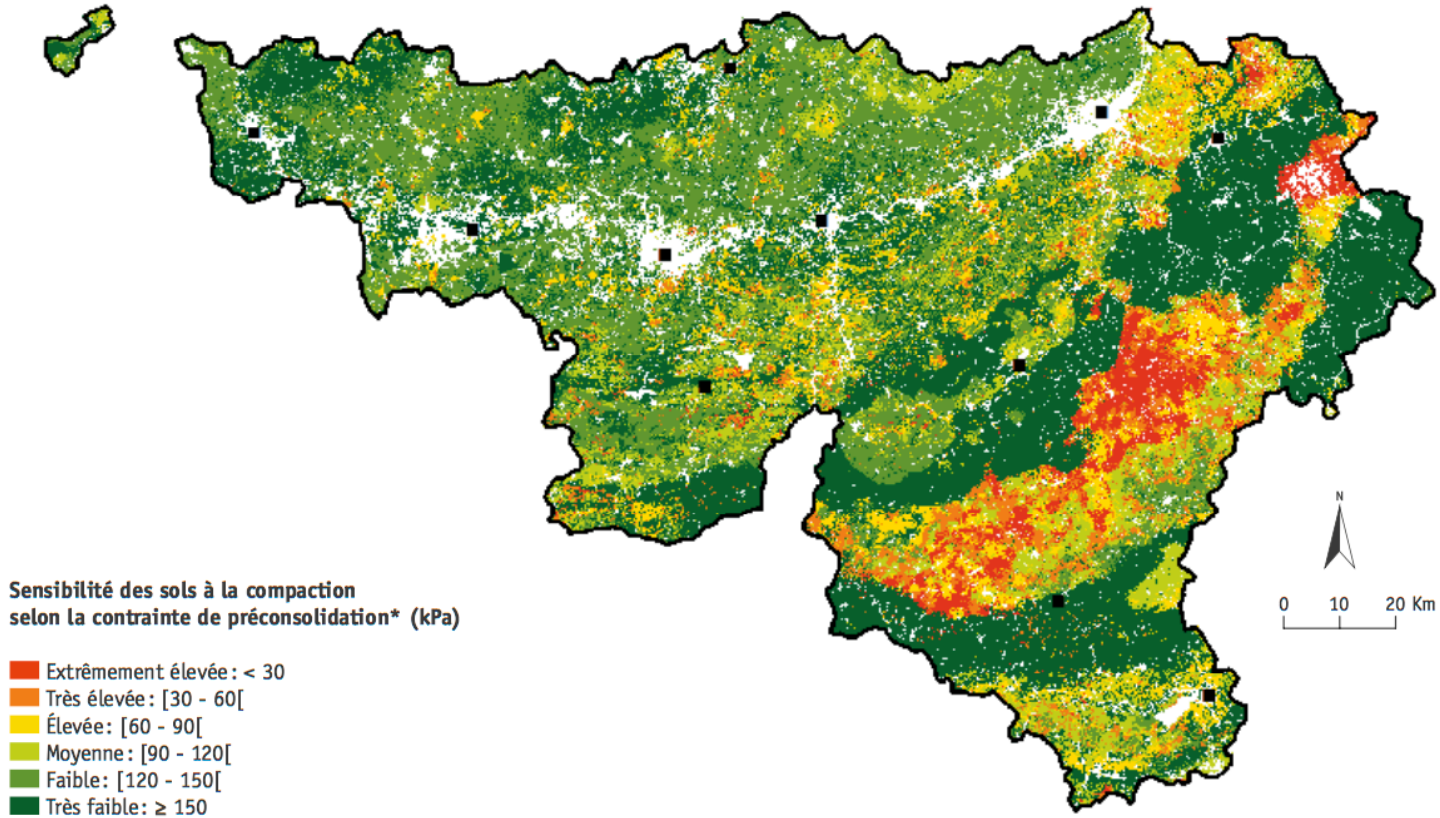
304

REEW 2017 – Source: SPW - DGO3 - DEE (base de données CALYPSO - survey nitrate)

http://etat.environnement.wallonie.be

SENSIBILITÉ DES SOLS À LA COMPACTION

→ SOLS Focus 2



** Contrainte de préconsolidation moyenne à 40 cm de profondeur à pF 2,5, estimée sur base des propriétés du sol en tenant compte de la charge caillouteuse (ULg-GxABT, 2013a)*
La sensibilité des sols à la compaction est d'autant plus élevée que les valeurs de contrainte de préconsolidation sont faibles.

REEW 2017 – Source : ULg-GxABT

Protection des eaux et du sol dans une culture de maïs ensilage à l'aide d'un couvert végétal associé

Présenté par Nadège Meister

Les risques d'érosion, de ruissellement et de lixiviation de l'azote auxquels les exploitations agricoles sont confrontées peuvent mener à la dégradation des sols et de la qualité des eaux souterraines et de surface. La culture de maïs est particulièrement exposée à ces risques puisqu'il s'agit d'une culture à grands interlignes qui couvre peu le sol. Or il s'agit d'une culture très répandue au niveau mondial, mais aussi au niveau wallon où il est cultivé pour l'ensilage, sur des sols majoritairement pentus et limoneux.

L'objectif général du mémoire est d'étudier l'efficacité de différentes cultures de couverture associées contre l'érosion, le ruissellement et la lixiviation de l'azote mais aussi sur la productivité et la qualité du maïs ensilage. En effet, l'adoption d'une telle pratique par les agriculteurs ne sera possible que si elle assure une rentabilité économique.

Deux essais ont été réalisés pour atteindre cet objectif. Il y avait un essai subdivisé en deux sous-essais où les parcelles étaient semées avec trois variétés de trèfle blanc et deux variétés de fétuque rouge. La différence entre ces deux sous-essais résidait dans la méthode de semis du maïs et des couverts végétaux et la densité de semis des cultures de couverture. Le deuxième essai était réalisé en pente, où le maïs était semé dans le sens de la pente avec une culture associée de trèfle blanc et une de fétuque rouge. Tous les essais comportaient trois répétitions.

Les résultats montrent que la productivité et la qualité du maïs sont peu affectées par les sous-semis et leur densité de semis sauf en cas de stress hydrique. La lixiviation, l'érosion et le ruissellement étaient moindre pour les couvertures du sol avec le trèfle, mais aucune distinction n'était à déceler entre les différentes variétés et de même pour la couverture du sol. Les mesures de pH, de carbone organique et d'azote total ont également été corrélées avec le type de couvert végétal. De manière générale, la densité de semis pour une même variété n'affectait pas significativement les résultats. Les résultats obtenus dans ce mémoire sont à corréler avec la sécherresse de l'été 2018. C'est pourquoi, en plus de prendre en compte cet évènement, les résultats seront comparés avec d'autres études réalisées dans des conditions similaires et différentes.

La diversification du type de mesures effectuées sur ce genre d'essai semble être intéressante puisque le sol cache de nombreuses ressources. Enfin, les perspectives d'une telle étude sont nombreuses au vu des enjeux climatiques, sociaux et économiques actuels.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Faculté des bioingénieurs
Croix du Sud, 2 bte L7.05.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | **www.uclouvain.be/agro**