

Association culturelle maïs-trèfle

Présenté par Titouan le Bussy

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

Lecteurs : Prof. Xavier Draye (UCL/ELI/ELIA)
Monsieur Gilles Manssens (CIPF)

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

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement mon promoteur, Pierre Bertin, pour m'avoir donné l'opportunité de faire un mémoire aussi enrichissant. Je le remercie aussi pour ses conseils avisés et tout l'aide qu'il m'a apporté. Je tiens également à tout aussi chaleureusement remercier mes deux lecteurs, Xavier Draye et Gilles Manssens, pour avoir pris beaucoup de temps pour m'aider et me conseiller tout au long de mon travail. Merci aussi à Thibaut Thyron pour son aide à propos du LAI-2200. En outre, je remercie le CIPF ainsi que tous ces collaborateurs pour leur aide matériel et logistique. Finalement, je tiens à remercier ma famille et mes proches pour leur soutien.

Table des matières

1. <u>Introduction</u>	p.6
2. <u>Etat de l'art</u>	p.7
2.1. <u>Problématique de la dégradation des sols cultivés</u>	p.7
2.1.1. Principes et mécanismes	p.7
2.1.2. Effets des couverts végétaux	p.12
2.1.3. Cas problématique de la culture de maïs	p.16
2.2. <u>Le sous-semis : une solution plausible ?</u>	p.17
2.2.1. Concept des cultures associés	p.17
2.2.2. Objectifs et fonctionnement du sous-semis	p.20
2.2.3. Variantes dans les sous-semis	p.22
2.3. <u>Cohabitation des espèces sur la parcelle</u>	p.24
2.3.1. Base d'écophysiologie du maïs	p.24
2.3.2. Base d'écophysiologie du trèfle blanc	p.25
2.3.3. Base d'écophysiologie du trèfle blanc nain	p.25
2.3.4. Base d'écophysiologie du lotier corniculé	p.25
2.3.5. Base d'écophysiologie de la fétuque rouge	p.26
2.3.6. Comparaison et hypothèses sur la cohabitation	p.26
2.4. <u>Objectifs</u>	p.27
3. <u>Matériel et méthode</u>	p.28
3.1. <u>Plan de l'expérience</u>	p.28
3.2. <u>Gestion et itinéraire technique des parcelles</u>	p.30
3.3. <u>Mesures réalisées</u>	p.31
3.3.1. Comptage de l'émergence	p.31
3.3.2. Surface foliaire effective	p.31
3.3.3. Mesures directes sur les plants de maïs	p.34
3.3.4. Teneur en eau du sol	p.35
3.3.5. LAI de la culture	p.37

3.3.6.	Rendement ensilage de la culture	p.40
3.3.7.	Analyses de sol	p.41
3.3.8.	Valeur alimentaire du maïs ensilage récolté	p.42
3.3.9.	Méthode statistique	p.43
4.	<u>Résultats</u>	p.44
4.1.	<u>Comptage de l'émergence</u>	p.44
4.2.	<u>Surface foliaire effective du sous-semis</u>	p.45
4.2.1.	Durant la culture du maïs	p.45
4.2.2.	Après la récolte du maïs	p.48
4.3.	<u>Surface foliaire effective de la culture de maïs</u>	p.54
4.4.	<u>Mesures directes sur les plants de maïs</u>	p.56
4.4.1.	Nombre de feuilles	p.56
4.4.2.	Hauteur du plant	p.59
4.4.3.	Longueur de la plus grande feuille du plant de maïs	p.61
4.4.4.	Largeur de la plus grande feuille du plant de maïs	p.63
4.5.	<u>LAI de la culture de maïs</u>	p.65
4.6.	<u>Rendement ensilage de la culture de maïs</u>	p.68
4.7.	<u>Teneur en eau du sol</u>	p.69
4.8.	<u>Analyses de sol</u>	p.70
4.8.1.	pH KCl	p.70
4.8.2.	Carbone organique	p.71
4.8.3.	Humus	p.72
4.8.4.	Azote total	p.73
4.8.5.	Matière sèche	p.74
4.8.6.	Nitrates	p.76
4.9.	<u>Valeur alimentaire du maïs ensilage récolté</u>	p.79

5. <u>Discussion</u>	p.81
5.1. <u>Préambule sur l'émergence</u>	p.81
5.2. <u>Sous-semis avec le meilleur potentiel de couverture</u>	p.81
5.3. <u>Influence des sous-semis sur la culture de maïs</u>	p.83
5.3.1. Développement et croissance	p.83
5.3.2. Rendement	p.85
5.3.3. Valeurs alimentaires	p.85
5.4. <u>Influence des sous-semis sur les paramètres du sol</u>	p.86
5.4.1. pH	p.86
5.4.2. Carbone organique et humus	p.86
5.4.3. Teneur en eau du sol et matière sèche	p.86
5.4.4. Azote total	p.87
5.4.5. Nitrates	p.87
5.5. <u>Critiques et perspective</u>	p.89
6. <u>Conclusion</u>	p.92
7. <u>Bibliographie</u>	p.93
8. <u>Annexes</u>	p.98

1. Introduction

On le sait, les coulées de boues font souvent la une de l'actualité durant le printemps et l'automne lorsque des orages surviennent ("Coulées de boue après les orages : les agriculteurs de l'Oise sont-ils responsables ? - Le Parisien," n.d.). Lorsque vient le moment de compter les dégâts, un responsable est souvent rapidement trouvé et pointé du doigt : le cultivateur de maïs. Effectivement, il est reconnu par la communauté scientifique (Cerdan et al., 2010) et le grand public ("Coulées de boues — Site de Genappe," n.d.) que la culture de maïs ainsi que la plupart des cultures sarclées de printemps sont sensibles à l'érosion des sols et au ruissellement. Or, le maïs est une culture très importante dans nos régions, notamment pour nourrir le bétail, pour produire de l'amidon à destination industrielle et pour produire du bio-éthanol (Renoux, 2014). Etant donné qu'il serait impensable d'abandonner cette culture purement et simplement, il est donc impératif de modifier les pratiques culturales conventionnelles actuellement en vigueur dans la plupart des fermes pour réduire l'impact négatif des cultures de maïs sur l'érosion des sols cultivés. C'est pour cette raison que nous avons décidé d'étudier le semis de couverts sous le maïs, technique qui pourrait protéger le sol de l'érosion durant les périodes sensibles.

Dans ce travail, nous allons tout d'abord aborder les aspects théoriques qui sont nécessaires à la compréhension de l'étude réalisée. Ensuite, nous énoncerons expériences réalisées et détaillerons les méthodes employées pour obtenir les résultats. Après cela, nous vous présenterons les résultats des dites expériences ainsi que leurs analyses statistiques. Enfin, nous discuterons de ces résultats et nous tenterons de les interpréter.

2. Etat de l'art

2.1. Problématique de la dégradation des sols cultivés

2.1.1. Principes et mécanismes

Les sols cultivés subissent de nombreuses contraintes dont sont épargnées les milieux non cultivés. Ces contraintes sont majoritairement dues à la forte anthropisation des terres de cultures. Parmi ces contraintes, deux sont particulièrement mises en cause dans la dégradation des sols cultivés : le travail intensif du sol et la faible couverture des parcelles. Par leur action, ils vont principalement jouer sur deux mécanismes de dégradation : l'altération de la structure du sol et l'érosion. Dans un premier temps, nous allons expliquer dans le détail ces mécanismes ainsi que les différents facteurs impliqués et, dans un second temps, quels rôles jouent spécifiquement ces phénomènes cultureux dans ces mécanismes en guise de conclusion.

2.1.1.1. L'altération de la structure du sol

La structure du sol se définit comme l'hétérogénéité spatiale des différentes composantes ou des propriétés du sol (Dexter, 1988). Pour simplifier, il s'agit donc de l'agencement de la phase solide au sein des différents horizons du sol. Par opposition, l'agencement du vide au sein des différents horizons pédologiques s'appelle **la porosité**. Une bonne porosité est importante car elle influence l'aération du sol, sa capacité au champ, sa conductivité hydrique ainsi que sa résistance mécanique à la pénétration des racines. Par conséquent, elle a une influence majeure sur la croissance des cultures et sur la vie du sol.

La porosité a deux origines : la porosité texturale ainsi que la porosité structurale (Lal et al., 1997). La première ne dépend que de la texture du sol (proportion de sable, de limon et d'argile) et reste donc invariable dans le temps. La seconde, quant à elle, peut être modifiée considérablement par de nombreux facteurs qui sont les suivants :

- **Le travail du sol.** Par leur action de fibration et de cisaillement, les outils de travail du sol vont fragmenter les agrégats et ainsi diminuer la densité du sol. Cette action est avantagée lorsque le sol est sec. En revanche, lorsque le sol est travaillé alors qu'il est fortement humide (teneur en eau > capacité au champ), il provoquera la défloculation

(rupture de l'agglomérat de colloïdes) des particules d'argile. Cela provoquera la formation de couches de sol dense avec une faible perméabilité, appelée semelle. Ce phénomène est plus grave en cas de labour car cette semelle (de labour) formée est continue et parallèle à la surface, limitant ainsi considérablement la conductivité hydrique du sol (Pagliai et al., 2004) (White, 2006).

- **Le tassement.** Le passage répété des engins agricoles sur les parcelles cultivées exerce une pression non négligeable à la surface du sol qui occasionne une compaction des horizons supérieurs. Cette compaction est proportionnelle au poids de l'engin et inversement proportionnelle à la surface d'appui au sol. Enfin, la compaction est aggravée si le passage se fait lorsque le sol est saturé (Soane and van OUWERKERK, 1994).
- **Le taux de matière organique.** La matière organique a un effet très important sur la stabilité structurale du sol. En effet, la matière organique a tendance à se lier aux argiles du sol grâce à des cations (Fe^{++} , Al^{3+} , Ca^{++} , ...) présents dans le sol et qui font office de ciment. Ce complexe argilo-humique favorise la formation d'agrégats stables et ainsi la formation de porosité (Oades, 1984). De plus, étant donné que la matière organique est une source de nutriments pour la faune et la flore du sol, elle est donc indispensable à sa biodiversité (Last, 1987). Sinon, le taux de matière organique dépend de beaucoup de facteurs. Tout d'abord, il diminue avec une pratique intensive du labour qui sa vitesse de dégradation par fragmentation (Poeplau and Don, 2015). Par ailleurs, il diminue également avec l'indice de récolte car plus la part récoltée de la culture est grande, plus celle qui restera au champ sera faible. En outre, l'utilisation de couverts d'interculture augmente le taux de matière organique (Ding et al., 2006). Enfin, la nature même de la matière organique influence sa dégradabilité. En effet, une matière organique riche en cellulose est peu dégradable alors qu'une matière organique riche en azote et rapidement dégradable (Pousset, 2015).
- **L'action de la faune et de la flore du sol.** De nombreux organismes du sol s'y déplacent à travers des galeries qu'ils creusent. Ces galeries ont l'avantage d'être macroporeuses (diamètre > 50nm) et d'être connectées entre elles, ce qui facilite grandement la circulation de l'eau entre les horizons, ainsi que le passage des racines. A son tour, l'action mécanique de la pénétration des racines des végétaux provoque le même

phénomène, s'additionnant ainsi à l'action de la faune éphémère (Edwards and Lofty, 1977) (Edwards, 1983) (Lee, 1985).

- Pour finir, **la fissuration climatique**. Le climat peut exercer une contrainte mécanique sur le sol grâce à la succession pluie/dessèchement et gel/dégel qui provoque le gonflement et le retrait successif du sol qui se fissure par cette action. Les sols riches en argile sont plus sensibles à la succession pluie/dessèchement alors que le labour expose plus le sol au cycle gel/dégel (Stengel and Bourlet, 1987).

2.1.1.2. L'érosion

L'érosion se définit comme le déplacement de constituants du sol sous l'action de forces naturelles et anthropiques (Girard, 2011). Ce déplacement, plus important dans les régions tropicales et subtropicales que dans les régions tempérées, peut causer de gros problèmes de fertilité sur les sols vulnérables ou particulièrement exposés. C'est pour cela qu'il est très important de s'en prémunir le plus possible. Deux agents sont majoritairement mis en causes dans ce phénomène : **l'eau et le vent**. Dans nos régions, le premier a plus d'importance que le second. Ici, nous allons les aborder un par un, en expliquant leur mécanisme d'action et en identifiant les principaux facteurs qui influencent leur importance.

- L'eau

L'eau érode le sol de deux manières distinctes : par la battance et le ruissellement. **La battance** se produit lorsque les gouttes de pluies frappent le sol. Au moment de l'impact, la goutte va transmettre son énergie cinétique au sol ce qui va provoquer deux phénomènes : la pulvérisation des particules fines dans l'air et la micro compaction de la surface du sol sur la zone d'impact. Le premier occasionne de l'érosion proprement dite alors que le second provoque la formation d'une croûte imperméable qui favorisera le ruissellement (Nearing et al., 1987). **Le ruissellement**, justement, se produit soit lorsque la capacité d'infiltration du sol est insuffisante, selon le degré de compaction du sol et son état de saturation. Dans un cas ou dans l'autre, l'eau qui arrive sur la parcelle ne peut plus s'y infiltrer. Il se forme alors un film d'eau à la surface du sol qui va s'écouler de manière gravitaire. Par la mise en suspension des plus petites particules et l'arrachage des plus grosses grâce à son énergie cinétique, l'eau ruisselante va entraîner des particules de sol vers l'aval du bassin versant.

La gravité de l'érosion hydrique est influencée par les facteurs suivant :

- **L'érosivité de la pluie** qui est directement lié à l'intensité de la pluie. De ce fait, elle dépend de la quantité d'eau tombée et de l'énergie cinétique des gouttes (Hudson, 1995).
 - **L'érodibilité de la terre.** Celle-ci dépend de la stabilité structurale qui est un indicateur de la cohésion des agrégats et de leur résistance à la dégradation. Cette stabilité dépend de la texture du sol et de la teneur en matière organique (Bissonnais and Arrouays, 1997) (Bissonnais, 1996).
 - **La couverture du sol.** Une couverture du sol par de la végétation et/ou de la litière protège la surface du sol contre les impacts des gouttes et freine le ruissellement de l'eau en surface, limitant ainsi l'érosion (Dabney et al., 2001) (Girard, 2011).
 - Pour finir, **le relief** qui dépend de la pente, de la longueur de la pente, de la rugosité du terrain et de l'orientation du travail du sol (Renard et al., 1997).
- Le vent

L'érosion éolienne est provoquée par deux facteurs : la vitesse du vent et la rugosité du terrain. En effet, lorsque le vent souffle à la surface du sol, ce dernier est freiné par la rugosité du terrain, augmentant ainsi la force de trainée. Cette trainée donnera alors une vitesse verticale à l'air circulant qui accélérera au fur et à mesure qu'il s'éloigne du sol. Cette brutale prise de vitesse verticale va alors entraîner des particules dans l'air. Le destin de ces particules dépend de leur taille :

- Pour les particules ayant un diamètre inférieur à 0,1 mm, leur suspension sera élevée et elles seront transportées sur de grandes distances.
- Pour les particules ayant un diamètre compris entre 0,1 et 1mm, leur transport se fait sur une moins longue distance et se fait par saltation. Lors de leur rebond, la transmission de leur énergie cinétique à l'impact peut provoquer le détachement d'autres particules, provoquant ainsi un effet boule de neige.
- Enfin, pour les particules ayant un diamètre supérieur à 1mm, la force du vent n'est souvent pas suffisante pour les faire entrer en suspension. Elle se déplacent donc en roulant.

Avant de finir, il est intéressant de dire qu'une bonne stabilité structurale et une rugosité très forte du terrain (diminution de la vitesse significative) diminue l'érosion éolienne (Hudson, 1995).

2.1.1.3. Conclusion

Après avoir vu en détail les mécanismes de l'altération de la structure et de l'érosion du sol, on peut identifier avec aisance les effets d'un travail intensif du sol et de sa faible couverture sur ceux-ci.

D'une part, on voit qu'un travail intensif du sol altère considérablement la structure du sol. En effet, la fragmentation des agrégats va augmenter la dégradation de la matière organique du sol ce qui va diminuer sa stabilité structurale. En outre, le tassement exercé par le passage d'engins lourds, la perturbation de la faune et la flore du sol et la formation de semelles vont également affecter négativement la structure du sol. Enfin, cette altération générale de la structure détériorera la capacité d'infiltration du sol et sa capacité au champ, favorisant ainsi l'érosion hydrique par ruissellement. D'autre part, la faible couverture du sol affectera significativement l'érosion du sol par l'absence de protection face à la battance et l'absence de ralentissement du ruissellement et du vent. Pour finir, dans le cas d'une couverture vivante, son absence soustraira au terrain sa capacité structurante du système racinaire.

2.1.2. Les effets couverts végétaux (Dabney et al., 2001)

Comme vu précédemment, le travail intensif et la faible couverture des sols cultivés aggravent fortement l'altération de la structure des sols ainsi que son érosion. Modifier les techniques culturales en vigueur actuellement devient donc indispensable pour maintenir la bonne santé des sols. Dans cette section, nous allons étudier plus spécifiquement les principaux avantages que peuvent nous procurer les couverts végétaux sur le sol mais aussi sur d'autres aspects de la phytotechnie en général.

2.1.2.1. Structure du sol

Comme nous l'avons évoqué auparavant, les couverts végétaux ont un effet positif sur la structure du sol. Premièrement, **l'action mécanique de pénétration des racines** dans le sol va favoriser la formation de galeries macroporeuses de longueur importante et interconnectées. La force de cette action dépendra du type d'espèces présents dans le couvert (racines pivotantes ou fasciculées), de la texture du sol, de sa compaction, de sa température et de son contenu en eau. Deuxièmement, les couverts augmentent le **taux de matière organique du sol** lors de leur destruction, ce qui va alors augmenter la stabilité structurale du sol. Cet effet est augmenté s'il est couplé avec un travail du sol superficiel. Enfin, troisièmement, **l'excrétion de mucilage et de polysaccharides** par les racines du couvert améliorera aussi l'agrégation des particules de sol.

2.1.2.2. Erosion

Comme nous l'avons vu précédemment, la présence d'une couverture végétale va significativement limiter l'érosion du terrain et ce par plusieurs mécanismes. Tout d'abord, **l'amélioration de la (macro)porosité** par l'enracinement améliore la capacité d'infiltration de l'eau ainsi que sa capacité au champ. Par conséquent, cela va limiter l'apparition d'une nappe d'eau de surface qui pourrait provoquer le ruissellement. En outre, le couvert peut faire **écran face aux gouttes de pluies** tombant sur le sol, diminuant ainsi leur énergie cinétique à l'impact et par la même occasion, le risque de battance. Enfin, le couvert **freinera également la circulation de l'eau ruisselante et du vent**, limitant du coup l'arrachage et la suspension (dans l'eau ou dans l'air) des particules de terre.

2.1.2.3. Cycle de l'azote

Initialement, les couverts végétaux ont été réintroduits après 1991 par la directive nitrate européenne dans l'objectif de **limiter le lessivage des nitrates**. En effet, après la récolte de la dernière culture avant l'hiver, les reliquats de nitrates encore présents dans le sol ne sont plus prélevés par la culture et ne sont pas retenus par le sol. De ce fait, ils seront lessivés par l'eau vers l'aval du bassin versant, provoquant une perte de fertilité de la parcelle et une pollution des cours d'eau et des nappes phréatiques. Cependant, si un couvert est planté après la dernière récolte, ce dernier pourra absorber et assimiler les reliquats d'azote, limitant ainsi leur lessivage. Le piégeage de l'azote par le couvert dépend de la disponibilité de l'azote du sol, du climat, des espèces du couvert, de la densité de semis, de la date du semis et de la date de destruction du couvert. En plus de son effet de piégeage, **le couvert peut augmenter la quantité d'azote du sol s'il est composé en partie de légumineuses**. En effet, les légumineuses font la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique. De plus, lors de la destruction du couvert, cela va créer une matière organique avec un rapport C/N faible rapidement dégradable dans le sol. Cela aura pour conséquence une libération rapide de l'azote fixé qui sera rapidement disponible pour la culture suivante. Enfin, concernant justement la libération de l'azote provenant du couvert, cette dernière dépend principalement des espèces le composant, de son taux de croissance, de sa date de destruction, de l'intensité de son incorporation et du climat.

2.1.2.4. Contrôle des adventices et des maladies

L'effet du couvert sur le contrôle des adventices et des maladies est **complexe**. Concernant le contrôle des adventices, **le couvert peut diminuer le développement des adventices** grâce à la compétition exercée sur les ressources (lumière, nutriments, eau ...), à la perturbation de la niche écologique (pH, population de la rhizosphère ...) ou encore grâce à la production de molécules phytotoxiques. L'importance de ces mécanismes dépend du type d'espèces composant le couvert, de la date de semis, de la densité de semis ainsi que de la date et de la méthode de destruction du couvert. En revanche, le couvert peut également **rendre le contrôle des adventices plus complexe** si le couvert empêche ou limite l'utilisation d'herbicide tout en ne supprimant pas suffisamment les adventices par les mécanismes énoncés ci-dessus. Concernant le contrôle des maladies et des ravageurs, si le couvert contient

des espèces sensibles à certains pathogènes qui affectent également les cultures principales, cela peut **entretenir l'inoculum** et aggraver l'état phytosanitaire de la parcelle. En revanche, ce problème peut être tourné à notre avantage si le couvert est détruit avant l'arrivée à maturité du pathogène. Le couvert sert alors de **piège au pathogène**. Enfin, l'implantation d'espèces attractives mais non sensible peuvent provoquer des **germinations suicide**.

2.1.2.5. Vie du sol

Les populations d'organismes du sol sont complexes et ont besoin d'un environnement riche, stable et continu pour pouvoir prospérer et avoir un **effet bénéfique sur les cycles biogéochimiques et sur la structure du sol** comme vu précédemment. Ainsi, une couverture permanente et complexe du sol offre aux organismes du sol autant d'habitats (rhizosphère) et de ressources (organiques et minérales). L'effet sur les populations de mycorhizes est particulièrement étudié depuis ces dernières années. Pour que cela fonctionne, l'utilisation des couverts doit, néanmoins, obligatoirement être couplé avec un travail du sol superficiel, voire nul.

2.1.2.6. Eau du sol

Comme vu plus haut, les couverts végétaux augmentent la capacité d'infiltration du sol ainsi que sa capacité au champ, **diminuant ainsi les problèmes de saturation**. Ce qui n'a pas été encore dit, cependant, c'est que les couverts **modifient l'évapotranspiration de la parcelle**. Si le couvert est vivant, sa transpiration va diminuer la teneur en eau du sol. En revanche, s'il est mort, ce dernier va limiter l'évaporation du sol en protégeant la surface du rayonnement. Une gestion réfléchie du couvert est donc recommandée en fonction du statut hydrique du sol et des exigences de la culture suivante.

2.1.2.7. Température du sol

Par sa transpiration, le couvert végétal va **diminuer la température des horizons superficiels** du sol. Cela peut être un avantage dans les régions très chaudes mais cela sera un inconvénient dans les régions plus froides car la croissance racinaire est favorisée par des chaleurs modérées.

2.1.2.8. Conclusion

A la vue de tout ce que nous venons d'évoquer, il semble évident qu'appliquer des techniques de conservations des sols tels que le travail superficiel et l'utilisation de couvert végétaux seraient donc bénéfique pour sa santé et sa fertilité. Néanmoins, insérer ces pratiques culturales n'est pas systématiquement une chose aisée dans toutes les rotations.

2.1.3. Cas problématique de la culture de maïs (Laloy and Biielders, 2010)

Le cas des cultures de maïs est particulier concernant la dégradation des sols cultivés car ce type de culture accumule beaucoup de facteurs qui favorisent l'altération de la structure du sol et son érosion. Dans cette petite section, ces différents facteurs seront énumérés.

Comme la plupart des cultures de printemps, le maïs est semé tard dans l'année (fin avril - début mai), laissant ainsi une **longue période d'interculture** avant le semis. Cette situation est aggravée dans le cas où la parcelle n'est pas couverte durant cette période, ce qui est souvent le cas en monoculture de maïs ensilage (puisque toute la plante est récoltée et qu'aucun résidu n'est laissé au champ). En outre, à cause de la largeur importante des inter-rangs (45 à 75cm) et de la relative faible croissance des parties aériennes au début de la culture, la fermeture complète de la canopée ne se produit pas avant la mi-juin. Tout cela a pour conséquence de **laisser le sol vulnérable tout le printemps**, période particulièrement sensible à l'érosion au vu des température et de l'humidité de cette période.

Une solution serait de planter un couvert après la culture précédente dans le but de couvrir et de protéger le sol lors de la période d'interculture mais là encore, la situation n'est pas si simple. En effet, la récolte du maïs se fait relativement tard durant l'année (début octobre). De ce fait, **il est donc difficile, voire impossible, d'implanter un couvert végétal** juste après la récolte car nous entrons dans une période où le climat n'est plus favorable à la germination et à la croissance de la plupart des espèces de couvert. Seules certaines espèces, telles que le ray-grass et le seigle, peuvent encore se développer durant cette période mais leur croissance (et donc leur potentiel de couverture) sera limitée. De plus, ces couverts ne sont pas gélifs et, pour des raisons phytotechniques, doivent être détruit relativement tôt pour obtenir une bonne décomposition avant le semis suivant limitant de ce fait encore d'avantage leur impact.

Enfin, à cause de la faible densité de semis du maïs, le passage de l'ensileuse à la récolte provoque un tassement et un défoncement du terrain plus important qu'une culture de céréale d'hivers, endommageant d'avantage la structure le sol avant l'hivers.

En conclusion, on peut dire que nous sommes face à un problème majeur et difficile à résoudre. Cependant, une autre technique moins connue mais prometteuse pourrait nous aider dans notre tâche : l'utilisation des cultures associées.

2.2. Le sous-semis : une solution plausible ?

2.2.1. Concept des cultures associés (Malézieux et al., 2009)

L'**association culturale** peut se définir comme étant le mélange de plusieurs espèces ou variétés sur la même parcelle cultivée en se basant sur des principes écologiques tels que la biodiversité, l'interaction des plantes et les mécanismes de régulation naturels. De ce fait, ce concept s'oppose à la **monoculture**, qui est la culture d'une seule espèce ou variété par parcelle. Les associations peuvent se **distinguer** par le nombre d'espèces les composants, leur proportion relative, leur répartition spatio-temporelle ainsi que par la présence et la proportion de plantes pérennes. Toutes ces caractéristiques affecteront l'aménagement et la gestion de la parcelle cultivée.

2.2.1.1. Le partage des ressources

Concernant justement l'aménagement et la gestion de la parcelle, un mécanisme fondamental est à prendre en compte pour la bonne compréhension de ce système : le **partage des ressources**. Dans le cas d'un écosystème cultivé, les principales ressources que les végétaux doivent se partager sont la lumière, l'eau et les minéraux. Cela peut se faire de deux manières différentes : la compétition et la facilitation. **La compétition**, d'une part, est le processus par lequel deux individus ou deux populations interagissent de tel sorte que l'un exerce un effet négatif sur l'autre alors que **la facilitation**, d'autre part, est le processus par lequel deux individus ou deux populations interagissent de tel sorte que l'un exerce un effet positif sur l'autre. La double facilitation est équivalente au **mutualisme**. Par conséquent, une bonne association culturale doit maximiser les facilitations et minimiser les compétitions. Pour ce faire, une bonne manière d'y arriver est d'implanter des espèces qui soient **complémentaires**, c'est-à-dire qu'elles n'exploitent pas les mêmes niches écologiques et que donc la compétition interspécifique serait plus faible que la compétition intraspécifique. Si on applique ce concept aux différentes ressources énoncées plus haut, cela se traduirait ainsi :

- Pour ce qui est de la **lumière**, on aurait des plantes qui exploiteraient des strates différentes de la canopée, avec idéalement au sommet de la canopée des plantes héliophiles avec des feuilles dressées et en bas de la canopée des plantes sciaphiles avec des feuilles à l'horizontale.

- En ce qui concerne **l'eau et les minéraux**, on aurait idéalement des plantes qui exploiteraient des horizons de sol différents, qui auraient des besoins en eau différés dans le temps et qui n'auraient pas les mêmes besoins concernant les minéraux.

2.2.1.2. Avantages des associations culturales

Bien que peu utilisé dans les grandes cultures conventionnelles, l'association culturale est souvent utilisée par les agriculteurs du sud pratiquant l'agriculture de subsistance. Elle est également grandement utilisée dans les pays du nord dans la gestion des prairies et pâtures. En effet, le mélange de plusieurs espèces sur une même parcelle comporte de **nombreux avantages économiques et écologiques** énoncés ci-dessous :

- **Effets sur le rendement.** Par l'optimisation de l'interception de la lumière, la maximisation de la surface cultivée au sol et les divers effets de facilitation, les cultures associées ont souvent des rendements supérieurs par rapport à leurs constituants cultivés en monoculture sur une surface égale. En outre, en plus d'augmenter en quantité, le rendement augmente également en stabilité. Cela se justifie par la complémentarité des espèces cultivées et l'augmentation de la biodiversité de la parcelle.
- **Effets sur l'environnement.** Cela se traduit par une meilleure conservation de la biodiversité (planifiée et associée), une amélioration du recyclage des nutriments, une meilleure conservation des sols et de la qualité de l'eau et une plus grande séquestration du carbone.
- **Effets sur les maladies et les adventices.** D'une part, les maladies sont mieux contrôlées grâce à des effets de dilution, de barrière physique, de modification des habitats et par des effets chimiques (interactions gènes pour gènes). D'autre part, les adventices sont, elles, mieux contrôlées par la plus grande compétition de la culture qui occupe plus de niches écologiques.
- **Effets économiques.** Pour finir, les intérêts économiques des cultures associées sont multiples. Parmi eux, on peut citer une plus grande période de production (surtout dans le cas de cultures pérennes qui prennent du temps à s'implanter), une plus grande stabilité des revenus (par la meilleure stabilité du rendement, une plus grande variété de produits et une diminution des intrants) et enfin l'augmentation des services écosystémiques rendus dans l'espace et le temps.

2.2.1.3. Désavantages des associations culturales

Pour finir, il est important de nuancer les propos tenus juste avant. En effet, même si les associations culturales ont relativement **peu d'inconvénients**, ceux-ci sont **difficiles à surmonter**, voire impossible dans certains cas.

Le premier inconvénient est **la compétition** qui peut exister entre les différentes espèces composant l'association. En effet, comme nous l'avons expliqué plus haut, les espèces associées peuvent entrer en compétition pour un grand nombre de ressources différentes comme la lumière, l'eau, les nutriments, etc..., auxquels on peut rajouter les problèmes liés à l'allélopathie. Cela peut provoquer de gros soucis d'aménagement et de gestion car pour minimiser ces compétitions, il faut savoir jouer sur la sélection des espèces appropriées, sur la date, la densité de semis et sur l'arrangement spatial des espèces. De plus, les paramètres idéaux pour un environnement donné peuvent ne pas l'être pour un autre (Lithourgidis et al., 2011).

Le second inconvénient est la relative incompatibilité de l'association culturale avec **la mécanisation**. Rien ne garanti que dans une association idéale au point de vue de la complémentarité, les différentes espèces composants l'association ont des exigences phytotechniques différentes. En effet, elles peuvent avoir des dates de semis ou de récoltes différentes. Elles peuvent également avoir des besoins différents en termes de fertilisations, de pesticides ou d'herbicides. Enfin, la séparation des produits de récolte peut aussi contenir des difficultés (Lithourgidis et al., 2011).

2.2.2. Objectifs et fonctionnement du sous-semis

Comme nous l'avons dit précédemment, **l'installation d'un couvert hivernal est problématique** après une culture de maïs car sa récolte est trop tardive pour permettre au couvert de se développer suffisamment avant les premières gelées. Par conséquent, une nouvelle technique a été élaborée en s'inspirant du concept de l'association culturale pour résoudre ce problème : **le semis du couvert directement sous la culture de maïs.**

Le principe de cette technique est simple : semer le couvert plus tôt dans la saison, le laisser se développer entre les rangs de maïs durant toute la période de culture et lors de la récolte, laisser le couvert reprendre et faire son travail pour la période d'interculture. Ainsi, en semant plus tôt le couvert, on espère qu'il se soit **suffisamment développé** avant la récolte de la culture pour obtenir une couverture hivernale optimale.

Bien que cette technique semble simple en théorie, **elle est beaucoup plus complexe** et diversifiée dans son application, où beaucoup de paramètres doivent être pris en compte et beaucoup de variantes existent. Il est important de noter que tous ces paramètres influencent en même temps la bonne tenue de l'association et que donc leur calibration doit se faire avec grande minutie. L'objectif de cette calibration est de donner au sous semis les bonnes conditions pour qu'il puisse se développer correctement sans pour autant trop pénaliser la culture principale avec laquelle il peut entrer en compétition. Les paramètres principaux à prendre en compte sont la date de semis, la densité de semis, les espèces/variétés utilisées et l'utilisation d'herbicides. Leurs influences sur le système sont les suivantes :

- **La date de semis.** Plus la date de semis du couvert est précoce, plus le couvert aura de lumière pour se développer. En revanche, il aura plus de chance de pénaliser le maïs. A contrario, plus la date de semis est tardive, plus le couvert sera impacté par l'ombrage que lui fera le maïs, ce qui affectera son développement. Dans le cas extrême d'un semis direct du maïs dans un couvert déjà établi, ce dernier pourrait même compromettre la levée du maïs.
- **La densité de semis.** Plus le semis est dense, plus la production de biomasse du couvert sera importante et donc plus il aura de chance de pénaliser le maïs.

- **Les espèces/variétés utilisées.** Plus l'espèce/variété utilisée est vigoureuse et compétitrice, plus le développement du couvert sera important et donc plus il aura de chance de pénaliser le maïs.
- **L'utilisation d'herbicides.** Leur utilisation peut être recommandée en cas de couvert trop compétitif. Alors, un herbicide sélectif est appliqué dans les rangs du maïs pour éviter qu'il soit colonisé par le couvert. En outre, dans le cas d'un semis direct du maïs sur un couvert déjà établi, un passage à l'herbicide totale avant le semis du maïs est recommandé.



Figure 1 : Sous-semis de fétuque rouge (gauche) et de trèfle blanc (droite)

2.2.3. Variantes dans les sous-semis

Pour cette section, nous allons vous énoncer **6 essais différents**, tous réalisés en des lieux et des années différentes : en France par l'institut Arvalis dans les années 2000, au Canada par l'université de McGill en 1993-1994, au Pays-Bas par l'université d'Amsterdam en 1992-1993, au Danemark par l'université d'Aarhus en 2009-2011 et en Allemagne par l'université de Kiel en 1998-2001. Chacune a expérimenté des méthodes différentes de sous semis ce qui illustre bien la diversité d'application de cette technique.

Tout d'abord, nous allons aborder **l'expérience française**, qui est la plus détaillée sur la gestion du sous semis. La pratique testée par Arvalis consistait principalement en un semis de diverses légumineuses sous une culture de maïs ensilage. Le semis est réalisé au stade 3-4 feuilles du maïs par un semoir à petites graines, juste derrière la bineuse. Un recouvrement de la ligne de semis par des peignes ou des chaînes permet un meilleur contact sol-graine. Il est également recommandé de faire un traitement herbicide 7 à 10 jours avant le semis du couvert pour un meilleur contrôle des adventices. Dans ces essais, le trèfle d'Alexandrie (*Trifolium alexandrinum*) et le trèfle souterrain (*Trifolium subterraneum*) ont donné les meilleurs résultats. Pour ce qui est de la pratique sous une culture de maïs grain, Arvalis émet des réserves à cause de la récolte tardive des épis et de l'importance des résidus de cultures après la récolte. Enfin, Arvalis a également testé le semis direct du maïs dans un couvert déjà établi. Là, un strip-till dans la ligne de semis et un affaiblissement mécanique (déchaumeuse) et/ou chimique (glyphosate + 2,4D) du couvert est indispensable pour une bonne levée de la culture. Un contrôle supplémentaire du couvert par herbicide pulvérisé en plein ou dans le rang peut être nécessaire (Labreuche and Légère, 2015) (Légère, 2017).

Ensuite, concernant **l'expérience canadienne**, l'université de McGill a testé le sous semis de ray-grass anglais, de ray-grass d'Italie et de trèfle violet. Leurs semis ont tous été réalisés 3 semaines après le semis du maïs avec une densité de 13, 10 et 25 kg/ha respectivement. Aucun traitement concernant les sous semis n'a été précisé. Selon l'étude, un impact négatif du couvert sur le rendement du maïs est noté mais n'est pas significatif (Carruthers et al., 2000).

En ce qui concerne **l'expérience néerlandaise**, l'université d'Amsterdam a testé la manière de semer une culture de maïs ensilage après un couvert hivernal de seigle semé juste après la culture de maïs ensilage précédente. Parmi les traitements, il y avait le semis direct du maïs

dans le couvert préalablement détruit chimiquement et le semis direct du maïs dans le couvert toujours vivant après le passage d'un strip-till. L'étude conclut que cela n'a pas d'effet sur l'érosion des sols ou le ruissellement en hivers mais que cela a un effet au printemps et au début de l'été (Kwaad et al., 1998).

Pour ce qui est de **l'expérience danoise**, l'université de Aarhus a testé le sous-semis de fétuque rouge avec un semis réalisé simultanément au semis du maïs. Aucun autre détail concernant la conduite directe du sous-semis n'est exposé, l'expérience portant surtout sur l'effet du sous semis sur le lessivage de l'azote. L'étude met en évidence la réduction significative du lessivage de l'azote dans les parcelles avec sous-semis par rapport à un témoin sans sous-semis (Manevski et al., 2015).

Pour finir, **l'expérience allemande** de l'université de Kiel a testé le sous semis de ray-grass anglais, semé en même temps que le maïs, avec une densité de 6kg/ha. Aucun autre détail concernant la conduite directe du sous-semis n'est exposé, l'expérience portant également sur l'effet du sous semis sur le lessivage de l'azote. L'étude met en évidence la réduction significative du lessivage de l'azote dans les parcelles avec sous-semis par rapport à un témoin sans sous-semis (Wachendorf et al., 2006).

2.3. Cohabitation des espèces sur la parcelle

Dans cette section, nous évoquerons les spécificités écophysiological des différentes plantes associées dans les parcelles d'essais dans le but de voir à priori si ces plantes se feront concurrences ou pas.

2.3.1. Base d'écophysiology du maïs

Le maïs cultivé (*Zea mays*) est une monocotylédone herbacée de grande taille effectuant sa photosynthèse en C4.

La croissance des parties aériennes est assez lente en début de saison. En effet, la levée a lieu seulement 80°j en moyenne après le semis et la durée entre deux phyllochrones est de 40-45°j (avec 6°C comme température de base). En prenant en compte ces données, une date de semis normale (fin avril, début mai) ainsi que les températures moyennes en Belgique durant le mois de mai, de juin et de juillet, l'émergence devrait arriver début mai, le stade 2-3 feuilles entre la mi et la fin mai, le stade 4-5 feuilles (marquant le sevrage) vers la fin mai et début juin, le stade 8-10 feuilles vers la fin juin et le stade 12-14 feuilles (marquant la fermeture de l'interligne) vers le début du mois de juillet. La dynamique de ce stade varie en fonction des conditions pédoclimatiques (Renoux, 2014).

Concernant la croissance du système racinaire (fasciculé), cette dernière est beaucoup plus rapide que celle des parties aériennes. En effet, après 15 jours suivant le semis, la profondeur maximale du système racinaire de la plante atteint plus de 60 cm, avec des racines secondaires et tertiaires allant jusqu'à 40 cm. Après 30 jours suivant le semis, la profondeur maximale du système racinaire est de 80 cm avec des racines secondaires et tertiaires allant jusqu'à 60 cm. La profondeur maximale de 92 cm arrive plus ou moins après 110 jours, avec des racines secondaires et tertiaires allant jusqu'à une profondeur de 75 cm. Cette dynamique dépend bien évidemment de la situation pédoclimatique (Leitner et al., 2010).

2.3.2. Base d'écophysiologie du trèfle blanc

Le trèfle blanc cultivé (*Trifolium repens*) est une dicotylédone vivace et gazonnante. C'est également une légumineuse, c'est-à-dire qu'elle fait la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique au niveau de ces nodules racinaires en s'associant avec des bactéries *Rhizobium*. La hauteur de sa partie aérienne est comprise entre 7 cm et 25 cm (Lambinon and Verloove, 2012). En ce qui concerne le système racinaire, ce dernier est peu profond. En effet, il est considéré que > 80% des racines ne dépassant pas les 10-20 cm, même si on peut trouver des racines jusqu'à 1,5m. La majorité des racines absorbant le phosphore (90%) se situent au-dessus de 7,5 cm de profondeur (Caradus, 1990). Enfin, le trèfle est une plante héliophile.

2.3.3. Base d'écophysiologie du trèfle blanc nain

Le trèfle blanc nain, ou micro-trèfle, est une variété particulière du trèfle blanc (*Trifolium repens*). C'est une variété à croissance faible, avec des petites feuilles et moins agressive que le trèfle blanc classique. Il est particulièrement adapté à une utilisation dans les gazons des jardins et des golfs (McCurdy et al., 2013). Manquant de données à son sujet, nous allons considérer que ses caractéristiques écophysiologiques sont égales ou inférieures au *Trifolium repens*.

2.3.4. Base d'écophysiologie du lotier corniculé

Le lotier corniculé (*Lotus corniculatus*) est une dicotylédone vivace et rampante. C'est également une légumineuse, c'est-à-dire qu'elle fait la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique au niveau de ces nodules racinaires en s'associant avec des bactéries *Rhizobium*. La longueur de sa partie aérienne est comprise entre 5 cm et 30 cm et peut aller jusqu'à 50 cm (Lambinon and Verloove, 2012). Enfin, le lotier corniculaire est une plante héliophile. Aucune source parlant de l'architecture et de la profondeur du système racinaire de cette plante n'a été trouvé.

2.3.5. Base d'écophysiologie de la fétuque rouge

La fétuque rouge (*Festuca rubra*) est une monocotylédone vivace et gazonnante. La hauteur de sa partie aérienne est comprise entre 20 cm et 75 cm (Rameau et al., 1989). Elle est particulièrement adaptée à une utilisation dans les gazons des jardins et des golfs (Kvalbein et al., n.d.). Enfin, la fétuque rouge est une plante est héliophile (Rameau et al., 1989). Aucune source parlant de l'architecture et de la profondeur du système racinaire de cette plante n'a été trouvé.

2.3.6. Comparaison et hypothèses sur la cohabitation

Au regard de toutes les informations citées plus haut, nous pouvons émettre l'hypothèse que les sous-semis n'impacteront pas la croissance et le développement de la culture de maïs, à la vue de leur relative faible croissance aérienne et racinaire (nous émettons tout de même une réserve concernant le lotier et la fétuque). Par conséquent, au niveau de l'occupation de l'espace, on peut dire que ces plantes sont complémentaires. En outre, pour ce qui est des trèfles et du lotier, étant donné que ce sont des légumineuses, on peut rajouter à cette complémentarité spatiale, une complémentarité nutritionnelle. Nonobstant, comme toutes ces plantes sont héliophile, le recouvrement de l'interligne par la culture de maïs risque de pénaliser la croissance du sous semis.

2.4. Objectifs

Etant donné tous les problèmes de dégradation des sols auxquels sont confrontés les agriculteurs et tout particulièrement les cultivateurs de maïs, nous avons donc décidé de nous pencher sur la technique du sous semis en culture de maïs pour tenter de répondre à cette problématique. Lors de notre essai, nous avons testé sept types de sous semis, différents dans les espèces les composants et dans leur densité de semis.

Notre objectif était de les comparer pour trouver celui qui avait le meilleur potentiel de performance pour être utilisé à plus grande échelle par les agriculteurs. Quand nous parlons de meilleur potentiel, deux caractéristiques fondamentales nous est venu à l'esprit. D'une part, il y a la capacité de couverture du sous semis durant la période de culture ainsi que durant la période d'interculture suivant la récolte du maïs. En effet, plus la capacité de couverture du sous semis est grande, plus les services qu'il peut fournir (conservation du sol, fertilité organique, etc...) seront importants. D'autre part, il y a la capacité du sous semis à pénaliser le moins possible la culture de maïs auquel il est associé. En effet, plus le sous semis pénalise la culture de maïs, plus son rendement en sera diminué, provoquant une perte sèche pour l'agriculteur. Ces deux caractéristiques fondamentales découlent directement de la complémentarité des espèces associées. Enfin, nous avons également voulu comparer l'influence que pouvait avoir ces sous-semis sur certains paramètres du sol.

Pour évaluer cette performance, de nombreuses expériences ont été réalisées tout au long de la période de culture du maïs et de l'interculture suivant sa récolte. D'autres expériences ont également été réalisées pour évaluer d'autres caractéristiques annexes. Toutes ces expériences sont détaillées dans le chapitre qui suit.

3. Matériel et méthode

3.1. Plan de l'expérience

Les parcelles de l'essai étaient localisées au centre **Alphonse De Marbais** (50°40'18.4"N 4°38'02.3"E), sur le territoire de la commune de Corroy le Grand (figure 2).

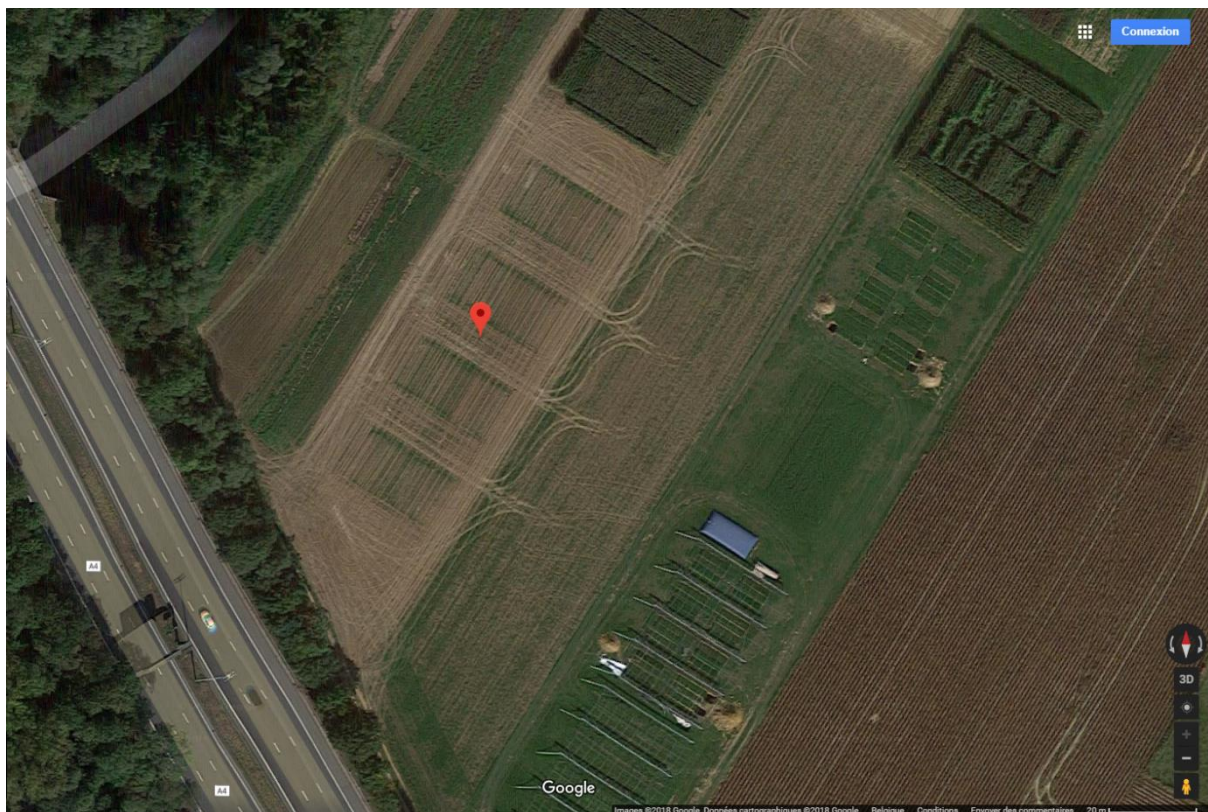


Figure 2 : Image satellite de la zone d'essai

Les différentes parcelles de l'essai étaient réparties sur le terrain selon **un plan en blocs aléatoires complets**, c'est-à-dire que tous les traitements sont testés dans chaque blocs (répétitions) selon une disposition aléatoire (Figure 3). Comme nous l'avons évoqué précédemment, sept traitements ont été testés auxquels nous devons rajouter un témoin. Par conséquent, nous avons au total **8 traitements**, appelés objets, à tester par blocs :

- **Objet n°1**, témoin ne disposant pas de sous semis ;
- **Objet n°2**, avec un sous semis de trèfle blanc (*Trifolium repens*) à 4 kg/ha ;
- **Objet n°3**, avec un sous semis de trèfle blanc nain (variété de *Trifolium repens*) à 4 kg/ha ;
- **Objet n°4**, avec un sous semis de lotier corniculé (*Lotius corniculatus*) à 4 kg/ha ;

- **Objet n°5**, avec un sous semis de fétuque rouge (*Festuca rubra*) à 6 kg/ha,
- **Objet n°6**, avec un sous semis de trèfle blanc (*Trifolium repens*) à 2 kg/ha ;
- **Objet n°7**, avec un sous semis de trèfle blanc nain (Variété de *Trifolium repens*) à 2 kg/ha ;
- **Objet n°8**, avec un sous semis de lotier corniculé (*Lotius corniculatus*) à 2 kg/ha.

		Objets										
		1	témoin sans sous-semis									
		2	sous-semis trèfle blanc (4 kg/ha)									
		3	sous-semis trèfle blanc nain (4 kg/ha)									
		4	sous-semis lotier (4 kg/ha)									
		5	sous-semis fétuque rouge (6 kg/ha)									
		6	sous-semis trèfle blanc (2 kg/ha)									
		7	sous-semis trèfle blanc nain (2 kg/ha)									
		8	sous-semis lotier (2 kg/ha)									
12 m.	Bloc 4	longueur totale 84 mètres	Bloc 4	Bloc 4	Bloc 4	Bloc 4	Bloc 4	Bloc 4	Bloc 4	Bloc 4	Bloc 4	
12 m.	Espace manœuvres		espace manœuvres									
12 m.	Bloc 3		Bloc 3	Bloc 3	Bloc 3	Bloc 3	Bloc 3	Bloc 3	Bloc 3	Bloc 3	Bloc 3	
12 m.	Espace manœuvres		espace manœuvres									
12 m.	Bloc 2		Bloc 2	Bloc 2	Bloc 2	Bloc 2	Bloc 2	Bloc 2	Bloc 2	Bloc 2	Bloc 2	
12 m.	Espace manœuvres		espace manœuvres									
12 m.	Bloc 1		Bloc 1	Bloc 1	Bloc 1	Bloc 1	Bloc 1	Bloc 1	Bloc 1	Bloc 1	Bloc 1	
largeur tot : 24 mètres												

Figure 3 : Plan de l'essai

Ainsi, chaque bloc était subdivisé en huit parcelles, disposant chacune d'un traitement différent. Ces parcelles faisaient 3 m de large pour 12 m de long. Comme l'espace entre les lignes de maïs était de 75 cm, chaque parcelle disposait donc de **4 lignes de maïs**. Entre chaque bloc, une zone tampon de 12 m a été installée pour faciliter la manœuvre des différents engins agricoles et pour limiter les interactions entre les traitements de blocs différents. Au total, le champ d'essai faisait donc 84 m de long pour 24 m de large.

Concernant la culture de maïs, elle était de variété TOUTATIS, **une variété précoce**.

Avant de débiter la section suivante, il est important de parler de la texture du sol du terrain sur lequel nous avons installé notre essai. La texture de ce sol était du **limon fin**, avec une certaine variation entre les blocs. En effet, la répartition argile/limon/sable était pour le premier bloc de 10/57/33 %, pour le deuxième de 15,7/64,7/19,6 %, pour le troisième de 15,7/67,9/16,4 % et pour le quatrième de 16,1/71,1/12,8 %. Nous pouvons ainsi constater que le Bloc n°1 est plus sableux que les trois autres.

3.2. Gestion et itinéraire technique des parcelles

Tout d'abord, concernant la préparation du sol, le champ de notre essai a subi un labour de printemps, suivi juste après d'un passage à la herse rotative à axe vertical. Le 21 avril 2017 a été appliquée une fertilisation NPK (14 % d'azote - 7 % de phosphore -16 % de potassium) sous forme de granulé à une dose de 800 kg/ha. Dans la foulée, le champ est passé sous la herse rotative à axe vertical pour bien incorporer les granulés au sol.

Le semis du maïs et du sous semis a eu lieu le 24 avril 2017. Il a été réalisé par un semoir pneumatique combiné qui semait en même temps le maïs et le sous semis. Le semoir était un modèle AEROSEM A de la marque Pottinger (Figure 4). Pour ce qui est de la densité des semis, celui du maïs était théoriquement de 95 000 plants/ha et ceux des sous semis étaient de la même densité qu'évoquée lors de la section précédente.



Figure 4 : Semoir mixte qui a servi au semis de l'essai

Suite au semis, un traitement herbicide a été appliqué. Il a eu lieu le 6 juin 2017 à l'aide d'un pulvérisateur classique. Le produit pulvérisé était du ZEUS (sulcotione 300 g/l) avec une dose de 1 l/ha. Aucun autre traitement n'a été appliqué avant la récolte.

Finalement, la récolte a eu lieu le 20 septembre 2017 grâce à une ensileuse expérimentale.

3.3. Mesures réalisées

3.3.1. Comptage de l'émergence

Ayant eu lieu durant le mois de juin, le comptage de l'émergence avait pour objectif de garantir des résultats comparables entre les différents objets pour les expériences futures, surtout en ce qui concerne le rendement. Concernant la méthode, un opérateur a compté tous les plants présents sur les 2 lignes centrales de chaque parcelle. Ensuite, la moyenne de plants par ligne est calculée à partir des résultats obtenus sur ces deux lignes. Enfin, cette moyenne est divisée par la longueur de la ligne (12 m) et multipliée par le nombre de mètre de ligne pour 1 ha de culture (13333 m/ha). Ainsi, nous obtenons le nombre de plants/ha théorique pour chaque parcelle.

3.3.2. Surface foliaire effective

La surface foliaire effective, c'est-à-dire la surface foliaire capable de faire écran à la lumière ou à la pluie, a été mesurée à de nombreuses reprises sur la culture de maïs et les divers sous semis. Dans le premier cas, elle nous donne un bon **indice du développement** du maïs et de sa santé alors que, dans le second cas, elle nous donne une bonne estimation de la capacité de couverture des sous semis.

Cette mesure a été réalisée à l'aide d'un **cadre** (Figure 5). C'est un carré de 50 cm de côté, quadrillé en 100 petites cases de chacune 5 cm de côté. Pour effectuer la mesure, nous disposons le cadre sur l'échantillon de végétation que nous voulions mesurer et nous prenons une photographie du dit cadre. Ensuite, nous observons la photo sur ordinateur et nous comptons le nombre de cases dites pleines. Une case était considérée comme pleine lorsqu'elle était occupée à plus de 50 % par de la végétation d'intérêt (maïs ou espèces de sous semis). Etant donné qu'il y avait 100 cases dans le cadre, la surface foliaire effective était donnée en pourcent (%).



Figure 5 : Cadre servant à la mesure de la surface foliaire effective

Trois mesures étaient systématiquement prises par parcelle. Pour les mesures concernant le maïs, celles-ci étaient prises sur les deux lignes centrales ; deux mesures étaient réalisées sur l'une et une était réalisée sur l'autre. En effet, les deux lignes aux extrémités des parcelles n'étaient pas prises en compte car elles pouvaient subir des effets d'interactions des parcelles adjacentes (Figure 6 gauche). Pour les mesures concernant les sous semis, elles étaient prises sur les trois interlignes que contenaient chaque parcelle, avec une mesure par interligne (Figure 6 droite). La position de chaque mesure dans la ligne ou l'interligne était aléatoire. Toutefois, nous évitons de faire des mesures aux extrémités des parcelles pour des problèmes d'hétérogénéité.

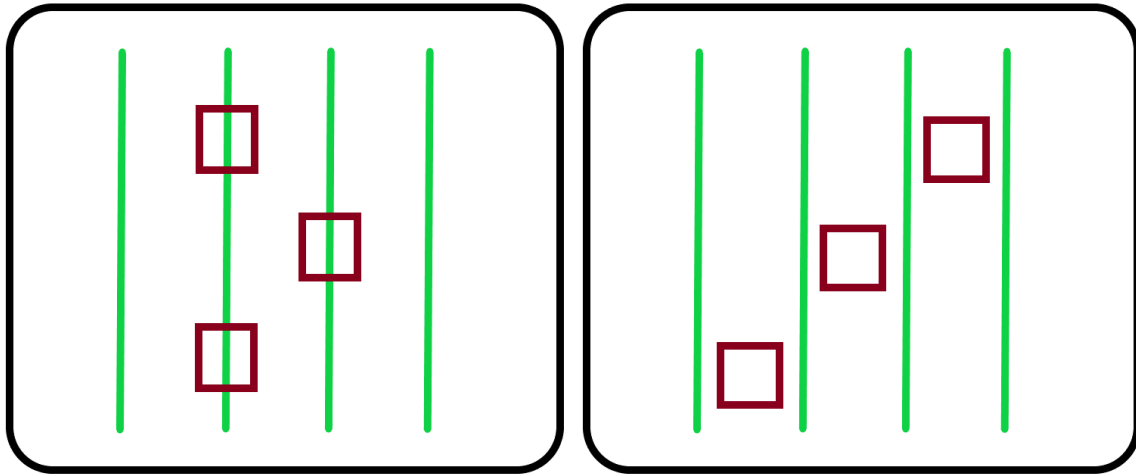


Figure 6 : Plans de la méthode de mesure de la surface foliaire effective du maïs (gauche) et des sous-semis (droite)

Au total, trois jeux de données ont été prélevés sur les parcelles d'essais :

- Un sur la culture de maïs durant sa période de culture les 26/05/17, 07/06/17 et 17/06/17,
- Un sur les sous semis durant la période de culture de maïs les 26/05/17, 07/06/17 et 17/06/17,
- Encore un sur le sous semis durant la période d'interculture suivant la récolte du maïs les 26/09/17, 14/10/17, 20/10/17, 31/10/17, 07/11/17 et 14/11/17.

3.3.3. Mesures directes sur les plants de maïs

L'objectif de ces mesures était de pouvoir estimer la croissance et le développement de la culture de maïs au début de sa croissance. Les diverses mesures en question étaient le nombre de feuilles déployées sur le plant, la hauteur du plant, la longueur et la largeur de la feuille la plus grande. Nous avons choisi ces mesures car elles étaient faciles à prélever et ne nécessitaient aucun matériel sophistiqué.

Concernant la répartition des mesures dans l'essai, nous avons procédé de la manière suivante : par parcelle, sur les 2 lignes centrales de maïs, nous prenions au hasard 3 bandes de 1 m ; deux sur l'une et une sur l'autre. Ensuite, nous effectuions les mesures citées plus haut sur tous les individus compris dans ces bandes de 1 m (Figure 7).

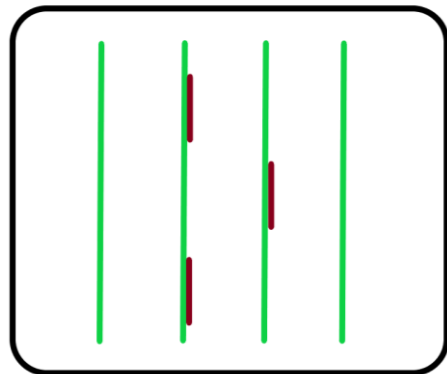


Figure 7 : Plans de la méthode des mesures directes sur les plants de maïs

Les mesures individuelles disposaient également de méthodes particulières qui sont les suivantes :

- **Nombre de feuilles.** Uniquement les feuilles déployées et fonctionnelles étaient considérées lors du comptage, c'est-à-dire que les feuilles du cornet, les feuilles sénescents ou les feuilles arrachées n'étaient pas prises en compte.
- **Hauteur du plant.** Elle était mesurée depuis la surface du sol jusqu'à la pointe de la dernière feuille du cornet. Cette dernière était tendue manuellement.
- **La longueur de la feuille la plus grande.** Elle était prise de la base des oreillettes jusqu'à la pointe de la feuille. La feuille était tendue manuellement.
- **La largeur de la feuille la plus grande.** Pour être plus précis, c'était la largeur maximale de la feuille. Pour la trouver, nous parcourions d'une règle la feuille en démarrant de la pointe et nous nous arrêtions juste au moment où la largeur commençait à diminuer.

Même si ces mesures étaient faciles à prendre, il y en avait un très grand nombre. C'est pour cela que nous avons dû limiter nos mesures aux deux premiers blocs de notre essai.

Au total, trois séries de mesures ont été réalisées : le 29/05/17, le 16/06/17 et le 26/06/17.

3.3.4. Teneur en eau du sol

L'objectif de cette mesure était de pouvoir évaluer si les sous semis diminuaient la teneur en eau du sol sous la culture de maïs et dans quelle proportion. Pour ce faire, nous avons utilisé la méthode consistant à sécher les échantillons de sols.

Tout d'abord, nous avons prélevé des échantillons de sol à l'aide d'une tarière. Ils étaient alors de suite mis dans des sachets individuels, hermétiques et numérotés. Quand tous les échantillons d'une parcelle étaient prélevés, ils étaient entreposés dans une glacière pour éviter l'évaporation de l'eau contenue dans l'échantillon. Le lendemain matin du prélèvement, les échantillons disposés dans de petites coupelles d'aluminium numérotées étaient pesés en laboratoire grâce une balance de précision. Cette pesée donnait leur poids humide. Ensuite, ils étaient entreposés dans une étuve chauffée à 105°C pour que l'eau qu'ils contenaient s'évapore (Figure 8). Par la suite, un opérateur repassait tous les deux jours pour peser à nouveau les échantillons. Lorsque le poids des échantillons ne variait plus d'une mesure à l'autre, l'échantillon était alors considéré comme sec et le dernier poids mesuré était donné comme le poids sec. Enfin, pour calculer la teneur en eau de l'échantillon, nous utilisons l'équation suivante : $\frac{\text{Poids sec} - \text{Poids humide}}{\text{Poids humide}}$. La teneur en eau est donnée en pourcent (%).



Figure 8 : Echantillons de sol en train de chauffés dans l'étuve

Au total, trois séries de mesures ont été réalisées :

- La première fut le 21/07/17. Lors de cette série, cinq échantillons par parcelles furent prélevés sur les deux premiers blocs de l'essai, pour un total de 80 échantillons. Les échantillons (d'un peu moins de 100 g) consistaient en une carotte de terre allant de 10 cm à 20 cm de profondeur.
- La deuxième fut le 09/08/17. Lors de cette série, deux échantillons par parcelles furent prélevés sur tous les blocs de l'essai, pour un total de 64 échantillons. Les échantillons (d'un peu moins de 100 g) consistaient en une carotte de terre allant de 10 cm à 20 cm de profondeur.
- La troisième fut le 28/08/17. Lors de cette série, deux échantillons par parcelles furent prélevés sur tous les blocs de l'essai, pour un total de 64 échantillons. Les échantillons (d'une vingtaine de gramme) consistaient en une carotte de terre allant de 40 cm à 50 cm de profondeur. Nous avons décidé de changer la profondeur de prélèvement à ce moment-là pour confirmer les résultats des deux séries de mesures précédentes.

3.3.5. LAI de la culture

Le LAI (**Leaf Area Index**) est un indice qui représente la surface foliaire totale d'une végétation donnée par mètre carré de sol. Nous avons décidé de mesurer le LAI de la culture de maïs car cela nous donne encore une fois un indice du développement et de la santé de la culture avant sa récolte.



Figure 9 : LICOR LAI-2200

Pour ce faire, nous avons utilisé un instrument spécifique appelé le **LICOR LAI-2200** (Figure 9). C'est appareil est constitué d'un capteur monté sur un manche muni de touches et d'un boîtier électronique muni d'un écran et d'un clavier. La théorie du fonctionnement de cet appareil est simple. Lorsque le capteur prend une photo en direction, l'appareil est capable de calculer la lumière qui lui est transmise. Ainsi, lorsqu'une photographie est prise au-dessus de la canopée (Above) et l'autre en dessous (Below), l'appareil est capable de les compiler et donc de calculer la transmittance de la lumière à travers la canopée. De plus, l'appareil est capable de subdiviser son champ de vision en 5 cercles concentriques ayant des angles croissants par rapport au zénith (Figure 10). Un système de pondération est alors appliqué pour corriger l'effet de l'angle de vue sur la transmittance. Pour plus d'information sur le fonctionnement de l'appareil, nous vous invitons à consulter l'annexe.

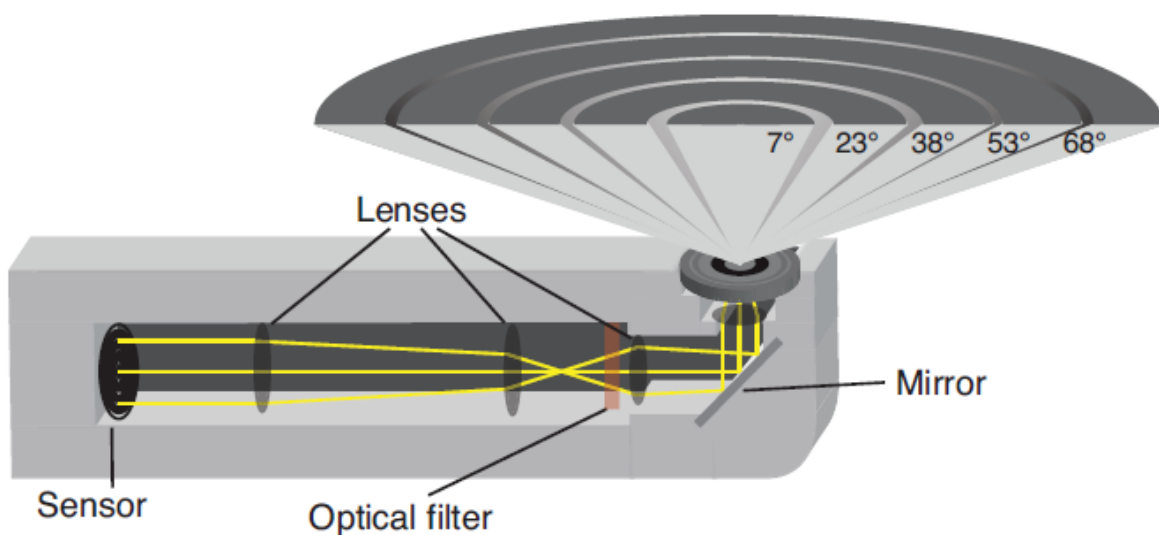


Figure 10 : Fonctionnement du capteur du LICOR LAI-2200

En ce qui concerne la méthode de prélèvement des données, nous avons suivi le protocole adapté aux cultures en rangs présenté dans le manuel de l'appareil (Figure 11). Pour être plus précis, pour chaque parcelle, une mesure Above pour quatre mesure Below étaient effectuées. Concernant la mesure Above, elle était prise sur un champ vide à quelques mètres du champ d'essai pour éviter l'éventuellement contamination de la mesure par de la haute végétation. Pour ce qui est des mesures Below, elles étaient toutes prises dans l'interlignes au centre de la parcelles. La première mesure était prise à 5 m au début de la parcelle, sous la ligne de maïs à notre droite. La deuxième mesure était prise 50 cm plus loin au $\frac{1}{4}$ de l'interligne en partant de la droite. La troisième mesure était prise encore 50 cm plus loin à la moitié de l'interligne. Enfin, la quatrième mesure était prise de nouveau 50 cm plus au $\frac{3}{4}$ de l'interligne en partant de la droite.

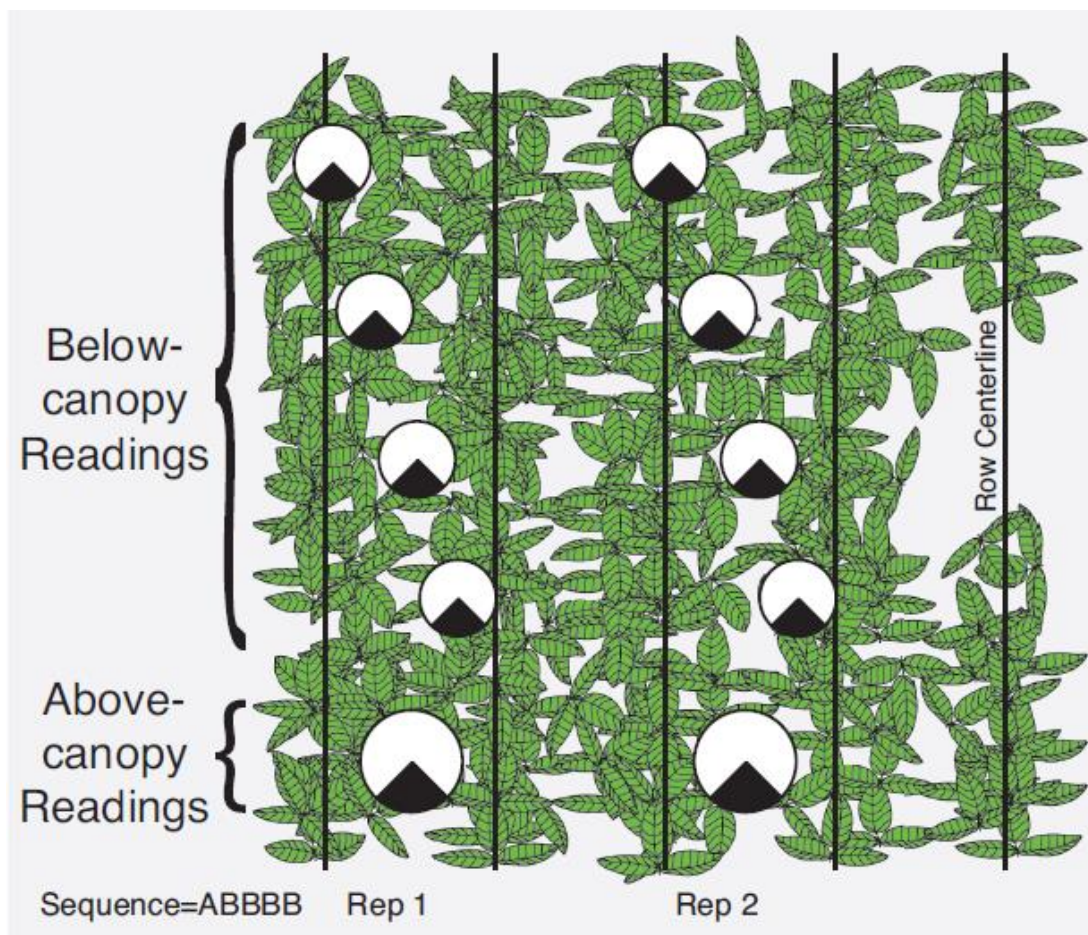







Figure 5-1. A row crop with a homogeneous canopy (e.g., no gaps between rows) can be measured with a wide view cap.

Etant donné la sensibilité de l'appareil, plusieurs précautions étaient de mises pour éviter les erreurs :

- Premièrement, la canopée devait être suffisamment homogène pour que la mesure soit correcte. Une mesure test a donc été préalablement réalisée pour le vérifier. Pour cela, il fallait faire six mesures Below de la même manière qu'expliquée plus haut. Ensuite, nous devons diviser l'erreur standard du LAI par le LAI moyen des six mesures (donnés sur le boîtier). Le nombre obtenu nous donnait le nombre de mesure Below minimal à prendre. Dans notre cas, 2 mesures suffisaient mais nous avons décidé d'en maintenir quatre comme expliqué dans le protocole.
- Deuxièmement, nous devons faire attention à ne pas prendre nos mesures trop près de feuilles de grande taille qui auraient pu obstruer la vue du capteur et ainsi fausser le résultat. Après avoir suivi une formule (Figure 12), nous avons conclu qu'il n'y aurait pas de problème si nous prenions nos mesures au ras du sol.

Table 4-2.

		Distance Factors				
		Sensor Field of View:				
						
Ring	Angle (°)	360°	270°	180°	90°	45°
1	7	10	20	30	50	100
2	22	4	5	8	20	30
3	38	3	3	5	10	20
4	52	2	3	4	8	15
5	68	2	2	3	7	14

The formula for determining whether a leaf is too close to the sensor is:

$$\text{minimum distance} = \left(\frac{d \times w}{B} \right) \quad 4-2$$

where d is the distance factor from Table 4-2, B is the number of B readings, and w is the leaf width (cm).

Figure 12 : Formule et tableau permettant de calculer la distance minimale entre le capteur et la feuille la plus basse

- Troisièmement, la météo ainsi que les rayons du soleil pouvaient également provoquer des erreurs. C'est pour cela qu'un temps uniformément nuageux et peu variable était idéal. Dans le cas contraire, il est recommandé de prendre des mesures Above le plus régulièrement possible et de masquer le soleil par un cache. Celui laissant un champ de vue de 270° était recommandé dans le protocole. En outre, ce cache avait l'avantage de masquer l'opérateur.
- Enfin, quatrièmement, un carton était disposé sous le capteur pour aplatir le couvert afin d'éviter qu'il n'interfère dans la mesure.

Avant de finir avec ceci, trois séries de mesures furent réalisées : une le 28/07/17, une le 31/08/17 et la dernière le 17/09/17.

3.3.6. Rendement ensilage de la culture

Réalisée lors de la récolte du 20 septembre 2017, cette mesure avait pour objectif d'évaluer si, finalement, les divers sous semis avaient un impact sur la productivité du maïs ensilage. Pour ce faire, nous avons utilisé une ensileuse spéciale (Figure 13) pour ce type d'essai. Cette machine récolta seulement des deux lignes centrales de chaque parcelle pour des raisons pratiques et statistiques. Après l'arrachage des plants, ces derniers étaient broyés puis passaient dans un cyclone pour tomber ensuite dans une balance à l'arrière de l'ensileuse. Là, un échantillon était prélevé à l'aide d'une vis et mis dans un sac micro-perforé tandis que le restant était pesé. Le poids de l'échantillon était mesuré ultérieurement. Ainsi, nous obtenions le poids frais de l'ensileuse, de l'échantillon et donc de la parcelle récoltée.

Après cette opération, les échantillons étaient séchés dans une étuve à une température de 75°C durant trois jours pour en retirer tout le contenu en eau. A la sortie de l'étuve, l'échantillon était de nouveau pesé, donnant son poids sec et après calcul, le pourcentage de matière sèche de l'ensilage récolté.

Parallèlement à ça, le rendement frais à l'hectare de chaque parcelle était donné par :

$$\text{Rendement } (T/ha) = \frac{\text{Poids frais} * 13333}{24 * 1000}$$

Où 24 est le nombre de mètre de maïs récolté (2*12 m), 13333 est le nombre de mètre de maïs à l'hectare et 1000 est la conversion de kg à tonnes. Son unité est donc en T/ha.

Enfin, le rendement sec par hectare fut donné en multipliant le rendement frais par le pourcentage en matière sèche. Son unité est également en T/ha.



Figure 13 : Ensileuse qui a servi à récolter les essais

3.3.7. Analyses de sol

L'objectif de ces mesures est de pouvoir évaluer l'influence éventuelle que pourrait avoir le sous semis sur certaines caractéristiques du sol. Cette question est légitime aux vues des effets potentiels reconnus des couverts végétaux sur le sol (cf état de l'art).

Au total, trois séries de mesures furent réalisées : le 18/10/17, le 19/02/18 et le 24/04/18.

Concernant le prélèvement des mesures, nous avons utilisé une carotteuse hydraulique placée derrière un tracteur et alimentée à sa prise de force (Figure 14). Grâce à cette machine, nous avons pu prélever deux carottes par parcelles avec plus ou moins d'aisance et de rapidité. Une fois obtenues, nous avons divisé les carottes en deux échantillons : l'un allant de 0 à 30 et l'autre allant de 30 à 60 cm de profondeur. Chaque échantillon était stocké dans un sac plastique individuel, numéroté et hermétique. Tous les blocs ont été inclus dans le prélèvement mais pas tous les objets. En effet, nous avons décidé de ne pas utiliser les objets 4 et 8, c'est-à-dire ceux composés de lotier, parce que nous estimions que son développement était insuffisant pour être pris en compte dans ces analyses.



Figure 14 : Carotteuse hydraulique qui a servi à prélever les échantillons de sol

Par la suite, les échantillons prélevés étaient envoyés au laboratoire du Centre provincial de l'agriculture et de ruralité à La Hulpe. Là, les échantillons d'une même parcelle et contenant les mêmes horizons étaient mélangés avant analyses.

Les diverses analyses effectuées sur les échantillons sont :

- **Le pH KCl.** Le protocole est décrit dans la norme NF ISO 10390. Son unité est adimensionnelle.
- **Le carbone organique.** Le protocole est décrit dans la norme NF ISO 10694. Son unité est en g/kg.
- **L'humus.** Il est obtenu en multipliant par deux le carbone organique (en % et non en g/kg). Son unité est en pourcent (%).

- **L'azote total.** Le protocole est décrit dans la norme NF ISO 13878. Son unité est en g/100g de terre sèche.
- **Le rapport C/N,** calculé à partir du carbone organique et de l'azote totale.
- **La matière sèche.** Le protocole est décrit dans la norme NF ISO 11465. Son unité est en pourcent (%).
- Enfin **les nitrates.** Le protocole est décrit dans la norme NF ISO 14256-2. Son unité est en mg/l et en kg/ha.

Remarque : ces normes étant protégées par le droit d'auteur, nous n'avons pas le droit de les publier ici. Si vous souhaitez les consulter, vous pouvez vous les procurer sur le site <https://www.iso.org/fr/standards.html>.

3.3.8. Valeur alimentaire du maïs ensilage récolté

L'objectif de cette mesure était de voir si les sous semis pouvait influencer la valeur alimentaire du maïs ensilage récolté. En effet, certaines associations céréales-légumineuses ont pour effet d'augmenter la teneur en azote des céréales.

Ces diverses analyses ont été réalisées à partir des échantillons prélevés dans l'ensileuse lors de la récolte (cf section 3.3.6.). Ainsi, après le séchage, l'échantillon est broyé pour obtenir des particules ayant une taille de 2 mm. Ensuite, l'échantillon passe dans un répartiteur pour obtenir de nouveaux sous-échantillons. A la suite de cela, les sous-échantillons sont de nouveau broyés pour obtenir des particules ne dépassant pas le millimètre. Enfin, ils sont mis en sachet et sont envoyés au département qualité du CRAW à Gembloux. Là, les sous-échantillons sont analysés par spectrophotométrie de réflexion dans le proche infrarouge. Cette méthode d'analyse indirecte se base sur un étalonnage qui consiste à développer un modèle mathématique reliant les données spectrales aux valeurs obtenues par les méthodes de référence. Ensuite, par diverses formules mathématiques, d'autres valeurs alimentaires sont déterminées. Ici, les valeurs alimentaires qui vont nous intéresser sont la cellulose brute, le VEM (valeur énergétique pour la production de lait), le VEVI (valeur énergétique pour la production intensive de viande), le DVE (protéines digestibles dans l'intestin grêle) et l'OEB (différence entre les protéines microbiennes brutes synthétisables à départ de l'azote disponible et au départ de l'énergie disponible).

3.3.9. Méthode statistique

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées sur le logiciel JMP SAS. Etant donné que nos traitements étaient des variables catégorielles et que nos réponses étaient continues, nous avons décidé de traiter nos données par des ANOVA 1.

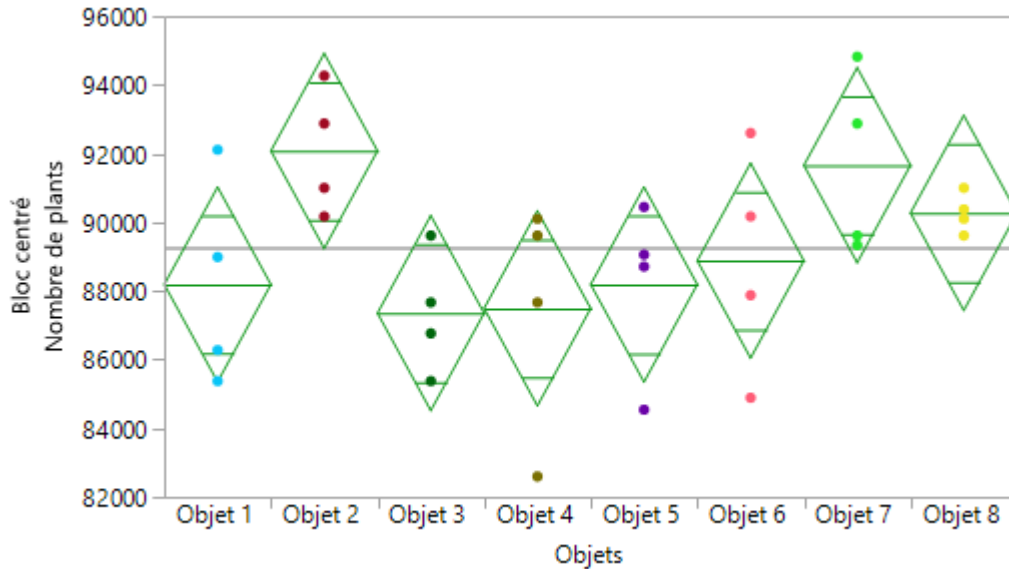
Par conséquent, avant chaque analyse, nous devons vérifier que les hypothèses de l'ANOVA étaient bien respectées : la normalité et l'égalité des variances. Pour ce faire, nous faisons systématiquement un QQ plot (graphe de distribution des résidus) et un test de Levene (H_0 = toutes des variances sont égales). Dans le cas où la normalité n'était pas respectée, une analyse non-paramétrique devait être lancée à la place de l'ANOVA. Dans le cas où l'égalité des variances n'étaient pas respectée, un test de Welsh (ANOVA où les variances sont considérées comme inégales) devait alors être lancé à la place.

Ensuite, après le test ANOVA ou un autre équivalent, son résultat était vérifié par un test de Tukey qui compare tous les objets de la série deux à deux (H_0 = pas de différence entre les objets). Dans le cas où des différences significatives entre certaines objets étaient constatées, celles-ci étaient prises retranscrites pour être interprétées.

Concernant la lecture des graphes, la ligne horizontale positionnée au centre indique la moyenne générale de la série de données. Chaque groupe est, quant à lui, représenté par un losange vert. La ligne verte au centre de ce dernier représente la valeur moyenne du groupe. Pour ce qui est de la taille du losange, sa hauteur représente 95 % de l'intervalle de confiance du groupe et sa largeur est proportionnelle à la taille de l'échantillon du dit groupe. Enfin, les deux lignes vertes de part et d'autre de la moyenne sont les « overlap mark ». Pour des groupes avec des tailles d'échantillons égales, ces marques indiquent que deux moyennes de groupe ne sont pas significativement différentes à un intervalle de confiance donné.

4. Résultats

4.1. Comptage de l'émergence



Graphique 1 : Résultat du comptage de la levée (plants/ha) en fonction des différents objets.

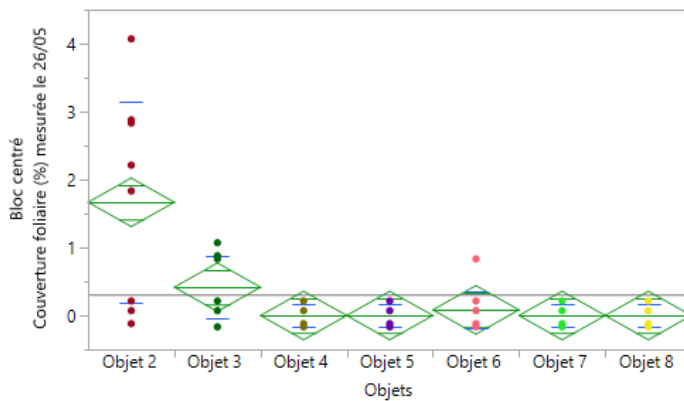
Avant toutes choses, il est important de préciser que la distribution de cette série de données est normale et que les variances des différents objets de notre expérience sont homogènes. Nous pouvons donc considérer que les hypothèses de l'ANOVA 1 sont remplies. Par conséquent, nous pouvons entamer une analyse classique.

Les moyennes individuelles s'écartent peu de la moyenne globale de l'expérience (89269 plants/ha). Cela se confirme par l'analyse de la variance qui nous indique qu'il n'y a pas d'effet du traitement sur la levée du maïs (p -valeur = 0.1332 > 0.05). Un test de Tukey a été réalisé afin de vérifier cette affirmation et il nous a également montré qu'aucune différence significative entre les objets n'est à constater.

4.2. Surface foliaire effective du sous-semis

4.2.1. Durant la culture du maïs

4.2.1.1. Mesures de la couverture du sous-semis du 26/05/17



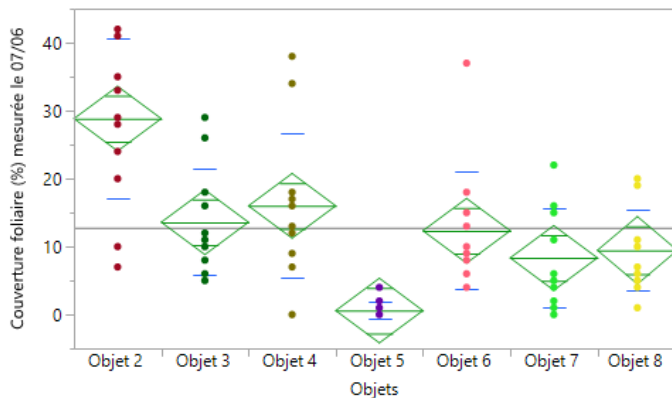
Graphique 2 : Couverture des sous-semis en fonction des objets. Mesures datées du 26/05/17

D'emblée, nous précisons que la distribution de ces données est normale mais que les variances des différents objets sont inégales (barres bleues). Nous devons donc remplacer le test ANOVA 1 par un test de Welsh.

Les moyennes individuelles s'écartent peu de la moyenne globale de l'expérience (0.3%) à l'exception de l'objet 2 (sous-semis de trèfle blanc 4 kg/ha) qui a une valeur plus élevée. Cela se confirme par l'analyse de la variance selon un test de Welsh qui nous indique qu'il n'y a pas d'effet du traitement sur la couverture des sous-semis à cette date (p -valeur = $0.0052 < 0.05$). Un test de Tukey a été réalisé afin de vérifier cette affirmation et il nous montre que l'objet 2 (sous-semis de trèfle blanc 4 kg/ha) est significativement différent de tous les autres objets de l'essai. A par cela, aucun autre objet ne diffère.

Remarque : Nous nous sommes permis de faire un test de Tukey même si cela n'est pas optimal car seul un objet possède une variance significativement différente.

4.2.1.2. Mesures de la couverture du sous-semis du 07/06/17



Graphique 3 : Couverture des sous-semis en fonction des objets.
Mesures datées du 07/06/17

Primo, nous précisons que la distribution de ces données est normale mais que les variances des différents objets sont inégales (barres bleues). Nous devons donc remplacer le test ANOVA 1 par un test de Welsh.

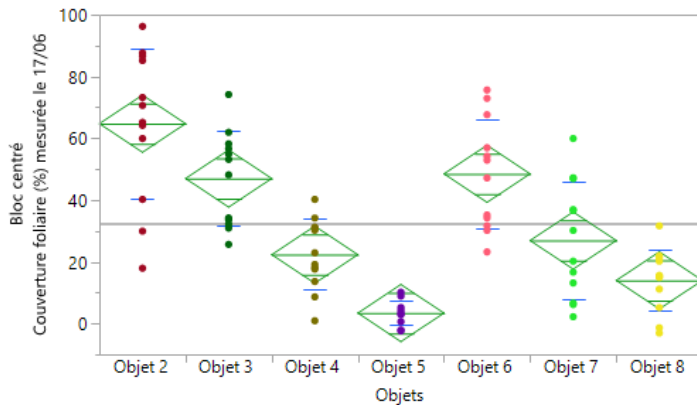
Certaines moyennes individuelles semblent s'écarter de la moyenne globale de l'expérience (13%). Cela

se confirme par l'analyse de la variance selon un test de Welsh qui nous indique qu'au moins un objet de l'expérience est significativement différent d'un autre objet (p -valeur $< 0.0001 < 0.05$). Un test de Tukey a été réalisé afin de vérifier cette affirmation et il nous montre qu'il y a une différence significative entre les objets suivants (classés par ordre d'importance) : 2 et 5 ; 2 et 7 ; 2 et 8 ; 2 et 6 ; 4 et 5 ; 2 et 3 ; 3 et 5 ; 2 et 4 et finalement 6 et 5.

Ainsi, nous pouvons démontrer que l'objet 2 (sous-semis de trèfle blanc 4 kg/ha) est significativement plus performant en termes de couverture alors que l'objet 5 (sous semis de fétuque rouge 6kg/ha) est significativement moins performant en termes de couverture que les autres objets à cette date.

Remarque : Nous nous sommes permis de faire un test de Tukey même si cela n'est pas optimal à la vue de la relativement faible hétérogénéité des variances (simple au double).

4.2.1.3. Mesures de la couverture du sous-semis du 07/06/17



Graphique 4 : Couverture des sous-semis en fonction des objets. Mesures datées du 07/06/17

Avant toutes choses, nous précisons que la distribution de ces données est normale mais que les variances des différents objets sont inégales (barres bleues). Nous devons donc remplacer le test ANOVA 1 par un test de Welsh.

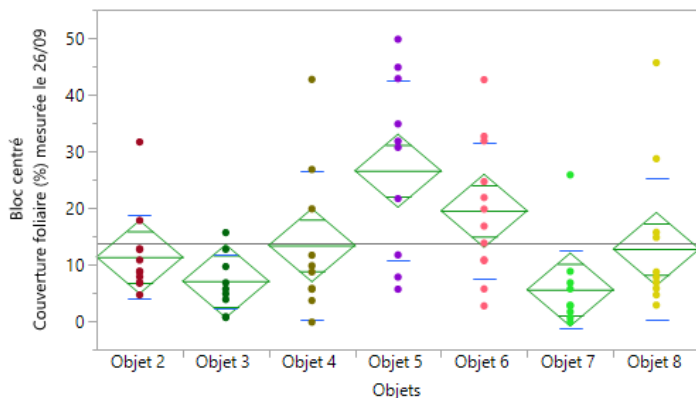
Nombres de moyennes individuelles semblent s'écarter de la moyenne globale de l'expérience (32.5%). Cela se confirme par l'analyse de la variance selon un test de Welsh qui nous indique qu'au moins un objet de l'expérience est significativement différent d'un autre objet (p -valeur $< 0.0001 < 0.05$). Un test de Tukey a été réalisé afin de vérifier cette affirmation et il nous montre qu'il y a une différence significative entre les objets suivants (classés par ordre d'importance) : 2 et 5 ; 2 et 8 ; 6 et 5 ; 5 et 3 ; 2 et 4 ; 2 et 7 ; 6 et 8 ; 3 et 8 ; 6 et 4 ; 3 et 4 ; 7 et 5 ; 6 et 7 et finalement 3 et 7. Pour finir, les objets ne différant pas sont minoritaires.

Ainsi, nous pouvons démontrer que les objets à base de trèfles blancs et de trèfles blancs nains sont significativement plus couvrants que les objets à base de fétuques rouge ou de lotiers à cette date.

Remarque : Nous nous sommes permis de faire un test de Tukey même si cela n'est pas optimal à la vue de la relativement faible hétérogénéité des variances (simple au double) sauf pour l'objet 5 où la différence est de l'ordre de la dizaine. Nous émettons donc quelques réserves sur l'utilisation de ce test dans ce cas.

4.2.2. Après la récolte du maïs

4.2.2.1. Mesures de la couverture du sous-semis du 29/09/17



Graphique 5 : Couverture des sous-semis en fonction des objets. Mesures datées du 29/09/17

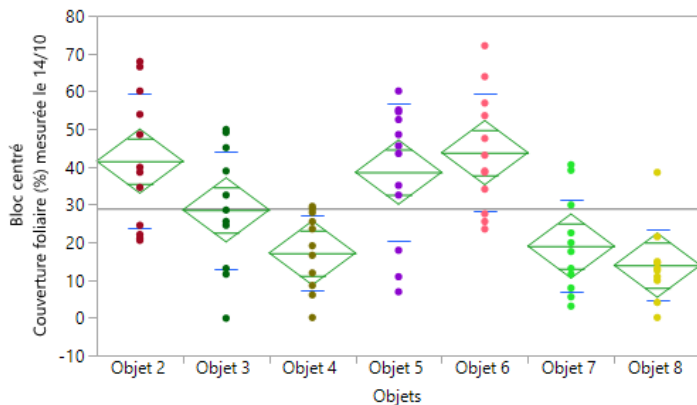
Pour commencer, nous précisons que la distribution de ces données est normale mais que les variances des différents objets sont inégales (barres bleues). Nous devons donc remplacer le test ANOVA 1 par un test de Welsh.

Certaines moyennes individuelles semblent s'écarter de la moyenne globale de l'expérience (14%). Cela se confirme par l'analyse de la variance selon un test de Welsh qui nous indique qu'au moins un objet de l'expérience est significativement différent d'un autre objet (p -valeur = 0.0012 < 0.05). Un test de Tukey a été réalisé afin de vérifier cette affirmation et il nous montre qu'il y a une différence significative entre les objets suivants (classés par ordre d'importance) : 5 et 7 ; 5 et 3 ; 5 et 2 et finalement 6 et 7.

Ainsi, nous pouvons notamment démontrer que l'objet 5 (fétuque rouge 6 kg/ha) est significativement plus couvrant que l'objet 2 (sous semis de trèfle blanc 4 kg/ha) ainsi que les sous-semis à base de trèfles blancs nains juste après la récolte du maïs. De plus, on peut ajouter que l'objet 6 (trèfle blanc 2 kg/ha) est légèrement plus performant que le trèfle blanc nain 2 kg/ha à cette date.

Remarque : Nous nous sommes permis de faire un test de Tukey même si cela n'est pas optimal à la vue de la relativement faible hétérogénéité des variances (simple au triple).

4.2.2.2. Mesures de la couverture du sous-semis du 14/10/17



Graphique 6 : Couverture des sous-semis en fonction des objets. Mesures datées du 14/10/17

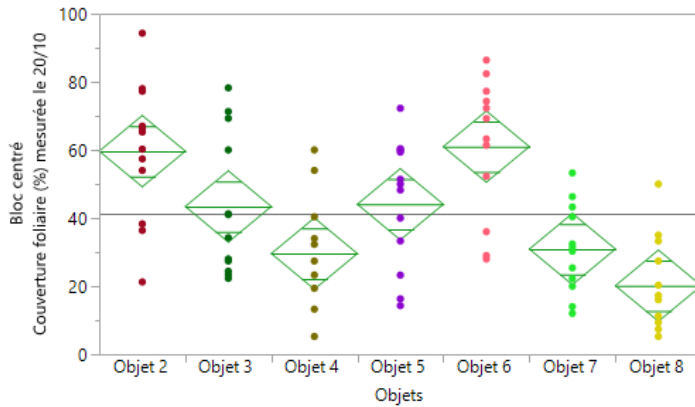
Préalablement, nous précisons que la distribution de ces données est normale mais que les variances des différents objets sont inégales (barres bleues). Nous devons donc remplacer le test ANOVA 1 par un test de Welsh.

Certaines moyennes individuelles semblent s'écarter de la moyenne globale de l'expérience (29%). Cela se confirme par l'analyse de la variance selon un test de Welsh qui nous indique qu'au moins un objet de l'expérience est significativement différent d'un autre objet ($p\text{-valeur} < 0.0001 < 0.05$). Un test de Tukey a été réalisé afin de vérifier cette affirmation et il nous montre qu'il y a une différence significative entre les objets suivants (classés par ordre d'importance) : 6 et 8 ; 2 et 8 ; 6 et 4 ; 6 et 7 ; 5 et 8 ; 2 et 4 ; 5 et 4 et finalement 5 et 7.

Ainsi, nous pouvons notamment démontrer que globalement les sous-semis à base de trèfles blancs et de fétuques sont significativement plus performant que ceux à base de lotier à cette date. De plus, nous remarquons que les objets à bases de trèfles blancs ont bien rattraper leur retard avec la fétuque.

Remarque : Nous nous sommes permis de faire un test de Tukey même si cela n'est pas optimal à la vue de la relativement faible hétérogénéité des variances (simple au double).

4.2.2.3. Mesures de la couverture du sous-semis du 20/10/17



Graphique 7 : Couverture des sous-semis en fonction des objets.
Mesures datées du 20/10/17

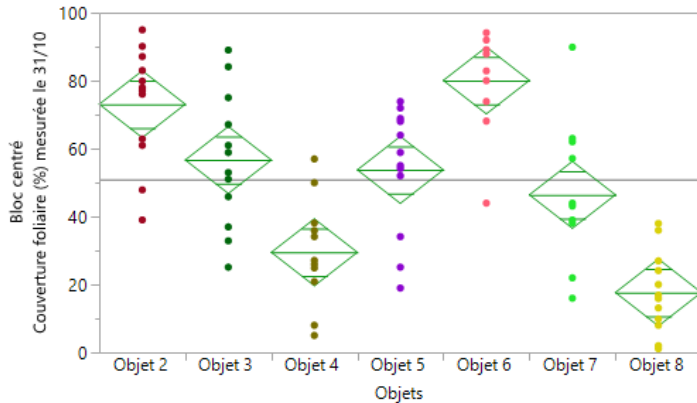
D'emblée, nous précisons que la distribution de ces données est normale et que les variances des différents objets sont homogènes. Nous pouvons donc entamer une ANOVA 1 classique.

Certaines moyennes individuelles semblent s'écarter de la moyenne globale de l'expérience (41%). Cela se

confirme par l'analyse de la variance qui nous indique qu'au moins un objet de l'expérience est significativement différent d'un autre objet ($p\text{-valeur} < 0.0001 < 0.05$). Un test de Tukey a été réalisé afin de vérifier cette affirmation et il nous montre qu'il y a une différence significative entre les objets suivants (classés par ordre d'importance) : 6 et 8 ; 2 et 8 ; 6 et 4 ; 6 et 7 ; 2 et 4 ; 2 et 7 ; 5 et 8 et finalement 3 et 8.

Ainsi, nous démontrons notamment que les sous-semis à base de trèfles blancs restent significativement supérieurs à ceux à base de lotiers et au trèfle blanc nain 2kg/ha. La fétuque rouge est toujours supérieure au lotier 2 kg/ha mais plus au lotier 4 kg/ha. En outre, la fétuque rouge commence à être dépassé de peu par les trèfles blancs. Enfin, le trèfle blanc nain 4 kg/ha est maintenant significativement supérieur au lotier 2 kg/ha.

4.2.2.4. Mesures de la couverture du sous-semis du 31/10/17



Graphique 8 : Couverture des sous-semis en fonction des objets. Mesures datées du 31/10/17

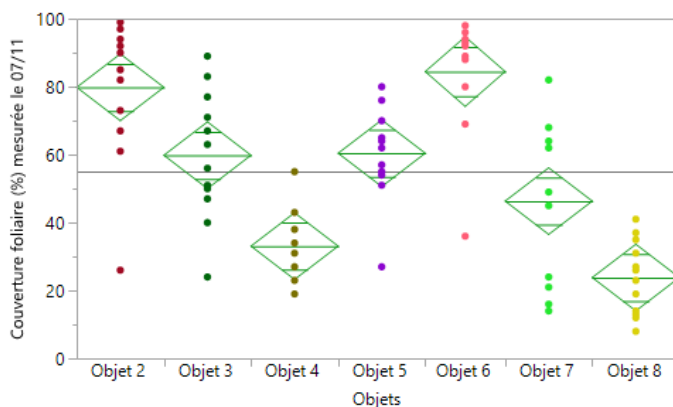
Au préalable, nous précisons que la distribution de ces données est normale et que les variances des différents objets sont homogènes. Nous pouvons donc entamer une ANOVA 1 classique.

Nombres de moyennes individuelles semblent s'écarter de la moyenne globale de l'expérience (51%). Cela

se confirme par l'analyse de la variance qui nous indique qu'au moins un objet de l'expérience est significativement différent d'un autre objet ($p\text{-valeur} < 0.0001 < 0.05$). Un test de Tukey a été réalisé afin de vérifier cette affirmation et il nous montre qu'il y a une différence significative entre les objets suivants (classés par ordre d'importance) : 6 et 8 ; 2 et 8 ; 6 et 4 ; 2 et 4 ; 3 et 8 ; 5 et 8 ; 6 et 7 ; 7 et 8 ; 3 et 4 ; 2 et 7 ; 6 et 5 ; 5 et 4 et finalement 6 et 3.

Ainsi, nous pouvons maintenant observer l'apparition de trois grands groupes distincts. Le premier, avec des performances supérieures, est composé des objets à base de trèfles blancs. Le deuxième, avec des performances intermédiaires, est composé des objets à base de trèfles blancs nains et de fétuques. Enfin, le troisième, avec des performances inférieures, est composé des objets à base de lotier.

4.2.2.5. Mesures de la couverture du sous-semis du 07/11/17



Graphique 9 : Couverture des sous-semis en fonction des objets. Mesures datées du 07/11/17

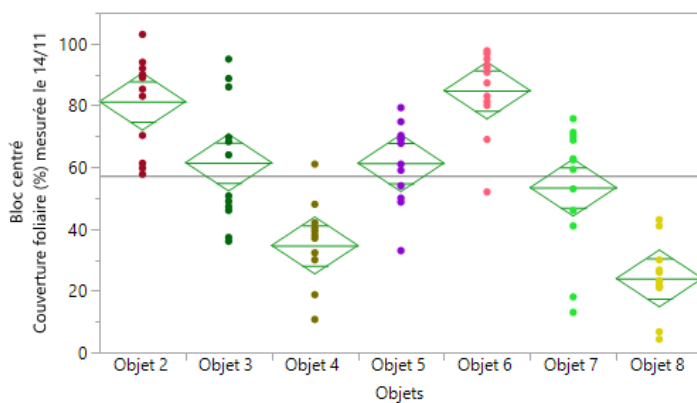
Primo, nous précisons que la distribution de ces données est normale et que les variances des différents objets sont homogènes. Nous pouvons donc entamer une ANOVA 1 classique.

Nombres de moyennes individuelles semblent s'écarter de la moyenne

globale de l'expérience (55%). Cela se confirme par l'analyse de la variance qui nous indique qu'au moins un objet de l'expérience est significativement différent d'un autre objet (p -valeur $<0.0001 < 0.05$). Un test de Tukey a été réalisé afin de vérifier cette affirmation et il nous montre qu'il y a une différence significative entre les objets suivants (classés par ordre d'importance) : 6 et 8 ; 2 et 8 ; 6 et 4 ; 2 et 4 ; 6 et 7 ; 5 et 8 ; 3 et 8 ; 2 et 7 ; 5 et 4 ; 3 et 4 ; 6 et 3 ; 6 et 5 et finalement 7 et 8.

Ainsi, nous pouvons voir que les groupes présentés juste avant sont toujours observable. Par ailleurs, on remarque que la vitesse croissance du couvert commence globalement à diminuer.

4.2.2.6. Mesures de la couverture du sous-semis du 14/11/17



Graphique 10 : Couverture des sous-semis en fonction des objets. Mesures datées du 14/11/17

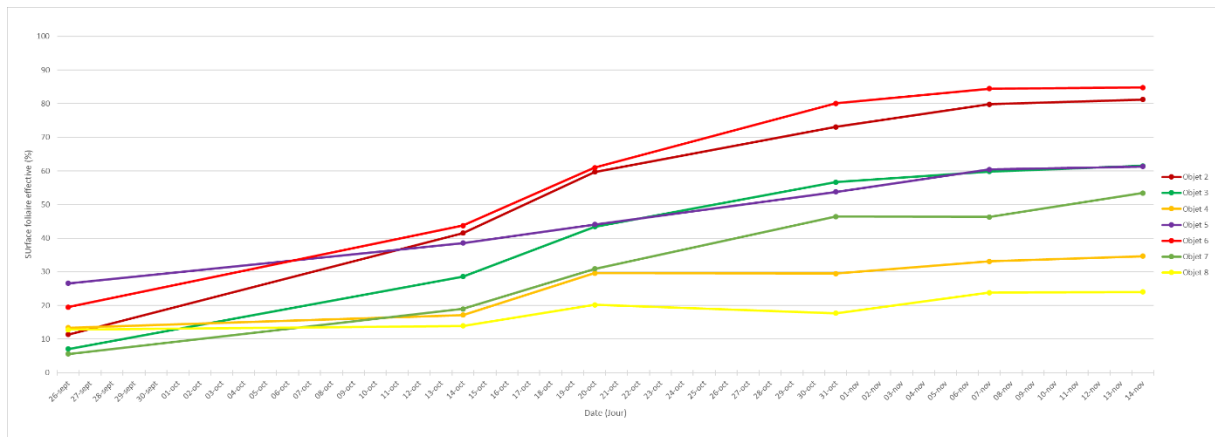
Avant toutes choses, nous précisons que la distribution de ces données est normale et que les variances des différents objets sont homogènes. Nous pouvons donc entamer une ANOVA 1 classique.

Nombres de moyennes individuelles semblent s'écarter de la moyenne globale de l'expérience (57%).

Cela se confirme par l'analyse de la variance qui nous indique qu'au moins un objet de l'expérience est significativement différent d'un autre objet (p -valeur $<0.0001 < 0.05$). Un test de Tukey a été réalisé afin de vérifier cette affirmation et il nous montre qu'il y a une différence significative entre les objets suivants (classés par ordre d'importance) : 6 et 8 ; 2 et 8 ; 6 et 4 ; 2 et 4 ; 3 et 8 ; 5 et 8 ; 6 et 7 ; 7 et 8 ; 2 et 7 ; 3 et 4 ; 5 et 4 ; 6 et 5 ; 6 et 3 et finalement 2 et 5.

Ainsi, nous pouvons voir que les groupes présentés juste avant sont toujours observable.

4.2.2.7. Evolution de la couverture foliaire du sous-semis au cours du temps

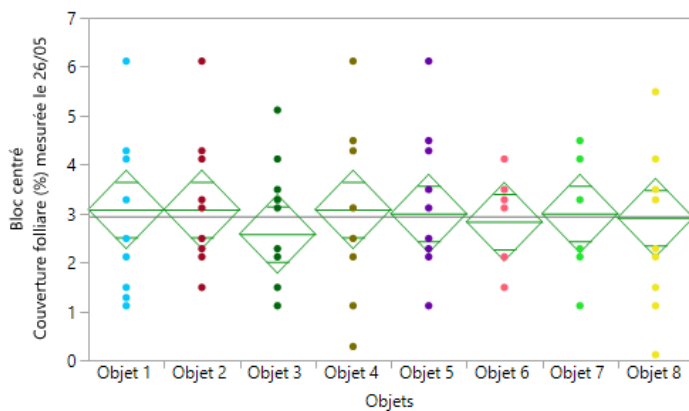


Graphique 11 : Evolution de la couverture foliaire du sous-semis au cours du temps

Comme vous pouvez le constater, l'évolution de la couverture foliaire des sous-semis au cours du temps est assez linéaire. Néanmoins, la vitesse de croissance n'est pas du tout la même en fonction du sous-semis considéré. Par exemple, la fétuque rouge (objet 6) a une vitesse de croissance particulièrement faible en comparaison des sous-semis à base de trèfles blancs (objets 2 et 6) et, dans une moindre mesure, des sous-semis à base de trèfles blancs nains (objets 3 et 7). Enfin, on peut voir que la croissance des sous-semis ralentit lors des deux dernières séries de mesures.

4.3. Surface foliaire effective de la culture de maïs

4.3.1. Mesure de la couverture du maïs du 26/05/17



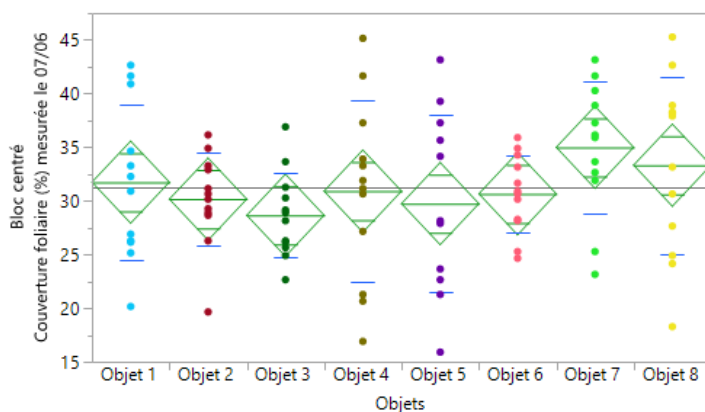
Graphique 12 : Couverture de la culture de maïs (%) en fonction des objets. Mesures datées du 26/05/17.

globale de l'expérience (3%). Cela se confirme par l'analyse de la variance qui nous indique qu'il n'y a pas d'effet du traitement sur la surface foliaire effective du maïs à cette date (p -valeur = 0.9883 > 0.05). Un test de Tukey a été réalisé afin de vérifier cette affirmation et il nous a également montré qu'aucune différence significative entre les objets n'est à constater.

Tout d'abord, nous précisons que la distribution de ces données est normale et que les variances des différents objets sont homogènes. Nous pouvons donc commencer à entamer une ANOVA 1 classique.

Les moyennes individuelles s'écartent peu de la moyenne

4.3.2. Mesure de la couverture du maïs du 07/06/17



Graphique 13 : Couverture de la culture de maïs (%) en fonction des objets. Mesures datées du 07/06/17

globale de l'expérience (31%). Cela se confirme par l'analyse de la variance selon un test de Welsh qui nous indique qu'il n'y a de nouveau pas d'effet du traitement sur la surface foliaire effective de la culture à cette date (p -valeur = 0.2333 > 0.05). Un test de Tukey a été réalisé

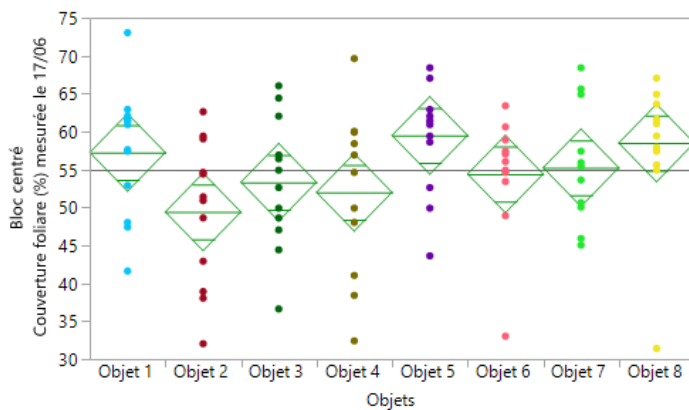
Pour commencer, nous précisons que la distribution de ces données est normale mais que les variances des différents objets sont inégales (barres bleues). Nous devons donc remplacer le test ANOVA 1 par un test de Welsh.

Les moyennes individuelles s'écartent peu de la moyenne

afin de vérifier cette affirmation et il nous a également montré qu'aucune différence significative entre les objets n'est à constater.

Remarque : Nous nous sommes permis de faire un test de Tukey même si cela n'est pas optimal à la vue de la relativement faible hétérogénéité des variances (simple au double).

4.3.3. Mesure de la couverture du maïs du 17/06/17



Graphique 14 : Couverture de la culture de maïs (%) en fonction des objets. Mesures datées du 17/06/17.

Préalablement, nous précisons que la distribution de ces données est normale et que les variances des différents objets sont homogènes. Nous pouvons donc entamer une ANOVA 1 classique.

Les moyennes individuelles s'écartent peu de la moyenne globale de l'expérience (55%). Cela

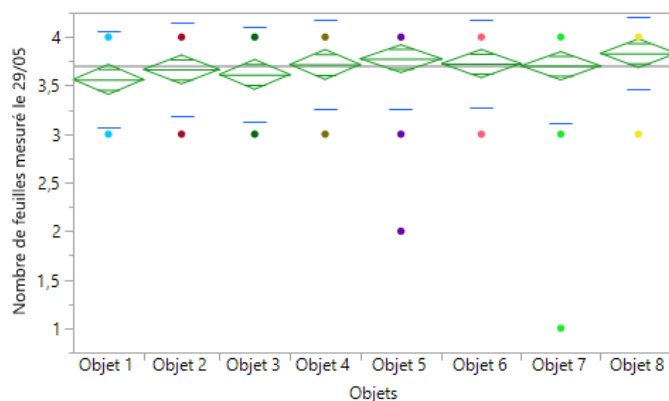
se confirme par l'analyse de la variance qui nous indique qu'il n'y a encore aucun effet du traitement sur la surface foliaire effective du maïs à cette date (p -valeur = 0.1886 > 0.05). Un test de Tukey a été réalisé afin de vérifier cette affirmation et il nous a également montré qu'aucune différence significative entre les objets n'est à constater.

4.4. Mesures directes sur les plants de maïs

4.4.1. Nombre de feuilles

Avant de débiter l'analyse de ces séries de données, nous tenons d'emblée à préciser que toutes ces séries suivent une distribution normale tandis que les variances des différents objets sont inégales (barres bleues). Nous ne pouvons donc pas considérer que les hypothèses de l'ANOVA 1 sont remplies. Par conséquent, nous devrions suivre des analyses alternatives (test de Welsh). Cela nous évitera de le répéter à chaque fois.

4.4.1.1. Mesures du nombre de feuille du 29/05/17



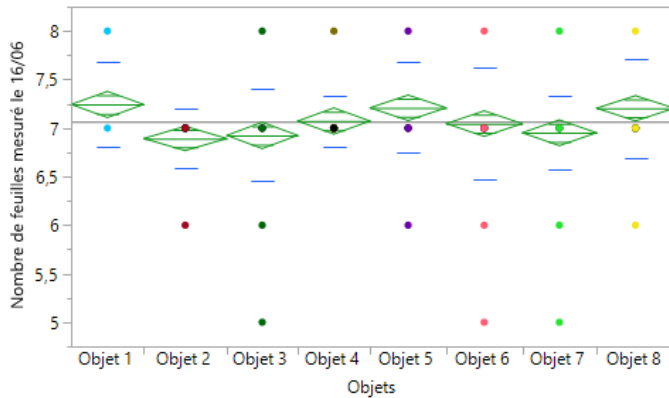
Graphique 2 : Nombre de feuilles par plants de maïs en fonction des objets. Mesures datées du 29/05/17

Les moyennes individuelles s'écartent peu de la moyenne globale de l'expérience (3.7). Cela se confirme par l'analyse de la variance selon un test de Welsh qui nous indique qu'il n'y a pas d'effet du traitement sur le nombre de feuille des plants de maïs à cette date (p -valeur = 0.1932 > 0.05).

Un test de Tukey a été réalisé afin de vérifier cette affirmation et il nous a également montré qu'aucune différence significative entre les objets n'est à constater.

Remarque : Nous nous sommes permis de faire un test de Tukey même si cela n'est pas optimal à la vue de la relativement faible hétérogénéité des variances (rapport inférieur à 1:2).

4.4.1.2. Mesures du nombre de feuille du 16/06/17



Graphique 3 : Nombre de feuilles par plants de maïs en fonction des objets. Mesures datées du 16/06/17

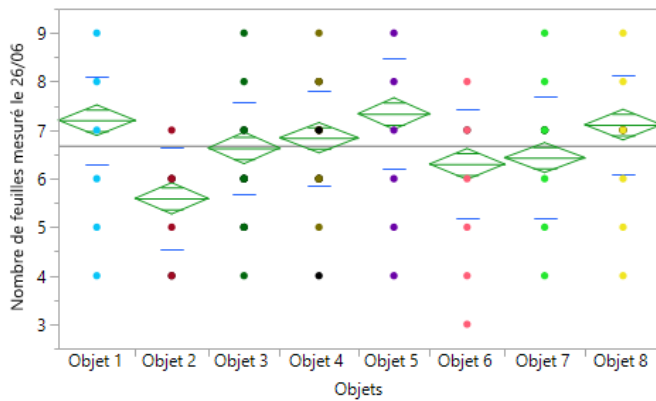
Certaines moyennes individuelles semblent s'écarter de la moyenne globale de l'expérience (7). Cela se confirme par l'analyse de la variance selon un test de Welsh qui nous indique qu'au moins un objet de l'expérience est significativement différent d'un autre objet ($p\text{-valeur} < 0.0001 < 0.05$). Un test de Tukey a été

réalisé afin de vérifier cette affirmation et il nous montre qu'il y a une différence significative entre les objets suivants (classés par ordre d'importance) : 1 et 2 ; 1 et 3 ; 5 et 2 et finalement 8 et 2.

Ainsi, nous démontrons que les objets 2 (trèfle blanc 4 kg/ha) et 3 (trèfle blanc nain 4 kg/ha) ont globalement moins de feuilles que les autres objets à cette date.

Remarque : Nous nous sommes permis de faire un test de Tukey même si cela n'est pas optimal à la vue de la relativement faible hétérogénéité des variances (simple au double).

4.4.1.3. Mesures du nombre de feuille du 26/06/17



Graphique 4 : Nombre de feuilles par plants de maïs en fonction des objets. Mesures datées du 26/06/17

Certaines moyennes individuelles semblent s'écarter de la moyenne globale de l'expérience (6.7). Cela se confirme par l'analyse de la variance selon un test de Welsh qui nous indique qu'au moins un objet de l'expérience est significativement différent d'un autre objet (p -valeur $< 0.0001 < 0.05$).

Un test de Tukey a été réalisé afin de vérifier cette affirmation et il nous montre qu'il y a une différence significative entre les objets suivants (classés par ordre d'importance) : 5 et 2 ; 1 et 2 ; 8 et 2 ; 4 et 2 ; 5 et 6 ; 3 et 2 ; 5 et 7 ; 1 et 6 ; 7 et 2 ; 8 et 6 ; 1 et 7 et finalement 6 et 2.

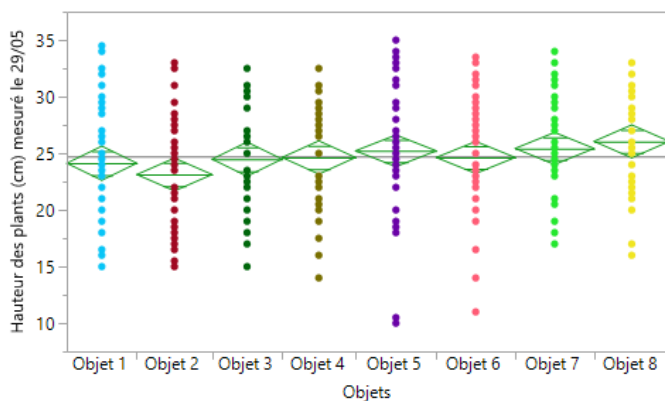
Ainsi, nous pouvons démontrer que les objets à base de trèfles ont globalement moins de feuilles que les autres objets et que les objets 1 (témoin sans sous-semis) et 6 (fétuque rouge 6 kg/ha) en ont globalement plus.

Remarque : Nous nous sommes permis de faire un test de Tukey même si cela n'est pas optimal à la vue de la relativement faible hétérogénéité des variances (rapport inférieur à 1:2).

4.4.2. Hauteur du plant

Avant de débiter l'analyse de ces séries de données, nous tenons d'emblée à préciser que toutes ces séries suivent une distribution normale et que les variances des différents objets sont égales. Nous pouvons donc considérer que les hypothèses de l'ANOVA 1 sont remplies. Par conséquent, nous pouvons suivre une analyse classique. Cela nous évitera de le répéter à chaque fois.

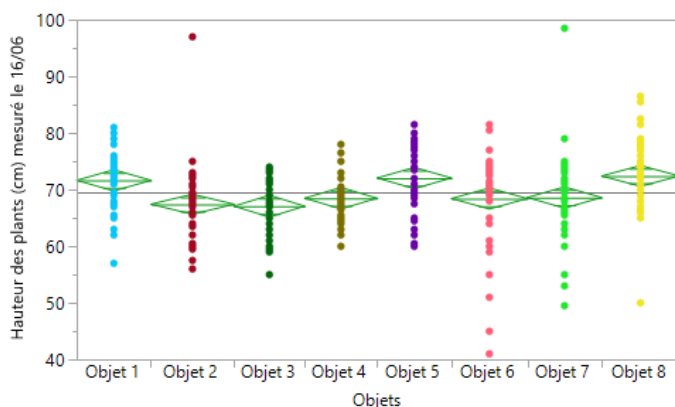
4.4.2.1. Mesures de la hauteur des plants du 29/05/17



Graphique 5 : Hauteur des plants de maïs en fonction des objets. Mesures datées du 26/05/17

Les moyennes individuelles s'écartent peu de la moyenne globale de l'expérience (25 cm). Cela se confirme par l'analyse de la variance qui nous indique qu'il n'y a pas d'effet du traitement sur la hauteur des plants de maïs à cette date ($p\text{-valeur} = 0.1854 > 0.05$). Un test de Tukey a été réalisé afin de vérifier cette affirmation et il nous a également montré qu'aucune différence significative entre les objets n'est à constater.

4.4.2.2. Mesures de la hauteur des plants du 16/06/17



Graphique 6 : Hauteur des plants de maïs en fonction des objets. Mesures datées du 16/06/17

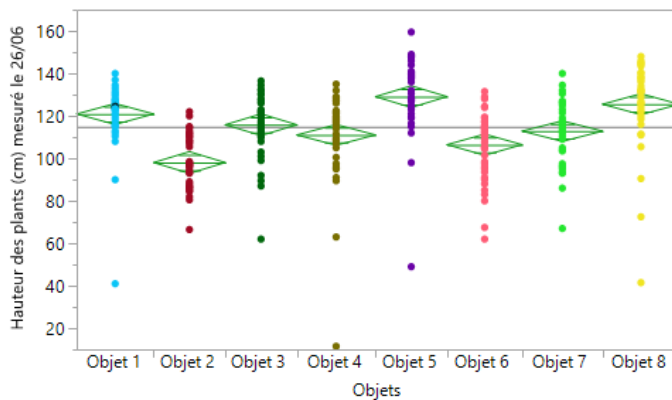
Certaines moyennes individuelles semblent s'écarter de la moyenne globale de l'expérience (70 cm). Cela se confirme par l'analyse de la variance qui nous indique qu'au moins un objet de l'expérience est significativement différent d'un autre objet ($p\text{-valeur} < 0.0001 < 0.05$). Un test de Tukey a été réalisé afin de

vérifier cette affirmation et il nous montre qu'il y a une différence significative entre les objets

suiuants (classés par ordre d'importance) : 8 et 3 ; 8 et 2 ; 5 et 3 ; 5 et 2 ; 1 et 3 et finalement 1 et 2.

Ainsi, nous pouvons démontrer que les objets 2 (trèfle blanc 4 kg/ha) et 3 (trèfles blancs nains 4 kg/ha) sont significativement plus grands que les objets 8 (lotier 2 kg/ha), 5 (fétuque rouge 6 kg/ha) et 1 (témoin sans sous-semis).

4.4.2.3. Mesures de la hauteur des plants du 26/06/17



Graphique 7 : Hauteur des plants de maïs en fonction des objets. Mesures datées du 26/06/17

De nombreuses moyennes individuelles semblent s'écarter de la moyenne globale de l'expérience (115 cm). Cela se confirme par l'analyse de la variance qui nous indique qu'au moins un objet de l'expérience est significativement différent d'un autre objet ($p\text{-valeur} < 0.0001 < 0.05$). Un test de Tukey a été réalisé afin de

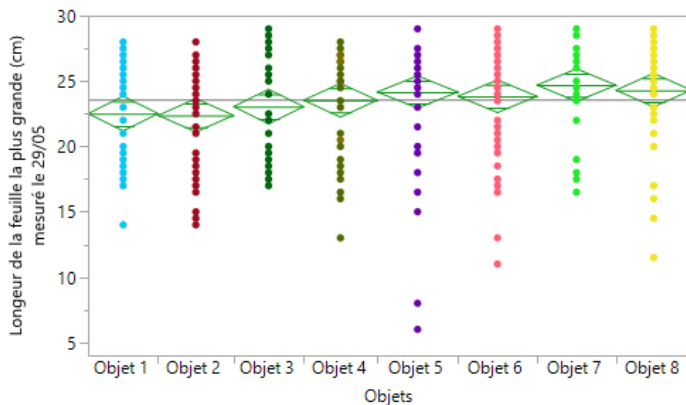
vérifier cette affirmation et il nous montre qu'il y a une différence significative entre les objets suivants (classés par ordre d'importance) : 5 et 2 ; 8 et 2 ; 1 et 2 ; 5 et 6 ; 8 et 6 ; 5 et 4 ; 3 et 2 ; 5 et 7 ; 7 et 2 ; 8 et 4 ; 1 et 6 ; 5 et 3 ; 4 et 2 et finalement 8 et 7.

Ainsi, nous pouvons voir que les objets à bases de trèfles blancs sont plus grands que la plupart des autres objets. A contrario, les objets 5, 1 et 8 sont globalement plus petits que autres objets.

4.4.3. Longueur de la plus grande feuille du plant de maïs

Avant de démarrer l'analyse de ces séries de données, nous tenons d'emblée à préciser que toutes ces séries suivent une distribution normale et que les variances des différents objets sont égales. Nous pouvons donc considérer que les hypothèses de l'ANOVA 1 sont remplies. Par conséquent, nous pouvons suivre une analyse classique. Cela nous évitera de le répéter à chaque fois.

4.4.3.1. Mesures de la longueur de la plus grande feuille du 29/05/17

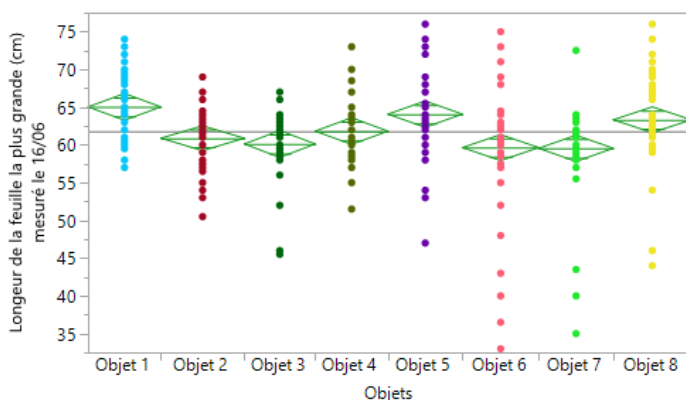


Graphique 8: Longueur de la feuille la plus grande des plants de maïs en fonction des objets. Mesures datées du 29/05/17

Les moyennes individuelles s'écartent peu de la moyenne globale de l'expérience (24 cm). Cela se confirme par l'analyse de la variance qui nous indique qu'il n'y a pas d'effet du traitement sur la longueur de la feuille la plus grande (p -valeur = 0.1076 > 0.05). Un test de Tukey a été réalisé afin de vérifier

cette affirmation et il nous a également montré qu'aucune différence significative entre les objets n'est à constater.

4.4.3.2. Mesures de la longueur de la plus grande feuille du 16/06/17



Graphique 9: Longueur de la feuille la plus grande des plants de maïs en fonction des objets. Mesures datées du 16/06/17

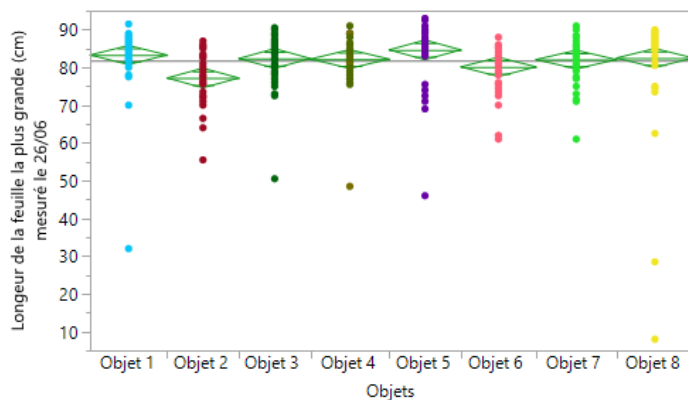
Certaines moyennes individuelles semblent s'écarter de la moyenne globale de l'expérience (70 cm). Cela se confirme par l'analyse de la variance qui nous indique qu'au moins un objet de l'expérience est significativement différent d'un autre objet (p -valeur < 0.0001 < 0.05). Un test de Tukey a été réalisé afin de

vérifier cette affirmation et il nous montre qu'il y a une différence significative entre les objets

suiuants (classés par ordre d'importance) : 1 et 7 ; 1 et 6 ; 1 et 3 ; 5 et 7 ; 5 et 6 ; 1 et 2 ; 5 et 3 ; 8 et 7.

Ainsi, nous pouvons releuer que les objets 6 (trèfle blanc 2 kg/ha), 7 (trèfle blanc nain 2 kg/ha) et 3 (lotier 4 kg/ha) sont significatiuement inférieurs aux objets 1 (témoin sans sous semis) et 5 (fétuque rouge 6kg/ha).

4.4.3.3. Mesures de la longueur de la plus grande feuille du 26/06/17



Graphique 10: Longeur de la feuille la plus grande des plants de maïs en fonction des objets. Mesures datées du 26/06/17

Certaines moyennes individuelles semblent s'écarter de la moyenne globale de l'expérience (82 cm). Cela se confirme par l'analyse de la variance qui nous indique qu'au moins un objet de l'expérience est significatiuement différent d'un autre objet ($p\text{-valeur} = 0.0057 < 0.05$). Un test de Tukey a été réalisé

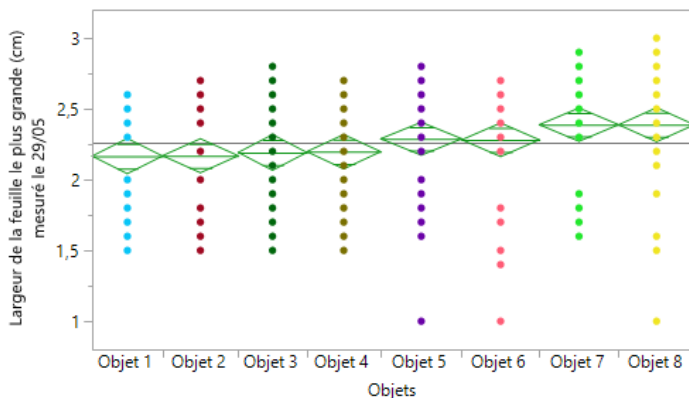
afin de vérifier cette affirmation et il nous montre qu'il y a une différence significative entre les objets suivants (classés par ordre d'importance) : 5 et 2 et 1 et 2.

Ainsi, nous pouvons observer que à cette date seul l'objet 2 (trèfle blanc 4 kg/ha) reste inférieur aux objets 5 (fétuque rouge 6 kg/ha) et 1 (témoin sans sous-semis).

4.4.4. Largeur de la plus grande feuille du plant de maïs

Avant de commencer l'analyse de ces séries de données, nous tenons d'emblée à préciser que toutes ces séries suivent une distribution normale et que les variances des différents objets sont égales à l'exception de la deuxième série, où la variance n'est pas homogène. Par conséquent, nous pouvons suivre une analyse classique pour la première et la troisième série mais pas pour la deuxième où un test de Welsh sera réalisé.

4.4.4.1. Mesures de la largeur de la plus grande feuille du 29/05/17

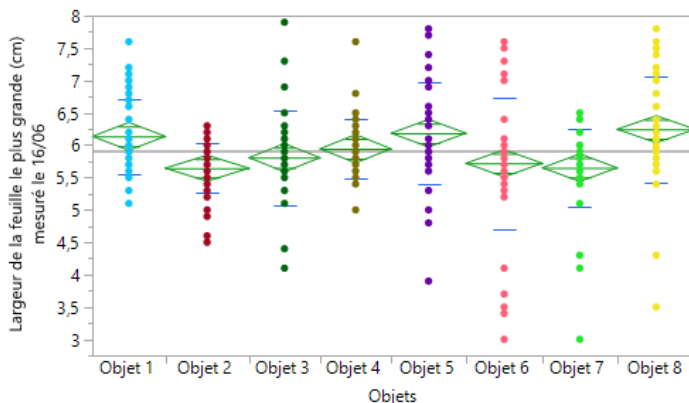


Graphique 11: Largeur de la feuille la plus grande des plants de maïs en fonction des objets. Mesures datées du 29/05/17

Les moyennes individuelles s'écartent peu de la moyenne globale de l'expérience (2.3 cm). Cela est contredit par l'analyse de la variance qui nous indique qu'il n'y a pas d'effet du traitement sur la largeur de la feuille la plus grande (p -valeur = 0.0284 < 0.05). Un test de Tukey a été réalisé afin de vérifier

cette affirmation et il nous a, en revanche, montré qu'aucune différence significative entre les objets n'est à constater. Un test de Dunnett a alors été effectué avec l'objet 1 comme contre et nous avons obtenu un résultat similaire. Le résultat obtenu par analyse de la variance est donc à la limite de la significativité.

4.4.4.2. Mesures de la largeur de la plus grande feuille du 16/06/17



Graphique 12: Largeur de la feuille la plus grande des plants de maïs en fonction des objets. Mesures datées du 16/06/17

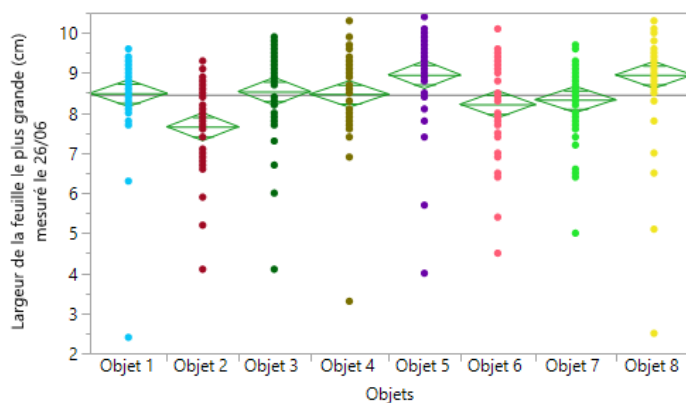
Certaines moyennes individuelles semblent s'écarter de la moyenne globale de l'expérience (6 cm). Cela se confirme par l'analyse de la variance selon un test de Welsh qui nous indique qu'au moins un objet de l'expérience est significativement différent d'un autre objet (p -valeur

<0.0001< 0.05). Un test de Tukey a été réalisé afin de vérifier cette affirmation et il nous montre qu'il y a une différence significative entre les objets suivants (classés par ordre d'importance) : 8 et 2 ; 8 et 7 ; 5 et 2 ; 5 et 7 ; 8 et 6 ; 1 et 2 ; 1 et 7 et finalement 5 et 6.

Ainsi, nous pouvons constater que les objets 2 (trèfle blanc 4 kg/ha) et 7 (trèfle blanc nain 2 kg/ha) sont significativement inférieurs aux objets 1 (témoin), 5 (fétuque rouge) et 8 (lotier 2 kg/ha). Par ailleurs, l'objet 6 (trèfle blanc 2 kg/ha) est significativement inférieur aux objets 5 (fétuque rouge) et 8 (lotier 2 kg/ha).

Remarque : Nous nous sommes permis de faire un test de Tukey même si cela n'est pas optimal à la vue de la relativement faible hétérogénéité des variances (simple au double).

4.4.4.3. Mesures de la largeur de la plus grande feuille du 26/06/17



Graphique 13: Largeur de la feuille la plus grande des plants de maïs en fonction des objets. Mesures datées du 26/06/17

Certaines moyennes individuelles semblent s'écarter de la moyenne globale de l'expérience (8.5 cm). Cela se confirme par l'analyse de la variance qui nous indique qu'au moins un objet de l'expérience est significativement différent d'un autre objet (p-valeur <0.0001< 0.05). Un test de Tukey a été réalisé afin de

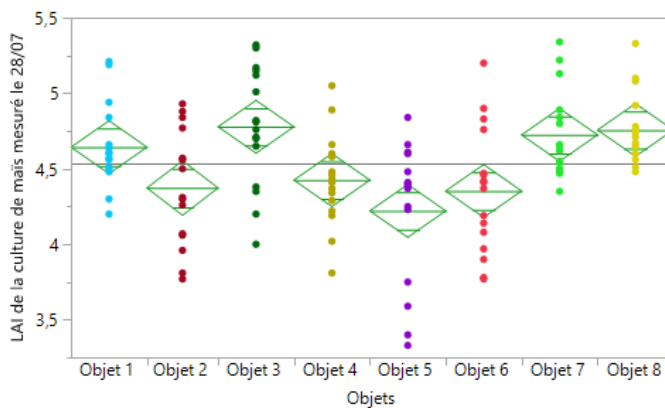
vérifier cette affirmation et il nous montre qu'il y a une différence significative entre les objets suivants (classés par ordre d'importance) : 2 et 5 ; 2 et 8 ; 2 et 3 ; 2 et 1 et finalement 2 et 4.

Ainsi, nous pouvons voir que certaines différences significatives ont disparues depuis la dernière mesure mais que d'autres subsistent comme entre l'objet 2 et les objets 1, 5 et 8. En outre, deux autres sont apparues entre l'objet 2 et les objets 3 et 4.

4.5. LAI de la culture de maïs

Avant de débiter l'analyse de ces séries de données, nous tenons d'emblée à préciser que toutes ces séries suivent une distribution normale et que les variances des différents objets sont égales à l'exception de la troisième série, où la variance n'est pas homogène. Par conséquent, nous pouvons suivre une analyse classique pour la première et la deuxième série mais pas pour la troisième où un test de Welsh sera réalisé.

4.5.1. Mesures du LAI de la culture de maïs du 28/07/17



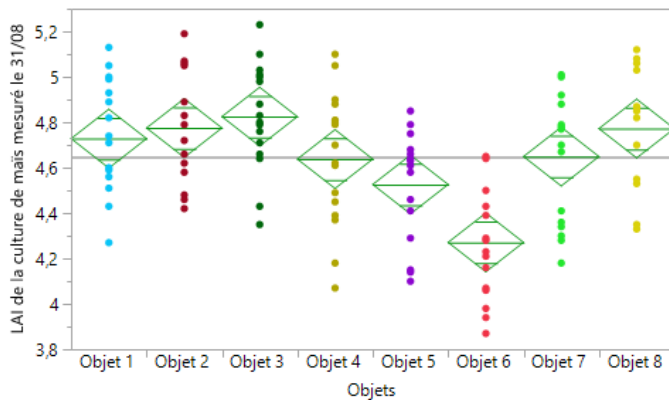
Graphique 27 : LAI de la culture de maïs en fonction des objets.
Mesures datées du 28/07/17

Certaines moyennes individuelles semblent s'écarter de la moyenne globale de l'expérience (4.5). Cela se confirme par l'analyse de la variance qui nous indique qu'au moins un objet de l'expérience est significativement différent d'un autre objet (p -valeur $< 0.0001 < 0.05$). Un test de Tukey a été réalisé afin de vérifier cette

affirmation et il nous montre qu'il y a une différence significative entre les objets suivants (classés par ordre d'importance) : 3 et 5 ; 8 et 5 ; 7 et 5 ; 3 et 6 ; 1 et 5 ; 3 et 2 et finalement 8 et 6.

Ainsi, ce sont, dans un premier temps, les objets à base de trèfles blancs et l'objet 5 (fétuque rouge 6 kg/ha) qui semblent être les moins performants alors que les objets à base de trèfles blancs nains et l'objet 8 semblent être les plus performants.

4.5.2. Mesures du LAI de la culture de maïs du 31/08/17



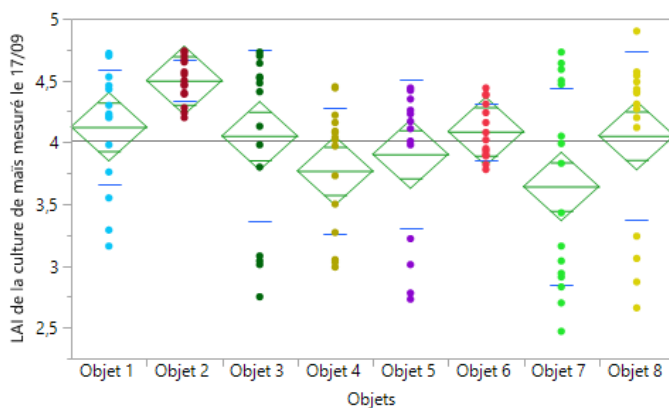
Graphique 28 : LAI de la culture de maïs en fonction des objets. Mesures datées du 31/08/17

Certaines moyennes individuelles semblent s'écarter de la moyenne globale de l'expérience (4.6). Cela se confirme par l'analyse de la variance qui nous indique qu'au moins un objet de l'expérience est significativement différent d'un autre objet (p -valeur $< 0.0001 < 0.05$). Un test de Tukey a été réalisé afin de vérifier cette

affirmation et il nous montre qu'il y a une différence significative entre les objets suivants (classés par ordre d'importance) : 3 et 6 ; 2 et 6 ; 8 et 6 ; 1 et 6 ; 7 et 6 ; 4 et 6 ; 3 et 5.

Ici, nous pouvons constater que c'est globalement l'objet 6 (trèfle blanc 2 kg/ha) qui est significativement le moins performant alors que tous les autres objets semblent avoir des performances similaires (à l'exception des objets 3 et 5). Cela change donc radicalement du résultat précédent.

4.5.3. Mesures du LAI de la culture de maïs du 17/09/17



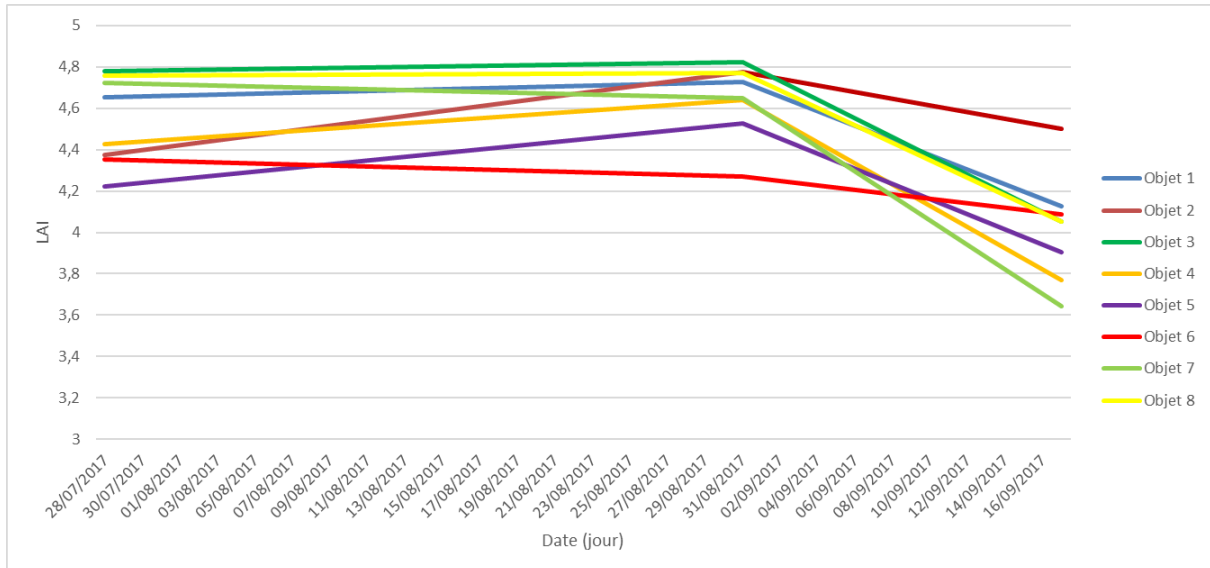
Graphique 29 : LAI de la culture de maïs en fonction des objets. Mesures datées du 17/09/17

Certaines moyennes individuelles semblent s'écarter de la moyenne globale de l'expérience (4). Cela se confirme par l'analyse de la variance selon un test de Welsh qui nous indique qu'au moins un objet de l'expérience est significativement différent d'un autre objet (p -valeur = $0.0022 < 0.05$). Un test de Tukey a été

réalisé afin de vérifier cette affirmation et il nous montre qu'il y a une différence significative entre les objets suivants (classés par ordre d'importance) : 2 et 7 et 2 et 4.

Dans ce dernier cas, nous pouvons voir que le résultat est encore différent de la série précédente avec un objet 2 significativement supérieur aux objets 7 et 4.

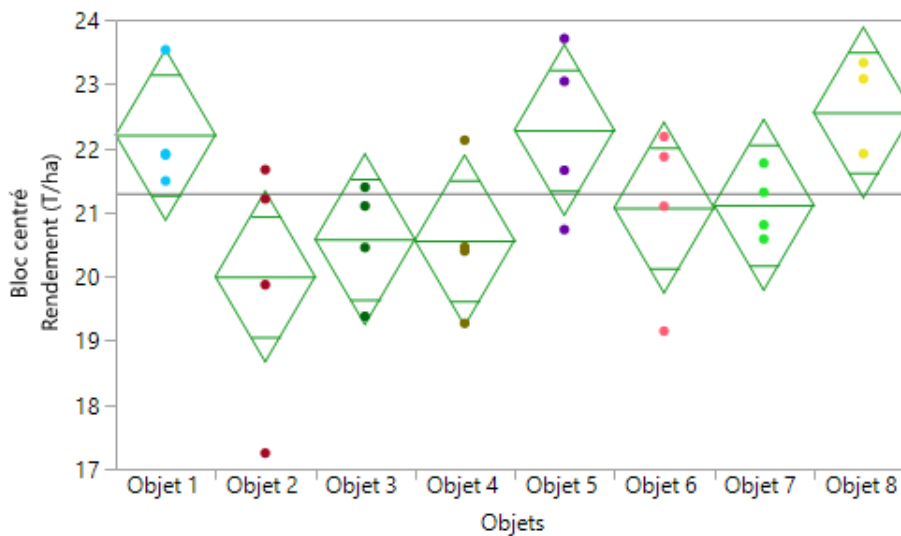
4.5.4. Evolution du LAI au cours du temps



Graphique 30 : Evolution du LAI au cours du temps

Comme vous pouvez le voir, le LAI est globalement en augmentation entre la première et la deuxième série de mesures pour ensuite chuter significativement entre la deuxième et la troisième mesure. En revanche, il semble qu'il n'y ait aucune corrélation concernant les positions relatives entre les différents objets. En effet, d'un moment à l'autre, un objet peut passer d'une position relativement élevée à une position relativement basse ou inversement.

4.6. Rendement ensilage de la culture de maïs

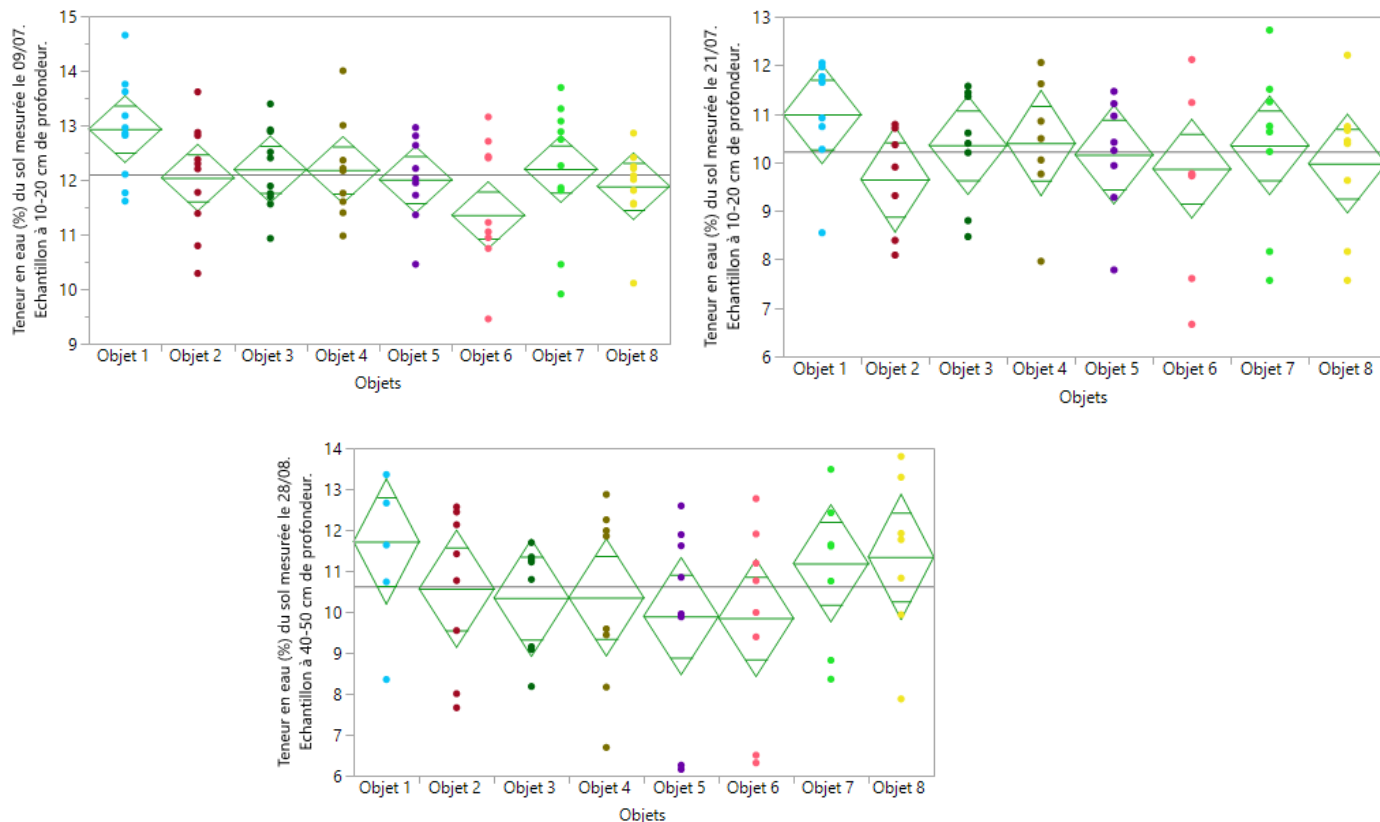


Graphique 31 : Rendement du maïs (T/ha) en fonction des objets.

Avant toutes choses, nous précisons que la distribution de ces données est normale et que les variances des différents objets sont homogènes. Nous pouvons donc entamer une ANOVA 1 classique.

Les moyennes individuelles s'écartent peu de la moyenne globale de l'expérience (21T/ha). Cela se confirme par l'analyse de la variance qui nous indique qu'il n'y a pas d'effet du traitement sur le rendement du maïs ($p\text{-valeur} = 0.0802 > 0.05$). Un test de Tukey a été réalisé afin de vérifier cette affirmation et il nous a également montré qu'aucune différence significative entre les objets n'est à constater.

4.7. Teneur en eau du sol



Graphique 32 : Teneur en eau du sol en fonction des objets. Mesures datées du 09/07/17, du 21/07/17 et du 28/08/17

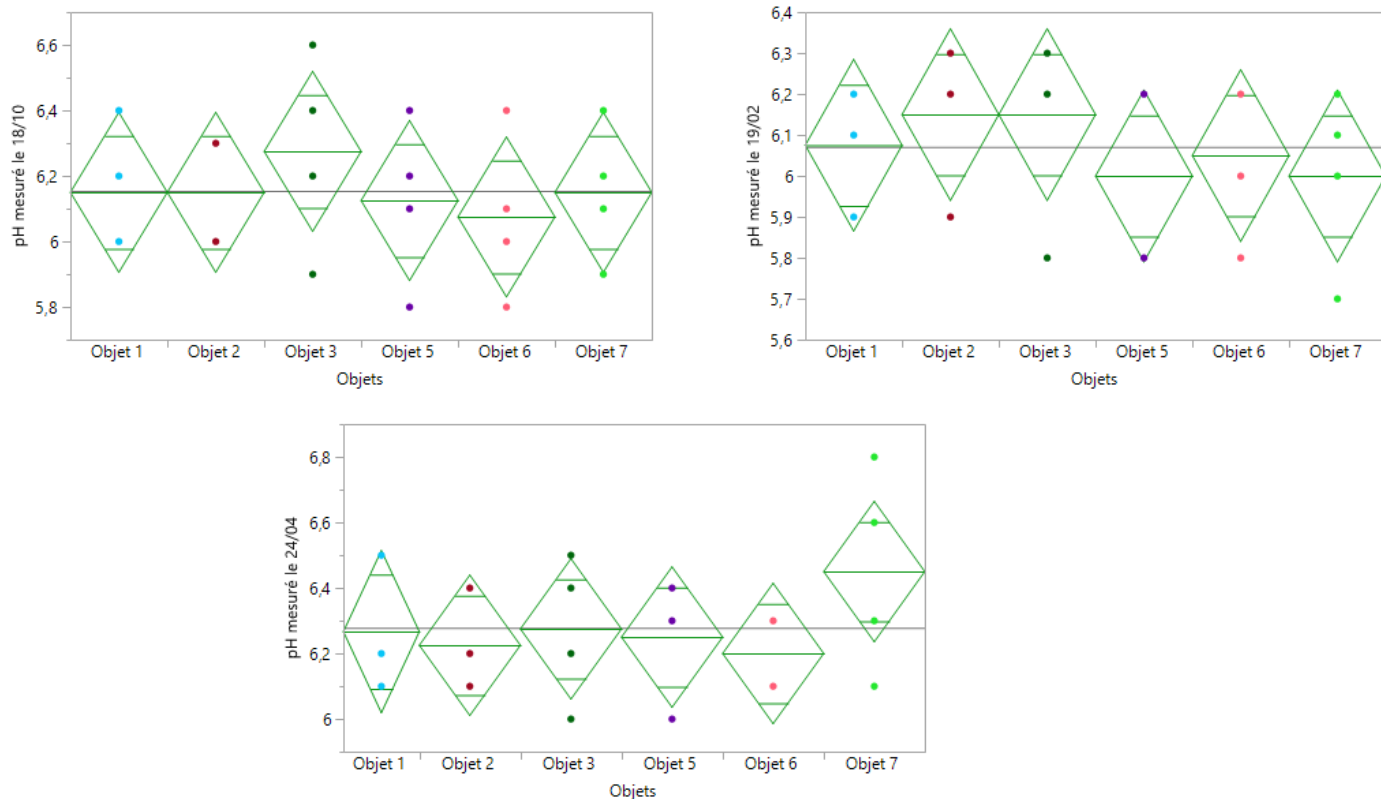
Ici, nous allons analyser ces trois séries de données comme un tout. En effet, les commentaires que nous allons faire sont valables pour toutes les séries présentées dans cette section.

Tout d'abord, nous précisons que la distribution de ces données est normale et que les variances des différents objets sont homogènes. Nous pouvons donc entamer une ANOVA 1 classique.

Il semble que les moyennes individuelles s'écartent peu des moyennes globales de chaque expérience (12%, 10.2% et 10.6% respectivement pour la première, deuxième et troisième série de mesure). Cela se confirme par l'analyse des variances qui nous indique que le traitement n'a pas d'effet sur la teneur en eau du sol (p -valeur > 0.05 dans tous les cas). Un test de Tukey a été réalisé pour toutes les séries afin de vérifier ces affirmations et ils nous ont également montrés qu'aucune différence significative entre les objets n'est à constater et ce pour toutes les dates de mesures.

4.8. Analyses de sol

4.8.1. pH KCl



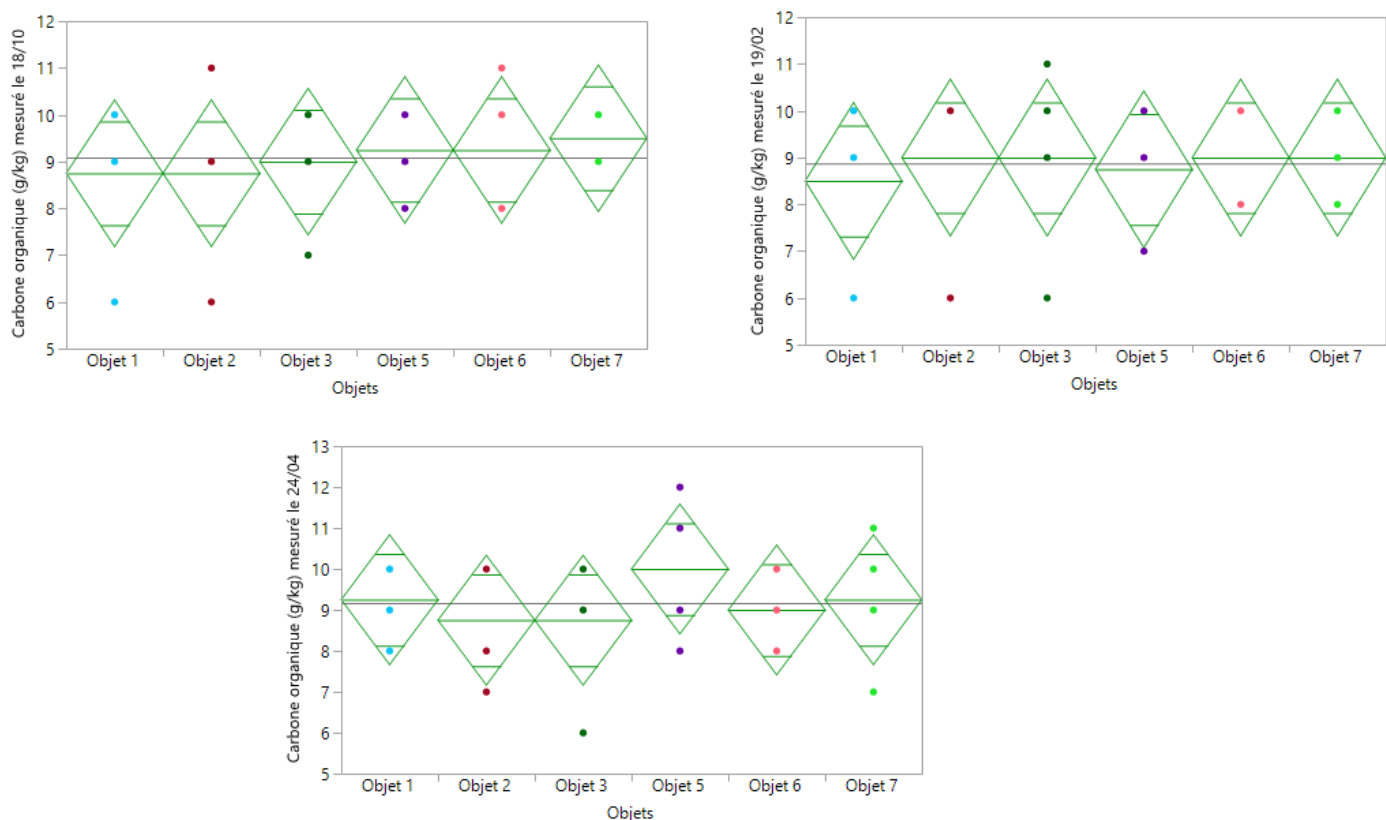
Graphique 14 : pH du sol en fonction des objets. Mesures datées du 18/10/17, du 19/02/18 et du 24/04/18

Ici, nous allons analyser ces trois séries de données comme un tout. En effet, les commentaires que nous allons faire sont valables pour toutes les séries présentées dans cette section.

Tout d'abord, nous précisons que la distribution de ces données est normale et que les variances des différents objets sont homogènes. Nous pouvons donc entamer une ANOVA 1 classique.

Il semble là que les moyennes individuelles s'écartent peu des moyennes globales de chaque expérience (6.1, 6.1 et 6.3 respectivement pour la première, deuxième et troisième série de mesure). Cela se confirme par l'analyse des variances qui nous indique qu'il n'y a aucun effet du traitement sur le pH KCl du sol (p -valeur > 0.05 dans tous les cas). Un test de Tukey a été réalisé pour toutes les séries afin de vérifier ces affirmations et ils nous ont également montrés qu'aucune différence significative entre les objets n'est à constater et ce pour toutes les dates de mesures.

4.8.2. Carbone organique



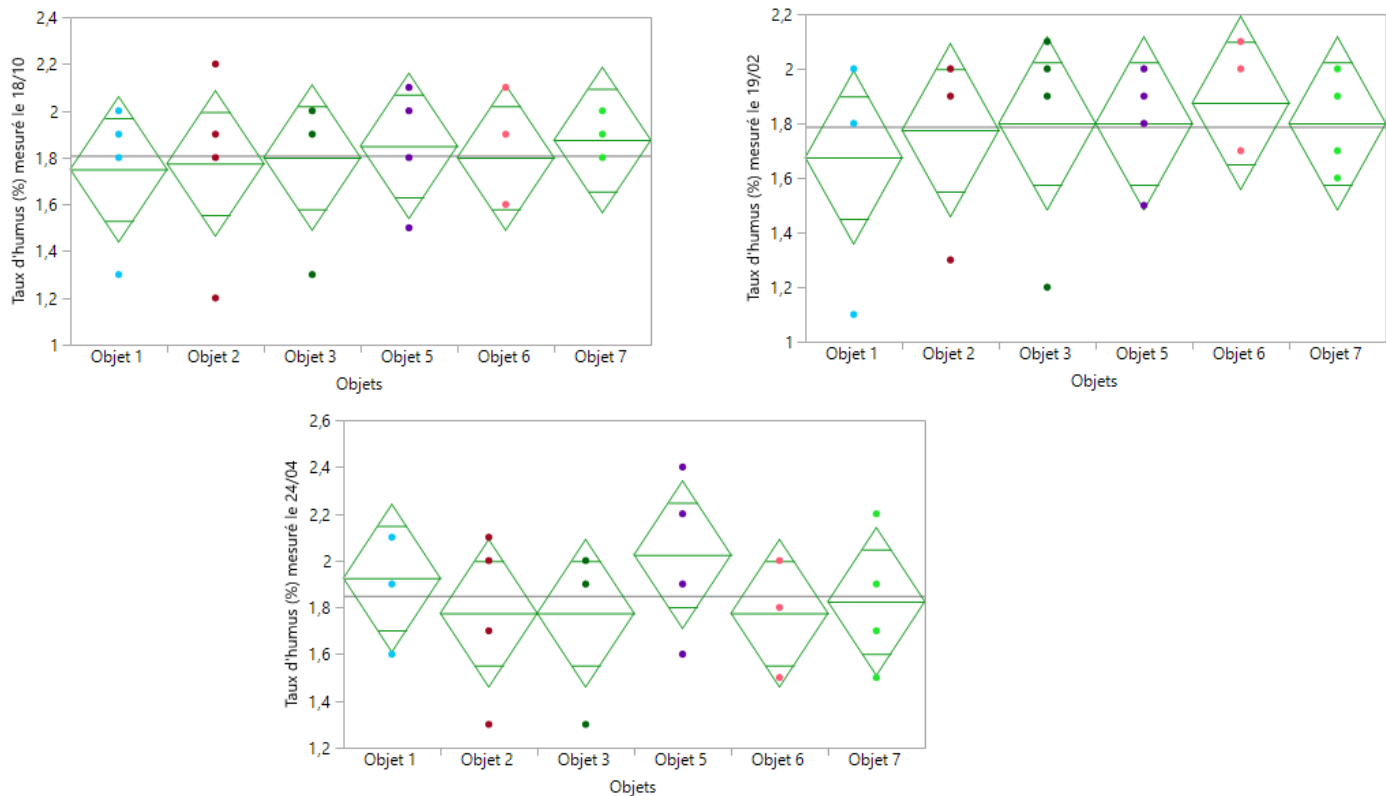
Graphique 15 : Carbone organique du sol en fonction des objets. Mesures datées du 18/10/17, du 19/02/18 et du 24/04/18

Céans, nous allons analyser ces trois séries de données comme un tout. En effet, les commentaires que nous allons faire sont valables pour toutes les séries présentées dans cette section.

Au préalable, nous précisons que la distribution de ces données est normale et que les variances des différents objets sont homogènes. Nous pouvons donc entamer une ANOVA 1 classique.

Il semble dans ce cas que les moyennes individuelles s'écartent peu des moyennes globales de chaque expérience (9 pour les trois séries). Cela se confirme par l'analyse des variances qui nous indique que le traitement n'a pas d'effet sur le taux de carbone organique dans le sol (p -valeur > 0.05 dans tous les cas). Un test de Tukey a été réalisé pour toutes les séries afin de vérifier ces affirmations et ils nous ont également montrés qu'aucune différence significative entre les objets n'est à constater et ce pour toutes les dates de mesures.

4.8.3. Humus



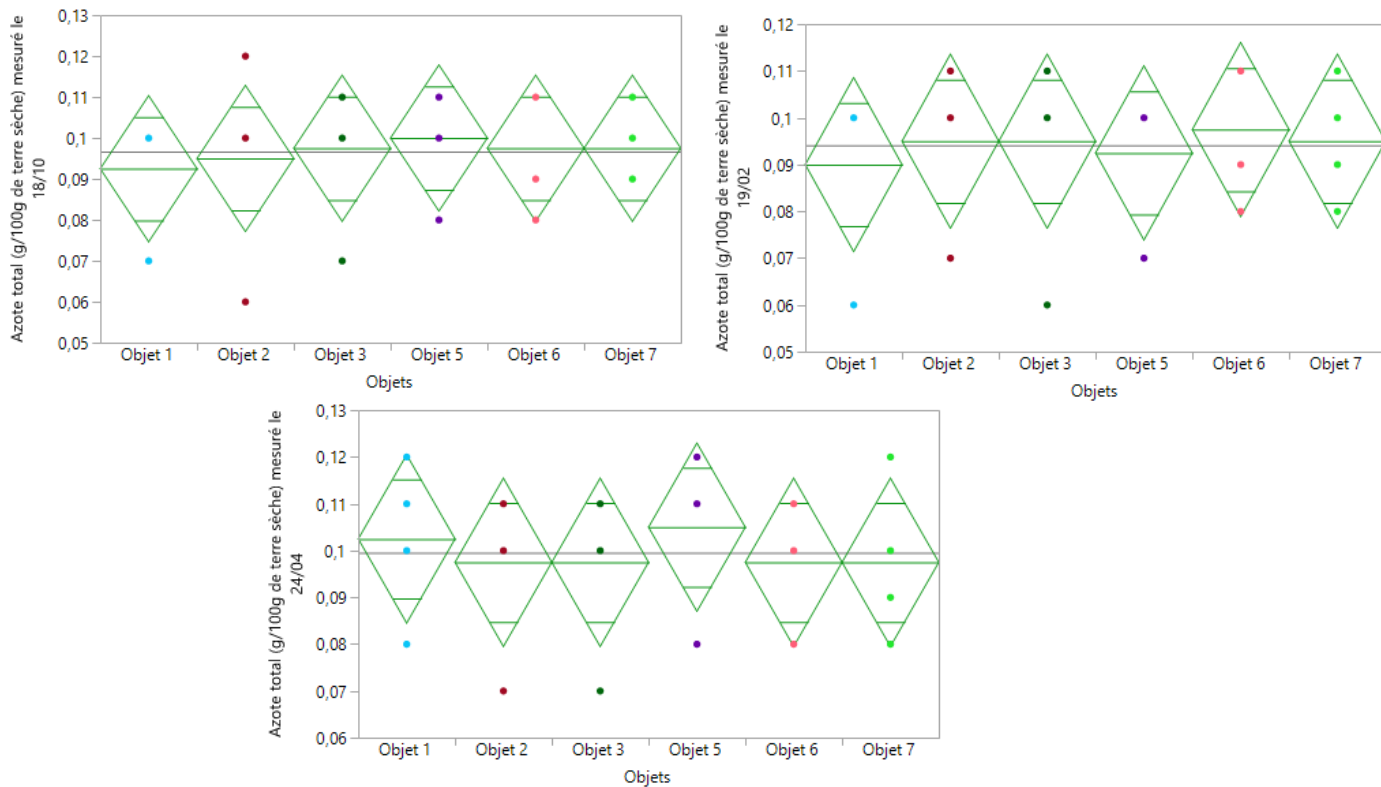
Graphique 16 : Taux d'humus du sol en fonction des objets. Mesures datées du 18/10/17, du 19/02/18 et du 24/04/18

Là, nous allons analyser ces trois séries de données comme un tout. En effet, les commentaires que nous allons faire sont valables pour toutes les séries présentées dans cette section.

D'emblée, nous précisons que la distribution de ces données est normale et que les variances des différents objets sont homogènes. Nous pouvons donc entamer une ANOVA 1 classique.

Il semble dans cette situation que les moyennes individuelles s'écartent peu des moyennes globales de chaque expérience (1.8 pour les trois séries). Cela se confirme par l'analyse des variances qui nous indique que le traitement n'a aucun effet sur le taux d'humus dans le sol (p -valeur > 0.05 dans tous les cas). Un test de Tukey a été réalisé pour toutes les séries afin de vérifier ces affirmations et ils nous ont également montrés qu'aucune différence significative entre les objets n'est à constater et ce pour toutes les dates de mesures.

4.8.4. Azote total



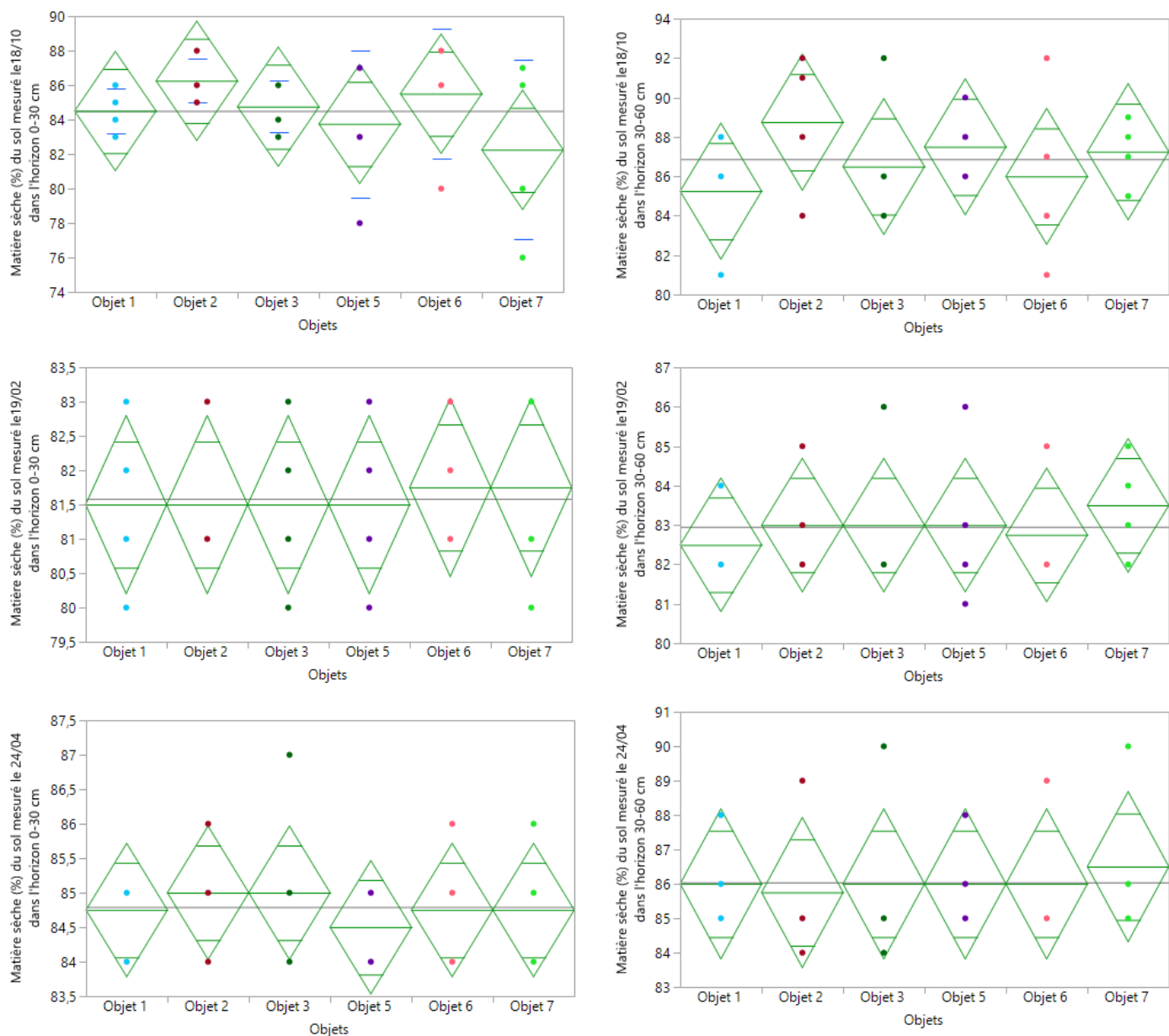
Graphique 17 : Azote total du sol en fonction des objets. Mesures datées du 18/10/17, du 19/02/18 et du 24/04/18

Dans cet autre cas, nous allons encore analyser ces trois séries de données comme un tout. En effet, les commentaires que nous allons faire sont valables pour toutes les séries présentées dans cette section.

Tout d'abord, nous précisons que la distribution de ces données est normale et que les variances des différents objets sont homogènes. Nous pouvons donc entamer une ANOVA 1 classique.

Il semble ici que les moyennes individuelles s'écartent peu des moyennes globales de chaque expérience (0.09 pour les trois séries). Cela se confirme par l'analyse des variances qui nous indique qu'il n'y a pas d'effet du traitement sur l'azote total du sol (p -valeur > 0.05 dans tous les cas). Un test de Tukey a été réalisé pour toutes les séries afin de vérifier ces affirmations et ils nous ont également montrés qu'aucune différence significative entre les objets n'est à constater et ce pour toutes les dates de mesures.

4.8.5. Matière sèche



Graphique 18 : Matière sèche du sol en fonction des objets. Mesures datées du 18/10/17, du 19/02/18 et du 24/04/18

Ici, nous allons de nouveau analyser ces trois séries de données comme un tout. En effet, les commentaires que nous allons faire sont valables pour toutes les séries présentées dans cette section.

Au préalable, nous avons constaté que les distributions de ces séries de données sont normales et que les variances des différents objets sont homogènes à l'exception de la série du 18/10/17 dans l'horizon 0-30 cm où la variance est hétérogène. Nous pouvons donc entamer une analyse classique sauf pour la série citée plus haut.

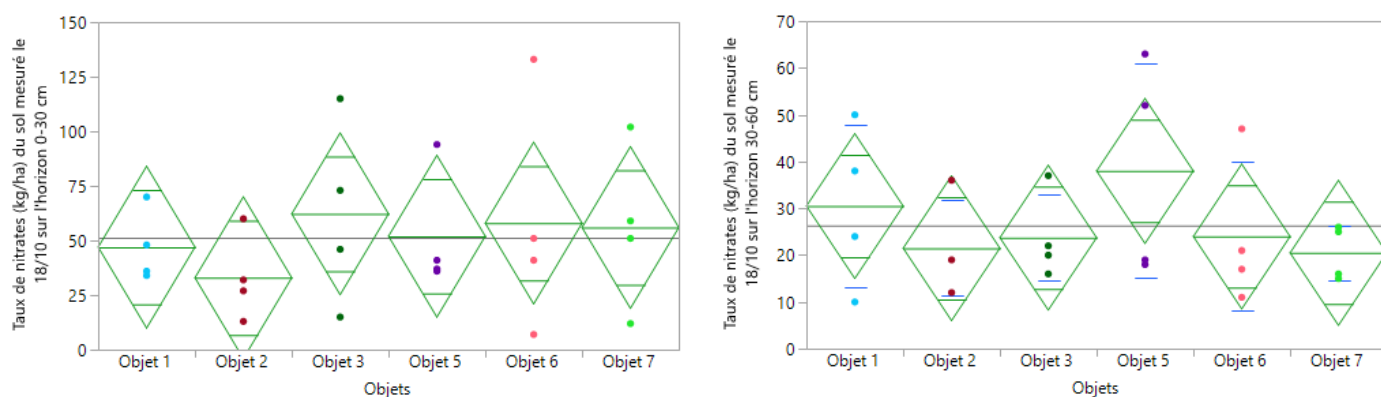
Il semble encore que les moyennes individuelles s'écartent peu des moyennes globales de chaque expérience. Cela se confirme par l'analyse des variances qui nous indique qu'il n'y a aucun effet du traitement sur la matière sèche du sol (p -valeur > 0.05 dans tous les cas). Un test de Tukey a été réalisé pour toutes les séries afin de vérifier ces affirmations et ils nous ont également montrés qu'aucune différence significative entre les objets n'est à constater et ce pour toutes les dates de mesures ainsi que pour tous les horizons.

4.8.6. Nitrates

Dans cette section, nous avons décidé de ne montrer que les valeurs en kg/ha et non celles en mg/l. Ce choix permet, en effet, une plus grande clarté dans l'explication tout en ne nuisant pas à la pertinence du propos.

Avant de débiter l'analyse de ces séries de données, nous tenons d'emblée à préciser que toutes ces séries suivent une distribution normale et que les variances des différents objets sont égales à l'exception de la série sur l'horizon 30-60 cm datant du 18/10/17, où la variance n'est pas homogène. Par conséquent, nous pouvons suivre une analyse classique pour toutes les séries sauf pour celle que nous venons de citer, où un test de Welsh sera réalisé.

4.8.6.1. Mesures du taux de nitrate du 18/10/17

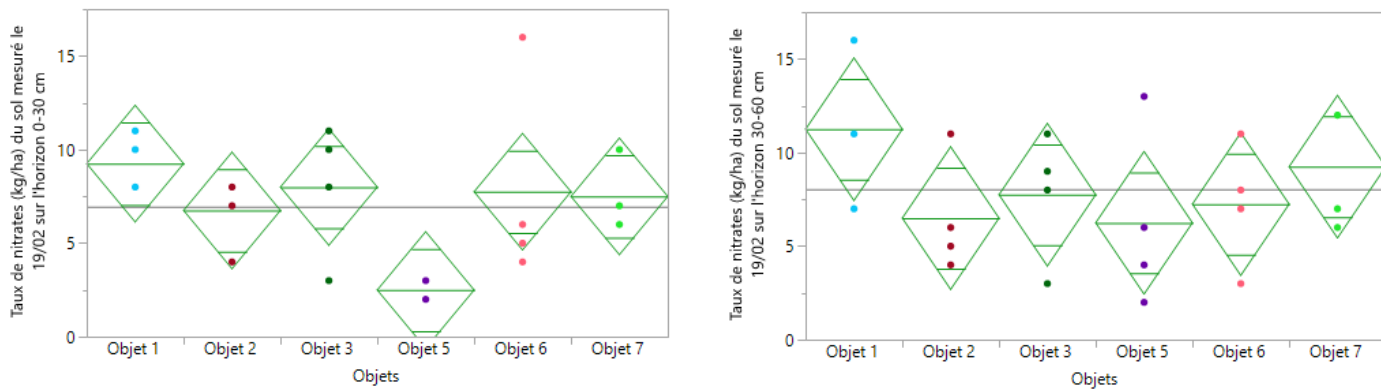


Graphique 19: Taux de nitrate du sol sur les horizons 0-30 cm et 30-06 cm en fonction des objets. Mesures datées du 18/10/17.

Il semble de nouveau que les moyennes individuelles s'écartent peu des moyennes globales des deux expériences (51 et 26 kg/ha respectivement pour l'horizon 0-30 cm et 30-60 cm). Cela se confirme par l'analyse des variances qui nous indique qu'aucun objet d'aucune expérience n'est significativement différent d'un autre objet (p -valeur > 0.05 dans les deux cas). Un test de Tukey a été réalisé pour les deux séries afin de vérifier ces affirmations et ils nous ont également montrés qu'aucune différence significative entre les objets n'est à constater et ce pour les deux horizons étudiés.

Cependant, les données de ces séries semblent complètement aberrantes, avec des valeurs de nitrates pouvant différer d'un facteur 100 au sein d'un même objet ! Il en va sans dire qu'il est très compliqué de tirer quelque chose de ces données.

4.8.6.2. Mesures du taux de nitrate du 19/02/18

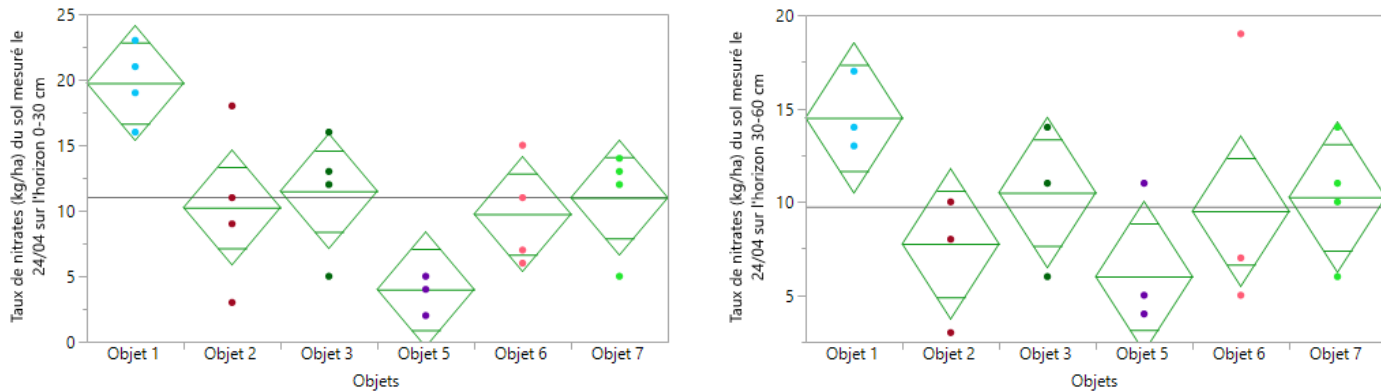


Graphique 20: Taux de nitrate du sol sur les horizons 0-30 cm et 30-60 cm en fonction des objets. Mesures datées du 19/02/17.

Comme vous pouvez le remarquer sur la série de données portant sur l'horizon 0-30 cm, il semble que l'objet 5 s'écarte de la moyenne globale (7 kg/ha) et donc qu'il pourrait être significativement différent de certains objets. Cela est contredit par l'analyse de la variance qui montre qu'aucun objet de la série n'est significativement différent d'un autre ($p\text{-valeur} = 0.0714 > 0.05$). Un test de Tukey a été réalisé pour vérifier cette affirmation et il nous montre au contraire qu'il y a une différence significative entre l'objet 5 et l'objet 1. Cependant, la $p\text{-valeur}$ de ce test (0.0461) non montre que nous sommes à la limite de la significativité, d'où la contradiction.

Pour ce qui est des données portant sur l'horizon 30-60, il semble là que les moyennes individuelles s'écartent peu de la moyenne globale (8 kg/ha). Cela se confirme par l'analyse des variances qui nous indique qu'aucun objet d'aucune expérience n'est significativement différent d'un autre objet ($p\text{-valeur} = 0.3955 > 0.05$). Un test de Tukey a été réalisé afin de vérifier cette affirmation et il nous a également montré qu'aucune différence significative entre les objets n'est à constater.

4.8.6.3. Mesures du taux de nitrate du 24/04/18



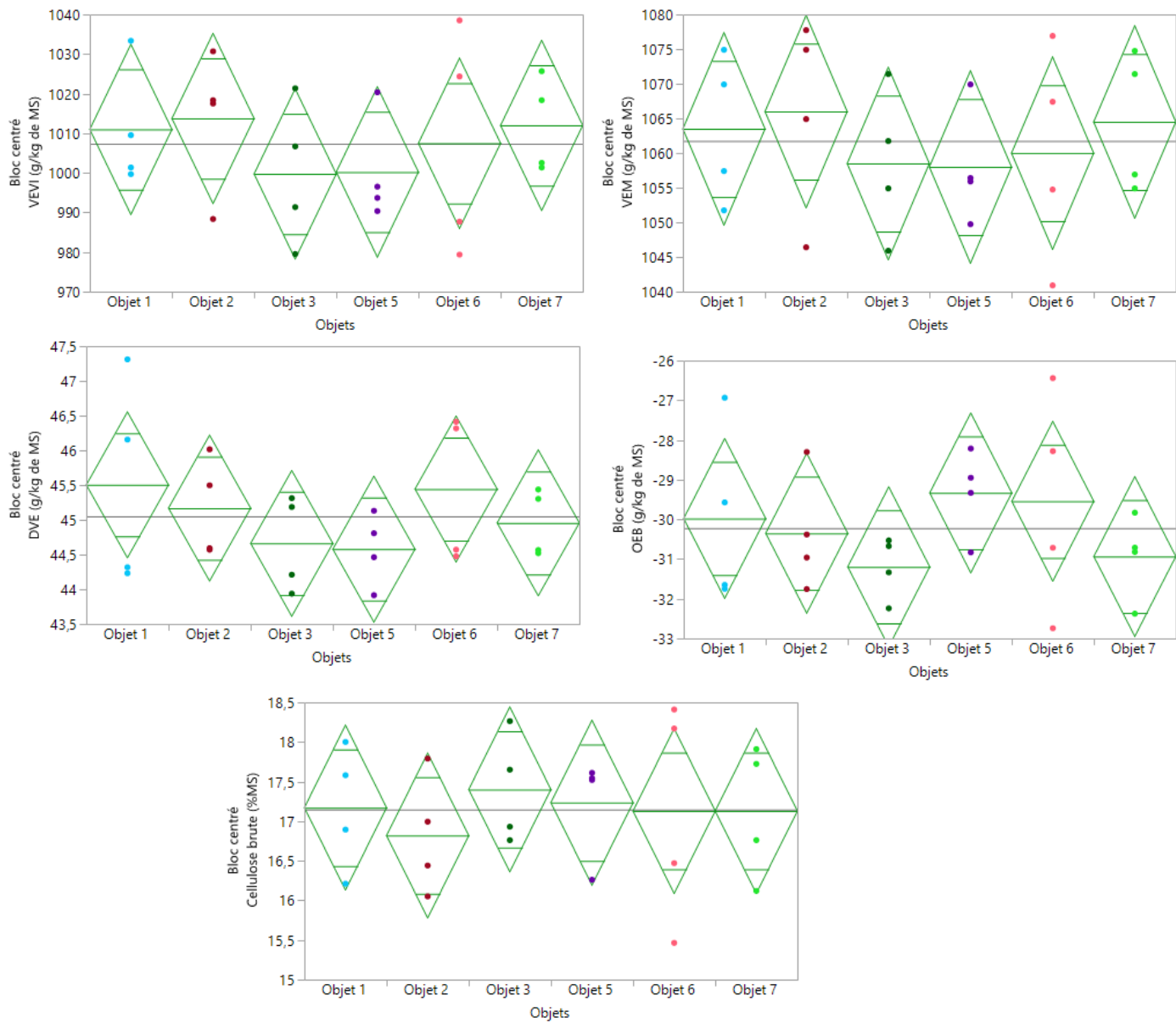
Graphique 21: Taux de nitrate du sol sur les horizons 0-30 cm et 30-60 cm en fonction des objets. Mesures datées du 24/04/17.

Comme vous pouvez le voir sur la série de données portant sur l'horizon 0-30 cm, il semble que certaines moyennes individuelles s'écartent de la moyenne globale (11 kg/ha), notamment l'objet 1 et 5. Cela est confirmé par l'analyse de la variance qui montre qu'au moins un objet de la série est significativement différent d'un autre (p -valeur = 0.0022 < 0.05). Un test de Tukey a été réalisé afin de vérifier cette affirmation et il nous montre qu'il y a une différence significative entre les objets suivants (classés par ordre d'importance) : 1 et 5 ; 1 et 6 ainsi que 1 et 2.

Donc, ceci nous démontre que les sous-semis à base de trèfles blancs et de fétuque ont un taux de nitrate significativement inférieur au témoin sans sous-semis.

Pour ce qui est des données portant sur l'horizon 30-60, il semble là que les moyennes individuelles s'écartent peu de la moyenne globale (8 kg/ha). Cela se confirme par l'analyse des variances qui nous indique qu'aucun objet d'aucune expérience n'est significativement différent d'un autre objet (p -valeur = 0.3955 > 0.05). Un test de Tukey a été réalisé afin de vérifier cette affirmation et il nous a également montré qu'aucune différence significative entre les objets n'est à constater.

4.9. Valeur alimentaire du maïs ensilage récolté



Graphique 22 : Valeurs alimentaires (VEM, VEV, DVE, OEB et cellulose brute) en fonction des objets

Ici, nous allons analyser ces trois séries de données comme un tout. En effet, les commentaires que nous allons faire sont valables pour toutes les séries présentées dans cette section.

Tout d'abord, nous précisons que la distribution de ces données est normale et que les variances des différents objets sont homogènes. Nous pouvons donc commencer une ANOVA 1 classique.

Il semble que les moyennes individuelles s'écartent peu des moyennes globales de chaque expérience. Cela se confirme par l'analyse des variances qui nous indique que le traitement n'a pas d'effet sur la teneur en eau du sol (p -valeur > 0.05 dans tous les cas). Un test de Tukey a été réalisé pour toutes les séries afin de vérifier ces affirmations et ils nous ont également montrés qu'aucune différence significative entre les objets n'est à constater et ce pour toutes les dates de mesures.

5. Discussion

5.1. Préambule sur l'émergence

Comme vous avez pu le constater dans la partie résultat, il n'y a aucune différence significative entre les sous-semis concernant la levée de la culture de maïs. Cela signifie en outre qu'aucun des sous-semis tels que réalisés ici n'influence la levée du maïs. Ce résultat est très important. En effet, une différence significative aurait eu de grandes répercussions car cela aurait biaisé les résultats de nombreuses les expériences réalisées durant l'essai.

Tout d'abord, le plus évident, cela aurait affecté le rendement, la couverture foliaire et le LAI de la culture de maïs. Par ailleurs, cela aurait pu également modifier les résultats concernant la couverture des sous-semis. En effet, à cause d'une moindre densité de végétation, la culture aurait laissé passer plus de lumière ce qui aurait bénéficié au couvert présent à ses pieds. Enfin, cela aurait pu augmenter la quantité de nitrate dans le sol des parcelles concernées car avec une plus faible densité racinaire, la culture aurait eu une capacité moindre à assimiler l'azote du sol.

5.2. Sous-semis avec le meilleur potentiel de couverture

Comme vous avez pu le voir, des tendances très intéressantes ont pu émergées des résultats concernant la couverture des sous-semis.

Pour rappel, durant la période de culture de maïs, on remarque que deux groupes se distinguent en ce qui concerne la couverture foliaire au fil des semaines : d'une part un groupe comprenant les trèfles blancs et le trèfle blanc nain 4 kg/ha et d'autre part un groupe composé du trèfle blanc nain 2 kg/ha, des lotiers et de la fétuque. Sinon, la dynamique de croissance des sous-semis durant cette période est globalement linéaire.

Ensuite, durant la période d'interculture suivant la récolte du maïs, nous obtenons également des résultats très intéressants. En effet, juste après la récolte, on remarque que c'est la fétuque rouge qui a le mieux supporté le roulage car c'est elle qui possède la plus grande couverture. En revanche, ce sont les sous-semis à bases de trèfles blancs nains qui ont le moins

bien supporté le roulage. Cette situation change néanmoins graduellement au fil des semaines suivantes. En effet, la fétuque rouge se fait vite dépasser par les sous semis à base de trèfles blancs et rattraper par les sous-semis à base de trèfles blancs nains en termes de couverture. Le lotier, quant à lui, croit peu durant cette période et garde une couverture médiocre. En définitive, lors de la dernière mesure, nous pouvons distinguer trois groupes (classés par ordre décroissant de performance) : un composé des sous semis à base de trèfles blancs, un autre composé des sous-semis à base trèfles blancs nains ainsi que celui à base de fétuque et un dernier composé des sous-semis à base de lotier. Sinon, la dynamique de croissance des sous-semis est globalement linéaire juste après la récolte avant de ralentir puis stagner vers la fin. Ce peut s'expliquer par la baisse des températures observées à cette période de l'année.

Ces résultats étaient attendus en grande partie. En effet, le trèfle blanc est une légumineuse réputée pour sa compétitivité et sa productivité, même à faible densité de semis (Genever, n.d.) (Tekeli and Ates, 2005). De plus, la variété que nous avons utilisée (Tivoli) a été sélectionnée pour avoir de grandes tiges et des feuilles plus larges ce qui est idéal pour une plante couvrante ("TIVOLI - Trèfle blanc | France," n.d.). Cette bonne performance peut également s'expliquer en partie par une meilleure nutrition minérale de la plante grâce à la fixation symbiotique de l'azote qu'elle est capable de faire. A contrario, le lotier est une plante réputée comme produisant peu de biomasse et nécessitant de fortes densités de semis pour avoir des rendements acceptables (Chapman et al., 2008). De plus, il semble que le lotier ait beaucoup plus souffert du traitement herbicide (ZEUS 1l/ha) que les autres sous-semis ce qui aurait d'autant plus diminué ses performances. Par ailleurs, la position du trèfle blanc nain était aussi attendue car le trèfle blanc nain est une version miniature (petite tige et petite feuille) du trèfle blanc classique. Ainsi, ses performances attendues en termes de couverture devaient être plus faibles ou au mieux égales à celles du trèfle blanc. En outre, les résultats concernant la fétuque rouge étaient eux aussi attendus car même si cette espèce est reconnue comme étant couvrante et compétitive, sa croissance est cependant réputée lente (Kvalbein et al., n.d.). Il était donc attendu qu'elle soit dans un premier temps dépassé par les autres espèces. En outre, la densité de semis appliquée est bien inférieure à celle recommandée pour son usage initial (pelouse) (Kvalbein et al., n.d.). Enfin, nous relevons que la densité de semis a peu, voire pas d'effet sur la couverture des sous semis. Ceci est une excellente nouvelle parce qu'en

diminuant la densité de semis, nous sommes assurés d'avoir les mêmes performances de couverture tout en diminuant le cout en semence.

5.3. Influence des sous-semis sur la culture de maïs

5.3.1. Développement et croissance

Pour rappel, trois types de mesures différentes nous ont permis d'évaluer l'influence des sous-semis sur la culture de maïs au cours de sa croissance : la couverture foliaire effective de la culture (avec le cadre), les mesures sur les plants (nombre de feuilles, hauteur, longueur et largeur des feuilles) et le LAI. Nous discuterons du résultat de ces mesures une par une.

Tout d'abord, l'évaluation de la croissance par la couverture foliaire effective n'a montré aucune différence significative entre les différents traitements. En d'autres termes, cela signifierait que les sous-semis n'ont aucune influence sur la croissance de la culture de maïs. Ce résultat était prévisible. En effet, si nous nous référons à l'état de l'art, aucune obstruction lumineuse des sous-semis sur la culture de maïs n'était attendue. En effet, étant donné que le maïs est beaucoup plus grand que les espèces des sous-semis, aucun impact négatif du sous-semis sur le maïs n'était attendu à ce sujet. Le contraire, en revanche, aurait été plus probable. De plus, étant donné que les systèmes racinaires des sous-semis et du maïs n'occuperaient pas les mêmes horizons de sol, aucune compétition concernant l'approvisionnement hydrique n'était attendue non plus. Enfin, les légumineuses de notre essai (trèfles et lotier) possèdent aussi une complémentarité nutritionnelle au niveau de l'azote avec le maïs, ce qui diminue par le fait la compétition minérale.

Cependant, la pertinence de cette technique est à relativiser. Effectivement, pour des plantes de hautes tailles et ayant des feuilles réparties sur toute leur hauteur, le fait de prendre une photographie de la canopée depuis son sommet a pour effet de sous-estimer la taille des feuilles basses (plus éloignées de l'objectif) par rapport aux feuilles hautes (plus proches de l'objectif). C'est une question de perspective.

Ensuite, pour ce qui est des mesures sur les plants (nombre de feuilles, hauteur, longueur et largeur des feuilles), les résultats sont tout autre. En effet, même si cela varie un peu d'une mesure à l'autre, les résultats nous montre systématiquement que les maïs des parcelles contrôles, celles avec un sous-semis de fétuque rouge et celles avec un sous semis de lotier 2

kg/ha sont significativement plus développées que les parcelles avec les sous-semis de trèfle blanc (4 kg/ha et 2 kg/ha). De plus, on peut y voir que les traitements où les cultures sont les moins développées correspondent aussi aux traitements où la couverture des sous-semis est la plus importante à la même période. C'est d'autant plus troublant qu'au début de la période de culture tous les traitements étaient égaux et ce pour tous les paramètres mesurés.

Ce constat est pour le moins déroutant car il contredit notre hypothèse de départ. Etant donné que la probabilité d'une pénalisation du maïs par les parties aériennes des couverts est négligeable, une compétition souterraine, plus précisément concernant les ressources hydriques et minérales, est plus probable. Cela est d'autant plus plausible que les articles de références discutant du système racinaire des espèces utilisés pour les sous-semis sont soit anciens (trèfle blanc), soit inexistantes (trèfle blanc nain, lotier corniculé et fétuque rouge). En outre, aucune observation racinaire n'a été réalisée dans nos essais pour étayer cette hypothèse.

Finalement, pour ce qui est des mesures de LAI, les résultats obtenus sont étranges. En effet, ils montrent des différences significatives entre les traitements mais elles diffèrent d'une série de mesure à l'autre, ne laissant apparaître aucune corrélation ni aucun modèle. Nous n'avons pas d'explication à donner à ce phénomène.

5.3.2. Rendement

Comme nous l'avons déjà dit, les résultats sur le rendement ensilage de la culture de maïs n'ont montré aucune différence significative entre les objets. Cela confirme de nouveau l'hypothèse que nous avons élaboré à propos de la complémentarité entre la culture de maïs et les différents sous-semis. En plus de cela, c'est une excellente nouvelle car cela signifierait qu'un agriculteur qui voudrait utiliser cette technique pour conserver ses sols ne prend pas le risque de perdre en productivité.

Nonobstant, il convient de dire que ce résultat est à prendre avec prudence car nous sommes à la limite de la non significativité concernant les différences entre les traitements. En effet, la p-valeur de l'ANOVA est de 0.0802, ce qui est assez proche de la valeur limite de 0.05. D'ailleurs, si on y regarde de plus près, le traitement à base de trèfles blancs 4 kg/ha est proche de la différence significative avec le traitement contrôle, celui à base de fétuque rouge 6 kg/ha et celui à base de lotier 2 kg/ha. Ce constat est d'autant plus troublant que ce sont ces mêmes objets qui sont impliqués dans les différences significatives de croissance mesurées par les mesures directes sur les plants. Ainsi, la comparaison que nous venons de faire entre la couverture foliaire des sous-semis durant la période de culture et la croissance du maïs obtenu par mesures sur les plants est donc également valable pour le rendement.

5.3.3. Valeurs alimentaires

Comme nous l'avons déjà expliqué, les résultats sur les valeurs alimentaires de l'ensilage récolté n'ont montré aucune différence significative entre les traitements et ce quelque-soit le paramètre évalué. Ce constat ne confirme ou n'infirme aucune hypothèse mais déçoit une grande espérance. En effet, il est reconnu que certaines associations légumineuses-graminées pouvaient améliorer la qualité alimentaire de la graminée. Ce phénomène fut également observé pour des associations maïs-légumineuses mais concernait d'autres espèces (niébé et haricot) que celles étudiées lors de notre essai (Dawo et al., 2007) (Geren et al., 2008). Nous espérons donc observer ce même phénomène lors de notre essai car cela aurait été bénéfique pour la nutrition du bétail. Malheureusement, ce ne fut pas le cas.

5.4. Influence des sous-semis sur les paramètres du sol

5.4.1. pH

Pour rappel, aucune différence significative entre les traitements n'a été observé concernant le pH du sol. Ce résultat est cohérent avec ce que nous pensions car même si les végétaux peuvent acidifier les sols par leur exsudats racinaires (Dakora and Phillips, 2002), aucun élément ne nous faisait penser que les sous-semis pouvaient influencer le pH du sol (très tamponné), surtout sur une période aussi courte.

5.4.2. Carbone organique et humus

Pour mémoire, aucune différence significative entre les traitements n'a été relevé concernant le carbone organique ou l'humus. Ce résultat était prévisible. En effet, même s'il est reconnu que les couverts végétaux augmentent significativement la séquestration du carbone dans les sols, il faut dans un premier temps que le couvert soit détruit et incorporé au sol, ce qui n'est pas notre cas ici. De plus, l'augmentation est extrêmement lente (0.32 mg/ha/an) et exige de nombreuses années de pratiques de conservation des sols pour qu'elle soit significative (Poeplau and Don, 2015). Par conséquent, il était fort peu probable que notre technique eu des effets significatifs en si peu de temps et sans incorporation du couvert au sol.

5.4.3. Teneur en eau du sol et matière sèche

Comme nous l'avons évoqué précédemment, aucune différence significative entre les objets n'a été observé concernant ces paramètres. Ce résultat est à la fois attendu et inattendu. En effet, d'une part, il est connu que les couverts végétaux peuvent diminuer la teneur en eau du sol à cause de la plus grande évapotranspiration exercée par le couvert (Unger and Vigil, 1998). Cependant, il a été prouvé que certaines associations, comme entre le maïs et le haricot, ne modifie pas du tout le contenu en eau du sol (Ogindo and Walker, 2005). Ce phénomène serait probablement dû à une diminution de l'évaporation grâce à une plus grande couverture du sol de la culture associée. En outre, l'architecture de la canopée de la culture associée offrirait une plus grande résistance à la circulation de l'air qui resterait plus humide, diminuant ainsi la

demande évapotranspirative. Enfin, la complémentarité des systèmes racinaires et le phénomène « d'ascenseur hydraulique » (mouvement passif de l'eau d'horizons de sol humides vers des horizons de sol plus secs par l'intermédiaire du système racinaire) pourraient également expliquer en partie ce résultat (Caldwell et al., 1998).

5.4.4. Azote total

Comme nous l'avons vu auparavant, aucune différence significative entre les traitements n'a été constaté concernant l'azote total du sol. Ce résultat était attendu et ce pour des raisons similaires au carbone organique. En effet, même si les couverts végétaux (surtout ceux composés de légumineuses) sont reconnus pour augmenter significativement l'azote total (organique et minéral) du sol, ce phénomène est extrêmement lent (de + 0.01 à + 0.02 mg/ha/an d'azote total), nécessite l'incorporation du dit couvert ainsi qu'un travail du sol réduit (Mazzoncini et al., 2011). C'est pourquoi il était très improbable que notre technique eu des effets similaires en une période si courte.

5.4.5. Nitrates

Comme nous avons pu le remarquer dans le chapitre précédent, les résultats des mesures des nitrates ont montré qu'on pouvait observer des différences significatives entre les objets pour l'horizon 0-30 cm.

Dans un premier temps, c'était entre le contrôle sans sous-semis (plus de nitrates) et la fétuque rouge (moins de nitrates). Puis, dans un second temps, c'était entre le contrôle sans sous-semis (plus de nitrates) et la fétuque rouge ainsi que les trèfles blancs (moins de nitrates). Ces résultats étaient prévisibles. En effet, les couverts végétaux (même ceux composés de légumineuses) sont reconnus pour leur pouvoir d'assimilation de l'azote et sont d'ailleurs grandement utilisés pour limiter le lessivage des nitrates en période d'interculture. Sinon, concernant plus spécifiquement l'importance de la fétuque rouge, son efficacité sur le lessivage de l'azote lorsqu'il est semé sous du maïs a déjà été démontrée dans l'expérience danois que nous avons évoquée dans l'état de l'art (Manevski et al., 2015). Concernant

maintenant la position du trèfle blanc, il est reconnu que cette légumineuse a tendance à inhiber sa fixation symbiotique de l'azote lorsque le substrat sur lequel il est posé contient une grande quantité de nitrate. Effectivement, il est beaucoup moins coûteux pour la plante d'assimiler directement les nitrates du sol que de le synthétiser elle-même par symbiose. Son efficacité en tant que piège à nitrate est donc justifié (Macduff et al., 1996). Enfin, l'inefficacité du lotier et du trèfle blanc nain dans leur capacité à piéger les nitrates du sol pourrait s'expliquer par leur développement moindre par rapport au trèfle blanc et leur capacité à fixer symbiotiquement l'azote. Aucun document à propos de leur capacité à piéger les nitrates (comme le trèfle blanc) n'a été trouvé.

Finalement, pour ce qui est de l'horizon 30-60 cm, nous rappelons que les résultats n'ont mis en évidence aucune différence significative entre les traitements. Ceci était parfaitement prévisible du fait que le système racinaire des espèces de sous-semis n'occupent pas massivement cet horizon selon nos sources. Elles ne peuvent donc pas y prélever des nitrates.

5.5. Critiques et perspectives

Tout d'abord, au regard des résultats obtenus, il va de soi qu'un sous-semis contenant à la fois du trèfle blanc et de la fétuque rouge pourrait être très intéressant et devrait être tester à l'avenir. En effet, notre expérience a montré la complémentarité des caractères des deux espèces. D'une part, elle a mis en évidence l'efficacité du trèfle blanc concernant la couverture du sol, même avec une faible densité de semis et sa capacité modérée à piéger les reliquats d'azote. En revanche, elle a aussi montré que le trèfle blanc pouvait potentiellement nuire modérément au maïs et qu'il résistait faiblement au roulage provoqué par la récolte. D'autre part, elle a mis en évidence l'efficacité de la fétuque rouge à piéger les reliquats d'azote, l'absence avérée de son effet négatif sur la culture de maïs ainsi que sa capacité à résister au roulage provoqué par la récolte. Cependant, elle a également montré sa capacité de couverture modérée. Par conséquent, une association des deux espèces dans un même sous-semis permettrait de cumuler leurs qualités respectives tout en atténuant leurs défauts. Enfin, pour ce qui est de l'aspect pratique, il conviendrait peut-être de semer une minorité de semences de trèfle blanc par rapport à celles de la fétuque rouge dans cette association. En effet, comme le trèfle blanc est très compétitif, il ne faut pas qu'il étouffe la fétuque qui lui a une dynamique de croissance plus lente.

En comparaison des bonnes performances du trèfle blanc et de la fétuque rouge, notre essai a montré l'inefficacité du lotier corniculé dans l'usage en sous-semis de maïs, d'une part à cause de sa faible productivité de base et d'autre part à cause de sa trop grande sensibilité face à l'herbicide utilisé pour contrôler les adventices. Il sera ainsi préférable de ne pas privilégier cette espèce dans de futurs essais.

En revanche, d'autres espèces jugées intéressantes, pourraient, elles, être évaluées dans de futurs essais. De ce fait, l'institut Arvalis avait mis en évidence lors d'expériences passées l'efficacité et le potentiel du sainfoin, du trèfle violet et du trèfle d'Alexandrie. Le potentiel du sainfoin et du trèfle violet est d'autant plus important qu'ils se sont montrés efficace dans une utilisation en couvert permanent en sous-semis de monoculture de maïs.

D'ailleurs, élargir l'utilisation temporelle de la technique du sous-semis de maïs en faisant un couvert permanent sous une monoculture de maïs serait une grande avancée dans l'agriculture de conservation. Pour ce faire, l'utilisation d'un strip-till et/ou l'affaiblissement

préalable du couvert par un traitement mécanique (déchaumeuse) ou herbicide est recommandé pour éviter une trop grande concurrence entre le couvert et la culture de maïs en germination. De plus, étant donné que le sol sera couvert tout au long de l'année sans travail intensif du sol, l'utilisation additionnelle de mycorhizes pourrait être un plus. Effectivement, un travail superficiel du sol et certains couverts végétaux ont un effet positif sur la population de mycorhize, notamment en maïs (Kabir and Koide, 2000) (Miller, 2000).

En outre, coupler la technique du couvert sous maïs avec l'installation de buttes antiérosives entre les rangs de maïs lors du semis pourrait avoir un effet cumulatif sur l'érosion des sols. Il serait donc très intéressant d'étudier la combinaison de ces deux techniques.

Enfin, il serait intéressant d'étudier à l'avenir, d'une part, les interactions racinaires entre la culture et les sous-semis pour mieux comprendre les phénomènes de complémentarité/compétition et, d'autre part, l'influence de cette technique sur la population d'adventices en termes de qualité et de quantité pour mieux évaluer son éventuel effet supprimeur.

Pour en finir avec la discussion, nous aimerions revenir sur certaines des expériences réalisées durant notre essai pour les critiquer :

- Premièrement, la mesure de la teneur en eau était trop lourde et nécessitait trop de temps pour les informations qu'elle pouvait nous procurer. A l'avenir, l'utilisation de sondes dédiés à cet usage devra être privilégié.
- Deuxièmement, même si les mesures diverses sur les plants de maïs nous ont permis d'obtenir des informations intéressantes, la méthode utilisée était également beaucoup trop lourde et exigeait beaucoup trop de temps. Pour preuve, seulement deux blocs ont pu être analysés. Un remplacement par la mesure du LAI par le LICOR LAI 2200 semble une bonne alternative.
- Enfin, troisièmement, l'utilisation du cadre et de photos pour évaluer la couverture foliaire effective des sous-semis était très simple et nous permis d'avoir des informations riches et précises. La réutilisation de cette technique doit donc être encouragée. Néanmoins, une technique permettant son utilisation alors que la culture de maïs est bien développée est à trouver pour pouvoir continuer cette mesure durant

toute la période de culture. En effet, les feuilles de maïs obstruent l'objectif de l'appareil photo.

6. Conclusion

En conclusion, nous pouvons à présent dire que nos objectifs sont en partie remplis.

Tout d'abord, nos expériences nous ont montré que parmi les sous-semis que nous avons testé, certains couvraient mieux le sol que d'autres. Ainsi, nous avons vu que les sous-semis les plus couvrants étaient ceux à base de trèfles blancs, que ce soit avant ou après la récolte. Ensuite, avec une couverture intermédiaire, venait les sous-semis à base de trèfles blancs nains. Les sous-semis qui offraient la plus faible couverture sont ceux à base de lotier corniculé et ce quelque-soit la date d'observation. Enfin, les sous-semis à base de fétuques rouges avaient des performances contrastées : médiocres durant la culture du maïs, leurs performances devenaient intermédiaires après la récolte grâce à une meilleure résistance au roulage. Notre essai a également démontré que la densité de semis des espèces de sous-semis n'influçait pas sur leur performance en termes de couverture, ce qui est intéressant économiquement.

Par ailleurs, concernant la pénalisation de la culture du maïs par les sous-semis, nos expériences ont apporté des réponses contradictoires. Effectivement, certaines expériences ont montré que les sous-semis à base de trèfles blancs pénalisaient la culture principale. En revanche, d'autres ont montré qu'aucun sous-semis ne pénalisaient le maïs. De plus, parmi ces dernières expériences, une corrélation (négative) troublante pouvait être observée entre le développement du maïs et le développement du couvert sous-jacent. Sinon, concernant la valeur alimentaire du maïs récolté, elle n'est influencée par la présence des sous-semis selon les analyses.

En outre, nos expériences nous ont montrés que les sous-semis à base de trèfles blancs et de fétuques rouges avaient une capacité plus importante de piéger les résidus de nitrate que les autres sous-semis ce qui est une excellente nouvelle pour la lutte contre le lessivage des nitrates. Sinon, il ne semble qu'aucun autre paramètre du sol testé (pH, carbone organique, humus, azote total et teneur en eau du sol) ne soit influencé par la présence des sous-semis.

Finalement, nous pouvons dire avec certitude que la technique des couverts sous maïs est une technique prometteuse qui possède beaucoup de potentiel pour améliorer la conservation des sols en culture de maïs.

7. Bibliographie

- 1) Coulées de boue après les orages : les agriculteurs de l'Oise sont-ils responsables ? - Le Parisien [WWW Document], n.d. URL <http://www.leparisien.fr/oise-60/coulees-de-boue-apres-les-orages-les-agriculteurs-de-l-oise-sont-ils-responsables-06-06-2018-7755561.php> (accessed 8.19.18).
- 2) Coulées de boues — Site de Genappe [WWW Document], n.d. URL <http://www.genappe.be/commune/services-communiaux/environnement/agriculture/erosion-coulees-de-boues-ruissellement> (accessed 8.19.18).
- 3) Dabney, S.M., Delgado, J.A., Reeves, D.W., 2001. Using Winter Cover Crops to Improve Soil and Water Quality. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32, 1221–1250. <https://doi.org/10.1081/CSS-100104110>
- 4) Dakora, F.D., Phillips, D.A., 2002. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments. *Plant and Soil* 245, 35–47. <https://doi.org/10.1023/A:1020809400075>
- 5) Dawo, M.I., Wilkinson, J.M., Sanders, F.E., Pilbeam, D.J., 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, 1391–1399. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2879>
- 6) Dexter, A.R., 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research, Proceedings 11th Conference of ISTRO: Tillage and Traffic in Crop Production* 11, 199–238. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(88\)90002-5](https://doi.org/10.1016/0167-1987(88)90002-5)
- 7) Ding, G., Liu, X., Herbert, S., Novak, J., Amarasiriwardena, D., Xing, B., 2006. Effect of cover crop management on soil organic matter. *Geoderma* 130, 229–239. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.01.019>
- 8) Edwards, C.A., 1983. Earthworm ecology in cultivated soils, in: Satchell, J.E. (Ed.), *Earthworm Ecology: From Darwin to Vermiculture*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 123–137. https://doi.org/10.1007/978-94-009-5965-1_10
- 9) Edwards, C.A., Lofty, J.R., 1977. *Biology of earthworms* - 2. ed.
- 10) Genever, L., n.d. Managing clover for Better Returns, AHDB Beef & Lamb. ed, Better Returns Programme.

- 11) Geren, H., Avcioglu, R., Hikmet, S., Kir, B., 2008. Intercropping of corn with cowpea and bean: Biomass yield and silage qualit. *African Journal of Biotechnology* 7, 4100–4104.
- 12) Girard, M.-C., 2011. *Sols et environnement : un cours complet, des exercices, des suppléments en ligne*. Dunod, Paris.
- 13) Hudson, N., 1995. *Soil conservation, Fully rev. and updated, 3rd ed.* ed. Ames: Iowa State University Press.
- 14) Kabir, Z., Koide, R.T., 2000. The effect of dandelion or a cover crop on mycorrhiza inoculum potential, soil aggregation and yield of maize. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 78, 167–174. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00121-8](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00121-8)
- 15) Kvalbein, A., S. Aamlib, T., Rasmussen, P., Mette Dahl Jensen, A., n.d. Red fescue management: Guidelines based on new research and greenkeepers' experiences.
- 16) Kwaad, F.J.P.M., van der Zijp, M., van Dijk, P.M., 1998. Soil conservation and maize cropping systems on sloping loess soils in the Netherlands. *Soil and Tillage Research* 46, 13–21. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)80103-7](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)80103-7)
- 17) Labreuche, J., Légère, R., 2015. Implantation : Les légumineuses pérennes profitent à couvert. *Perspectives Agricoles* 48–52.
- 18) Lal, R., Kimble, J.M., Follett, R.F., Stewart, B.A., 1997. *Soil Processes and the Carbon Cycle*. CRC Press.
- 19) Laloy, E., Bielders, C.L., 2010. Effect of intercropping period management on runoff and erosion in a maize cropping system. *J. Environ. Qual.* 39, 1001–1008. <https://doi.org/10.2134/jeq2009.0239>
- 20) Lambinon, J., Verloove, F. (Eds.), 2012. *Nouvelle flore de la Belgique, du Grand-Duché de Luxembourg, du Nord de la France et des régions voisines : Ptéridophytes et Spermatophytes*, 6. Ed. ed. Jardin botanique national de Belgique, Meise.
- 21) Last, F.T., 1987. Soil organic matter biological and ecological effects. *Environ Monit Assess* 9, 295–295. <https://doi.org/10.1007/BF00419902>
- 22) Lee, K.E., 1985. *Earthworms: their ecology and relationships with soils and land use*. Earthworms: their ecology and relationships with soils and land use.
- 23) Légère, R., 2017. Conduite du maïs : Une cohabitation délicate avec les couverts. *Perspectives Agricoles* 48–51.
- 24) Leitner, D., Klepsch, S., Knieß, A., Schnepf, A., 2010. The algorithmic beauty of plant roots – an L-System model for dynamic root growth simulation. *Mathematical and*

- Computer Modelling of Dynamical Systems 16, 575–587.
<https://doi.org/10.1080/13873954.2010.491360>
- 25) Lithourgidis, A.S., Dordas, C.A., Damalas, C.A., Vlachostergios, D.N., 2011. Annual Intercrops: An Alternative Pathway for Sustainable Agriculture. *Australian Journal of Crop Science* 5, 396.
- 26) Macduff, J.H., Jarvis, S.C., Davidson, I.A., 1996. Inhibition of N_2 fixation by white clover (*Trifolium repens* L.) at low concentrations of NO_3^- in flowing solution culture. *Plant Soil* 180, 287–295.
<https://doi.org/10.1007/BF00015312>
- 27) Malézieux, E., Crozat, Y., Dupraz, C., Laurans, M., Makowski, D., Ozier-Lafontaine, H., Rapidel, B., Tourdonnet, S. de, Valantin-Morison, M., 2009. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 29, 43–62. <https://doi.org/10.1051/agro:2007057>
- 28) Manevski, K., Børgesen, C.D., Andersen, M.N., Kristensen, I.S., 2015. Reduced nitrogen leaching by intercropping maize with red fescue on sandy soils in North Europe: a combined field and modeling study. *Plant Soil* 388, 67–85.
<https://doi.org/10.1007/s11104-014-2311-6>
- 29) Mazzoncini, M., Sapkota, T.B., Bàrberi, P., Antichi, D., Risaliti, R., 2011. Long-term effect of tillage, nitrogen fertilization and cover crops on soil organic carbon and total nitrogen content. *Soil and Tillage Research* 114, 165–174.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2011.05.001>
- 30) McCurdy, J.D., McElroy, J.S., Guertal, E.A., 2013. White Clover (*Trifolium repens*) Establishment within Dormant Bermudagrass Turf: Cultural Considerations, Establishment Timing, Seeding Rate, and Cool-season Companion Grass Species. *HortScience* 48, 1556–1561.
- 31) Miller, M.H., 2000. Arbuscular mycorrhizae and the phosphorus nutrition of maize: A review of Guelph studies. *Can. J. Plant Sci.* 80, 47–52. <https://doi.org/10.4141/P98-130>
- 32) Nearing, M.A., Bradford, J.M., Holtz, R.D., 1987. Measurement of Waterdrop Impact Pressures on Soil Surfaces 1. *Soil Science Society of America Journal* 51, 1302–1306.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100050038x>

- 33) Oades, J.M., 1984. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant Soil* 76, 319–337.
<https://doi.org/10.1007/BF02205590>
- 34) Ogindo, H.O., Walker, S., 2005. Comparison of measured changes in seasonal soil water content by rainfed maize-bean intercrop and component cropping systems in a semi-arid region of southern Africa. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Integrated Water Resources Management (IWRM) and the Millennium Development Goals: Managing Water for Peace and Prosperity* 30, 799–808.
<https://doi.org/10.1016/j.pce.2005.08.023>
- 35) Pagliai, M., Vignozzi, N., Pellegrini, S., 2004. Soil structure and the effect of management practices. *Soil and Tillage Research, Soil Physical Quality* 79, 131–143.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2004.07.002>
- 36) Poeplau, C., Don, A., 2015. Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 200, 33–41.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.024>
- 37) Pousset, J., 2015. *Engrais verts et fertilité des sols*. Éditions France agricole, Paris.
- 38) Rameau, J.-C., Mansion, D., Dumé, G., 1989. *Flore forestière française : Plaines et collines*. Forêt privée française.
- 39) Renard, K.G., USA, USA (Eds.), 1997. *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*, Agriculture handbook. Washington, D. C.
- 40) Renoux, J.-P., 2014. *Le maïs : Une plante pour l'intensification écologique*.
- 41) Rouquerol, J., Avnir, D., Everett, D.H., Fairbridge, C., Haynes, M., Pernicone, N., Ramsay, J.D.F., Sing, K.S.W., Unger, K.K., 1994. Guidelines for the Characterization of Porous Solids, in: Rouquerol, J., Rodríguez-Reinoso, F., Sing, K.S.W., Unger, K.K. (Eds.), *Studies in Surface Science and Catalysis, Characterization of Porous Solids III*. Elsevier, pp. 1–9. [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(08\)63059-1](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(08)63059-1)
- 42) Soane, B.D., van OUWERKERK, C., 1994. Chapter 1 - Soil Compaction Problems in World Agriculture, in: Soane, B.D., van Ouwerkerk, C. (Eds.), *Developments in Agricultural Engineering, Soil Compaction in Crop Production*. Elsevier, pp. 1–21.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-88286-8.50009-X>

- 43) Stengel, P., Bourlet, M., 1987. Fissuration d'un sol argileux gonflant après compactage : effet de l'humectation. Soil compaction and regeneration. 1987; Workshop on soil compaction: consequences and structural regeneration processes, Avignon, FRA, 1985-09-17-1985-09-18, 95-110.
- 44) Tekeli, A., Ates, E., 2005. YIELD POTENTIAL AND MINERAL COMPOSITION OF WHITE CLOVER (*TRIFOLIUM REPENS* L.)-TALL FESCUE (*FESTUCA ARUNDINACEA* SCHREB.) MIXTURES [WWW Document]. Journal of Central European Agriculture. URL <https://jcea.agr.hr/en/issues/article/199> (accessed 8.18.18).
- 45) TIVOLI - Trèfle blanc | France [WWW Document], n.d. URL <https://ragt-semences.fr/fr-fr/nos-varietes/tivoli-tr%C3%A8fle-blanc> (accessed 8.18.18).
- 46) Unger, P.W., Vigil, M.F., 1998. Cover crop effects on soil water relationships. Journal of Soil and Water Conservation 53, 200–207.
- 47) Wachendorf, M., Büchter, M., Volkers, K.C., Bobe, J., Rave, G., Loges, R., Taube, F., 2006. Performance and environmental effects of forage production on sandy soils. V. Impact of grass understorey, slurry application and mineral N fertilizer on nitrate leaching under maize for silage. Grass and Forage Science 61, 243–252. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2006.00528.x>
- 48) White, R.E., 2006. Principles and practice of soil science: the soil as a natural resource, 4th ed. ed. Blackwell Pub, Malden, MA.

8. Annexe : extraits du manuel du LICOR LAI-2200

9 Theory

The LAI-2200 measures the probability of seeing the sky when looking up through a vegetative canopy in different directions. These measurements essentially contain two pieces of structural information about the canopy: 1) the amount of foliage in the canopy and 2) the foliage orientation. This section describes the details of how the LAI-2200 extracts this information from its measurements.

Calculations

As a beam of light passes through a plant canopy, there is a certain probability that it will be intercepted by foliage. The probability of interception is proportional to the path length, foliage density (area of foliage per volume of canopy), and foliage orientation. If foliage elements are small compared to the overall canopy, and they are randomly distributed in the sensor view, then it is well known that a beam of light from zenith angle θ has a probability of $P(\theta)$ of non-interception:

$$P(\theta) = e^{-G(\theta)\mu S(\theta)} \quad 9-1$$

where $G(\theta)$ is the fraction of foliage projected toward θ , μ is foliage density (m^2 foliage per m^3 canopy volume), and $S(\theta)$ is path length (m) through the canopy at angle θ . Miller (1967) gives the exact solution for μ as

$$\mu = 2 \int_0^{\pi/2} \frac{\ln P(\theta)}{S(\theta)} \sin \theta d\theta \quad 9-2$$

Foliage Density and Leaf Area Index

In a horizontally large, homogeneous canopy, path length, $S(\theta)$ is related to canopy height b by

$$S(\theta) = \frac{b}{\cos \theta} \quad 9-3$$

In such a canopy, the relation between leaf area index L and foliated density μ is

$$L = \mu b \quad 9-4$$

Substituting these into (9-2) yields

$$\mu = \frac{2}{b} \int_0^{\mu/2} -\ln P(\theta) \cos \theta \sin \theta d\theta$$
$$L = \mu b = 2 \int_0^{\pi/2} -\ln P(\theta) \cos \theta \sin \theta d\theta \quad 9-5$$

Thus, we can use a common formula (9-2) for computing either L or μ . For L , we use $S(\theta) = 1/\cos \theta$ (height b does not matter because it cancels out of (9-5)), and for computing μ we use actual values of $S(\theta)$. The difference between L and μ is driven by $S(\theta)$.

Clumping

When multiple observations of $P(\theta)$ are available, there are two ways they could be combined: The values of $P(\theta)$ could be averaged:

$$\mu = 2 \int_0^{\pi/2} -\frac{\overline{\ln P(\theta)}}{S(\theta)} \sin \theta d\theta \quad 9-6$$

or the values of $\ln P(\theta)$ averaged:

$$\mu = 2 \int_0^{\pi/2} -\frac{\overline{\ln P(\theta)}}{S(\theta)} \sin \theta d\theta \quad 9-7$$

Eqn. (9-7) will account for clumping (on spatial scales larger than the field of view of the sensor), but Eqn. (9-6) is appropriate for determining effective leaf area index L_e , which by definition must ignore clumping.

The LAI-2200 computes both of these, and uses Eqn. (9-7) for its reported leaf area index value L , and the ratio of (9-6) and (9-7) for computing Ω_{app} , the apparent clumping factor (Ryu et al. 2010).

$$\Omega_{app} = \frac{2 \int_0^{\pi/2} -\frac{\overline{\ln P(\theta)}}{S(\theta)} \sin \theta d\theta}{2 \int_0^{\pi/2} -\frac{\overline{\ln P(\theta)}}{S(\theta)} \sin \theta d\theta} \quad 9-8$$

Effective leaf area index, L_e , can be computed by

$$L_e = L \Omega_{app} \quad 9-9$$

Foliage Orientation

Once L or μ is determined from Eqn. (9-1), Eqn. (9-2) can be solved for the orientation function $G(\theta)$.

$$G(\theta) = \frac{-\ln P(\theta)}{\mu S(\theta)} \quad 9-10$$

Figure 9-1 shows the theoretical values of $G(\theta)$ for an ideal canopy whose foliage is random both in position and azimuthal orientation, but inclined at a fixed angle. Curves for ten different foliage inclination angles are shown.

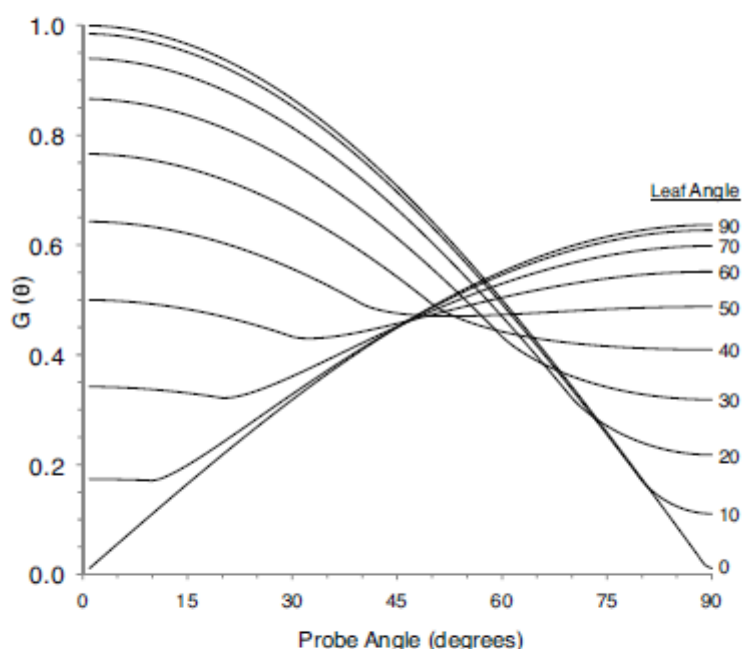


Figure 9-1. Idealized relationship between projected foliage area and direction for various foliage inclination angles, after Warren Wilson (1959).

The LAI-2200 calculates foliage mean tilt angle α_f after the manner of Lang (1986), using an empirical polynomial relating inclination angle to the slopes of the

idealized curves between 25° and 65° (data in table 9-1, plot in Figure 9-2).

Table 9-1.

MTA (degrees)	Slope	MTA (degrees)	Slope
1	-.6964	50	-.1547
10	-.6859	60	.1180
20	-.6546	70	.3164
30	-.5855	80	.4131
40	-.4105	89	.4431

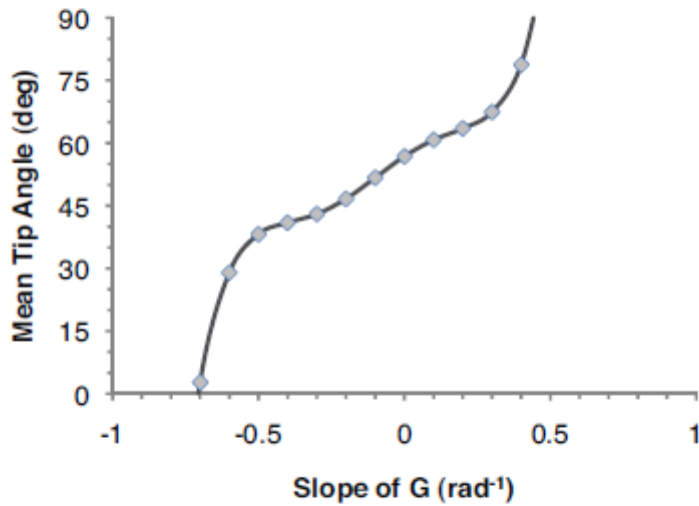


Figure 9-2. Plot of equation 9-22, which relates slope of the foliage orientation function to average inclination angle. 0° leaf angle is horizontal, and 90° is vertical.

Implementation Algorithms

In this section, the subscript i refers to optical sensor rings ($i=1\dots5$), and the subscript j refers to observational pairs ($j=1\dots N_{obs}$). B_{ij} is the j^{th} below-canopy observation, i^{th} ring, and A_{ij} is its corresponding above canopy reading.

AVGTRANS

The average probability of light penetration into the canopy is computed by

$$\overline{P(\theta_i)} = \frac{1}{N_{obs}} \sum_{j=1}^{N_{obs}} \frac{B_{ij}}{A_{ij}} \quad 9-11$$

The 5 values of $\overline{P(\theta_i)}$ are labeled AVGTRANS in the LAI-2200 data file.

GAPS

The probability of light penetration based on averaging the logarithms of transmittance for the i^{th} ring is computed from

$$G_i = e^{\overline{\ln P(\theta_i)}} = e^{\left(\frac{1}{N_{obs}} \sum_{j=1}^{N_{obs}} \ln \frac{B_{ij}}{A_{ij}} \right)} \quad 9-12$$

The values of G_i are labeled GAPS in the data file.

LAI and CNTCT#

The leaf area index L for the file, labeled LAI, is computed from

$$L = 2 \int_0^{\pi/2} -\frac{\overline{\ln P(\theta)}}{S(\theta)} \sin \theta d\theta = 2 \sum_{i=1}^5 \bar{K}_i W_i \quad 9-13$$

where

$$\bar{K}_i = \frac{1}{N_{obs}} \sum_{j=1}^{N_{obs}} \frac{-\ln\left(\frac{B_{ij}}{A_{ij}}\right)}{S_i} \quad 9-14$$

and

$$W_i = \sin \theta_i d\theta_i \quad 9-15$$

K_i is sometimes called the contact number, and is reported with the label CNTCT# in the data file. For further explanation of W_i , see Weighting Factors, below.

ACF and ACFS

An apparent clumping factor for each ring, labeled ACFS in the LAI-2200 data file, is computed from

$$\Omega_i = \frac{\overline{\ln P(\theta_i)}}{\ln P(\theta_i)} = \frac{\ln\left(\frac{1}{N_{obs}} \sum_{j=1}^{N_{obs}} \left(\frac{B_{ij}}{A_{ij}}\right)\right)}{\frac{1}{N_{obs}} \left(\sum_{j=1}^{N_{obs}} \ln\left(\frac{B_{ij}}{A_{ij}}\right)\right)} \quad 9-16$$

A total apparent clumping factor, Ω_{app} , labeled ACF in the data file, is computed from

$$\Omega_{app} = \frac{2 \int_0^{\pi/2} -\frac{\ln \overline{P(\theta)}}{S(\theta)} \sin \theta d\theta}{2 \int_0^{\pi/2} -\frac{\ln \overline{P(\theta)}}{S(\theta)} \sin \theta d\theta} = \frac{2 \sum_{i=1}^5 -\frac{\ln \overline{P(\theta_i)}}{S_i} W_i}{2 \sum_{i=1}^5 K_i W_i} \quad 9-17$$

SEL and STDDEV

Standard error L_{se} of the leaf area index value is reported as SEL, and is computed from

$$L_{se} = \sqrt{\frac{\frac{1}{N_{obs}} \sum_{j=1}^{N_{obs}} L_j^2 - L^2}{N_{obs}}} \quad 9-18$$

where L_j is the leaf area index calculated for an individual A/B pair

$$L_j = 2 \sum_{i=1}^5 K_{ij} W_i \quad 9-19$$

where K_{ij} is the contact value for the pair.

$$K_{ij} = \frac{-\ln\left(\frac{B_{ij}}{A_{ij}}\right)}{S_j} \quad 9-20$$

The standard deviation $K_{\sigma i}$ of the contact numbers is reported as STDEV, and computed from

$$K_{\sigma i} = \sqrt{\frac{1}{N_{obs} - 1} \sum_{j=1}^{N_{obs}} (K_{ij} - \overline{K}_i)^2} \quad 9-21$$

MTA

Mean Tip Angle α_f is the average inclination of the foliage in degrees from the horizontal (0=flat, 90=ve-

tical), and is computed from a 5th order polynomial $\alpha(m)$ (see figure 9-2):

$$a(m) = a_0 + (a_1 + (a_2 + (a_3 + (a_4 + a_5m)m)m)m)m \quad 9-22$$

where

$$\begin{aligned} a_0 &= 56.81964 \\ a_1 &= 46.84833 \\ a_2 &= -64.62133 \\ a_3 &= -158.69141 \\ a_4 &= 522.06260 \\ a_5 &= 1008.14931 \end{aligned}$$

The value of $\alpha(m)$ is constrained so that $0 \leq \alpha(m) \leq 90$. The independent variable m is the slope of the mean contact numbers (K) plotted against ring angle θ in radians.

$$\bar{a}_f = a\left(\frac{m}{L}\right) \quad 9-23$$

SEM

Standard error of the mean tip angle is estimated from

$$a_{se} = \left| \bar{a}_f - a\left(\frac{m \pm m_{se}}{L}\right) \right| \quad 9-24$$

where m_{se} is the standard error of the slope m . When $m > 0$, we use $(m - m_{se})$; otherwise, we use $(m + m_{se})$.

DIFN

Diffuse non-interceptance D is the fraction of sky radiation that will penetrate the canopy, averaged over the hemisphere (Norman and Welles, 1983). Note: this is computed from $\overline{\ln P(\theta)}$ not $\ln \overline{P(\theta)}$.

$$D = \frac{\int_0^{\pi/2} G(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta} = 2 \sum_{i=1}^5 \overline{G}_i W'_i \quad 9-25$$

where W'_i

$$W'_i = \sin \theta_i \cos \theta_i d\theta_i \quad 9-26$$

This value is reported as DIFN in the data file. The FV2200 makes a related computation (D_{sky} , labeled DIFN_SKY), that is weighted by sky brightness distribution based on the A readings.

$$D_{sky} = \frac{\int_0^{\pi/2} \overline{A}(\theta) G(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} \overline{A}(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta} = \frac{\sum_{i=1}^5 \overline{A}_i G_i W'_i}{\sum_{i=1}^5 \overline{A}_i W'_i} \quad 9-27$$

where \overline{A}_i is the average of the N_A above canopy readings in the file.

$$\overline{A}_i = \frac{1}{N_A} \sum_{j=1}^{N_A} A_{ij} \quad 9-28$$

Weighting Factors

The weighting factors for LAI and DIFN work out to be (when no rings are masked)

θ_i	$d\theta_i$	W_i $\sin \theta d\theta$	W'_i $\sin \theta \cos \theta d\theta$
7	12.2	0.041	0.033
23	12.2	0.131	0.097
38	11.8	0.201	0.127
53	13.2	0.290	0.141
68	13.2	0.337	0.102

When a ring is masked (excluded from the computations), its weighting value is set to 0. This will increase the weighting of the remaining rings, since their sum must be

$$\sum_{i=1}^5 W_i = \int_0^{\pi/2} \sin \theta d\theta = 1 \quad 9-29$$

and

$$\sum_{i=1}^5 W'_i = \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta = 0.5 \quad 9-30$$

The values of W_i are available on the FV2200 as the LAI_wt, and the values of W'_i are shown as DIFN_wt.

Alternative Methods

Gap fractions have been measured using fisheye photographs (Anderson, 1971; Bonhomme and Chartier 1972), by traversing a sunward-pointed sensor beneath the canopy (reviewed by Ross, 1981; Lang et al. 1985; Perry et al. 1988), by linear light sensors (Walker et al. 1988), and by pushing metal probes through the canopy (Warren Wilson, 1959).

See Norman and Campbell (1989), Welles (1990), Welles and Cohen (1996), Gower et al. (1999), Machado and Reich (1999), de Jesus et al. (2001), Mussche et al. (2001), Breda (2003) Hyer and Goertz (2004), Keane et al. (2005), Garrigues et al. (2008) for additional reviews and comparisons.

Mathematical techniques for deducing foliage density and angle distribution from measurements of gap fraction (or contact frequency) have been presented by

many authors, including Warren Wilson (1959), Miller (1963, 1967), Philip (1965), Ross (1981), Anderson (1984a, 1984b), Lang (1986, 1987), Lang et al. (1985), Perry et al. (1988), and Norman and Campbell (1989).

Derivation of Formulae for Determining # of B Readings

The guideline presented in Chapter 4 Measurement Guidelines for determining the number of **B** readings comes from the following analysis:

$$M = m \pm t(n)E \quad 9-31$$

where M is the true mean of a population, m is the mean of a sample of that population, $t(n)$ is the value of the t distribution (ignoring sign) for a 5% probability, and E is the standard error of m . We rewrite equation 9-31 in terms of an acceptable uncertainty δ :

$$\frac{M}{m} = 1 \pm \delta \quad 9-32$$

Since standard error E is standard deviation D divided by the square root of the number of samples n , we can express δ as:

$$\delta = \frac{t(n)D}{m\sqrt{n}} \quad 9-33$$

To solve equation 9-32 for sample size n , we find a functional relationship for $t(n)$ by fitting a curve to the form

$$t(n) = \frac{1}{a + bn} + c \quad 9-34$$

and find $a = -0.11528$, $b = 0.060798$, and $c = 2.9817$. Substituting equation 9-34 into 9-32 and solving for n yields

$$n = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4bC}}{2b} \quad 9-35$$

where

$$B = a - bc\left(\frac{D}{m\delta}\right)^2 \text{ and } C = -(1 + ac)\left(\frac{D}{m\delta}\right)^2.$$

As a practical matter, the term $D/(m\delta)$ can be determined by a “trial measurement” with the LAI-2200 using some number of **B** readings. These readings should be a fair representation of the diversity of the foliage density. Given *LAI*, *SEL*, and *SMP*, the $D/(m\delta)$ term can be computed from

$$\frac{D}{m\delta} = \frac{(SEL)\sqrt{(SMP)}}{(LAI)\delta} \quad 9-36$$

Table 9-2, below, from equation 9-35, predicts the number of samples necessary for a 95% confidence that a sampled mean is within some error δ of a population mean.

Table 9-2.

$D/(m\delta)$	n	$D/(m\delta)$	n	$D/(m\delta)$	n
0.2	2	1.2	8	2.2	19
0.4	3	1.4	10	2.4	22
0.6	4	1.6	12	2.6	25
0.8	5	1.8	14	2.8	28
1.0	7	2.0	16	3.0	30

Table 4-1. (page 4-4) is in terms of SEL and LAI, rather than D and m, and is based on a sample of 6 (*SMP*) with $\delta=0.1$.

Résumé

La culture du maïs ensilage est réputée pour la dégradation qu'elle peut provoquer sur les sols à cause sa faible couverture durant la saison. Ce phénomène est d'autant plus vrai lorsque le maïs est cultivé en monoculture parce que cela occasionne une longue période d'interculture où il est souvent difficile d'implanter un couvert végétal.

Nous avons donc décidé de nous pencher sur la technique du semis de couverts sous la culture de maïs pour tenter de répondre à cette problématique. Pour ce faire, nous avons semé 7 types de sous-semis différents (trèfle blanc, trèfle blanc nain et lotier corniculé à 4 et 2 kg/ha ainsi que de la fétuque rouge à 6 kg/ha) en plus d'un témoin sans sous-semis dans le but de les comparer sur trois aspects : premièrement sur leur capacité de couverture, deuxièmement sur leur éventuel effet négatif sur la croissance du maïs et troisièmement à propos de leur influence sur certains paramètres du sol (pH, carbone organique, humus, azote total, matière sèche, nitrate et teneur en eau du sol).

Les résultats de nos expériences nous ont montrés que les sous-semis à base de trèfles blancs étaient d'excellents couverts car ils offraient la meilleure couverture et permettaient une diminution significative du taux de nitrate dans le sol. Le sous-semis à base de fétuques rouges, quant à lui, offrait une couverture intermédiaire mais une baisse importante du taux de nitrate dans le sol. Pour ce qui est des sous-semis à base de trèfles blancs nains et de lotiers corniculés, ces derniers offraient, respectivement, une couverture intermédiaire et médiocre et ne diminuaient pas la quantité de nitrate dans le sol. En revanche, le lien entre la pénalisation du maïs et les couverts sous-jacents est difficile à établir car les résultats des expériences à ce sujet sont contradictoires. Enfin, les couverts végétaux ne semblent pas avoir d'influence sur la valeur alimentaire du maïs ainsi que sur les autres paramètres du sol.