

**Faculté des bioingénieurs**

# **Comparaison de méthodes d'évaluation de la fourniture du service écosystémique de la stabilité structurale sur des sols limoneux et limono-sableux en Belgique**

Auteur : Nicolas Biot

Promoteurs : Lola Leveau (doctorante UCLouvain/ELI/ELIA)

Prof. Pierre Bertin (UCLouvain/ELI/ELIA)

Lecteurs : Prof. Charles Bielders (UCLouvain/ELI/ELIE)

Dr. Frédéric Vanwindekens (CRA-W)

Année académique 2019-2020

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



---

# Remerciements

---

Ce mémoire est le fruit d'une collaboration multidisciplinaire ayant nécessité l'intervention experte et bienveillante de nombreux contributeurs.

Tout d'abord, j'aimerais remercier mes deux promoteurs, le Prof. Pierre Bertin et la doctorante Lola Leveau pour la qualité de leur suivi et leurs remarques constructives pour approfondir certains sujets. Je suis particulièrement reconnaissant vis-à-vis de Lola Leveau qui m'a accueilli et accordé une place si intéressante au sein de sa recherche, qui a partagé ses hypothèses, ses connaissances et réflexions stimulantes et s'est vraiment investie sans relâche dans cette belle collaboration. J'ai beaucoup appris de cette expérience commune.

Frédéric Vanwindekens a joué aussi un rôle important en me présentant la méthode du Quanti-Slake Test au CRA-W et en m'aidant pour l'analyse de mes résultats.

J'ai eu la chance de discuter avec des agriculteurs lors des interviews individuels ou lors de la réunion collective. J'ai trouvé très enrichissant de pouvoir inclure une partie participative à mon mémoire, et je reste convaincu qu'une consultation de ces experts de terrain, trop souvent négligée, est indispensable dans la recherche agronomique.

Hugues Falys, responsable de la ferme de Marbaix, s'est montré très disponible, contribuant à l'organisation de prises de mesures sur le terrain ainsi qu'à l'interprétation de mes résultats.

De nombreux membres de la faculté d'agronomie de l'UCLouvain m'ont conseillé sur base de leurs expertises. Ainsi, grâce au Prof. Charles Bielders, j'ai pu participer à la mise au point du protocole de la méthode Le Bissonnais au sein de son laboratoire, avec l'aide précieuse de Martin Zanutel et d'Adrien Lefebvre. Aubry Vandeuren a répondu patiemment à mes questions concernant les sciences du sol et l'utilisation du matériel de terrain ; Axelle Koch m'a guidé dans l'analyse des résultats d'infiltrométrie. Sébastien François et Jérémy Lefour m'ont fourni tout le matériel dont j'avais besoin. Durant la période de confinement, j'ai apprécié l'aide inestimable de nos deux techniciens, Thomas Dagbert et Pierre Van Thorre, dans l'élaboration de matériel et la prise de mesures sur le terrain.

Mes amis de cours ont également participé aux prises de mesures sur le terrain : Louise Verhaeghe, Javier Guirao et surtout Florent Matheise qui m'a partagé son expérience du milieu agricole et m'a apporté motivation et réconfort durant cette période inoubliable de « rédaction de mémoire pendant le confinement ».

Enfin je souhaiterais remercier énormément ma famille - ma mère, mon père, ma sœur et mon grand-père pour leur intérêt pour mes recherches et leurs soutiens respectifs.

Merci à tous et à toutes.

---

# Résumé

---

Pour pallier les effets négatifs sur l'environnement des formes d'agriculture développées au XX<sup>ème</sup> siècle, la Région wallonne encourage maintenant une transition vers une agriculture écologiquement intensive et plus durable, qui s'inspire de processus écologiques sans compromettre les objectifs de production. Dans cette intention de changement vers plus de durabilité, la thèse de Lola Leveau soutient que l'évaluation objective et scientifique, à partir d'approches participatives et multidisciplinaires, des pratiques culturelles innovantes déjà présentes dans les exploitations agricoles wallonnes devient un enjeu majeur. Ce mémoire partage ses hypothèses et s'insère spécifiquement dans la dimension écologique de son travail de recherche. L'objectif de ce mémoire est de sélectionner puis de tester des indicateurs et des méthodes de mesure qui permettent d'évaluer les résultats de différentes pratiques culturelles sur la fourniture du service écosystémique de la stabilité structurale du sol.

Trois indicateurs pour évaluer la stabilité structurale du sol ont été sélectionnés à partir de la littérature et par une approche participative basée sur des interviews d'agriculteurs et d'experts scientifiques : la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol, la résistance du sol à la compaction et la stabilité des agrégats du sol. Pour chaque indicateur, des méthodes scientifiquement reconnues ont été comparées à des méthodes simples, rapides et peu coûteuses. Certaines méthodes « Maison » ont été développées en se basant sur les observations d'agriculteurs. Onze méthodes ont été testées à la ferme universitaire de Marbaix sur trois champs différents : une prairie permanente, un champ de froment après une culture de pommes de terre et un champ occupé par une couverture après une culture de froment et avant une culture de betterave. Chaque champ a été divisé en deux parcelles de texture limoneuse et limono-sableuse. Pour chaque méthode, les effets de l'humidité, de la texture et du type de culture sur les résultats des mesures ont été testés.

Presque aucune méthode n'a permis de distinguer les champs soumis à un travail du sol. En revanche, 9 des 11 méthodes testées ont montré que ces deux champs, ou au moins un des deux, avaient une moins bonne stabilité structurale que la prairie. La méthode Maison qui évalue l'infiltration de l'eau dans le sol, s'est montrée prometteuse et peut servir de point de départ pour l'élaboration collective d'une nouvelle méthode de terrain.

L'élaboration de méthodes d'évaluation de la stabilité structurale des sols reste un enjeu majeur pour le monde agricole et la recherche scientifique. Ces outils, s'ils sont bien utilisés, peuvent soutenir une évolution vers une agriculture plus durable.

---

# Table des matières

---

|          |                                                                                                                  |           |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>ETAT DE L'ART</b>                                                                                             | <b>0</b>  |
| 1.1      | <b>Contexte</b>                                                                                                  | <b>1</b>  |
| 1.1.1    | Défis de l'agriculture actuelle                                                                                  | 1         |
| 1.1.2    | Une agriculture écologiquement intensive comme trajectoire plus durable                                          | 6         |
| 1.2      | <b>Caractérisation et comparaison des exploitations en fonction de leur caractère écologiquement intensif</b>    | <b>8</b>  |
| 1.2.1    | Une approche agroécologique pour répondre aux objectifs de comparaison                                           | 8         |
| 1.2.2    | Une approche basée sur les services écosystémiques comme outil de comparaison                                    | 10        |
| 1.2.3    | Recherche participative à la ferme                                                                               | 12        |
| 1.3      | <b>Sélection d'indicateurs et de méthodes de mesures associées pour évaluer des services écosystémiques</b>      | <b>14</b> |
| 1.3.1    | Définition et classification des indicateurs associés aux services écosystémiques                                | 14        |
| 1.3.2    | Démarche de sélection d'indicateurs et de méthodes de mesures associées pour évaluer des services écosystémiques | 15        |
| 1.4      | <b>Indicateurs et méthodes de mesure de la stabilité structurale du sol</b>                                      | <b>17</b> |
| 1.4.1    | Définition de la stabilité structurale du sol                                                                    | 17        |
| 1.4.2    | Evaluation de la stabilité structurale du sol                                                                    | 18        |
| 1.4.3    | Méthodes de mesure de l'infiltration de l'eau dans le sol                                                        | 19        |
| 1.4.4    | Méthodes de mesure de la résistance à la compaction du sol                                                       | 20        |
| 1.4.5    | Méthodes de mesure de l'érosion et de la stabilité des agrégats                                                  | 23        |
| 1.5      | <b>Objectifs du mémoire</b>                                                                                      | <b>27</b> |
| <b>2</b> | <b>MATERIEL ET METHODES</b>                                                                                      | <b>29</b> |
| 2.1      | <b>Constitution d'un réseau de fermes</b>                                                                        | <b>30</b> |
| 2.2      | <b>Démarches pour la sélection d'indicateurs et de méthodes de mesure</b>                                        | <b>31</b> |
| 2.3      | <b>Plan des parcelles</b>                                                                                        | <b>36</b> |
| 2.4      | <b>Plan expérimental</b>                                                                                         | <b>39</b> |
| 2.5      | <b>Conséquences de l'épidémie de coronavirus (COVID-19) sur le plan expérimental</b>                             | <b>40</b> |
| 2.6      | <b>Description des méthodes testées</b>                                                                          | <b>41</b> |
| 2.6.1    | Méthodes de mesure qui évaluent l'infiltration de l'eau dans le sol                                              | 41        |

|       |                                                                                                                           |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.6.2 | Méthodes de mesure qui évaluent la résistance du sol à la compaction .....                                                | 45 |
| 2.6.3 | Méthodes de mesure de la stabilité des agrégats du sol .....                                                              | 48 |
| 2.7   | <b>Analyses statistiques</b> .....                                                                                        | 55 |
| 2.7.1 | Variables et facteurs de classification .....                                                                             | 55 |
| 2.7.2 | Moyennes, écart-types et erreurs standards .....                                                                          | 55 |
| 2.7.3 | Analyse de la variance et comparaison des moyennes .....                                                                  | 55 |
| 2.7.4 | Coefficient et test de corrélation .....                                                                                  | 57 |
| 3     | <b>RESULTATS</b> .....                                                                                                    | 58 |
| 3.1   | <b>Influence de l'humidité du sol sur les résultats</b> .....                                                             | 59 |
| 3.2   | <b>Résultats des méthodes qui évaluent la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol</b><br>.....                       | 60 |
| 3.2.1 | Résultats de la méthode Simple anneau .....                                                                               | 60 |
| 3.2.2 | Résultats de la méthode Ariane Chabert .....                                                                              | 61 |
| 3.2.3 | Résultats de la méthode Maison .....                                                                                      | 63 |
| 3.2.4 | Corrélation entre les méthodes qui évaluent la capacité d'infiltration de l'eau dans le<br>sol.....                       | 65 |
| 3.3   | <b>Résultats des méthodes qui évaluent la résistance du sol à la compaction</b> .....                                     | 66 |
| 3.3.1 | Résultats de la mesure de densité apparente par des cylindres de Kopecky .....                                            | 66 |
| 3.3.2 | Résultats du pénétromètre digital .....                                                                                   | 69 |
| 3.3.3 | Résultats de la méthode VESS .....                                                                                        | 71 |
| 3.3.4 | Résultats de la méthode Maison .....                                                                                      | 74 |
| 3.3.5 | Corrélation entre les méthodes .....                                                                                      | 75 |
| 3.4   | <b>Résultats des méthodes de mesure qui évaluent la stabilité des agrégats du sol</b> .                                   | 77 |
| 3.4.1 | Résultats de la méthode Le Bissonnais .....                                                                               | 77 |
| 3.4.2 | Résultats de la méthode Ariane Chabert .....                                                                              | 77 |
| 3.4.3 | Résultats de la méthode du Quanti-Slake Test .....                                                                        | 80 |
| 3.4.4 | Résultats de la méthode VESS .....                                                                                        | 80 |
| 3.4.5 | Résultats de la méthode USDA.....                                                                                         | 82 |
| 3.4.6 | Corrélation entre les méthodes .....                                                                                      | 83 |
| 4     | <b>DISCUSSION</b> .....                                                                                                   | 84 |
| 4.1   | <b>Discussion sur les résultats des méthodes qui évaluent la capacité d'infiltration de<br/>l'eau dans les sols</b> ..... | 85 |
| 4.1.1 | Confrontation des valeurs avec la littérature.....                                                                        | 85 |
| 4.1.2 | Variabilité des méthodes de mesure.....                                                                                   | 85 |
| 4.1.3 | Quelles sont les différences mises en évidence par chaque méthode ? .....                                                 | 88 |

|       |                                                                                                             |            |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.1.4 | Résumé sur la comparaison des méthodes qui évaluent la capacité d'infiltration de l'eau dans les sols ..... | 93         |
| 4.2   | <b>Discussion sur les résultats des méthodes qui évaluent la résistance des sols à la compaction.....</b>   | <b>94</b>  |
| 4.2.1 | Confrontation des valeurs avec la littérature.....                                                          | 94         |
| 4.2.2 | Variabilité des méthodes de mesure.....                                                                     | 95         |
| 4.2.3 | Quelles sont les différences mises en évidences par chaque méthode ? .....                                  | 97         |
| 4.2.4 | Résumé sur la comparaison des méthodes de mesure qui évaluent la résistance des sols à la compaction .....  | 102        |
| 4.3   | <b>Discussion sur les résultats des méthodes qui évaluent la stabilité des agrégats des sols.....</b>       | <b>104</b> |
| 4.3.1 | Confrontation des résultats avec la littérature .....                                                       | 104        |
| 4.3.2 | Variabilité des méthodes de mesure.....                                                                     | 105        |
| 4.3.3 | Quelles sont les différences mises en évidences par chaque méthode ? .....                                  | 106        |
| 4.3.4 | Résumé sur la comparaison des méthodes qui évaluent la stabilité des agrégats des sols .....                | 108        |
| 4.4   | <b>Quelles améliorations et perspectives ? .....</b>                                                        | <b>109</b> |
| 4.5   | <b>Conclusion .....</b>                                                                                     | <b>111</b> |

---

# Table des figures

---

|                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 : Evolution de l'agriculture entre 1940 et 2000 .....                                                                                         | 1  |
| Figure 2: Rôles de la matière organique.....                                                                                                           | 4  |
| Figure 3: Effets de la compaction sur le fonctionnement d'un sol agricole.....                                                                         | 6  |
| Figure 4 : Diversité des types de signification de l'agroécologie.....                                                                                 | 9  |
| Figure 5: Relations entre les propriétés finales du sol, les propriétés initiales et les forces appliquées dans un processus de compaction du sol..... | 22 |
| Figure 6 : Schéma global de la phase de recherche et de sélection des indicateurs et méthodes de mesure.....                                           | 34 |
| Figure 7 : Plan parcellaire des essais .....                                                                                                           | 37 |
| Figure 8 : Vues aériennes et positions des placettes et parcelles expérimentales.....                                                                  | 38 |
| Figure 9 : Dispositif de l'infiltromètre simple anneau (schéma et photographie) .....                                                                  | 42 |
| Figure 10 : Photographie de la méthode de mesure d'infiltration inspirée d'Ariane Chabert .....                                                        | 43 |
| Figure 11 : Photographies de la méthode maison d'infiltrométrie .....                                                                                  | 44 |
| Figure 12 : Photographies de l'utilisation d'un pénétromètre digital .....                                                                             | 46 |
| Figure 13 : Photographie des étapes de la méthode maison de mesure de la résistance à la pénétration .....                                             | 47 |
| Figure 14 : Photographies des étapes du test de Le Bissonnais (1995) .....                                                                             | 50 |
| Figure 15 : Photographies du dispositif du Quanti-Slake Test .....                                                                                     | 51 |
| Figure 16 : Photographie de la dissolution des échantillons de sol durant un test VESS (a) et du dispositif servant de filtre (b).....                 | 52 |

|                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 17 : Mesure de la turbidité de l'eau à partir d'un disque de Secchi par la méthode Ariane Chabert .....                                                                                                                        | 53 |
| Figure 18 : Test maison de mesure de la stabilité des agrégats.....                                                                                                                                                                   | 54 |
| Figure 19 : Moyennes et erreurs standards des constantes hydrauliques à saturation ( $K_s$ ) par parcelle, mesurées par la méthode Simple anneau.....                                                                                 | 60 |
| Figure 20 : Moyennes et erreurs standards des constantes hydrauliques ( $K$ ) par parcelle, mesurées par la méthode Ariane Chabert .....                                                                                              | 62 |
| Figure 21 : Moyennes et erreurs standards des mesures d'infiltration ( $1/s$ ) par parcelle, mesurées par la méthode Maison .....                                                                                                     | 64 |
| Figure 22 : : Moyennes et erreurs standards des mesures de densité apparente du sol sur 30 cm de profondeur par parcelle .....                                                                                                        | 67 |
| Figure 23 : Moyennes et erreurs standards des mesures de densité apparente du sol en fonction de la profondeur pour chaque parcelle .....                                                                                             | 68 |
| Figure 24 : Moyennes et erreurs standards des pressions moyennes nécessaires (MPa) pour pénétrer de 1 cm dans le sol entre 0 et 30 cm de profondeur .....                                                                             | 69 |
| Figure 25 : Moyennes et erreurs standards des pressions moyennes nécessaires (MPa) pour pénétrer de 1 cm dans le sol en fonction de la profondeur pour chaque parcelle.....                                                           | 70 |
| Figure 26 : Moyennes et erreurs standards des scores VESS sur 30 cm de profondeur par parcelle. Deux moyennes sont significativement différentes, si et seulement si, les lettres qui leur sont associées ne sont pas les mêmes ..... | 72 |
| Figure 27 : Moyennes et erreurs standards des scores VESS en fonction de la profondeur pour chaque parcelle .....                                                                                                                     | 73 |
| Figure 28 : Profondeurs moyennes d'enfoncement de la bouteille et erreurs standards par parcelle pour la méthode Maison .....                                                                                                         | 74 |
| Figure 29 : Moyennes et erreurs standards des diamètres moyens pondérés (MWD) par parcelle, calculés par la méthode Le Bissonnais .....                                                                                               | 77 |
| Figure 30 : Moyennes et erreurs standards des mesures de stabilité des agrégats par parcelle, mesurées par la méthode Ariane Chabert.....                                                                                             | 79 |

|                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 31 : Moyennes et erreurs standards des masses relatives par parcelle, mesurées à 700 sec par la méthode du Quanti-Slake Test ..... | 80 |
| Figure 32 : Moyennes et erreurs standards des scores VESS moyens sur 5 cm de profondeur par parcelle .....                                | 81 |
| Figure 33 : Moyennes et erreurs standards des scores USDA par parcelle .....                                                              | 82 |

---

# Liste des tableaux

---

|                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1: Teneurs en carbone organique des sols (COS) sous cultures en Wallonie.....                                                                             | 4  |
| Tableau 2 : Types d'indicateurs pour évaluer des services écosystémiques .....                                                                                    | 14 |
| Tableau 3 : Critères pour l'évaluation d'indicateurs durables et pour la sélection d'un set d'indicateurs approprié en lien avec les objectifs de l'analyse ..... | 16 |
| Tableau 4 : Indicateurs et méthodes de mesure de l'infiltration de l'eau dans le sol .....                                                                        | 20 |
| Tableau 5 : Indicateurs et méthodes de mesure de l'état de compaction, ou de la résistance à la compaction du sol .....                                           | 23 |
| Tableau 6: Principales caractéristiques des différents mécanismes de désagrégation par l'eau .....                                                                | 25 |
| Tableau 7 : Indicateurs et méthodes de mesure de l'érosion hydrique du sol.....                                                                                   | 26 |
| Tableau 8: Services écosystémiques sélectionnés à partir de la littérature .....                                                                                  | 31 |
| Tableau 9 : Indicateurs de la stabilité structurale du sol sélectionnés dans la littérature.....                                                                  | 32 |
| Tableau 10: Critères de sélection utilisés pour la pondération des indicateurs .....                                                                              | 33 |
| Tableau 11 : Indicateurs et méthodes sélectionnés pour évaluer la stabilité structurale du sol .....                                                              | 35 |
| Tableau 12 : Description des champs d'essais .....                                                                                                                | 37 |
| Tableau 13 : Tableau répertoriant les caractéristiques des scores VESS .....                                                                                      | 48 |
| Tableau 14 : Classes de stabilité, battance et érosion en fonction de valeurs du diamètre moyen pondéré après désagrégation (MWD).....                            | 50 |
| Tableau 15 : Critères pour l'attribution des scores VESS .....                                                                                                    | 52 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 16 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ) et résultat du test F (Prob. > F) de l'ANOVA II utilisant les facteurs Texture, Champ ainsi que leur interaction pour expliquer les valeurs de Ks mesurée par la méthode simple anneau.....                                | 60 |
| Tableau 17 : Valeurs des écart-types ( $\sigma$ ) intra-parcelle, intra-placette et pour l'ensemble des données de Ks mesurées par la méthode Simple anneau .....                                                                                                              | 61 |
| Tableau 18 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ) et résultat du test F (Prob. > F) de l'ANOVA II utilisant les facteurs Texture, Champ ainsi que leur interaction pour expliquer la racine carrée des valeurs d'infiltrométrie mesurées par la méthode Ariane Chabert ..... | 61 |
| Tableau 19 : Résultats du test de Student (Prob. >  t ) et relations de grandeur entre les différents champs pour la méthode Ariane Chabert .....                                                                                                                              | 62 |
| Tableau 20 : Valeurs des écart-types ( $\sigma$ ) intra-parcelle, intra-placette et inter-parcelle (total) à partir des données d'infiltration de la méthode Ariane Chabert.....                                                                                               | 63 |
| Tableau 21 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ) et résultat du test F (Prob. > F) de l'ANOVA II utilisant les facteurs Texture, Champ ainsi que leur interaction pour expliquer la racine carrée des valeurs d'infiltrométrie mesurée par la méthode Maison .....          | 64 |
| Tableau 22 : Résultats du test de Student (Prob. >  t ) et relation de grandeur entre les différents champs pour la méthode Maison .....                                                                                                                                       | 65 |
| Tableau 23 : Valeurs des écart-types ( $\sigma$ ) intra-parcelle, intra-placette et pour l'ensemble des données d'infiltrométrie pour la méthode Maison .....                                                                                                                  | 65 |
| Tableau 24 : Corrélation et p-valeur associée entre la méthode Maison et Ariane Chabert .....                                                                                                                                                                                  | 65 |
| Tableau 25 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ) et résultat du test F (Prob. > F) de l'ANOVA III utilisant les facteurs texture, Champ et profondeur ainsi que leurs interactions pour expliquer les valeurs de densité apparente mesurées.....                            | 66 |
| Tableau 26 : Résultats du test de Student (Prob. >  t ) et relations de grandeur entre les différents champs par rapport à leur densité apparente .....                                                                                                                        | 67 |
| Tableau 27 : Valeurs des écart-types ( $\sigma$ ) intra-parcelle, intra-placette et pour l'ensemble des mesures de densité apparente .....                                                                                                                                     | 68 |
| Tableau 28 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ) et résultat du test F (Prob. > F) de l'ANOVA III utilisant les facteurs Texture, Champ et Profondeur ainsi que leurs interactions pour expliquer les valeurs de pénétrométrie mesurées .....                               | 69 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 29 : Résultats du test de Student (Prob. >  t ) et relations de grandeur entre les différents champs par rapport à leur résistance à la pénétration.....                                                                                                                                                                                      | 70 |
| Tableau 30 : Valeurs des écart-types ( $\sigma$ ) intra-parcelle, intra-placette et pour l'ensemble des mesures de pénétrométrie .....                                                                                                                                                                                                                | 71 |
| Tableau 31 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ) et résultat du test F (Prob. > F) de l'ANOVA III utilisant les facteurs Texture, Champ et Profondeur ainsi que leurs interactions pour expliquer les scores VESS .....                                                                                                                            | 71 |
| Tableau 32 : Résultats du test de Student (Prob. >  t ) et relations de grandeur entre les différents champs par rapport à leur score VESS .....                                                                                                                                                                                                      | 72 |
| Tableau 33: Coefficient de détermination ( $R^2$ ) et résultat du test F (Prob. > F) de l'ANOVA II utilisant les facteurs Texture et Champ ainsi que leur interaction pour expliquer les résultats de profondeur d'enfoncement de la méthode Maison.....                                                                                              | 74 |
| Tableau 34 : Valeurs des écart-types ( $\sigma$ ) intra-parcelle, intra-placette et pour l'ensemble des mesures de la méthode Maison.....                                                                                                                                                                                                             | 75 |
| Tableau 35 : Corrélations de Pearson et p-valeurs associées entre les mesures de densité apparente avec celles de pénétrométrie et de la méthode VESS en tenant compte de la profondeur entre 0 et 30 cm .....                                                                                                                                        | 75 |
| Tableau 36 : Corrélation de Pearson et p-valeur associée entre les mesures de densité apparente avec celles de la méthode VESS en tenant compte de la profondeur entre 0 et 5 cm .....                                                                                                                                                                | 76 |
| Tableau 37 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ), résultat du test F (Prob. > F) de l'ANOVA II utilisant les facteurs Texture et Champ ainsi que leur interaction pour expliquer les valeurs de stabilité des agrégats évaluées par la méthode Ariane Chabert, et résultats du test F (Prob. > F) testant les effets des différents facteurs ..... | 78 |
| Tableau 38 : Résultats du test de Student (Prob. >  t ) et relations de grandeur entre les champs par rapport à leur stabilité mesurée par la méthode Ariane Chabert .....                                                                                                                                                                            | 79 |
| Tableau 39 : Valeurs des écart-types ( $\sigma$ ) intra-parcelle, intra-placette et pour l'ensemble des mesures de la méthode Ariane Chabert .....                                                                                                                                                                                                    | 79 |
| Tableau 40 : Corrélation et p-valeurs associées entre les méthodes USDA, VESS et Ariane Chabert pour la mesure de stabilité des agrégats .....                                                                                                                                                                                                        | 83 |

---

# Plan du mémoire

---

Ce mémoire est organisé en quatre parties : « Etat de l’art », « Matériel et méthodes », « Résultats » et « Discussion ».

L’« Etat de l’art » contextualise ce travail par rapport à des enjeux socio-économiques et environnementaux d’actualité. Une attention particulière est donnée aux conséquences de l’agriculture, telle qu’elle a été pratiquée au XX<sup>ème</sup> siècle, sur la dégradation des sols dans les régions sablo-limoneuses et limoneuses de Belgique. Ensuite, la notion d’agriculture écologiquement intensive est introduite en tant que solution proposée par la Région wallonne comme trajectoire plus durable. Pour évaluer les pratiques innovantes déjà mises en place par les agriculteurs par rapport aux objectifs de la Région wallonne, les concepts d’agroécologie, de recherche participative, d’indicateur et de service écosystémique sont présentés. Cette partie se termine en proposant des indicateurs et méthodes de mesure, tirés de la littérature, pour évaluer la stabilité structurale du sol et en définissant les objectifs de ce mémoire.

Dans « Matériel et méthodes » est introduite la démarche participative utilisée pour sélectionner des indicateurs et des méthodes de mesure. Ensuite, le plan expérimental et la disposition des parcelles sont présentés. La fin de cette partie est consacrée à la présentation des protocoles de toutes les méthodes de mesures utilisées et à la description des analyses statistiques.

Les « Résultats » détaillent la variabilité et les effets de l’humidité, de la texture, du type de champ et de la profondeur sur les résultats obtenus par parcelle pour chacune des méthodes. Les corrélations entre les méthodes d’un même indicateur de la stabilité structurale du sol sont également développées.

Finalement, la « Discussion » compare et met en perspective les effets des différents facteurs (humidité, texture, champ, profondeur) pour chaque méthode. Cette partie se penche également sur la variabilité des méthodes et sur leur aspect « pratique » (simple, rapide, peu coûteux). Après cela, une comparaison finale des méthodes est effectuée par indicateur. Cette partie se termine par des propositions d’améliorations, de nouvelles perspectives et apporte une conclusion générale par rapport aux différents aspects analysés dans ce mémoire.

---

# Thèse de doctorat de Lola Leveau

---

« Les pratiques innovantes actuelles des fermes de grandes cultures wallonnes permettent-elles de remplacer des intrants commerciaux par des services écosystémiques sans perte de revenu ni de bien-être social ? »

Ce mémoire s'insère dans le cadre de la thèse de doctorat de Lola Leveau. Cette partie est dédiée à la présentation du contexte, des objectifs et du plan de recherche de sa thèse.

## Contexte

Lorsqu'il est question de la transition vers des systèmes agricoles plus durables, le remplacement des intrants synthétisés chimiquement par des fonctions et processus de l'agroécosystème est souvent cité comme l'une des pistes dans la littérature scientifique. Certains agriculteurs wallons sont déjà engagés dans une transition vers plus de durabilité depuis de nombreuses années, via l'application de différents principes et modèles : agriculture biologique, agroécologie, agriculture de conservation, agroforesterie,... Cependant, les initiatives de recherche visant à évaluer à quel point ces différents systèmes cultureux parviennent effectivement à diminuer leur dépendance aux intrants issus de ressources non renouvelables en les remplaçant par des services agro-écosystémiques sont encore rares, et elles se concentrent souvent sur quelques niveaux classiques d'une pratique précise – le travail du sol, les couverts, la fertilisation,...-, tout le reste étant égal par ailleurs, ou sur un nombre réduit de fermes « modèles ». De plus, malgré le caractère systémique et multidisciplinaire du sujet, les recherches se concentrent généralement pour des questions de moyens et de temps sur l'étude de résultats liés à une discipline scientifique donnée – ennemis des cultures, pollinisateurs, physique du sol...

Par exemple, depuis 15 ans, de nombreuses recherches ont porté sur les pratiques de conservation des sols dans les grandes cultures belges, principalement dans la ceinture limoneuse centrale. Beaucoup de choses ont déjà été découvertes, principalement en ce qui concerne les fonctionnalités physiques, biologiques et chimiques du sol sous quelques niveaux « typiques » de travail du sol. Cependant, en Wallonie, il y a encore beaucoup d'inconnues concernant les impacts des pratiques de l'agriculture de conservation (AC) de façon plus large que *via* le seul facteur du travail du sol. En effet, très peu d'études ont intégré les trois piliers de l'AC - le travail du sol minimal, la couverture permanente et la diversification de la rotation - dans leurs variables. En outre, à notre connaissance, aucune des études réalisées sur l'agriculture de conservation en Belgique n'a encore combiné de résultats concernant l'écologie avec des résultats de viabilité sociale et/ou économique.

En parallèle des études scientifiques, les agriculteurs et les conseillers techniques engagés dans un modèle agricole particulier ont tendance à créer leur propre définition et système d'évaluation de la durabilité afin de vérifier les impacts de leurs choix. Ils utilisent notamment des méthodes de mesure développées par des centres de recherche, choisies en fonction de leurs domaines d'intérêt. Par exemple, des chercheurs de l'ULg ont montré que les agriculteurs engagés dans l'agriculture de conservation passent par une transformation cognitive qui modifie leur perception de la qualité des sols, ce qui les amène à considérer voir les choses de manière plus holistique qu'avant leur transition.

D'un côté, ces différences dans les définitions de la "qualité" ou de la "durabilité" entre modèles cultureux rendent difficile la communication entre les agriculteurs et la comparaison objective des systèmes agricoles innovants. Mais d'un autre côté, la prolifération d'outils d'évaluation sur le terrain montre que les agriculteurs et leurs conseillers techniques cherchent des réponses concernant l'efficacité de leurs pratiques. Cette dynamique est une opportunité pour mener une recherche collaborative permettant une évaluation objective des différents systèmes agricoles existants, sur la base d'indicateurs multidisciplinaires pertinents, et à l'aide de méthodes d'analyse simples et proches du terrain.

## Objectif

L'objectif général de la thèse est d'identifier, via une approche collaborative et multidisciplinaire, si certains systèmes de grande culture appliqués actuellement dans les régions limoneuse et sablo-limoneuse wallonne se rapprochent effectivement de l'objectif théorique de remplacement des intrants synthétisés chimiquement par des services agro-écosystémiques, tout en maintenant au même niveau ou en améliorant les aspects liés aux dimensions économiques et sociales du métier d'agriculteur-rice.

## Plan de la recherche

Pour les régions limoneuse et sablo-limoneuse wallonnes, un échantillon de parcelles intégrant au maximum la diversité actuelle des pratiques observables en grandes cultures, notamment au niveau de l'agriculture de conservation, sera constitué. Ces parcelles seront analysées en collaboration avec leurs gestionnaires afin de mesurer l'impact des pratiques qui y sont appliquées sur trois dimensions :

- Les services écosystémiques que les parcelles fournissent
- La marge économique de la rotation
- L'impact social de ces pratiques pour l'agriculteur-rice

Ces mesures seront répétées trois années de suite, à chaque fois sur des parcelles différentes. Pour augmenter l'homogénéité de l'échantillon, toutes les parcelles auront des sols limoneux à drainage favorable et toutes les mesures auront lieu durant une culture de froment d'hiver.

En parallèle, les mêmes mesures seront effectuées à la Ferme universitaire de Marbaix sur une plateforme d'essai à long terme comprenant des parcelles cultivées selon les modèles « travail du sol » et « AC », et avec ou sans agriculture biologique (plan croisé). Sur cette plateforme, les mesures seront prises sur les mêmes parcelles chaque année, quelle que soit la culture en place, afin d'évaluer dans quel mesure les impacts de ces pratiques varient d'une culture à l'autre.

| PHASE 1 : PREPARATION (2019-2020)                                  |                                            |                                                      |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Création du réseau de parcelles                                    | Choix des indicateurs                      | Choix des méthodes de mesure                         |
| Création du réseau de fermes initial                               | Bibliographie et consultation d'experts    | Bibliographie et consultation d'experts              |
| Analyse du réseau de fermes initial et ajout des profils manquants | Enquêtes auprès des agriculteurs du réseau | Enquêtes auprès des agriculteurs du réseau           |
| Choix des parcelles à analyser dans chaque ferme du réseau         | Sélection du set final d'indicateurs       | Evaluation en champs de certaines méthodes de mesure |
|                                                                    |                                            | Sélection du set final de méthodes de mesure         |

| PHASE 2 : ANALYSE DES PARCELLES DU RESEAU (2020-2023) |                                              |
|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Dans les parcelles des agriculteur-rices              | Dans les parcelles de la Ferme universitaire |
| Mesure en champ des services écosystémiques           | Mesure en champ des services écosystémiques  |
| Enquêtes sur l'itinéraire culturel                    | Enquêtes sur l'itinéraire culturel           |
| Calcul de la marge économique                         | Calcul de la marge économique                |
| Enquête sur l'impact social                           |                                              |

| PHASE 3 : ANALYSE DES RESULTATS (2023-2024)                                                                                                 |                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Apports scientifiques                                                                                                                       | Impacts pour les agriculteur-rices du réseau                            |
| Comparaison des résultats obtenus dans les parcelles d'agriculteur-rices avec les résultats obtenus dans les parcelles expérimentales       | Présentation des résultats complets                                     |
| Identification de liens existant entre les pratiques appliquées et la théorie du remplacement des intrants par les services écosystémiques. | Enquête sur l'impact de l'étude auprès des agriculteur-rices du réseau. |

Les cases en bleu correspondent aux étapes dans lesquelles Nicolas Biot est intervenu au cours de son mémoire.

# 1 ETAT DE L'ART

---

# 1.1 Contexte

---

## 1.1.1 Défis de l'agriculture actuelle

### 1.1.1.1 Evolution de l'agriculture au XX<sup>ème</sup> siècle

L'incapacité à subvenir aux besoins alimentaires d'une population est un des facteurs qui a souvent expliqué l'abandon d'un système agraire pour un autre dans l'histoire de l'humanité. De fait, lorsqu'il devient évident ou socialement inacceptable qu'un système agraire donné n'est pas ou plus capable de subvenir durablement aux besoins des habitants, des conflits d'intérêts apparaissent et une pression s'exerce pour des changements partiels ou plus globaux, lents ou plus brutaux. Grâce à une série d'améliorations, de réformes, ou dans des circonstances particulières, le système agraire finit par être concurrencé, complété ou remplacé par un autre qui permettrait, dans l'idéal, d'alimenter plus de personnes (Bertin, 2019).

La Terre ayant des surfaces agricoles limitées, l'une des solutions pour nourrir les hommes est d'augmenter la productivité des exploitations. C'est ainsi qu'au XX<sup>ème</sup> siècle, d'importants investissements publics ont encouragé la recherche à émettre des propositions afin d'accroître drastiquement les rendements agricoles pour répondre à l'augmentation de la population mondiale. Ces solutions ont été possibles grâce à l'arrivée de la motorisation et du développement des transports lors de la seconde révolution agricole des temps modernes. Ces innovations ont permis l'augmentation de la productivité de la terre de différentes manières : par l'utilisation de fertilisants inorganiques, de pesticides (Figure 1), par l'amélioration génétique et l'irrigation ainsi que celle de la productivité

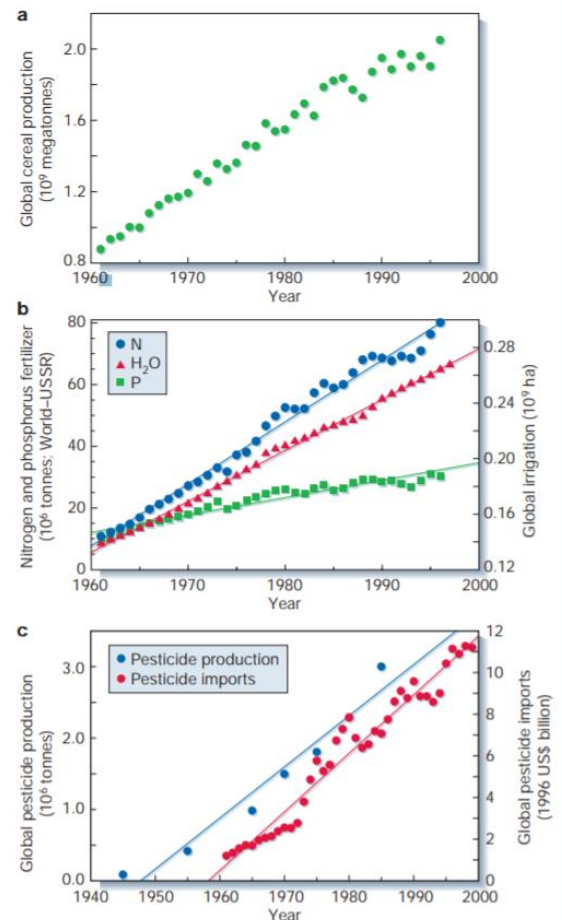


Figure 1 : Evolution de l'agriculture entre 1940 et 2000. a) Production totale de céréales, b) Utilisation globale de fertilisants azotés et phosphatés (excepté l'ex- URSS) et total des surfaces irriguées, c) Production mondiale totale de pesticides et importation mondiale de pesticides (sommée entre tous les pays). Source : Tilman et al. (2002).

du travail liée au développement de machines plus puissantes et par l'arrivée des transports qui a également causé une spécialisation de l'agriculture tant au niveau régional qu'au niveau de la chaîne de production (Bertin, 2019; Hazell and Wood, 2008).

#### *1.1.1.2 Conséquences de l'agriculture du XX<sup>ème</sup> siècle*

A l'heure actuelle, l'amélioration de la productivité devient difficile et les surfaces cultivables diminuent. La FAO affirme qu'il est peu probable qu'on arrive à une pénurie alimentaire au niveau mondial, mais qu'il y a de sérieux problèmes au niveau de la répartition de la production alimentaire tant à l'échelle nationale que locale (Hazell and Wood, 2008; Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 2002).

Alors que l'atteinte de l'objectif de sécurité alimentaire d'une telle agriculture peut être discuté, sa durabilité est quant à elle sûrement menacée (Bertin, 2019; Hazell and Wood, 2008).

Les effets environnementaux liés à l'agriculture telle qu'elle est pratiquée depuis le XX<sup>ème</sup> siècle, peuvent nuire à long terme à la productivité du système (MEA, 2005). Ces effets peuvent être résumés en 5 points (Hazell and Wood, 2008) :

- Déforestation et dégradation des forêts
- Epuisement de l'eau et dégradation des terres irriguées
- Dégradation du sol
- Perte de biodiversité
- Changement régional et mondial du climat

Pour ce qui est de la dégradation des sols, la Commission européenne pointe huit menaces principales : la contamination des sols - par les métaux lourds et autres polluants d'origine anthropique - , l'imperméabilisation des sols - augmentée par l'urbanisation - , l'érosion, la diminution du taux en matière organique, la compaction, la réduction de la biodiversité, la salinisation, les inondations et les glissements de terrains. L'imperméabilisation des sols est le seul processus pour lequel l'agriculture n'a pas d'influence (Commission Européenne, 2016, 2006).

Parmi les effets cités ci-dessus, ce mémoire se focalise sur les problèmes liés à la dégradation des sols limoneux et limono-sableux sous culture en Région wallonne, en Belgique.

#### *1.1.1.3 Problèmes liés à la dégradation des sols en Région wallonne*

En 2017, entre les huit causes principales de dégradation des sols pointées par la Commission européenne, seuls les problèmes d'inondation et de salinisation ne sont pas repris dans les principales préoccupations concernant la qualité des sols en Wallonie. En

revanche, un focus particulier est donné aux flux d'azote, et dans une moindre mesure de phosphore, issus des sols agricoles (Service Public Wallon, 2017). De fait, l'usage d'engrais minéraux depuis 1960 a contribué à l'altération du cycle de l'azote, résultant en un appauvrissement des sols en azote et en une pollution des eaux par les nitrates (Matson, 1997). La dégradation des sols est d'autant plus importante quand on est situé en région agricole de grandes cultures comme la région sablo-limoneuse (Service Public Wallon, 2017).

#### 1.1.1.3.1 Perte de carbone organique

La matière organique du sol est :

Un ensemble hétérogène constitué de litières, de résidus de culture, de racines vivantes, d'animaux de tailles diverses ... mais aussi de débris végétaux en cours de décomposition et de matières évoluées non identifiables à l'œil : l'humus.  
(Bourgeois et al., 2020).

Elle peut donc être vue comme un continuum de composés organiques en décomposition progressive (Lehmann et Kleber, 2015).

L'agriculture conventionnelle telle qu'elle a été pratiquée à partir du XX<sup>ème</sup> siècle a réduit considérablement les taux de matière organique présents dans les sols agricoles en Belgique (Tableau 1 ; Hazell and Wood, 2008; Lettens et al., 2005; Matson, 1997). En 1994, dans son rapport sur l'environnement wallon, la Région wallonne indiquait qu'en région limoneuse et sablo-limoneuse, respectivement 28.8% et 42% des terres étaient insuffisamment pourvus en carbone organique (le carbone organique étant un estimateur des teneurs en matières organiques). Déjà à cette époque-là, elle estimait que cette déficience avait été observée depuis une dizaine d'années (Ministère de la Région Wallonne, 1994).

Le manque de carbone organique peut notamment s'expliquer par le remplacement d'engrais organiques par des fertilisants minéraux. Or, la matière organique joue un rôle important dans la stabilité structurale des sols. Elle influence une série de paramètres importants concernant la qualité du sol comme l'érosion, la résistance à la compaction, l'infiltration de l'eau dans le sol, la rétention en eau, la disponibilité en nutriments et l'activité biologique (Figure 2). Bien que la fertilisation minérale puisse combler les besoins des plantes en nutriments, elle ne suffit pas pour remplacer l'ensemble des fonctions de la matière organique (Bertin, 2019; Le Bissonnais, 1995; Marsden, 2014; Weil. Ray R. Brady and Weil, 2016).

Tableau 1: Teneurs en carbone organique des sols (COS) sous cultures en Wallonie. Source : Service Public Wallon (2017)

| Régions agricoles | n*     | Teneurs en COS (%) |      |      | Evolution entre les périodes 1949-1972 et 2004-2014 |
|-------------------|--------|--------------------|------|------|-----------------------------------------------------|
|                   |        | Moyenne            | P 25 | P 75 |                                                     |
| Sablo-limoneuse   | 8 714  | 1,14               | 1,00 | 1,20 | -12 %                                               |
| Limoneuse         | 19 694 | 1,22               | 1,02 | 1,30 | -13 %                                               |

\* Nombre d'échantillons analysés

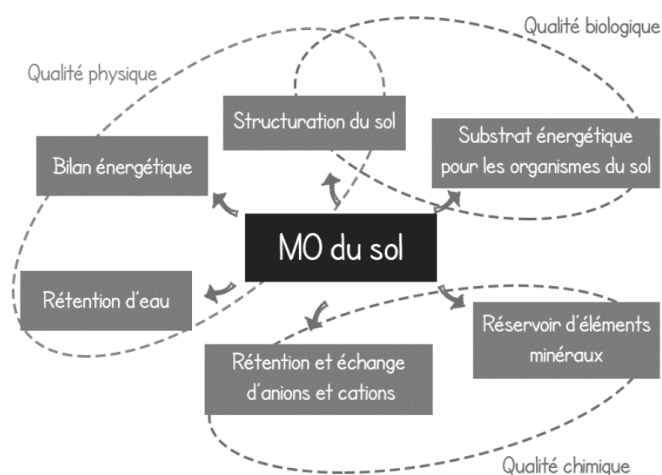


Figure 2: Rôles de la matière organique. Source : Marsden (2014).

#### 1.1.1.3.2 Problèmes d'érosion

L'érosion est définie comme étant l'entraînement de particules de sol par un vecteur comme l'eau, le vent ou le travail du sol (Gillijns et al., 2005). L'érosion est la conséquence d'une perte en matière organique mais aussi d'une croissance des surfaces cultivées (menant à une diminution de bordures), de l'absence de couverts végétaux et d'un labour répété (Pimentel et al., 1995; Van Oost et al., 2000). De plus, l'utilisation de cultures sarclées fait que l'érosion est plus élevée dans les régions de grandes cultures. En effet, ces cultures sont peu couvrantes au printemps, quand les pluies sont les plus érosives (Service Public Wallon, 2017). L'érosion dépend aussi de la porosité du sol, par sa capacité à permettre le mouvement de l'eau, des racines et des gaz dans le sol. L'activité biologique du sol joue donc un rôle important dans les processus d'érosion puisqu'elle participe à la création et à la maintenance de la porosité (Shaxson, 2009). La pluviométrie, le type de sol et la topographie influencent aussi la capacité du sol à être sensible à l'érosion (Gillijns et al., 2005).

L'érosion du sol est un processus qui cause beaucoup de problèmes dans la ceinture sablo-limoneuse en Belgique (Lettens et al., 2005) et qui est directement lié à des pertes de rendement. En 2003, une enquête réalisée chez 352 agriculteurs de la région limoneuse en Wallonie, montre que 70% d'entre eux rencontrent des problèmes d'érosion hydrique dans

leurs champs (Biielders et al., 2003). En 2015, les pertes de sol dues à l'érosion étaient supérieures à 5 t/ha pour 35% et à 10 t/ha pour 9% des terres agricoles en Région wallonne (Service Public Wallon, 2017). Qui dit perte de sol dit également perte en production et en nutriments et réduction à long terme du potentiel de production des sols érodés en modifiant progressivement leurs caractéristiques physiques, chimiques et biologiques (Roose, 1999). Outre les conséquences locales, l'érosion hydrique en particulier a également des conséquences en aval des parcelles agricoles, par exemple sur les cours d'eau et les routes (Annexe 1 ; Gillijns et al., 2005).

#### 1.1.1.3.3 Problèmes de compaction des sols

La compaction est un phénomène de détérioration de la structure des sols par pression mécanique, par vibration ou percussion, augmentant la densité sèche du sol, en réduisant la macroporosité (Larousse, 2020; Service Public Wallon, 2017).

La compaction est fortement influencée par le passage de machines agricoles devenues de plus en plus lourdes (Ministère de la Région Wallonne, 1994). Le nombre de passages, la vitesse à laquelle l'engin travaille, le type d'outil ainsi que la pression de contact sont des paramètres qui influencent aussi la compaction. Dans les champs labourés, la compaction est réversible en surface par des phénomènes naturels : les cycles de gel-dégel, cycles d'humectation-dessiccation, bioturbation. Cependant, elle n'est pas réversible en profondeur (>30cm) où une semelle de labour - un horizon compacté faisant obstacle à la circulation de l'eau ou à la pénétration des racines (Mazoyer, 2002a) - a tendance à se former. La compaction est surtout critique dans les sols limoneux peu caillouteux de la partie centrale de l'Ardenne et de la partie nord de l'Ardenne du nord-est (Service Public Wallon, 2017).

La compaction réduit considérablement les rendements. Elle diminue l'infiltration de l'eau dans le sol ainsi que sa remontée par capillarité, les échanges gazeux (avec des risques de dénitrification) et la capacité des racines à s'enfoncer dans le sol. Aussi, la compaction provoque du ruissellement en surface, augmentant les risques d'érosion et provoquant la perte de fertilisants et produits phytopharmaceutiques par écoulement (Figure 3, Service Public Wallon, 2017).

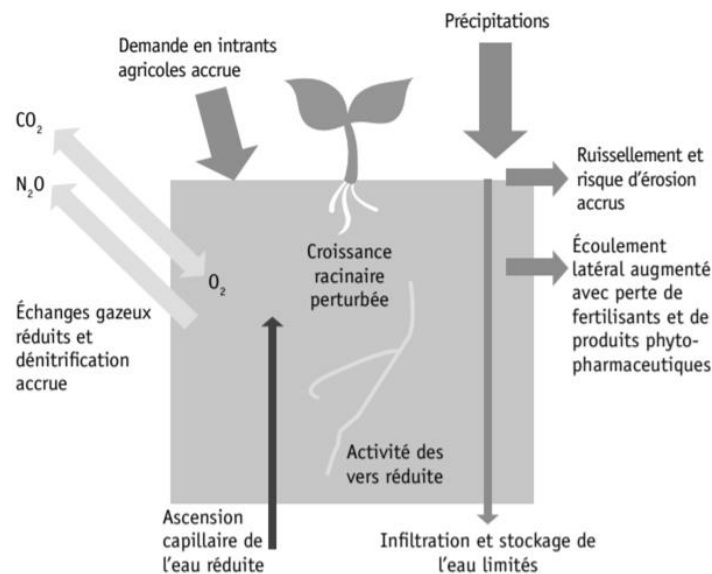


Figure 3: Effets de la compaction sur le fonctionnement d'un sol agricole. Source : Service Public Wallon (2017).

### 1.1.2 Une agriculture écologiquement intensive comme trajectoire plus durable

Le Gouvernement wallon est sensible aux problèmes liés à la dégradation des sols et à la durabilité de l'agriculture d'une façon plus générale. Il prône un changement vers une agriculture écologiquement intensive :

*Pour préserver la diversité et la multifonctionnalité de son agriculture et assurer son développement durable, la Région wallonne encourage le maintien d'une agriculture familiale, à taille humaine, rentable, pourvoyeuse d'emplois et **l'évolution vers une agriculture écologiquement intensive** (Gouvernement wallon, 2014).*

Par agriculture écologiquement intensive, le Gouvernement wallon fait référence à :

*Une agriculture qui s'appuie sur les processus et fonctionnalités écologiques pour produire sans compromettre l'aptitude du système à maintenir sa propre capacité de production et qui cherche à utiliser les fonctions des écosystèmes, les processus écologiques, l'information et le savoir pour minimiser les intrants et remplacer les intrants synthétisés chimiquement (Gouvernement wallon, 2014).*

Plusieurs groupes d'agriculteurs wallons ainsi que des organismes de conseil et d'encadrement suivent déjà cette trajectoire. Ils utilisent des pratiques propres à différents types d'agricultures comme notamment l'agriculture biologique, le non-labour et/ou l'agriculture de conservation, le semis direct, etc... tout en s'intéressant à l'innovation (Annexe

2; Triest, 2017). Même certains agriculteurs catégorisés par les scientifiques ou leurs voisins comme faisant de l'agriculture « conventionnelle » adaptent leurs pratiques pour suivre cette trajectoire et le terme d' « agriculture conventionnelle raisonnée » est parfois utilisé pour y faire référence (Antier et al., 2019). Quoi qu'il en soit, il est difficile de catégoriser et de répertorier les différents « types » d'agricultures alternatives afin de présenter un aperçu suffisamment exhaustif des innovations existantes. En effet, tandis que les unes font référence à un mouvement, d'autres concernent plutôt l'utilisation d'une pratique culturale bien définie, et certaines encore traduisent surtout une façon de penser. Par exemple, quand on effectue une classification ascendante hiérarchique pour regrouper les agriculteurs en fonction des pratiques culturales qu'ils utilisent (classification basée sur les dissimilarités des pratiques), des agriculteurs conventionnels peuvent parfois être regroupés dans le même groupe que ceux qui sont en transition<sup>1</sup> ou qui suivent des pratiques culturales simplifiées<sup>2</sup> (Vanhove, 2018). Ceci illustre bien la complexité d'une exploitation et la difficulté de lui attribuer un « type » d'agriculture défini. Un problème de catégorisation similaire est observable également au sein des organismes qui participent à l'innovation en agriculture en Wallonie. L'innovation est multiple car elle peut être sociale, technique, environnementale, etc... Par conséquent, il existe plusieurs organismes qui sont chacun spécialisés dans un domaine particulier. Seulement, les interactions entre ceux-ci sont rares et la nécessité de mieux organiser cette innovation et de faciliter le réseautage se fait ressentir (Debruyn and Triest, 2020).

Les agriculteurs wallons en collaboration avec une série d'intervenants, mettent donc déjà des pratiques alternatives en place. Il est nécessaire maintenant d'étudier les impacts de ces différents systèmes culturels alternatifs à l'aide d'indicateurs pertinents, vis-à-vis des objectifs définis par le Gouvernement wallon, pour identifier des combinaisons de pratiques agricoles susceptibles de faire avancer l'agriculture dans une trajectoire d'agriculture écologiquement intensive. Il est nécessaire également de fournir des outils qui permettent d'organiser et de caractériser les différents mouvements, pratiques ou pensées propres à l'innovation dans le domaine agricole.

---

<sup>1</sup> Transition = transition de conventionnel à TCS (Techniques Culturelles Simplifiées ; Vanhove, 2018).

<sup>2</sup> Pratiques culturales simplifiées fait référence aux TCS : Utilisé pour évoquer les systèmes sans labour ou pour lesquels l'intensité du travail du sol est fort réduite par rapport au système conventionnel (Vanhove, 2018).

---

## 1.2 Caractérisation et comparaison des exploitations en fonction de leur caractère écologiquement intensif

---

Comme le dit Mahmoud Solh, directeur de la FAO Plant Production and Protection Division :

*It is apparent that there is no single management package that will meet the requirements of all farms within a region and, therefore, choices of appropriate practices need to be tailored to local conditions and circumstances (FAO, 2003).*

L'environnement dans lequel on cultive est extrêmement complexe et comprend une série de paramètres qui peuvent varier fortement d'un endroit à l'autre, même pour des champs voisins. C'est pourquoi, caractériser les exploitations simplement en fonction des pratiques principales qu'elles mettent en place ne suffit pas pour comparer leur caractère durable (FAO, 2003).

En effet, il faut une vision plus globale et avec plusieurs critères pour une comparaison objective du caractère écologiquement intensif, et de la durabilité. Il faut prendre en compte les services rendus par la nature et la biodiversité ainsi que la situation financière et sociale du producteur.

### 1.2.1 Une approche agroécologique pour répondre aux objectifs de comparaison

L'agroécologie est née en 1928 dans le domaine scientifique, par l'appropriation de concepts d'écologie à l'agronomie. Une série de recherches comme celles de Bensin (1928), Friederichs (1930), Tischler (1950) et Henin (1967) menées par des zoologistes, agronomes et écologistes ont appliqué des concepts écologiques à l'agronomie et à la protection des plantes. Par la suite, est née la notion d'agroécosystème (Odum, 1969) comme étant un écosystème « domestiqué » intermédiaire entre l'écosystème naturel et artificiel.

L'agroécologie a pris un caractère social après la révolution verte, dans les années 1980- 1990, en soutenant une transition vers des systèmes agricoles plus durables. Miguel Altieri (1995), qui est considéré comme un des pères de l'agroécologie, la définit comme une agriculture qui concilie le respect de l'environnement et la production agricole tout en appliquant des concepts d'écologie, en remplaçant les intrants externes par la gestion de processus naturels comme le maintien de la fertilité des sols et le contrôle biologique. Notons

qu'il s'agit d'un concept qui évolue avec le temps. Ainsi, Francis (2003) la conçoit comme l'étude de l'ensemble du système alimentaire englobant les dimensions écologiques, sociales et économiques.

Aujourd'hui, le terme « agroécologie » a des interprétations visant des domaines différents et qui peuvent varier en fonction des pays (Figure 4) : il peut être vu comme une approche scientifique, un mouvement ou une pratique agricole. L'échelle que l'approche scientifique étudie a également évolué. En effet, l'analyse peut se réaliser au niveau du champ et de la parcelle, au niveau de la ferme et de l'agroécosystème mais aussi au niveau de l'entièreté du système alimentaire (Baret, 2020; Dalgaard et al., 2003; Wezel et al., 2009 ).

Dans le cadre de ce mémoire et de la thèse de Lola Leveau, l'approche agroécologique suivie fait référence à la discipline scientifique qui étudie les caractères environnementaux, sociaux et économiques de différents systèmes cultureux à l'échelle du champ. Dans sa thèse, Lola Leveau met en pratique cette approche en sélectionnant des paramètres pluridisciplinaires - économiques, sociaux et environnementaux - et en ayant recours à une recherche participative avec un réseau d'agriculteurs. L'approche suivie dans ce travail est aussi liée à l'agroécologie en tant que pratique puisque des pratiques culturelles différentes sont étudiées avec l'objectif d'identifier les combinaisons de celles-ci qui suivent la trajectoire d'agriculture écologiquement intensive de la Région wallonne.

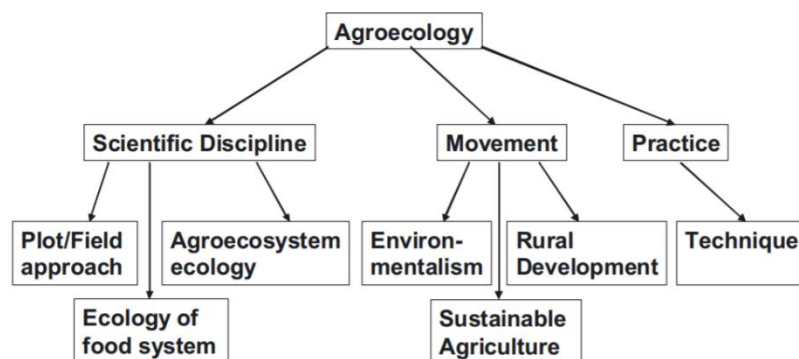


Figure 4 : Diversité des types de signification de l'agroécologie. Source : Wezel et al. (2009).

## 1.2.2 Une approche basée sur les services écosystémiques comme outil de comparaison

Dans le cas d'une recherche scientifique suivant les concepts d'agroécologie, il est nécessaire d'employer des outils adéquats, c'est-à-dire des outils pluridisciplinaires qui permettent d'évaluer l'ensemble des caractéristiques sociales, environnementales et économiques au sein de la parcelle. Ces outils permettent de prendre en compte la complexité d'un cas agricole donné (Boeraeve et al., 2018).

Pour cela, plusieurs chercheurs utilisent l'évaluation de services écosystémiques (MEA, 2005; Cáceres et al., 2015; Dendoncker et al., 2013; Bennett et al., 2015). La définition de service écosystémique sur laquelle ce mémoire se base est celle du Millennium Ecosystem Assessment (MEA) qui est la plus utilisée dans la littérature scientifique :

*Ecosystem services are the benefits people obtain from ecosystems. These include provisioning, regulating, and cultural services that directly affect people and the supporting services needed to maintain other services (MEA, 2005)*

Il existe plusieurs types de services écosystémiques et plusieurs moyens de les regrouper. Le MEA les classe en quatre groupes (MEA, 2005) :

1. **Les services d'approvisionnement** : ils représentent ce qui est produit par l'écosystème. Les services d'approvisionnement regroupent la nourriture, les fibres, l'eau potable, les ressources génétiques, le bois de chauffage et les produits biochimiques.
2. **Les services de régulation** : ils représentent les bénéfices obtenus de la régulation de processus de l'écosystème. Les services de régulation regroupent la régulation du climat, des maladies et de l'eau ainsi que la purification de l'eau et la pollinisation.
3. **Les services culturels** : ils représentent les bénéfices non-matériels obtenus de l'écosystème. Les services culturels regroupent les services spirituels et religieux, éducatifs, de loisirs et pour l'écotourisme, les services esthétiques et inspirants ainsi que l'héritage culturel et le sens du lieu.
4. **Les services de soutien** : ils représentent les services nécessaires pour la production de l'ensemble des autres services écosystémiques. Les services de soutien regroupent la formation du sol, les cycles des nutriments et la production primaire.

D'autres classifications existent également comme celle proposée par le Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) qui regroupe les services écosystémiques parmi les mêmes catégories mais en distinguant également les services biotiques et abiotiques (Haines-Young and Potschin, 2018). Dans l'application de ce concept à la caractérisation d'agroécosystème, Zhang et al. font une distinction entre bons services écosystémiques et mauvais services écosystémiques (« ecosystem dis-service » ; Zhang et al.,

2007). L'INRA propose quant à lui une classification adaptée à l'agriculture, qui répartit les services écosystémiques en trois groupes (Le Roux, 2008):

1. **Les services intrants** : ils représentent les services qui contribuent à la production de ressources et au maintien des supports physico-chimiques de la production agricole. Les services intrants regroupent notamment la stabilité structurale d'un sol, la disponibilité en eau, la fertilité, le microclimat, le contrôle des bio-agresseurs et des invasions, la pollinisation et la protection de la santé des animaux domestiques, etc.
2. **Les services de production contribuant au revenu agricole** : ils représentent les productions végétales et animales ainsi que d'autres produits commerciaux.
3. **Les services produits hors revenu agricole direct** : ils regroupent notamment le contrôle de la qualité des eaux, la régulation du climat, la conservation de la biodiversité, la séquestration du carbone, la valeur esthétique du paysage, etc. La contribution ou la dégradation de ces services peuvent faire l'objet d'une aide ou d'une pénalité financière.

Dans le cas de sa thèse, Lola Leveau a utilisé une classification semblable à celle du MEA qu'elle a mise en parallèle avec celle de l'INRA, plus adaptée à l'agroécosystème, afin de considérer l'ensemble des services écosystémiques d'intérêt. Travailler avec les deux classifications permet d'avoir des informations complémentaires. En effet, celle du MEA informe sur la place du service écosystémique dans le fonctionnement de l'écosystème alors que celle de l'INRA donne une information sur la place du service écosystémique dans le fonctionnement d'une exploitation agricole.

Dans ce mémoire, le service écosystémique qui est étudié en particulier est celui de la stabilité structurale du sol. Celui-ci joue un rôle majeur dans les processus de résistance du sol à la dégradation et est donc un service déterminant pour le maintien de la productivité du sol. Il est répertorié parmi les services écosystémiques de régulation pour la classification du MEA et les services intrants dans celle de l'INRA.

L'évaluation de services écosystémiques permet de quantifier les bienfaits fournis par les agroécosystèmes et permet de voir comment ils sont impactés par les pratiques agricoles et l'environnement. Il est aussi possible d'attribuer une valeur monétaire, sociale ou environnementale aux services écosystémiques (Bartkowski et al., 2020; Cáceres et al., 2015). Depuis 2004-2006, cet outil est de plus en plus utilisé dans la recherche scientifique pour appréhender la complexité des systèmes alimentaires, en particulier dans le domaine agronomique, notamment pour la comparaison de pratiques culturales (Bartkowski et al., 2020; Bengtsson, 2015; Birkhofer et al., 2016; Boeraeve et al., 2018; Nkurunziza et al., 2017; Rodríguez-Ortega et al., 2014; Williams and Hedlund, 2013).

### 1.2.3 Recherche participative à la ferme

La recherche basée à la ferme (« on-farm research ») est un type de recherche où les essais sont réalisés à la ferme sous des conditions réelles et en gardant les objectifs de production d'origine fixés par les agriculteurs (Vrešak et al., 2016).

Les différents degrés d'implication des agriculteurs et des chercheurs dans la recherche participative à la ferme permettent de classer ces essais selon trois catégories (Vrešak et al., 2016):

1. Le plan d'expérience et les mesures sont réalisés par les chercheurs à la ferme.
2. Le plan d'expérience est réalisé par les chercheurs alors que les mesures et la gestion des essais sont gérées par les agriculteurs.
3. Le plan d'expérience et les mesures sont réalisés par les agriculteurs.

Les agriculteurs font des essais en champ par eux-mêmes depuis bien longtemps. Si cette méthode leur confère l'avantage de travailler dans des conditions locales propres à leur situation (Hansson, 2019), la collaboration avec des chercheurs leur permet de valider scientifiquement leur projet. En contrepartie, les agriculteurs offrent un regard expert et pratique aux chercheurs (SARE, 2012; Vrešak et al., 2016).

Une approche similaire, basée sur des conditions réelles en champ et sur la participation des agriculteurs, est utilisée dans la thèse de Lola Leveau. En effet, une concertation avec les agriculteurs a eu lieu en amont du travail de terrain afin de construire les protocoles expérimentaux, et la prise de mesures se fera ensuite en collaboration avec eux.

Ce type de recherche peut être défini comme de la recherche « on-farm » participative puisque l'agriculteur joue un rôle dans le projet et qu'une collaboration entre agriculteurs et chercheurs est mise en avant. La recherche participative basée à la ferme est déjà utilisée pour étudier l'intérêt d'une variété, d'un moyen de lutte ou la comparaison de différentes pratiques culturales (Vrešak et al., 2016). Par exemple, le Nutrient Management Spear Program (NMSP) de l'Université de Cornell aux USA s'intéresse beaucoup à la recherche collaborative « on-farm » en lien avec la gestion des nutriments. Ils ont récemment lancé le New York On-Farm Research Partnership pour faciliter l'échange de données « on-farm ». Ils ont également rédigé une fiche avec sept étapes pour réaliser la recherche « on-farm » d'après leur expertise (NMSP Cornell University, 2020).

Il est important de noter qu'une série de paramètres est à prendre en considération lors d'une recherche basée à la ferme si l'on veut avoir des données analysables scientifiquement. Le plus important est la transférabilité des données pour les autres fermes. Réfléchir au choix des champs, à la localisation des parcelles, à leur taille et à la façon de

récolter les données est donc très important (CIMMYT Economics Program, 1988; Vrešak et al., 2016).

Ainsi, dans leur guide de la recherche « on-farm » participative pour les agriculteurs biologiques, Vrešak et al. (2016) mentionnent six points d'attention pour un bon fonctionnement de la recherche :

1. La représentativité du lieu.
2. La description et le choix des types de fermes étudiées.
3. La prise en compte du matériel disponible dans chaque ferme.
4. La collecte de la documentation sur la ferme (information sur la rotation, les produits phytopharmaceutiques utilisés, ...).
5. La capacité d'innovation, les compétences de communication et l'engagement des agriculteurs.
6. Une attitude respectueuse du chercheur vis-à-vis des agriculteurs.

Finalement, la recherche « on-farm » participative permet de faciliter l'accès aux résultats pour les agriculteurs et rend ces résultats plus applicables puisqu'ils ne sont pas issus de cas très théoriques et contrôlés, comme c'est le cas dans les stations d'essais. D'autre part, ce genre de recherche nécessite des méthodes pratiques et peu onéreuses, abordables pour les agriculteurs (SARE, 2012; Vrešak et al., 2016).

## 1.3 Sélection d'indicateurs et de méthodes de mesures associées pour évaluer des services écosystémiques

### 1.3.1 Définition et classification des indicateurs associés aux services écosystémiques

Dans le cadre de ce mémoire, le service écosystémique étudié est la stabilité structurale du sol. Pour pouvoir évaluer ce service, il est nécessaire de sélectionner des indicateurs pertinents. Un indicateur est une « variable qui fournit de l'information sur d'autres variables difficiles d'accès et qui peut servir de référence pour prendre une décision » (Gras et al., 1989). Le terme indicateur de durabilité peut être utilisé quand une information sur la dimension temporelle y est associée (Wu and Wu, 2012).

Il existe plusieurs classifications d'indicateurs dans la littérature (Lebacqz et al., 2013; Meul et al., 2009; Sauvenier et al., 2005; Valé et al., 2011). Concernant l'étude des services écosystémiques, Boeraeve et al. (2018) proposent une approche basée sur la relation des indicateurs avec les services écosystémiques étudiés. Les indicateurs peuvent fournir de l'information sur l'état de l'écosystème ainsi que sur son fonctionnement. Ils peuvent également informer sur le bénéfice réel de l'écosystème pour l'homme (Tableau 2). Ces derniers indicateurs sont ceux qui sont les plus proches de la réalité tandis que ceux qui font référence à l'état et à la fonction de l'écosystème informent seulement sur la capacité potentielle de celui-ci à fournir un service pour l'homme (Boeraeve et al., 2018).

Tableau 2 : Types d'indicateurs pour évaluer des services écosystémiques. Source : Boeraeve et al. (2018).

| TYPES D'INDICATEURS POUR ÉVALUER DES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES |                                                              |                                                                       |                                                                  |
|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
|                                                              | État de l'écosystème                                         | Fonction de l'écosystème                                              | Bénéfice pour l'homme                                            |
| <b>Description</b>                                           | Informent sur la structure et la composition de l'écosystème | Informent sur les fonctions et les processus basiques de l'écosystème | Informent sur les bénéfices réels de l'écosystème pour l'homme** |
| <b>Information fournie par rapport au SE*</b>                | Capacité potentielle de l'écosystème à fournir un service    |                                                                       | Fourniture réelle du service                                     |
| <b>Exemple appliqué à la stabilité structurale du sol</b>    | Le pourcentage de matière organique, d'argiles               | La stabilité des agrégats lors de l'immersion dans l'eau              | La diminution des dégâts causés par l'érosion                    |

\*SE = Service écosystémique

\*\* Type d'indicateur le plus proche de la réalité

### 1.3.2 Démarche de sélection d'indicateurs et de méthodes de mesures associées pour évaluer des services écosystémiques

En plus de la classification, les critères de sélection d'indicateurs sont très importants dans une évaluation basée sur des indicateurs car ils influencent les conclusions. Lebacqz et al. (2013) définissent trois étapes pour la sélection d'indicateurs :

- 1) **Contextualisation** : étape dans laquelle le but de l'analyse est défini.
- 2) **Comparaison et évaluation des indicateurs avec des critères de sélection** : étape qui a pour but d'évaluer et de comparer les différents indicateurs en fonction de critères de sélection bien définis. L'importance donnée pour chaque critère dépend du contexte et des objectifs de l'étude. Les principaux critères de sélection utilisés dans la littérature sont la pertinence, l'aspect pratique et la valeur ajoutée pour l'utilisateur final. Le Tableau 3 reprend des exemples de critères de sélection qui sont utilisés dans la littérature et leur description.
- 3) **Sélection d'un set d'indicateurs** : étape qui permet de sélectionner l'ensemble d'indicateurs le plus optimal pour l'étude. Le set d'indicateurs doit ainsi être évalué par rapport à son habilité à représenter la complexité du système étudié. Il doit répondre aux exigences de parcimonie, consistance et suffisance :
  - Les indicateurs ne doivent pas être redondants entre eux et ne doivent pas être trop nombreux (parcimonie).
  - Ils doivent permettre une interprétation de la variable à analyser (consistance)
  - Ils doivent être suffisants pour inclure tous les objectifs de l'analyse (suffisance).Les critères pour la sélection d'un set d'indicateurs approprié sont repris dans le Tableau 3 avec leur description.

Dans le tableau 3, la présence d'une valeur de référence fait partie des critères mentionnés qui apportent une valeur pour l'utilisateur final. Ce critère s'insère dans la deuxième étape de la démarche expliquée ci-dessus et est particulièrement important. En effet, l'interprétation des indicateurs nécessite d'avoir un référentiel approprié au contexte de l'étude pour pouvoir comparer les résultats entre eux. Il est aussi nécessaire d'identifier l'état optimum par rapport à un ou plusieurs objectifs donnés afin de pouvoir réaliser un diagnostic de la situation (Balloy et al., 2017; Valé et al., 2011). Peu d'indicateurs ont un référentiel et un état optimum connu et la recherche de telles informations représente un investissement en temps et en argent (Valé et al., 2011).

Concrètement, il existe beaucoup de moyens d'appliquer cette démarche de sélection d'un set d'indicateurs final dans une recherche participative (Elliott et al., 2005). Boeraeve et al. (2018) proposent une méthode divisée en deux grandes étapes. L'approche participative à

proprement parler, dans laquelle un set d'indicateurs et leurs méthodes de mesure sont sélectionnés avec les agriculteurs, et la sélection finale du set d'indicateurs avec leurs méthodes associées, faite en collaboration avec des experts. Cette phase finale vise à analyser chaque indicateur et méthode en fonction des critères de sélection.

*Tableau 3 : Critères pour l'évaluation d'indicateurs durables et pour la sélection d'un set d'indicateurs approprié en lien avec les objectifs de l'analyse. Source : Lebacqz et al. (2013).*

| CRITÈRES DE SÉLECTION |                                     | DESCRIPTION               |                                                                       |
|-----------------------|-------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Critères d'évaluation | Pertinence                          | Contexte et objectifs     | Approprié au contexte et aux objectifs                                |
|                       |                                     | Dimension de l'analyse    | Approprié aux dimensions spatiales et temporelles                     |
|                       |                                     | Validité                  | Soumis à un test de validation                                        |
|                       |                                     | Solidité analytique       | Qualité de la conception et de l'information fournie par l'indicateur |
|                       |                                     | Validation sociale        | Reconnu par les utilisateurs finaux                                   |
|                       | Aspect pratique                     | Mesurabilité              | Méthode de calcul et disponibilité des données                        |
|                       |                                     | Quantification            | Indicateur quantitatif                                                |
|                       |                                     | Compatibilité             | Compatible avec la méthode d'agrégation sélectionnée                  |
|                       |                                     | Transférabilité           | Pertinent pour différents types de fermes                             |
|                       | Valeur pour les utilisateurs finaux | Habilité à résumer        | Capable de simplifier et résumer les processus                        |
|                       |                                     | Compréhensibilité         | Clair, lisible et facile à interpréter                                |
|                       |                                     | Valeurs de référence      | Valeurs de référence disponibles                                      |
|                       |                                     | Pertinence politique      | Lié à des mesures politiques                                          |
|                       |                                     | Dérive                    | Peut être influencé par l'agriculteur                                 |
| Set d'indicateurs     |                                     | Représentation du système | Représentation fiable et compréhensive du système                     |
|                       |                                     | Parcimonie                | Pas de redondance                                                     |
|                       |                                     | Consistance               | Complémentarité pour une interprétation appropriée                    |
|                       |                                     | Suffisance                | Intègre tous les objectifs de durabilité                              |
|                       |                                     |                           |                                                                       |

---

## 1.4 Indicateurs et méthodes de mesure de la stabilité structurale du sol

---

### 1.4.1 Définition de la stabilité structurale du sol

La structure d'un sol est le mode d'assemblage de ses particules et pores. On parle de stabilité structurale d'un sol pour faire référence à la résistance de la structure du sol à des agents de dégradation. Ceux-ci sont principalement mécaniques et hydriques (Jensen et al., 2019; Mazoyer, 2002b).

La dégradation du sol par des agents hydriques - gouttes d'eau, frottement de l'eau de ruissellement sur la surface du sol -, éoliens, mécaniques - travail du sol, passage de machines - ou physiques - gravité - provoque des problèmes d'érosion, de battance, de compaction et d'infiltration. Une bonne stabilité structurale permet au sol de mieux résister à ces différents phénomènes (Jensen et al., 2019; Le Bissonnais, 1995; Sauvenier et al., 2005).

De fait, la stabilité structurale est une propriété fondamentale des sols qui a un impact majeur sur leur comportement. Elle assure une bonne rétention et infiltration de l'eau, régule les échanges gazeux, les cycles des nutriments, la quantité en matière organique, les risques d'érosion, et permet une pénétration des racines optimale. Le mode d'agencement des particules peut également être une source d'habitat pour une série d'organismes du sol. La stabilité structurale du sol contribue donc à leur diversité et à la régulation de leur activité (Rabot et al., 2018).

Plusieurs caractéristiques du sol ainsi que les interactions entre celles-ci influencent la stabilité du sol. La texture, la teneur en matière organique, la minéralogie des argiles, les cations, les oxydes de fer et d'aluminium, et les carbonates sont les plus importantes. Parmi celles-ci, la teneur en matière organique est de loin la plus déterminante dans les sols de grandes cultures en région tempérée (Le Bissonnais, 1995).

La matière organique permet de lier les particules minérales entre elles via la formation du complexe argilo-humique, et rend leurs surfaces hydrophobes, ralentissant ainsi la vitesse d'humectation des agrégats et donc réduisant les risques d'éclatement. D'autre part, la matière organique joue un rôle tampon sur le pH du sol et améliore la rétention en eau (Juriga and Šimanský, 2018; Le Bissonnais, 1995).

La formation et la stabilité des complexes argilo-humiques du sol - liaisons entre des argiles et des polymères organiques par des cations - sont influencées par la quantité de matière organique, le type d'argiles, la présence de cations et favorisées par la faune et la

microflore. Un complexe argilo-humique stable favorise une structure aérée, un stockage hydrique suffisant et ralentit la minéralisation de la matière organique. De plus, il empêche la dispersion (réduction des forces d'attraction des particules) des argiles, réduisant ainsi les risques de colmatage et de compaction du sol (Gobat et al., 2010).

Les cations échangeables  $\text{Ca}^{2+}$  favorisent la floculation des argiles (augmentation des forces d'attraction des particules) et stabilisent la structure du sol alors que les ions  $\text{Na}^+$  rendent les sols sensibles à la dispersion, menant à des sols instables. Les oxydes de fer et d'aluminium augmentent également la cohésion du complexe argilo-humique et réduisent les risques d'éclatement (Gobat et al., 2010; Le Bissonnais, 1995).

## 1.4.2 Evaluation de la stabilité structurale du sol

La stabilité structurale du sol dépend d'une série de paramètres et peut être évaluée de plusieurs manières (Gobat et al., 2010; Le Bissonnais, 1995; Rabot et al., 2018).

Tout d'abord, en caractérisant l'organisation de la phase solide. Cela peut se faire au niveau du champ par des moyens visuels en observant la structure de la couche superficielle ou de l'ensemble du profil du sol. La structure est alors estimée en observant la porosité du sol, la forme et la taille des agrégats. Cela peut aussi se faire au laboratoire, en utilisant des méthodes qui évaluent l'état de compaction du sol à l'aide d'indicateurs comme la densité apparente, le degré de compaction ou la « packing density ». Au laboratoire, la stabilité structurale du sol peut également être déterminée en regardant la distribution de la taille des agrégats et leur stabilité face à différents traitements comme une immersion dans l'eau, une désagrégation mécanique par agitation, etc... (Le Bissonnais, 1995; Rabot et al., 2018).

D'autre part, il est possible d'évaluer la stabilité structurale en caractérisant la phase poreuse du sol. Cela peut se faire par des méthodes indirectes comme la mesure de la porosité au mercure, la mesure d'adsorption des gaz et la courbe de rétention en eau, ou par des méthodes directes utilisant des techniques d'imagerie qui permettent une visualisation géométrique des espaces poreux du sol (Rabot et al., 2018).

Boerema et al. (2017) ont répertorié une série d'indicateurs utilisés pour évaluer des services écosystémiques. Dans les services de régulation, ils ont classé les indicateurs de la stabilité structurale du sol parmi trois types selon qu'ils permettent de mesurer la stabilité des agrégats, l'érodibilité ou les propriétés générales du sol (comme son humidité, sa densité apparente, sa résistance à la pénétration, etc.)

En plus de ces indicateurs, dans la littérature, mesurer le taux d'infiltration de l'eau dans le sol est courant pour étudier les risques d'érosion et de compaction. Le taux d'infiltration de l'eau dans le sol est directement lié aux écoulements de surface et si un sol est compact, son taux d'infiltration d'eau sera réduit. Cet indicateur est aussi souvent utilisé avec les mesures

de porosité pour étudier l'influence du labour sur la production végétale, la structure du sol et l'environnement (Elliott and Efetha, 1999; Franzluebbers, 2002; Lipiec et al., 2006; Meek et al., 1992; Roose, 1999).

### 1.4.3 Méthodes de mesure de l'infiltration de l'eau dans le sol

L'infiltration est le volume d'eau traversant une unité de surface par unité de temps à l'interface sol-atmosphère (Vanclooster and Biielders, 2018). Elle est une caractéristique importante du sol qui influence la lixiviation, le lessivage et les disponibilités en eau pour la culture (Franzluebbers, 2002). Elle est influencée par le type de sol (ex. teneur en argile), la structure du sol (ex. teneur en matière organique, porosité, etc.), la méthode de mesure utilisée et la présence de couvert végétal (Lozano-Baez et al., 2019).

La mesure d'infiltration en champ peut se faire de différentes manières. Elle peut se faire simplement par des observations visuelles (présence de flaques d'eau stagnantes). De nombreuses méthodes évaluent l'infiltration à l'aide d'anneaux cylindriques que l'on enfonce dans le sol et dans lesquels on mesure la vitesse d'infiltration d'un volume connu d'eau (méthode Muntz, Porchet, Vergière, etc...). Certaines, mesurent l'infiltration avec une charge constante d'eau (perméamètre à charge constante), d'autres avec une charge variable d'eau (perméamètre à charge variable). Aussi, il est possible d'utiliser un anneau (méthode simple anneau) ou deux anneaux (méthode double anneau). Enfin, certains utilisent des simulateurs de pluies (Asseline, 1997; Roose and Smolikowski, 1997). Les méthodes de mesures les plus retrouvées dans la littérature pour mesurer l'infiltration dans un champ sont l'infiltromètre double anneau, l'infiltromètre simple anneau, le perméamètre à disque et l'infiltromètre minidisque (Elliott and Efetha, 1999; Franzluebbers, 2002; Lipiec et al., 2006; Lozano-Baez et al., 2019; Meek et al., 1992; Roose and Smolikowski, 1997).

L'infiltration étant variable dans l'espace et le temps (Vanclooster and Biielders, 2018), dans la plupart des cas, on mesure la conductivité hydraulique à saturation (m/s), c'est-à-dire, le taux d'infiltration limite du sol si le sol est saturé en eau et homogène (Musy, 2005).

Les différents indicateurs et méthodes de mesure de l'infiltration de l'eau dans le sol discutés dans ce paragraphe sont repris dans le Tableau 4. Ajouté à cela, le type d'indicateur selon la classification de Boerema et al. (2017) a été spécifié.

Tableau 4 : Indicateurs et méthodes de mesure de l'infiltration de l'eau dans le sol.

| Classe d'indicateurs        | Indicateur                                | Type d'indicateur | Exemple de méthodes de mesure                                                      |
|-----------------------------|-------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Propriétés physiques du sol | Caractéristiques physico-chimiques du sol | Etat              | Texture, teneur en matière organique, type et teneur en argile, etc.               |
| Indicateurs visuels         | Observation d'eau stagnante               | Bénéfice          | Observation de la quantité de flaques d'eau stagnante.                             |
| Indicateurs de terrain      | Conductivité hydraulique à saturation     | Fonction          | Infiltromètre simple et double anneau, simulateurs de pluies, essais Porchet, etc. |

#### 1.4.4 Méthodes de mesure de la résistance à la compaction du sol

La compaction est un phénomène de détérioration de la structure des sols par pression mécanique, par vibration ou percussion, qui augmente la densité sèche du sol, en réduisant la macroporosité (Larousse, 2020; Service Public Wallon, 2017). Ce phénomène peut avoir lieu en surface - inférieur à 30cm de profondeur - ou en profondeur - supérieur à 30cm de profondeur - (Destain, 2013).

Le risque de compaction pour un sol agricole dépend des propriétés intrinsèques du sol (texture, teneur en matière organique, structure, teneur en eau) et des forces appliquées dues au passage de véhicules motorisés. Les caractéristiques de ces véhicules (taille des pneus, vitesse, poids de l'engin, etc...) peuvent influencer l'intensité du phénomène. Ainsi, les pratiques agricoles sont déterminantes car elles influencent les caractéristiques du sol et des machines utilisées (Figure 5; Destain, 2013).

Concernant les propriétés du sol, une texture fine (argile) est plus sensible à la compaction qu'une texture plus grossière (sable). La teneur en eau, elle, augmente la sensibilité du sol à la compaction. En Belgique, les périodes avec les risques de compaction les plus élevés sont entre le début du mois d'octobre et la fin du mois de mars, quand l'évapotranspiration est quasi nulle et que les sols sont gorgés d'eau. Enfin, une meilleure structure et une teneur en matière organique élevée améliorent la résistance à la compaction (Destain, 2013).

Sur le terrain, une observation visuelle peut se faire via la recherche de présence de racines<sup>3</sup>, la caractérisation de la porosité du sol et d'une série de paramètres sur une couche de sol récoltée à la bêche ou sur un profil cultural (~1,5m de profondeur). Ces évaluations sont de plus en plus référencées dans la littérature internationale et ont été employées pour comparer des systèmes agricoles utilisant des pratiques culturales différentes. Par exemple, le test VESS mis au point par Guimarães et al. (2011) et inspiré de Ball et al. (2007) est un test visuel qui permet d'évaluer la structure du sol (pas seulement la compaction) et qui a été testé dans plusieurs pays dont la Belgique. D'autre part, la FAO a développé un test pour donner une idée de la densité apparente du sol en fonction de l'observation faite sur le terrain lors de l'insertion d'un couteau dans le sol (Annexe 3; Ball and Munkholm, 2015; Ball et al., 2007; FAO, 2006; Franco et al., 2019; Guimarães et al., 2011; Pulido Moncada et al., 2014; Shepherd et al., 2000).

La manière la plus utilisée dans la littérature scientifique pour évaluer l'état de compaction d'un sol est le calcul de sa densité apparente. La densité apparente est le rapport de la masse sèche dans un volume donné de sol (Destain, 2013). Il existe plusieurs méthodes directes pour mesurer la densité apparente. La plus simple consiste à récolter un volume connu de sol et à peser la masse séchée. Une autre méthode très proche consiste à peser la masse du sol récolté et à remplir le trou réalisé lors de la récolte avec du sable ou un liquide de densité connue afin de déterminer quel était le volume de l'échantillon récolté. Enfin, il est possible de déterminer la densité apparente d'un échantillon en l'enduisant de résine et en le plongeant dans différents liquides de gravités spécifiques connues. Les liquides entre lesquels l'échantillon flotte et coule donnent une idée des valeurs de la densité apparente de l'échantillon. Il existe également des méthodes de mesures indirectes mais souvent plus onéreuses en utilisant des jauges radioactives, des rayons gamma ou des rayons X (Al-Shammary et al., 2018; Campbell, 1994; Hamza and Anderson, 2005; Hemmat and Adamchuk, 2008). Finalement, certains chercheurs étudient le degré de compaction (« degree of compactness ») ou densité apparente relative, comme étant le pourcentage d'une densité apparente de référence (obtenue de façon standardisée par des tests de compression). Cette transformation permet de généraliser l'information relative à la porosité à l'ensemble des sols alors que la densité apparente optimale pour la croissance d'une culture varie d'un sol à l'autre (Håkansson and Lipiec, 2000).

Un autre indicateur fortement utilisé pour mesurer la résistance du sol à la compaction est la mesure de sa résistance mécanique. Elle peut être évaluée en calculant la contrainte de préconsolidation par des essais de chargement unidirectionnels ou essais œdométriques. Cette contrainte représente la limite entre l'état élastique et plastique du sol. Son

---

<sup>3</sup> Dans un sol compact, le développement et la distribution des racines est altéré suite à une réduction du prélèvement d'eau et de nutriments par la plante (Unger and Kaspar, 1994). Ainsi, l'absence ou présence de racines peut être utilisé pour évaluer l'état de compaction du sol (Ball and Munkholm, 2015).

dépassement est donc indicateur d'une compaction du sol. Les essais œdométriques se font en laboratoire et sont assez coûteux en raison de la durée de la mesure. Sur le terrain, la résistance mécanique peut être évaluée à l'aide d'un pénétromètre. Composé d'une tige métallique et d'une tête conique munie d'un manomètre (jauge à pression), le pénétromètre peut mesurer la pression nécessaire à exercer pour pénétrer dans le sol en fonction de la profondeur. Il existe des pénétromètres manuels et électriques. Parmi les manuels, certains sont uniquement qualitatifs et requièrent que l'expérimentateur sente lui-même à quel moment il rencontre une résistance plus élevée lors de l'opération (Destain, 2013; Hamza and Anderson, 2005; Hemmat and Adamchuk, 2008; Patel, 2019).

Les différents indicateurs et méthodes de mesure de l'état de compaction, ou la résistance à la compaction du sol, discutés dans ce paragraphe sont repris dans le Tableau 5. Ajouté à cela, le type d'indicateur selon la classification de Boerema et al. (2017) a été spécifié.

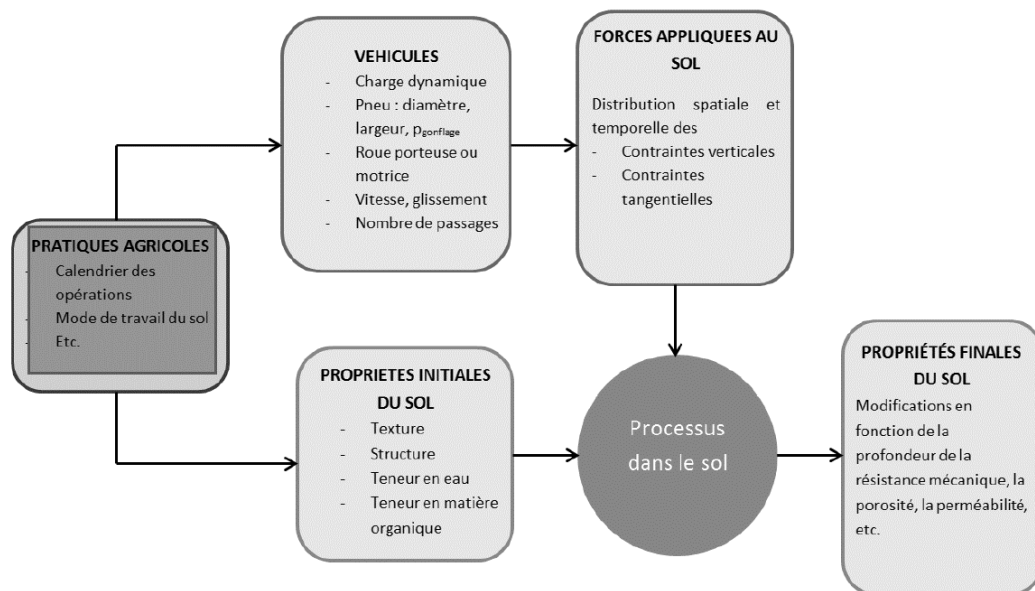


Figure 5: Relations entre les propriétés finales du sol, les propriétés initiales et les forces appliquées dans un processus de compaction du sol. Source : Destain (2013).

Tableau 5 : Indicateurs et méthodes de mesure de l'état de compaction, ou de la résistance à la compaction du sol.

| Classe d'indicateurs        | Indicateur                                                                                       | Type d'indicateur | Exemple de méthodes de mesure                                                              |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Propriétés physiques du sol | Caractéristiques physico-chimiques du sol                                                        | Etat              | Texture, teneur en matière organique, type et teneur en argile, humidité, etc.             |
| Indicateurs visuels         | Observation de la structure du sol (porosité, présence de racines, taille et forme des agrégats) | Etat              | VESS, profil cultural, etc.                                                                |
| Indicateurs de terrain      | Résistance du sol à la pénétration                                                               | Fonction          | Pénétrométrie, test du couteau (FAO), etc.                                                 |
| Indicateurs en laboratoire  | Porosité, densité apparente et dérivés                                                           | Etat              | Méthodes de mesures directes ou indirectes de densité apparente, degré de compaction, etc. |
|                             | Tassement observé après un chargement uniaxial                                                   | Fonction          | Contrainte de préconsolidation                                                             |

### 1.4.5 Méthodes de mesure de l'érosion et de la stabilité des agrégats

L'érosion est définie comme étant l'entraînement de particules de sol par un vecteur (Gillijns et al., 2005). C'est un processus d'altération de la surface du sol et de modification du relief. Plusieurs types d'érosion sont répertoriés en fonction du vecteur responsable du déplacement des particules. Ainsi l'érosion peut être hydrique (sous l'effet de l'eau), éolienne (liée au vent), aratoire (provoquée par les outils de travail du sol), glaciaire (causée par le mouvement de glaciers), résulter d'un glissement de terrain (gravité) ou de l'arrachage de certaines cultures. Les types d'érosion observés en Wallonie sur les sols cultivés sont surtout l'érosion hydrique, aratoire, celle causée par l'arrachage de certaines cultures et dans une moindre mesure les glissements de terrains (Dautrebande et al., 2006).

L'érosion par arrachage de certaines cultures représente parfois une perte considérable de sol. Elle dépend du type de plante (les effets les plus dévastateurs concernent surtout les plantes à tubercules ou à racines comme la betterave, la pomme de terre et la chicorée), du taux d'humidité du sol au moment de la récolte, de la texture du sol et de la méthode d'arrachage. On peut mesurer la perte de terre lors de l'arrachage en nettoyant les racines arrachées et en récupérant le sol. Il suffit alors de le sécher et de le peser pour quantifier (Gillijns et al., 2005).

L'érosion hydrique est la plus importante sur les sols cultivés. Elle est causée principalement par l'impact des gouttes de pluie sur le sol et par le frottement provoqué entre

l'eau et la surface du sol lors du ruissellement. Elle dépend surtout des précipitations, des caractéristiques du sol, de la topographie, du type de couvert végétal présent, du type de travail du sol et de machines agricoles utilisées (Dautrebande et al., 2006; Gillijns et al., 2005; Grønsten and Børresen, 2009).

L'érosion hydrique est un processus directement lié à la stabilité des agrégats et aux mécanismes de désagrégation par l'eau (Bissonnais, 1995; Grønsten and Børresen, 2009). La désagrégation par l'eau résulte de différents mécanismes physiques et physico-chimiques : l'éclatement, la désagrégation mécanique sous l'impact des gouttes de pluie, la désagrégation par gonflement différentiel et la dispersion physico-chimique (Tableau 6). L'éclatement se produit lorsque des agrégats secs sont immergés dans de l'eau ou rapidement réhumectés. La désagrégation mécanique sous l'impact des gouttes de pluie se passe lorsque l'énergie cinétique des gouttes n'est plus absorbée et se transforme en force de cisaillement. La désagrégation par gonflement fait référence à une microfissuration des agrégats des sols argileux lors des cycles d'humectation-dessiccation des argiles. Les conséquences de ces microfissurations sont moins importantes que celles des autres phénomènes. Finalement, la dispersion physico-chimique est la réduction des attractions des particules colloïdales lors de l'humectation. Ce dernier mécanisme est important car il influence aussi l'intensité des autres mécanismes de désagrégation par l'eau (Le Bissonnais, 1995).

La stabilité des agrégats dépend de caractéristiques primaires comme la présence d'électrolytes (influence importante des cations  $\text{Na}^+$  et  $\text{Ca}^{2+}$ ), la minéralogie des argiles, la présence de  $\text{CaCO}_3$  et la teneur en matière organique et en oxydes de fer et d'aluminium. Elle dépend également de facteurs externes comme le climat, les facteurs biologiques et les pratiques agricoles (Amézketa, 1999).

Il existe un grand nombre de méthodes pour mesurer l'érosion hydrique que ce soit en la mesurant directement, en étudiant la stabilité des agrégats ou en faisant des prédictions. Tout d'abord, l'érosion hydrique peut être observée en champs par la présence de ravines plus ou moins profondes et larges ou de rigoles aux endroits où l'érosion est concentrée (Dautrebande et al., 2006). Comme pour la compaction, il est possible d'évaluer la sensibilité du sol à l'érosion par des observations visuelles de sa structure (Franco et al., 2019). Ensuite, il est possible de quantifier directement l'érosion au niveau du champ à l'aide de différentes méthodes. Certaines calculent le taux d'érosion en mesurant le volume des rigoles et en le convertissant en masse à l'aide de la densité apparente du sol ou de photographies aériennes. D'autres mesurent un changement d'élévation de la surface à l'aide d'« érosion pins » (une épingle graduée que l'on plante dans le sol et qui permet de voir de combien la hauteur de la surface du sol a diminué à cause de l'érosion). Il est aussi possible de calculer le débit de l'eau qui ruisselle et sa teneur en sédiment ou de peser la quantité de terre récoltée dans un réceptacle en aval d'une parcelle d'essai. Ces méthodes demandent beaucoup de temps et parfois des simulateurs de pluie sont utilisés pour accélérer l'analyse lorsque l'on veut

comparer l'érosion entre différents sols. Finalement, il existe des méthodes indirectes, plus innovantes mais souvent plus coûteuses en étudiant la susceptibilité magnétique, les flux de Césium 137 ou en utilisant des scanners 3D (Gillijns et al., 2005; Grønsten and Børresen, 2009; Liu et al., 2019; Stroosnijder, 2005).

Les méthodes de mesure de la stabilité des agrégats permettent aussi de donner une idée de la sensibilité du sol à l'érosion hydrique et sont fortement utilisées dans la littérature (Amézketa, 1999; Le Bissonnais, 1995). Elles sont nombreuses également. Ceci est dû au fait qu'il existe plusieurs mécanismes de désagrégation (Tableau 6), plusieurs échelles auxquelles la stabilité peut être étudiée (microagrégats, macroagrégats, particules élémentaires) et donc plusieurs approches pour étudier le phénomène (Amézketa, 1999). Les méthodes de mesure varient en fonction du prétraitement de l'échantillon, de la taille des agrégats étudiés, de la durée et du type de stress appliqué, etc... En laboratoire, deux types de méthodes sont utilisés : celles qui appliquent l'énergie cinétique de précipitations simulées sur les agrégats du sol et celles qui imitent l'effet de l'eau courante par différentes techniques de tamisage humide. La comparaison entre les résultats des différentes méthodes n'est pas toujours faisable et c'est pourquoi une norme ISO (ISO 10930:2012 Mai 2012) propose un protocole standard dans lequel le diamètre moyen pondéré (MWD) est utilisé pour comparer les résultats (Amézketa, 1999; Bissonnais, 1995; Grønsten and Børresen, 2009; ISO, 2012). Finalement, bien que très peu étudiée dans la littérature, la mesure de la turbidité de l'eau peut être un indicateur prometteur de la stabilité des agrégats. Cette mesure est très simple à réaliser à l'aide d'un disque de Secchi, d'un cylindre et d'eau (Chabert and Sarthou, 2017).

Etant donné le lien important entre la stabilité des agrégats et l'érosion des sols, les méthodes de mesure d'érosion et de stabilité des agrégats ont été regroupées dans le cadre de ce mémoire. Les différents indicateurs et méthodes de mesure de l'érosion du sol, discutés dans ce paragraphe sont repris dans le Tableau 7. Ajouté à cela, le type d'indicateur selon la classification de Boerema et al. (2017) a été spécifié.

*Tableau 6: Principales caractéristiques des différents mécanismes de désagrégation par l'eau. Source : Le Bissonnais (1995).*

| Mécanisme                     | Éclatement                                            | Désagrégation mécanique sous l'impact des gouttes de pluie | Désagrégation par gonflement différentiel                | Dispersion physico-chimique                            |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Nature des forces en jeu      | Pression interne de l'air piégé lors de l'humectation | Impact des gouttes de pluie                                | Pression interne par gonflement différentiel de l'argile | Réduction des forces d'attraction entre les particules |
| Intensité de la désagrégation | Totale                                                | Cumulative                                                 | Partielle                                                | Totale                                                 |
| Propriétés du sol en jeu      | Porosité, mouillabilité, cohésion interne             | Cohésion humide (argile, matière organique, oxydes)        | Gonflement potentiel, cohésion, conditions d'humectation | Statut ionique, minéralogie de l'argile                |
| Particules résultantes        | Petits microagrégats (<500µm)                         | Particules élémentaires et microagrégats                   | Macro et microagrégats                                   | Particules élémentaires                                |

Tableau 7 : Indicateurs et méthodes de mesure de l'érosion hydrique du sol.

| Classe d'indicateurs                     | Indicateur                                                                                       | Type d'indicateur | Exemple de méthodes de mesure                                        |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Propriétés physiques du sol              | Caractéristiques physico-chimiques du sol                                                        | Etat              | Texture, teneur en matière organique, type et teneur en argile, etc. |
| Indicateurs visuels                      | Observation de la structure du sol (porosité, présence de racines, taille et forme des agrégats) | Etat              | VESS, profil cultural, etc.                                          |
|                                          | Présence de ravines et rigoles                                                                   | Bénéfice          | Observation de la quantité et de la grandeur des ravines et rigoles  |
| Indicateurs de terrain                   | Quantité de sol érodé                                                                            | Bénéfice          | Réceptacle à sédiments, calcul du volume des rigoles, etc.           |
|                                          | Changement de profondeur de la surface du sol                                                    | Bénéfice          | Epingles d'érosion (erosion pins)                                    |
| Indicateurs de la stabilité des agrégats | Distribution de la taille des particules après soumission à divers traitements à l'eau           | Fonction          | Méthode de Bissonnais, etc.                                          |
|                                          | Turbidité de l'eau en contact avec le sol                                                        | Fonction          | Mesure de turbidité avec disque de Secchi                            |

---

## 1.5 Objectifs du mémoire

---

L'agriculture telle qu'elle a été pratiquée au XX<sup>ème</sup> siècle a eu des effets négatifs sur l'environnement partout dans le monde. Dans ce mémoire, une importance a été donnée aux conséquences relatives à la dégradation des sols dans les régions sablo-limoneuses et limoneuses de Belgique. En particulier, les problèmes de diminution de matière organique, d'érosion et de compaction ont été mis en exergue. Face à ces conséquences environnementales, la Région wallonne promeut une agriculture écologiquement intensive, plus durable. C'est-à-dire une agriculture qui s'approprie les processus écologiques pour produire sans compromettre l'aptitude du système à maintenir sa propre capacité de production. Ce concept est déjà mis en pratique de plusieurs manières chez certains agriculteurs innovants. Cependant le besoin de pouvoir caractériser et comparer entre elles les différentes pratiques de manière scientifique par rapport aux objectifs d'agriculture écologiquement intensive se fait ressentir. Pour ce faire, une manière pertinente d'étudier ces systèmes agricoles est une approche agroécologique multidisciplinaire et collaborative étudiant les dimensions écologiques, économiques et sociales, en réseau de fermes. C'est l'approche menée dans la thèse de Lola Leveau. Ce mémoire prend place dans la dimension écologique de sa thèse. Cette dimension est étudiée en évaluant l'impact des pratiques culturales sur la fourniture de services écosystémiques. L'objectif général de ce mémoire est de trouver un set d'indicateurs et de méthodes de mesure qui permet d'évaluer l'impact de différentes pratiques culturales sur la fourniture du service écosystémique de la stabilité structurale du sol. Ces outils pourront ainsi être utilisés en réseau de fermes par Lola Leveau pour évaluer la capacité de chaque exploitation à fournir ce service écosystémique.

Les objectifs spécifiques de ce mémoire sont les suivants :

- (1) **Sélectionner un set d'indicateurs et de méthodes via une approche participative pour évaluer la stabilité structurale du sol.** L'approche participative consiste à utiliser l'information d'entretiens avec des agriculteurs et des experts en plus des ressources de la littérature.
- (2) **Développer des méthodes « maison » inspirées d'observations qualitatives des agriculteurs en champ.** L'objectif est surtout de voir si les observations visuelles peuvent facilement être rendues plus rigoureuses à partir d'un test rapide et peu coûteux.
- (3) **Comparer en champ la précision des méthodes « pratiques » et « maison » avec des méthodes « reconnues » dans le but de sélectionner un set de méthodes « pratiques » finales utilisables dans la thèse de Lola Leveau.** Le terme « méthode pratique » fait référence à des méthodes qui peuvent facilement être

utilisées par un agriculteur ou par un chercheur travaillant avec un réseau de fermes. C'est-à-dire des méthodes simples, peu coûteuses, rapides ainsi que compréhensibles et intéressantes pour les agriculteurs. Les méthodes « reconnues » sont celles qui sont proposées dans la littérature scientifique et réalisées couramment par des laboratoires agréés ou des chercheurs. Une méthode reconnue peut parfois être pratique.

## 2 MATERIEL ET METHODES

---

## 2.1 Constitution d'un réseau de fermes

---

Des agriculteurs ont été concertés afin de sélectionner les indicateurs et les méthodes de mesures correspondantes qui concernent le service écosystémique de la stabilité structurale du sol. Le réseau d'agriculteurs a été constitué au préalable par Lola Leveau durant l'été 2019 dans la cadre de sa thèse. La constitution de ce réseau a été réalisé via les trois actions suivantes :

1. **Collecte de contacts via des réseaux existants**, auprès d'associations agricoles actives dans la région de l'étude : Regenacterre, Greenotec, la Fugea.
2. **Annonce sur Facebook** concernant la recherche de participants pour la thèse.
3. **Echantillonnage « boule de neige »** via la demande de contacts aux agriculteurs déjà inclus dans le réseau.

Les critères de sélection utilisés pour l'ajout d'un participant au réseau étaient les suivants :

- Caractéristiques de la ferme :
  - Grandes cultures ou mixte
  - Située dans la région agricole limoneuse ou sablo-limoneuse, et à maximum 30 minutes en voiture de Louvain-la-Neuve
  - Tous systèmes / modèles cultureux bienvenus
- Position de l'agriculteur par rapport à l'étude :
  - Prêt à laisser l'accès à ses champs pour les analyses de terrain
  - Prêt à fournir les informations concernant ses pratiques dans les champs étudiés

L'objectif était de constituer un réseau incluant une diversité de profils d'agriculteurs brabançons en ce qui concerne les pratiques de grandes cultures. Ceci dans le but de collecter des avis diversifiés – au cas où ceux-ci varieraient en fonction des pratiques – et d'en tenir compte dans la sélection des indicateurs.

Entre juin et octobre 2019, un réseau de 19 agriculteurs a été constitué. Parmi ceux-ci, trois agriculteurs ont des parcelles labélisées en agriculture biologique, deux sont en culture mixte avec bovins et ovins et deux en culture mixte uniquement avec bovins. Deux agriculteurs ont aussi un élevage de volaille. Tous les agriculteurs sauf un sont en système de non-labour. La taille des fermes varie entre 45 et 400 hectares.

Des 19 agriculteurs, 10 ont participé à une réunion collective sur les indicateurs de services écosystémiques et tous ont participé à une enquête individuelle concernant ce même sujet.

---

## 2.2 Démarches pour la sélection d'indicateurs et de méthodes de mesure

---

Il existe un grand nombre de méthodes participatives pour définir un set d'indicateur en collaboration avec un groupe de participants (Elliott et al., 2005). L'approche choisie dans ce mémoire et dans la thèse de Lola Leveau est inspirée de celle de Boeraeve et al. (2018) en ce qui concerne l'inclusion de deux volets : d'une part les interviews d'agriculteurs et d'autre part la consultation d'experts. Elle s'inspire également de la méthode décrite par Lebacq et al. (2013) concernant l'utilisation de critères liés à la valeur des indicateurs pour la sélection des indicateurs.

Avant toute chose, Lola Leveau a effectué une revue de la littérature concernant les services écosystémiques et indicateurs afin de sélectionner les plus pertinents pour les objectifs de la recherche. Les services écosystémiques identifiés ont été inspirés de la classification utilisée par le MEA (2005) ainsi que de celle développée par l'INRA qui est appliquée à l'agroécosystème (Le Roux, 2008). Le Tableau 8 reprend les dix services écosystémiques qui ont été identifiés pour la dimension écologique de la thèse de Lola Leveau.

*Tableau 8: Services écosystémiques sélectionnés à partir de la littérature. Sources : Haines-Young and Potschin (2018), MEA (2005) et Le Roux (2008).*

| Service écosystémique                               | Classification MEA (2005) | Classification INRA (Le Roux, 2008)       |
|-----------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|
| 1. Fertilité du sol                                 | Régulation                | Intrant                                   |
| 2. Disponibilité en eau pour la production primaire | Régulation                | Intrant et produit hors revenu agricole   |
| 3. Stabilité structurale du sol                     | Régulation                | Intrant                                   |
| 4. Purification de l'eau                            | Régulation                | Produit hors revenu agricole direct       |
| 5. Régulation du micro-climat                       | Régulation                | Produit hors revenu agricole direct       |
| 6. Régulation du climat global                      | Régulation                | Produit hors revenu agricole direct       |
| 7. Pollinisation                                    | Régulation                | Intrant                                   |
| 8. Contrôle naturel des ennemis des cultures        | Régulation                | Intrant                                   |
| 9. Productions végétales                            | Approvisionnement         | Production contribuant au revenu agricole |
| 10. Conservation de la diversité                    | Régulation                | Produit hors revenu agricole direct       |

Pour chaque service écosystémique choisi, Lola Leveau a ensuite identifié, parmi l'ensemble des indicateurs répertoriés par Boerema et al. (2017) dans une review sur les méthodes d'évaluation des services écosystémiques, ceux qui étaient potentiellement utilisables dans le cadre de sa thèse. Cette sélection s'est basée sur deux critères :

l'applicabilité de l'indicateur à l'écosystème « parcelle agricole » et le fait que l'indicateur soit lié à une mesure de terrain plutôt qu'à l'application d'une pratique par l'agriculteur ou à une modélisation. Le Tableau 9 reprend les neuf indicateurs sélectionnés dans la littérature pour l'évaluation de la stabilité structurale du sol, le service écosystémique étudié dans ce mémoire.

*Tableau 9 : Indicateurs de la stabilité structurale du sol sélectionnés dans la littérature. Source : Boerema et al. (2017).*

| <b>Indicateurs de la stabilité structurale du sol</b> | <b>Type d'indicateurs</b> |
|-------------------------------------------------------|---------------------------|
| 1. Analyse de la densité apparente en laboratoire     | Etat                      |
| 2. Structure visuelle du sol en champ                 | Etat                      |
| 3. Porosité verticale du sol                          | Etat                      |
| 4. Résistance à la compaction du sol                  | Fonction                  |
| 5. Stabilité des agrégats à l'eau                     | Fonction                  |
| 6. Capacité d'infiltration de l'eau dans le sol       | Fonction                  |
| 7. Tare de terre des cultures à racines               | Bénéfice                  |
| 8. Quantité de sol érodé                              | Bénéfice                  |
| 9. Perception visuelle de l'érosion                   | Bénéfice                  |
| 10. Perception visuelle de la battance                | Bénéfice                  |

La démarche auprès des agriculteurs s'est organisée en deux temps. D'abord, une première réunion a eu pour but de familiariser les participants avec le sujet de la thèse et du mémoire. Lors de cette réunion, les notions de services écosystémiques et d'indicateurs ont été clarifiées. Il était initialement prévu d'organiser à ce moment une collecte de l'avis de chaque participant concernant les indicateurs, au moyen d'une grille de notation individuelle. Cependant, il a été décidé avec les participants présents que des entretiens individuels seraient plus simples afin de récolter toutes les informations nécessaires. De plus, cela permet de s'imprégner de la situation de chaque agriculteur et de s'assurer qu'il ait compris l'ensemble des questions.

La deuxième phase consistait à se rendre chez les différents participants dans le but d'évaluer les indicateurs identifiés dans la littérature selon trois critères : la compréhensibilité de l'indicateur, la capacité qu'a l'agriculteur à modifier le résultat de l'indicateur par ses pratiques culturales et la pertinence de cet indicateur pour l'agriculteur afin de démontrer le bien-fondé de son système cultural (Tableau 10). Un quatrième critère prenant en compte le type d'indicateur (état, fonction de l'écosystème et bénéfice) a également été considéré lors de la sélection finale des indicateurs à retenir pour l'étude. Durant cet entretien, il était aussi demandé aux agriculteurs de nous partager les observations, souvent qualitatives, qui leur permettent d'évaluer les services écosystémiques présentés sur le terrain. Ceci dans le but de mettre au point des méthodes de mesures maisons.

Tableau 10: Critères de sélection utilisés pour la pondération des indicateurs.

| Critère de sélection | Lien avec le service écosystémique                                | Compréhensible                                             | Résultat modifiable par les pratiques culturales                                          | Intérêt pour l'agriculteur                                                              |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Description</b>   | Quel est le lien entre l'indicateur et le service écosystémique ? | L'indicateur est-il compréhensible pour les agriculteurs ? | L'agriculteur peut-il influencer la valeur de l'indicateur par ses pratiques culturales ? | L'indicateur intéresse-t-il l'agriculteur pour montrer le bien-fondé de ses pratiques ? |
| <b>Valeurs</b>       | 1 – 2 – 3<br>1 = Etat<br>2 = Processus/fonction<br>3 = Bénéfice   | oui – non                                                  | 1 – 2 – 3<br>1 = pas modifiable<br>2 = peu modifiable<br>3 = modifiable                   | 1 – 0<br>1 = indicateur clé<br>0 = indicateur pas intéressant                           |

La sélection d'indicateurs s'est principalement basée sur la pondération des critères réalisée à partir des entretiens d'agriculteurs. Cependant, un autre volet tout aussi important a permis d'aider à les évaluer et surtout à se renseigner sur les méthodes de mesures qui leurs étaient associées. Ce volet concerne les interviews auprès des experts. Les experts consultés pour les mesures de stabilité structurale du sol étaient : Charles Biolders (Professeur à l'UCLouvain), Pierre Bertin (Professeur à l'UCLouvain), Bruno Delvaux (Professeur à l'UCLouvain), Frédéric Vanwindekens (Docteur en agronomie travaillant au CRA-W), Sébastien François (responsable technique du laboratoire de Génie Rural à l'UCLouvain) et Aubry Vandeuken (Doctorant en sciences du sol à l'UCLouvain). Les questions posées lors des interviews concernaient la pertinence des indicateurs présélectionnés dans la littérature et les caractéristiques des méthodes de mesures s'y rapportant. Ces enquêtes ont notamment permis de récolter des informations sur le coût, la possibilité de sous-traitance, le temps, le lieu, la qualité et la pertinence des méthodes de mesures liées aux différents indicateurs (Annexe 4).

Après avoir sélectionné le set d'indicateurs, les méthodes de mesure pour les évaluer ont été identifiées à partir de la littérature et des entretiens avec les experts et les agriculteurs. Les trois indicateurs sélectionnés dans le cas de la stabilité structurale du sol, étaient la résistance à la compaction du sol, la stabilité des agrégats et la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol. Le but de ce mémoire est de comparer la rigueur de méthodes « pratiques » avec celle de méthodes reconnues dans le monde scientifique afin d'identifier des méthodes qui pourront être utilisées dans le cas d'une recherche agroécologique collaborative impliquant un réseau de fermes. Le terme « méthodes pratiques » fait donc référence ici à des méthodes simples, peu coûteuses, rapides ainsi que compréhensibles et intéressantes pour les agriculteurs. Ainsi, une présélection sur base de ces critères a permis d'identifier des méthodes d'intérêt à étudier dans ce mémoire. Celles-ci sont reprises dans le Tableau 11 et

seront détaillées dans la partie 2.6. Dans ce mémoire leur rigueur sera testée et les méthodes seront comparées entre-elle pour permettre de les évaluer plus précisément. Une comparaison finale se fera alors en les confrontant à onze critères, inspirés de la thèse de Theresa Lebacqz (Lebacqz et al., 2013), basés sur leur représentabilité, leur rigueur et leur facilité logistique (Annexe 5). Ceci dans le but de choisir lesquelles seront les plus pertinentes pour la thèse de Lola Leveau. La Figure 6 reprend le cheminement de l'approche de recherche et de sélection d'indicateurs et de méthodes de mesure à partir de la présélection dans la littérature jusqu'au set final qui sera utilisé dans la thèse. Cette figure montre aussi qu'un retour sur les indicateurs sélectionnés a été fait auprès des agriculteurs via un e-mail puis lors d'une réunion collective.

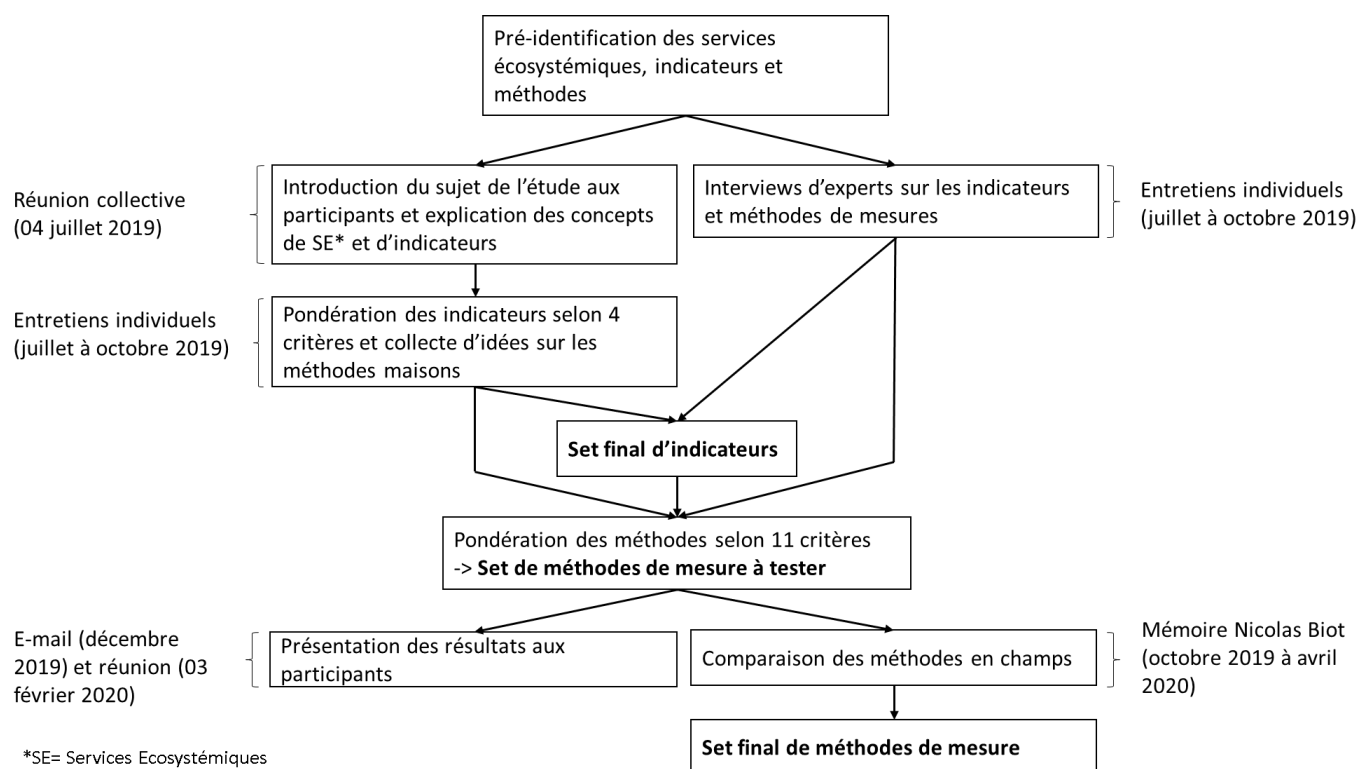


Figure 6 : Schéma global de la phase de recherche et de sélection des indicateurs et méthodes de mesure.

Tableau 11 : Indicateurs et méthodes sélectionnés pour évaluer la stabilité structurale du sol.

| Service écosystémique        | Fonctions de l'écosystème associées<br>(Indicateurs du Service écosystémique) | Indicateurs                                                                                                                                                                                              | Méthodes                                | Types de méthode     |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------|
| Stabilité structurale du sol | Capacité d'infiltration de l'eau dans le sol                                  | Taux d'infiltration de l'eau dans le sol à saturation                                                                                                                                                    | Simple anneau <sup>1</sup>              | Reconnue             |
|                              |                                                                               | Taux d'infiltration de l'eau dans le sol, supposé à saturation                                                                                                                                           | Ariane Chabert <sup>2</sup>             | Pratique             |
|                              |                                                                               | Temps que met l'eau à s'infiltrer dans le sol pour un volume d'eau donné                                                                                                                                 | Méthode maison                          | Pratique             |
|                              | Résistance à la compaction                                                    | Densité apparente                                                                                                                                                                                        | Cylindres de Kopecky <sup>3</sup>       | Reconnue             |
|                              |                                                                               | Force pour pénétrer dans le sol                                                                                                                                                                          | Pénétromètre digital <sup>4</sup>       | Reconnue et pratique |
|                              |                                                                               | Aspect visuel du sol                                                                                                                                                                                     | VESS <sup>5</sup>                       | Reconnue et pratique |
|                              |                                                                               | Profondeur de pénétration pour une force donnée                                                                                                                                                          | Méthode maison                          | Pratique             |
|                              | Stabilité des agrégats du sol<br>(sensibilité à l'érosion)                    | Diamètre moyen pondéré des particules du sol après humectation rapide par immersion, humectation lente par capillarité et désagrégation mécanique par agitation après humectation d'agrégats de 3 à 5 mm | Le Bissonnais <sup>6</sup>              | Reconnue             |
|                              |                                                                               | Proportion d'agrégats de départ de 0 à 1,5cm dans un filtre après immersion dans l'eau                                                                                                                   | USDA <sup>7</sup>                       | Pratique             |
|                              |                                                                               | Evolution de la masse relative d'un échantillon de sol dans l'eau en fonction du temps                                                                                                                   | Quanti- Slake test (CRA-W) <sup>8</sup> | Pratique             |
|                              |                                                                               | Turbidité de l'eau                                                                                                                                                                                       | Ariane Chabert <sup>2</sup>             | Pratique             |
|                              |                                                                               | Aspect visuel du sol                                                                                                                                                                                     | VESS <sup>5</sup>                       | Reconnue et pratique |

<sup>1</sup> <https://lter.kbs.msu.edu/protocols/184>

<sup>2</sup> Chabert and Sarthou (2017)

<sup>3</sup> Campbell (1994)

<sup>4</sup> Eijkelkamp (2020a)

<sup>5</sup> Guimarães et al. (2011)

<sup>6</sup> Le Bissonnais (1995)

<sup>7</sup> Prosensols (2012)

<sup>8</sup> <https://gitlab.com/FrdVnW/slaker> et <https://www.youtube.com/watch?v=G9UweThvHYI> (Vanwindekens, 2020)

---

## 2.3 Plan des parcelles

---

Toutes les méthodes de mesures ont été testées durant l'année 2019-2020 au centre Alphonse de Marbaix, l'une des fermes universitaires de l'UCLouvain, située à Corroy-le-Grand. Trois champs ont été sélectionnés en fonction du type de plantes cultivées et de l'intensité du travail du sol qui y sont associés : une prairie permanente (Prairie), un champ de froment semé en novembre 2019 après une culture de pommes de terre (PDT) et un champ de betteraves semées en avril 2020 après une culture de froment et une interculture (BET ; Tableau 12). Ceci dans le but d'évaluer la capacité de chaque méthode à mettre en évidence des différences de fourniture de services écosystémiques liées à la stabilité structurale du sol parmi des sols soumis à des intensités de travail distinctes.

A part la prairie qui n'est pas sujette au travail du sol, les champs ont été labourés de manière conventionnelle jusqu'en 2018. Depuis, les principes de techniques culturales simplifiées<sup>4</sup> y sont appliqués. Voici les opérations culturales liées au sol qui ont été effectuées sur les deux champs travaillés entre septembre 2019 et mars 2020 et qui nous permettent de les distinguer en termes d'intensité du travail du sol :

- **PDT** : Suite à la culture de pomme de terre, plusieurs opérations nécessitant parfois des machines lourdes ont été entreprises. Tout d'abord, une arracheuse (munie de chenilles) et une benne ont été utilisées pour récolter entre 40 et 50 tonnes de pomme de terre. La circulation de la benne sur le champ a été problématique étant donné la quantité de pomme de terre récoltées. Le tassement créé lors de cette opération a nécessité un labour à 25 cm de profondeur. Ensuite, pour semer le froment, un semoir à disque HORSCH Pronto - allant jusque 10-15 cm de profondeur - a été utilisé (Allemagne ; HORSCH Maschinen GmbH, 2020).
- **BET** : Certaines mesures ont été prises directement dans l'interculture, d'autres ont été réalisées après sa destruction. La destruction du couvert s'est faite à partir d'un broyage et de l'utilisation de glyphosate. Ensuite, un strip-till a été effectué sur des rangs espacés de 45 cm afin de préparer le futur semis de betterave. Les mesures effectuées après la destruction du couvert ont également été effectuées après le passage au strip-till.

Les hypothèses faites dans ce travail sont que la prairie permanente devrait obtenir la meilleure stabilité structurale. Ensuite, Le champ BET serait supérieur en terme de stabilité

---

<sup>4</sup> Techniques culturales simplifiées est un terme utilisé pour évoquer les systèmes sans labour ou pour lesquels l'intensité du travail du sol est fort réduite par rapport au système conventionnel (Vanhove, 2018).

structurale que le champ PDT en raison de l'usage d'une interculture et de l'absence de labour (Arshad et al., 1999; Cambardella and Elliott, 1993; Hauggaard-Nielsen et al., 2008; Obalum and Obi, 2010; Pagliai et al., 2004).

Tableau 12 : Description des champs d'essais.

| Abréviation donnée au champ | Type de culture                                                                                                                                              | Période de mesures                  | Couverture du sol lors des mesures                             | Intensité du travail du sol  |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------|
| <b>Prairie</b>              | Prairie permanente avec pâturage de bovins et d'ovins                                                                                                        | Septembre – novembre 2019           | Prairie                                                        | Pas de travail du sol        |
| <b>PDT</b>                  | Froment semé après pommes de terre                                                                                                                           | Février-mars 2020                   | Froment                                                        | Travail du sol important     |
| <b>BET</b>                  | Betteraves semées après froment.                                                                                                                             | Janvier 2020 pour l'infiltrométrie* | Dans le couvert                                                | Travail du sol intermédiaire |
|                             | Interculture : mélange de pois fourrager, avoine de printemps, féverole, tournesol, nyger, phacélie, lin oléagineux, trèfle d'Alexandrie, moutarde et vesce. | Mars 2020 pour les autres mesures   | Après la destruction du couvert et avant le semis de betterave | Travail du sol intermédiaire |

\*La séparation dans le temps des mesures d'infiltration par rapport aux autres n'était pas voulue mais les conditions de terrain - date du moment du travail du sol et coronavirus – l'ont imposée. Cela implique que les mesures d'infiltration ont été prises sur un sol de structure différente que lorsque les mesures de compaction et de stabilité des agrégats ont été prises

Une parcelle de **texture limoneuse** et une de **texture limono-sableuse** ont été choisies pour chaque champs. Ceci dans le but de tester les méthodes sur des sols de textures similaires à celles retrouvées dans les champs des participants de la thèse participative de Lola Leveau sur lesquels elles seront utilisées par après. Par parcelle, les mesures ont été prises à cinq placettes différentes disposées en étoiles (Figure 7 et Figure 8).

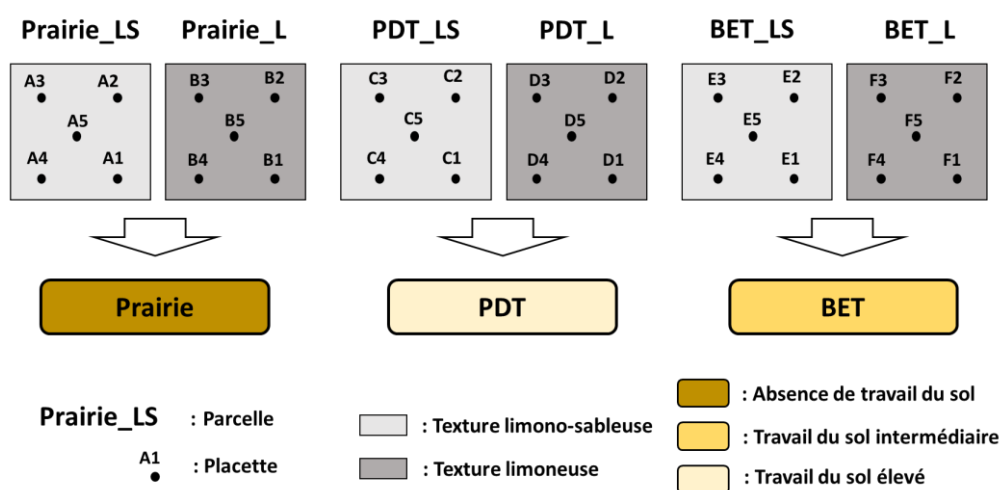


Figure 7 : Plan parcellaire des essais. Prairie : Prairie permanente. PDT : champ de froment semé après pommes de terre. BET : champ de betteraves semées après une culture de froment puis une interculture. X\_L : Parcelle du champ X de texture Limoneuse (L). X\_LS : Parcelle du champ X de texture Limono-Sableuse (LS).

L'application Mapit GIS (Mapit GIS, 2020) a été utilisée pour déterminer et retrouver la localisation des placettes d'une parcelle donnée (Figure 8). Pour ce faire, la carte numérique des sols de Wallonie (SPW, 2015) a été téléchargée sur l'application. Des mesures de granulométrie étaient prévues pour vérifier la précision de la carte mais elles n'ont pas pu être terminées en raison de l'épidémie du coronavirus (COVID-19).

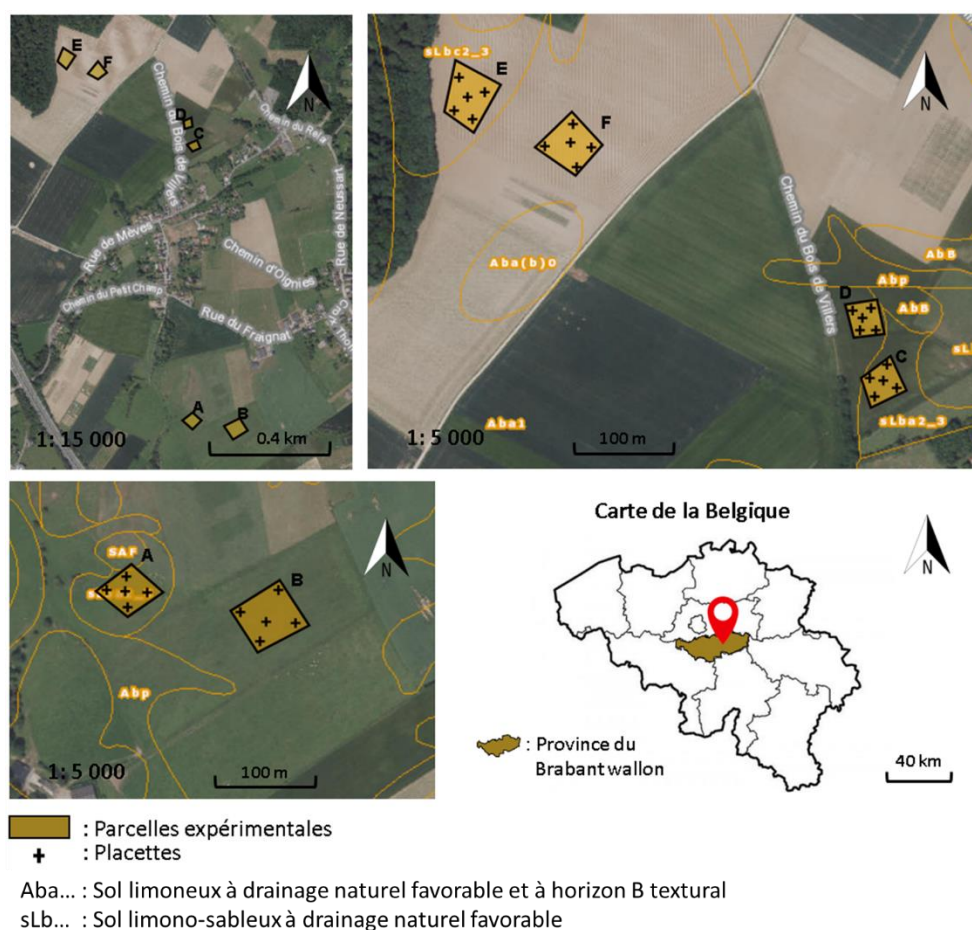


Figure 8 : Vues aériennes et positions des placettes et parcelles expérimentales. Source : SPW (2018). A = prairie de texture limono-sableuse (Prairie\_LS), B = prairie de texture limoneuse (Prairie\_L), C = champ de pommes de terre de texture limono-sableuse (PDT\_LS), D = champ de pommes de terre de texture limoneuse (PDT\_L), E = champ de betteraves de texture limono-sableuse (BET\_LS), F = champ de betteraves de texture limoneuse (BET\_L).

---

## 2.4 Plan expérimental

---

Le choix du nombre d'échantillons à tester s'est fait en concertation avec les experts lors des entretiens, et en consultant la littérature. Le nombre d'échantillons réellement effectués par parcelle s'est dans certains cas éloigné de ce choix initial suite aux restrictions en termes d'accessibilité au champ et au laboratoire causées par l'épidémie du coronavirus (COVID-19).

Le plan principal, a consisté à prendre au moins cinq mesures par méthode par parcelle. Les cinq mesures ont été réparties en étoiles, à raison de une par placette, comme le montre la Figure 7 et la Figure 8. Afin d'éviter l'impact d'une méthode sur une autre, une attention a été portée sur le fait de ne pas répéter des prises de mesure exactement au même endroit que les précédentes au sein d'une placette.

Pour le cas du pénétromètre digital et de la méthode USDA (voir Méthode USDA et Mesure de pénétrométrie), le nombre d'échantillons par parcelle a été augmenté en raison de la rapidité de la prise des mesures et du nombre conseillé dans la littérature. Ainsi, quinze mesures ont été prises par parcelle pour la pénétrométrie et dix par parcelle pour la méthode USDA. En résumé, pour une placette donnée, une mesure par méthode a été prise sauf pour la pénétrométrie et la méthode USDA où respectivement 3 et 2 mesures ont été prises.

Les mesures de densité apparente, de la méthode VESS (voir Mesure de densité apparente par les cylindres de Kopecky. et Méthode VESS) et de pénétrométrie, ont été prises sur une profondeur de 30 cm. Pour le cas de la densité apparente, six échantillons ont été récoltés entre 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25 et 25-30 cm de profondeur. Des moyennes des valeurs de pénétrométrie et des scores VESS ont été faites tous les 5 cm afin de pouvoir comparer les résultats en fonction de la profondeur pour ces trois méthodes.

Après une première analyse des résultats sur les parcelles de prairie, il a été décidé de réaliser, en plus des mesures prévues, une série de cinq mesures au sein d'une même placette pour les méthodes suivantes : la méthode simple anneau, Ariane Chabert, de mesure de densité apparente, de pénétrométrie et les deux méthodes maison. L'objectif de ces mesures supplémentaires était d'évaluer la variabilité des résultats sur des échantillons de sol supposés très homogènes.

---

## 2.5 Conséquences de l'épidémie de coronavirus (COVID-19) sur le plan expérimental

---

En période de confinement, il a été impossible de se rendre au laboratoire ou en champ pour la prise de plusieurs mesures. Ainsi, la méthode du Quanti-Slake Test et du Bissonnais ont dû être abandonnées sur les parcelles PDT\_LS, PDT\_L, BET\_LS et BET\_L. De plus, les mesures maison d'infiltrométrie n'ont pas pu être prises avant la destruction du couvert des parcelles BET\_LS et BET\_L comme les autres mesures d'infiltrométrie. Elles n'ont donc pas été réalisées sur ces deux parcelles, puisqu'elles n'auraient pas pu être comparées avec les autres mesures d'infiltrométrie.

Ajouté à cela, l'humidité n'a pu être mesurée en même temps que la pénétrométrie que dans le cas des parcelles du champ Prairie en raison de l'incapacité de se procurer la sonde. Heureusement, les pluies ont été absentes durant l'intervalle de temps entre les mesures des quatre dernières parcelles. Cependant, les résultats de pénétrométrie devront être interprétés avec vigilance et en particulier lors de la comparaison des parcelles Prairie\_LS et Prairie\_L avec les autres.

Finalement, en ce qui concerne les mesures de densité apparente, une partie des échantillons a dû être séchée dans un four classique. Bien que ce changement dans le protocole puisse affecter la précision des mesures, il permet d'illustrer la facilité de réaliser cette méthode chez-soi pour un agriculteur.

---

## 2.6 Description des méthodes testées

---

### 2.6.1 Méthodes de mesure qui évaluent l'infiltration de l'eau dans le sol

#### 2.6.1.1 Méthode Simple Anneau

Le protocole qui a été suivi est celui décrit par le TP 8 : Conductivité hydraulique à saturation, méthode Simple Anneau du cours LBRES2103 - Physique du sol appliquée à l'agronomie et l'environnement à l'UCLouvain (Biielders and Javaux, 2019).

Le principe consiste à mesurer la vitesse d'infiltration de l'eau dans un anneau cylindrique quand le sol est à saturation en appliquant une charge hydrostatique constante. La charge hydrostatique constante est garantie grâce au réservoir de Mariotte (Figure 9). La conductivité hydraulique à saturation  $K_s$  [m/s] peut alors être calculée sur base de l'équation de Reynolds et Elrick (1990), valable pour un essai d'infiltration à flux constant, sous charge, à partir d'un anneau dans un sol rigide, homogène et isotrope :

$$K_s = \frac{GQ}{aH + \pi a^2 G + \frac{a}{\alpha}}$$

Où  $G$  est un paramètre de forme sans dimension défini d'après la géométrie du système surbase de résolutions numériques de l'équation de Richard (Annexe 6),  $Q$  est le débit d'eau qui s'écoule dans le sol depuis l'anneau [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ],  $H$  est la charge hydrostatique [m], c'est à dire la hauteur d'eau dans l'anneau,  $a$  est le rayon de l'anneau d'infiltration [m] et  $\alpha$  [ $\text{m}^{-1}$ ] est le paramètre de l'équation de Gardner (Gardner and Mayhugh, 1958) qui décrit la conductivité hydraulique  $K$  du sol :

$$K(h) = K_s \exp(\alpha h)$$

Avec  $h$  l'état de succion du sol [m].

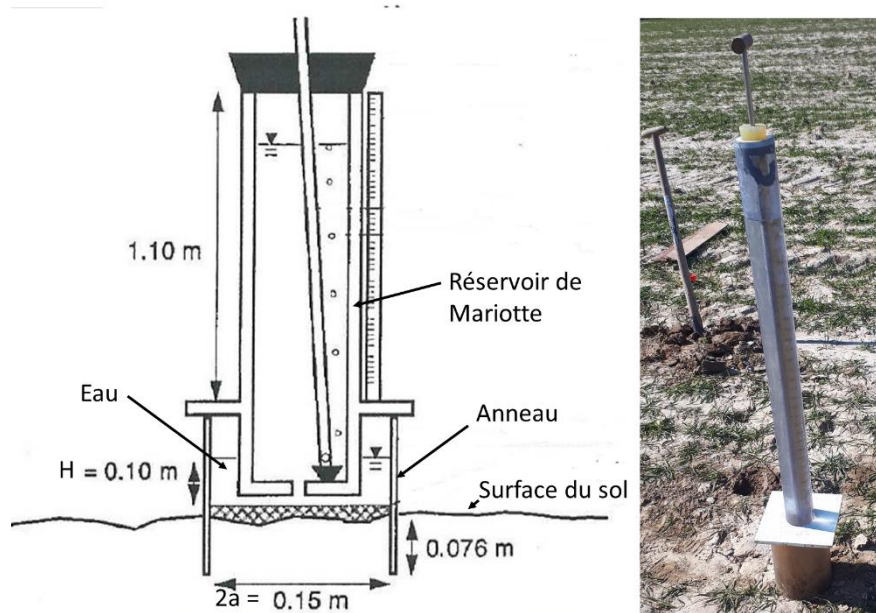


Figure 9 : Dispositif de l'infiltromètre simple anneau (schéma et photographie).  
Source : Bielders et Javaux (2019).

Les mesures d'infiltrométrie ont été prises à l'aide de la fiche d'infiltrométrie du projet Prosensol (Annexe 7). Une fois le sol à saturation - c'est-à-dire, une fois que l'infiltration de l'eau est constante- ou après 30 minutes si la saturation n'était toujours pas atteinte, les mesures d'infiltration étaient prises durant au moins 30 minutes. Les valeurs utilisées pour calculer le débit ne sont que les valeurs pour lesquels le débit constant a été atteint. Afin de faciliter la rapidité de l'expérience et d'empêcher de devoir répéter les mesures pour calculer les inconnues de l'équation de Reynolds et Elrick (1990), le paramètre  $\alpha$  a été fixé en faisant l'hypothèse que la courbe de conductivité hydraulique à une forme exponentielle et que le sol n'est initialement pas trop proche de la saturation. Dans cette fiche, le paramètre  $\alpha$  a été posé à  $12 \text{ cm}^{-1}$ . Cette valeur de  $\alpha$  correspond assez bien aux sols limoneux et sablo-limoneux (Bielders, 2009). Finalement les mesures ont été réalisées à l'aide d'anneaux de diamètre intérieur de 15 cm et de réservoirs de Mariotte de diamètres intérieurs de 11.95 et 6.7 cm.

### 2.6.1.2 Méthode Ariane Chabert

La méthode Ariane Chabert fait référence à la méthode utilisée par Ariane Chabert dans sa thèse (Chabert and Sarthou, 2017) adaptée aux conditions observées sur le terrain. Le principe est proche de la méthode simple anneau, mais en plus rapide, plus facile et avec une charge hydrostatique qui n'est pas constante.

L'expérience consiste à enfoncer un anneau en PVC de 12 cm de diamètre à une profondeur de 5 cm dans le sol (Figure 10). Ensuite, 1.25 L d'eau est versée dans l'anneau à l'aide d'une bouteille en plastique. Cette première opération a pour but de saturer le sol en eau afin de standardiser les mesures et de pouvoir les comparer. Si la première bouteille s'est entièrement infiltrée avant 15 min, alors une deuxième bouteille d'1.25L est versée et l'infiltration de l'eau est mesurée directement. Pour mesurer l'infiltration, la hauteur d'eau dans l'anneau après avoir versé la deuxième bouteille d'eau ( $t=0$ ) et après 5 min ( $t=5$  min) sont mesurées avec un mètre. S'il reste encore beaucoup d'eau de la première bouteille dans l'anneau après 15 min, alors la mesure d'infiltration est directement mesurée pendant 5 min (de  $t=15$  min à  $t=20$  min).



*Figure 10 : Photographie de la méthode de mesure d'infiltration inspirée d'Ariane Chabert.*

### *2.6.1.3 Méthode Maison*

Cette méthode est une méthode développée dans ce mémoire et basée sur les observations d'agriculteurs. A partir de la réunion du 04 juillet 2019 et des entretiens individuels chez les participants, deux observations concernant l'infiltration de l'eau ont été relevées. D'une part, il est possible d'avoir une idée de la capacité d'un sol à infiltrer l'eau en regardant la présence de flaques stagnantes dans les champs. D'autre part, l'évaluation de l'infiltration ou du ruissellement d'une petite quantité d'eau versée sur le sol permet de voir directement si le sol infiltre rapidement ou pas. C'est sur cette dernière observation que la méthode maison s'est basée. De manière générale, comme pour les autres méthodes maison, les problèmes rencontrés dans l'élaboration d'un protocole ont été de trouver un moyen de rendre la mesure répétable, indépendante de la variation d'humidité des sols et facile à réaliser.

Celle-ci est réalisable en trois étapes :

1. S'il y a de la végétation à la surface du sol, celle-ci doit être coupée sur un cercle d'environ 3 cm de diamètre, au moins aussi grand que la taille d'un bouchon de

bouteille en plastique, afin qu'elle ne bloque pas l'infiltration à partir de la bouteille par après. Ensuite, 2L d'eau sont versés sur ce cercle afin de « saturer » le sol en eau, ou du moins de diminuer l'influence de l'humidité du sol sur la mesure.

2. Après avoir attendu que ces 2L d'eau aient été entièrement infiltrés, une bouteille en plastique d'1L est remplie et renversée rapidement, avec le goulot en contact avec le sol au niveau du cercle de 3cm, où l'infiltration sera mesurée (Figure 11.a). Lors de cette étape rapide, l'eau ne sort pas de la bouteille.
3. Pour mesurer l'infiltration, la bouteille est alors soulevée à environ 2 cm du sol. Ceci permet de vider la bouteille de façon standardisée. Une fois la dernière goutte d'eau sortie de la bouteille, la mesure d'infiltration commence. Elle se fait en calculant le temps que prend l'eau à être infiltrée au niveau de la marque que le goulot de la bouteille a faite lors du renversement de la bouteille à l'étape 2. L'eau est infiltrée quand on ne voit plus d'eau stagnante à la surface du sol au niveau de la marque du goulot (Figure 11.b).

Pour simplifier l'interprétation des résultats par rapport aux autres méthodes, l'inverse des valeurs d'infiltration a été calculée. Les unités sont donc exprimées en 1/secondes. En conséquence, une valeur élevée indiquera une grande infiltration.

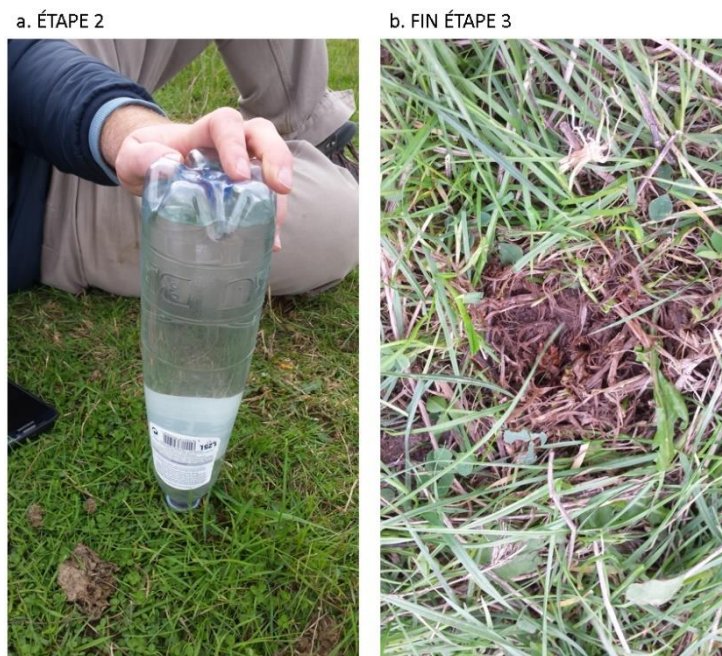


*Figure 11 : Photographies de la méthode maison d'infiltrométrie. Le renversement de la bouteille (a. ÉTAPE 2) et le résultat après que l'eau soit infiltrée au niveau du cercle de 3 cm (b. FIN ÉTAPE 3).*

## 2.6.2 Méthodes de mesure qui évaluent la résistance du sol à la compaction

### 2.6.2.1 *Mesure de densité apparente par les cylindres de Kopecky.*

La densité apparente à l'état sec d'un sol ( $\rho_b$ ) [Kg/m<sup>3</sup>] est calculée comme le ratio entre la masse sèche ( $M_s$ ) présente dans un volume de sol donné et ce volume ( $V_s$ ).

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_s}$$

Pour la calculer, des échantillons de sol de 100 cm<sup>3</sup> ont été récoltés à l'aide de cylindres de Kopecky de 100 cm<sup>3</sup> et de 5 cm de hauteur pour 6 profondeurs différentes (0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25 et 25-30 cm). Les échantillons ont été séchés à 105°C à l'étuve durant 48h et leur poids sec a été mesuré.

### 2.6.2.2 *Mesure de pénétrométrie*

Les mesures de pénétrométrie ont été prises à l'aide d'un Penetrologger Eijkelkamp (Pays-Bas ; Eijkelkamp, 2020a). Il s'agit d'un pénétromètre digital qui mesure la pression exercée pour pénétrer dans le sol en Méga Pascal par centimètre de profondeur. Le Penetrologger a été enfoncé jusqu'au moins 30 cm de profondeur afin de pouvoir comparer les résultats avec ceux de densité apparente et de la méthode VESS.

Concrètement, un pénétromètre digital s'utilise en programmant à l'avance les données à récolter. Dans notre cas, ceci s'est fait à l'aide du programme Penetroviewer V6.08 (Eijkelkamp, 2020b). Ensuite, l'étape suivante consiste à prendre la mesure. Pour cela, il faut appuyer sur le pénétromètre de façon constante et de manière à ce que la tige reste bien perpendiculaire par rapport au sol (Figure 12.a). Lors de la mesure, le pénétromètre digital construit instantanément un graphique de la pression exercée pour pénétrer dans le sol par rapport à la profondeur (Figure 12.b).

Comme l'humidité influence la facilité à pénétrer dans le sol, l'humidité du sol [m<sup>3</sup> d'eau /m<sup>3</sup> de sol] a été mesurée en parallèle avec une sonde Thetaprobe (Eijkelkamp, 2020c).

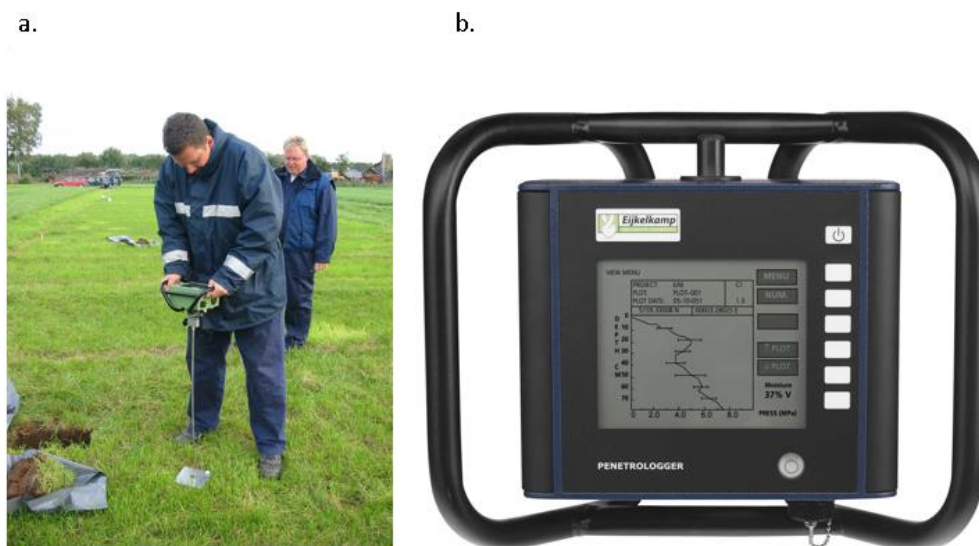


Figure 12 : Photographies de l'utilisation d'un pénétromètre digital. Prise de mesure (a) et graphe obtenu après la mesure (b). Sources : Eijkelkamp (2020d) et Rutgers et al. (2009).

### 2.6.2.3 Méthode Maison

Cette méthode a été développée dans ce mémoire et est basée sur une des observations d'agriculteurs. Les méthodes utilisées en pratique par les agriculteurs pour évaluer l'état de compaction du sol ou sa résistance à la compaction et qui ont été proposées lors de la réunion du 04 juillet 2019 et des interviews individuels sont les suivantes :

- Observation de l'enfoncement des chaussures ou des roues d'un tracteur en avançant dans le champ.
- Evaluation de l'effort à fournir pour travailler le sol, par exemple via la consommation de carburant.
- Observation du temps que prend une trace laissée sur le sol à disparaître, soit en retournant voir la trace soit en regardant si la culture suivante atteint une hauteur homogène. Ex de traces : rouleau, pneus de pulvérisateur, pieds de moutons.
- Observation du développement des racines dans un profil de sol ou une bêchée de sol.
- Enfoncement d'une tige métallique graduée dans le sol (comme un pénétromètre, mais sans cadran chiffré).

La méthode maison développée s'inspire de l'observation concernant l'enfoncement des chaussures ou roues dans le champ. Elle a pour but d'évaluer jusqu'à quelle profondeur un objet s'enfonce dans le sol, ce qui informe sur la capacité du sol à répondre à la pénétration d'un objet. Pour ce faire, la méthode développée s'articule en deux étapes :

1. Couper, s'il y en a, la végétation sur un cercle de sol de diamètre d'environ 10 cm (Figure 13.a). Ceci a pour but de diminuer l'influence du type de culture en surface sur la prise de mesure. Verser 2L d'eau dans cette zone afin de diminuer l'influence de l'humidité du sol sur la mesure (Figure 13.b).
2. Remplir une bouteille d'eau en verre de 33 cl et la laisser tomber verticalement de 1 m de hauteur, goulot vers le bas, au-dessus de la zone d'étude (Figure 13.c). Si la bouteille ne tombe pas verticalement, recommencer cette étape. Mesurer de combien de centimètres s'est enfoncée la bouteille dans le sol (Figure 13.d).

Les mesures ont été réalisées avec une bouteille en verre de la marque Barbãr car elle permet de refermer le capuchon de manière solide et hermétique, et qu'il est facile pour tout un chacun de se procurer ce matériel.

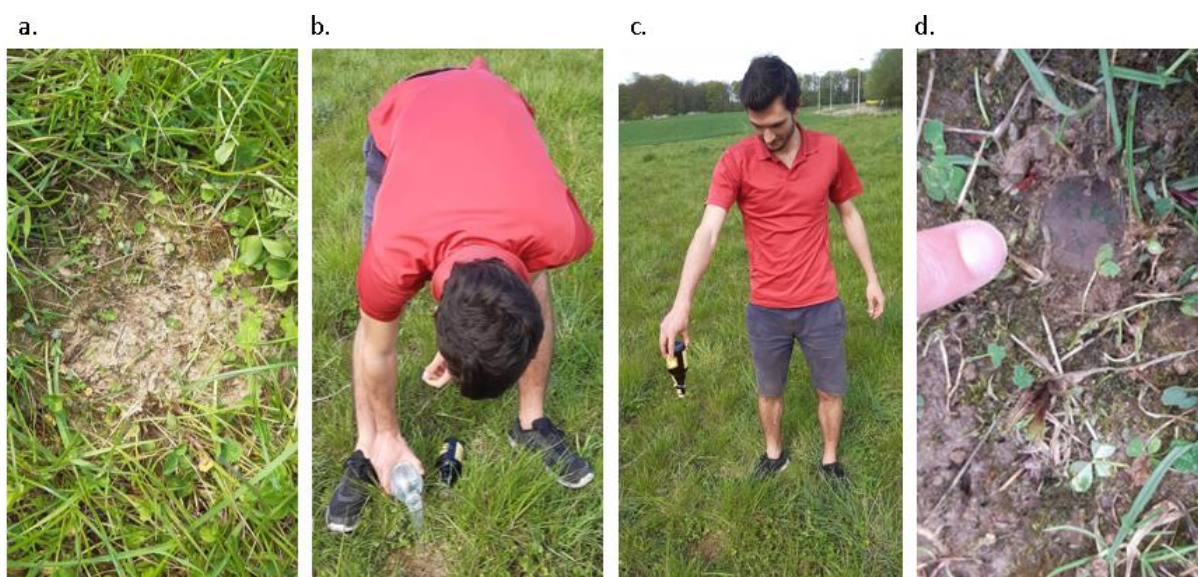


Figure 13 : Photographie des étapes de la méthode maison de mesure de la résistance à la pénétration. Couper la végétation du sol (a), verser 2L d'eau (b), laisser tomber la bouteille de 1 m (c) et mesurer la marque laissée par la bouteille (d).

#### 2.6.2.4 Méthode VESS

La méthode VESS (Visual Evaluation of Soil Structure) utilisée est décrite dans le protocole de Guimarães et al. (2011). Concrètement, nous avons utilisé l'application VESS – Evaluation visuelle structure du sol (bêta), version 1.1.3 (Google Play, 2020). Cette application smartphone permet d'encoder facilement les résultats et de calculer le score VESS en répondant à une série de questions.

La méthode VESS consiste à extraire un bloc de sol d'environ 20x20x30 cm à la bêche, l'équivalent d'un trou de la profondeur et largeur de la bêche. Le bloc de sol est ensuite manuellement cassé afin d'observer les limites naturelles des agrégats. Finalement, un score

est donné pour chaque couche - si on observe des couches de structures différentes - basé sur des caractéristiques telles que la taille et la forme des agrégats, la présence de racine, la porosité, la facilité à casser les agrégats, etc. Afin de donner un score global au bloc, on additionne les scores de chaque couche après les avoir multipliées par leur épaisseur et avoir divisé le tout par l'épaisseur totale du bloc.

Un score de 1 indique un sol avec une bonne structure et peu susceptible à la compaction alors qu'un score de 5 fait référence à un sol très compact (Tableau 13).

Tableau 13 : Tableau répertoriant les caractéristiques des scores VESS. Sources : Ball et al. (2007) et Guimarães et al. (2011). Disponible sur le site : <https://agriculture-de-conservation.com/Evaluation-Visuelle-de-la-structure-d-un-sol.html>.

| Qualité de la Structure                                                          | Taille et Apparence des Agrégats                                                                                         | Porosité Visible et Racines                                                                                                      | Apparence après rupture : divers sols                                               | Apparence après rupture: même sol, différentes modalités de travail du sol          | Traits distinctifs                                                                                                   | Apparence des fragments (naturels ou obtenus par rupture) de $\approx 1.5$ cm de diamètre                                                                                                                                                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Sq1 Friable</b><br>Agrégats friables entre les doigts                         | La plupart des agrégats < à 6mm après émiettement.                                                                       | Très poreux. Les racines ont colonisé le sol.                                                                                    |    |    | <br>Agrégats Fins                  | <br>L'action de briser le bloc est suffisante pour les relever. Les gros agrégats sont composés de plus petits, maintenus par les racines.                              |
| <b>Sq2 Intact</b><br>Agrégats se brisent facilement avec la main                 | Mélange d'agrégats poreux, arrondis de 2mm à 7cm. Aucune motte présente.                                                 | La plupart des agrégats sont poreux. Les racines colonisent entièrement le sol.                                                  |   |   | <br>Forte porosité des agrégats   | <br>Les agrégats obtenus sont arrondis, fragiles, se cassent très facilement et sont très poreux.                                                                      |
| <b>Sq3 Ferme</b><br>La plupart des agrégats se brisent avec la main              | Mélange d'agrégats poreux de 2mm-10cm. Moins de 30% <1cm. Présence possible de fragments angulaires non poreux (mottes). | Présence de macropores et de fissures. Présence de pores et de racines à l'intérieur des agrégats.                               |  |  | <br>Faible porosité des agrégats | <br>Les agrégats/fragments sont plutôt faciles à obtenir. Ils ont peu de pores visibles et sont arrondis. Les racines poussent habituellement à travers les agrégats. |
| <b>Sq4 Compact</b><br>Exige un gros effort pour briser les agrégats avec la main | Principalement mottes >10 cm, sub-angulaires, non poreuses ; moins de 30% <7cm ; structure lamellaire possible.          | Peu de macropores et de fissures. Toutes les racines sont localisées dans les pores et autour des agrégats.                      |  |  | <br>Macropores Visibles          | <br>Les agrégats/fragments sont faciles à obtenir quand le sol est humide. Ils se présentent en cubes avec des formes anguleuses et des fissures internes.            |
| <b>Sq5 Très Compact</b><br>Agrégats vraiment difficile à briser                  | Principalement mottes angulaires et non poreuses ; >10cm, très peu de fragment <7cm.                                     | Très faible porosité. Des macropores peuvent être discernables. Anoxie possible. Peu de racines et localisées dans les fissures. |  |  | <br>Couleur gris-bleu            | <br>Le sol peut être fragmenté lorsqu'il est humide, mais peut exiger un effort important. Habituellement, pas de pores ou de fissures visibles à l'œil.              |

## 2.6.3 Méthodes de mesure de la stabilité des agrégats du sol

### 2.6.3.1 Méthode Le Bissonnais

La méthode utilisée dans ce mémoire pour mesurer la stabilité des agrégats de manière rigoureuse et reconnue par la communauté scientifique est la méthode de Le Bissonnais (1995). Le protocole suivi est celui proposé par l'INRA (2019) et normalisé dans la

norme ISO 10930: 2012 « Qualité du sol - Mesure de la stabilité d'agrégats de sols soumis à l'action de l'eau » (ISO, 2012).

L'objectif de cette méthode est de donner un aperçu de comment les agrégats du sol réagissent à l'action de la pluie. Pour ce faire 3 traitements différents sont réalisés sur des agrégats de 3 à 5 mm :

**1) Humectation rapide par immersion :**

Ce test permet de tester le comportement du sol à une humectation brutale. Cependant, il ne prend pas en compte l'impact de la goutte d'eau (ex. irrigation par submersion, pluies intenses). Il consiste à plonger les agrégats pendant 10 minutes dans de l'eau déminéralisée (Figure 14.a).

**2) Humectation lente par capillarité :**

Ce test permet de tester le comportement du sol à une humectation plus lente (ex. pluies modérées). Ce test est moins destructif et permet de faire des distinctions entre les sols instables. L'opération consiste à disposer les agrégats sur un papier filtre et attendre leur humectation durant 30 minutes sur une table à succion (Figure 14.b).

**3) Désagrégation mécanique par agitation après réhumectation :**

Ce test permet de tester le comportement du sol à la désagrégation mécanique en période humide (ex. période hivernales humides). Le dispositif photographié dans la Figure 14.c a été construit dans le but de pouvoir effectuer cette étape sur 10 échantillons simultanément. Après avoir réhumecté les agrégats dans de l'éthanol, ils sont transvasés dans les erlenmeyers du dispositif de la Figure 14.c. Alors, une opération de retournement et d'agitation du dispositif est entreprise vingt fois.

Après chaque test, un tamisage dans l'éthanol est réalisé pour enlever les fractions inférieures à 50 µm du reste de l'échantillon. L'éthanol est utilisé car il évite toute désagrégation supplémentaire. L'appareil présenté dans la Figure 14.d a été utilisé pour augmenter la quantité d'échantillons traitables en même temps.

Ensuite, un tamisage final est réalisé après avoir séché les échantillons à 40°C à l'étuve (Figure 14.e). Ce tamisage permet de séparer les agrégats en 6 fractions granulométriques (2000, 1000, 500, 200, 100 et 50 µm) et d'ainsi calculer le diamètre moyen pondéré (MWD) :

$$MWD (mm) = \sum (\emptyset \text{ moyens entre 2 tamis} \times [\% \text{ pondéral des particules retenues sur le tamis}]) / 100$$

Finalement, les MWD obtenus peuvent être interprétés selon le Tableau 14. Ainsi, un MWD < 0,4mm est associé à un sol très instable alors qu'un MWD > 2mm correspond à un sol stable (Le Bissonnais, 1995).

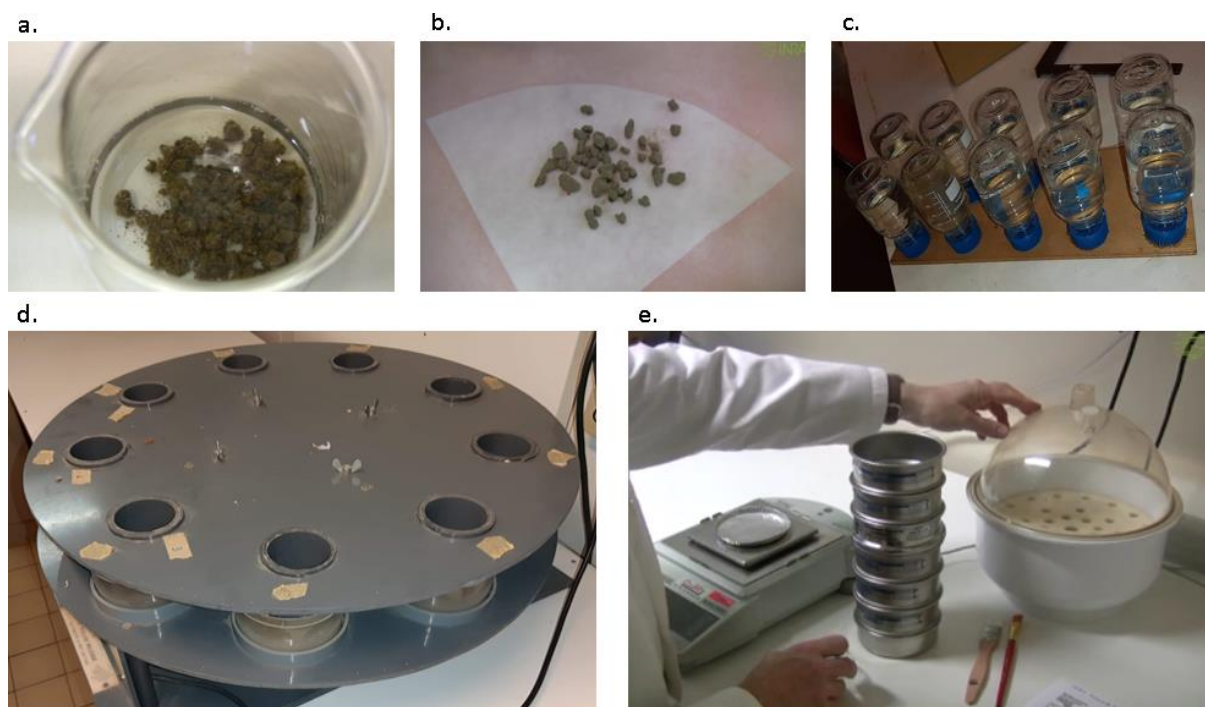


Figure 14 : Photographies des étapes du test de Le Bissonais (1995). Humectation rapide par immersion (a). Humectation lente par capillarité (b). Désagrégation mécanique par agitation après réhumectation (c). Tamisage des fractions inférieure à 50 µm dans l'éthanol (d). Tamisage final après étuve (e). Source : INRA (2019). L'ensemble des étapes illustrées en vidéo est disponible sur le site : <https://www6.val-de-loire.inrae.fr/ur-sols/Equipements/Physique-du-sol/Protocole-de-tests-de-stabilite-structurale>.

Tableau 14 : Classes de stabilité, battance et érosion en fonction de valeurs du diamètre moyen pondéré après désagrégation (MWD). Source : Le Bissonais (1995).

| MWD (mm)  | Stabilité          | Battance       | Ruissellement et érosion diffuse                                         |
|-----------|--------------------|----------------|--------------------------------------------------------------------------|
| < 0,4     | Très instable      | Systémique     | Risque important et permanent en toutes conditions topographiques        |
| 0,4 – 0,8 | Instable           | Très fréquente | Risque fréquent en toute situation                                       |
| 0,8 – 1,3 | Moyennement stable | Occasionnelle  | Risque variable en fonction des paramètres climatiques et topographiques |
| 1,3 – 2   | Stable             | Rare           | Risque limité                                                            |
| > 2       | Très stable        | Très rare      | Risque très faible                                                       |

### 2.6.3.2 Quanti-Slake Test

Le Quanti- Slake Test est une méthode développée par Frédéric Vanwindekens au Centre de Recherche agronomique wallon (CRA-W). Cette méthode est encore en cours de développement mais un protocole expérimental ainsi qu'une application R Shiny pour

visualiser les résultats sont déjà disponible<sup>5</sup>. Il existe également une vidéo YouTube qui illustre la méthode<sup>6</sup>.

Le principe de la méthode consiste à mesurer l'évolution du poids d'un échantillon de sol dans le temps lorsqu'il est plongé dans de l'eau distillée. Pour se faire, un crochet relié à une balance de laboratoire permet de plonger les échantillons dans l'eau en les mettant dans un petit panier grillagé (Figure 15). La balance est connectée à un ordinateur et lui envoie la valeur du poids mesurée pour un temps donné.

Dans ce mémoire, les échantillons pour réaliser le test ont été récoltés à l'aide de cylindres de Kopecky de 100 cm<sup>3</sup> sur une profondeur de 1 à 6 cm. Ils ont été séchés 30 jours à l'air libre, en les laissant dans les cylindres de Kopecky. Ensuite, les Quanti-Slake Tests ont été réalisés au CRA-W. La durée pour un test était de 900 secondes. Pour permettre la comparaison des résultats de plusieurs essais, la masse relative des échantillons a été calculée, en divisant le poids à un moment donné des échantillons par leur masse initiale. Plusieurs possibilités s'offrent à l'expérimentateur pour comparer les résultats. Une simple visualisation des courbes, la comparaison d'une masse relative à un moment donné de l'expérience, la comparaison de la pente de la courbe à un moment donné, la comparaison du temps que prend un échantillon à arriver à une masse relative donnée, etc. Dans ce mémoire, il a été décidé de les comparer en fonction de leur valeur à 700 secondes, quand les courbes du test deviennent plates et que la masse relative ne varie plus beaucoup.



*Figure 15 : Photographies du dispositif du Quanti-Slake Test.*

---

<sup>5</sup> <https://gitlab.com/FrdVnW/slaker> (Vanwindekens, 2020)

<sup>6</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=G9UweThvHYI>

### 2.6.3.3 Méthode USDA

La méthode USDA est celle décrite dans la partie « Kit sol » du projet Prosensols (Prosensols, 2012). Le principe est d'observer le comportement des agrégats du sol lors de leur immersion dans l'eau.

Les agrégats sont récoltés entre 0 et 1,5 cm de profondeur du sol et sont compris entre 0,5 et 1 cm de diamètre. Lors de l'expérience, ils sont plongés dans de l'eau déminéralisée à l'aide d'un filtre pendant 5 minutes (Figure 16). Alors, un score est attribué à l'échantillon à partir du Tableau 15. Ce score est basé sur la proportion de l'échantillon qui est dissoute dans l'eau après 5 secondes, 30 secondes et 5 min. Si moins de 50 % de l'échantillon de départ est dissout après les 5 minutes, un traitement supplémentaire lui est appliqué avant de lui attribuer un score : il s'agit de cinq aller-retours d'immersion de l'échantillon dans l'eau.

Le score de la méthode USDA donne une indication sur la stabilité des agrégats du sol. Ainsi, un score de 0 fait référence à un sol très instable alors qu'un score de 6 caractérise un sol très stable.

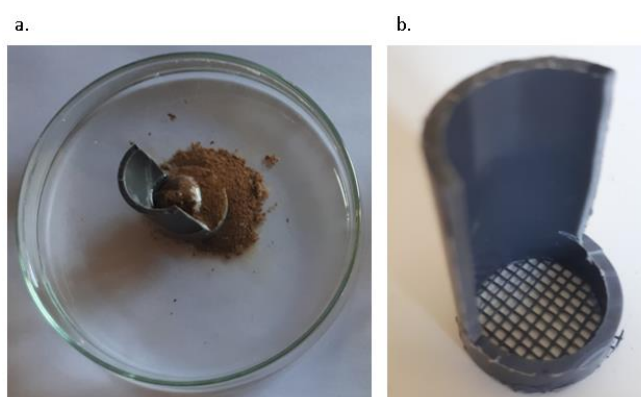


Figure 16 : Photographie de la dissolution des échantillons de sol durant un test VESS (a) et du dispositif servant de filtre (b).

Tableau 15 : Critères pour l'attribution des scores VESS. Source : Prosensols (2012).

| Scores | Critères                                                                                                                                                 |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0      | Sol trop instable pour récolter un agrégat (tout le sol passe à travers le filtre)                                                                       |
| 1      | 50% de l'échantillon est dissous en 5 secondes lors de l'immersion dans l'eau                                                                            |
| 2      | 50% de l'échantillon est dissous entre 5 à 30 secondes après immersion                                                                                   |
| 3      | 50% de l'échantillon est dissous entre 30 sec et 5 min après immersion<br>ou<br>Il reste moins de 10 % de l'agrégat de départ après 5 cycles d'immersion |
| 4      | Il reste entre 10 et 25 % de l'agrégat de départ après 5 cycles d'immersion                                                                              |
| 5      | Il reste entre 25 et 75 % de l'agrégat de départ après 5 cycles d'immersion                                                                              |
| 6      | Il reste entre 75 et 100 % de l'agrégat de départ après 5 cycles d'immersion                                                                             |

#### *2.6.3.4 Méthode Ariane Chabert*

La méthode d'Ariane Chabert (Chabert and Sarthou, 2017) utilisée pour la mesure de la stabilité des agrégats dans l'eau est un complément de la méthode Ariane Chabert décrite pour la mesure d'infiltration de l'eau dans le sol. Il s'agit en fait d'une seule expérience qui donne ces deux informations.

Le principe concernant la partie qui mesure la stabilité des agrégats est d'observer la turbidité de l'eau lors du versement de la première bouteille. Ceci se fait à l'aide d'un disque de Secchi (Preisendorfer, 1986). Le disque de Secchi a été conçu à l'aide d'une tige filetée, de deux boulons, d'un pot en plastique pour faire le cercle et de la peinture acrylique noire et blanche. Pour mesurer la turbidité de l'eau, il faut plonger le disque dans l'eau et regarder après combien de centimètres il n'est plus possible de le voir (Figure 17).



*Figure 17 : Mesure de la turbidité de l'eau à partir d'un disque de Secchi par la méthode Ariane Chabert.*

#### *2.6.3.5 Méthode VESS*

La méthode utilisée est la même que celle décrite dans le point faisant référence aux Méthodes de mesure .

#### *2.6.3.6 Pourquoi n'y a-t-il pas de méthode Maison ?*

Les méthodes utilisées en pratique par les agriculteurs pour évaluer la stabilité des agrégats du sol à l'érosion hydrique et qui ont été proposées lors de la réunion du 04 juillet 2019 et des interviews individuels sont les suivantes :

- (1) Observation visuelle de l'érosion après une forte pluie : coulées de boue sur la route, présence de boue dans les forières, eau chargée en terre dans les fossés, présence de ravines ou de rigoles dans la parcelle.
- (2) Observation de la quantité de terre collant aux chaussures ou aux pneus du tracteur lorsque le champ est traversé après une grosse pluie.
- (3) Observation de la présence d'une croûte de battance.
- (4) Immersion d'une motte de sol dans l'eau et observation de sa dégradation.

Dans un premier temps, il était prévu de mettre au point une méthode basée sur la deuxième observation. Des essais ont été réalisés en regardant la quantité de terre capturée par différents objets lorsqu'ils sont plongés dans le sol (chaussures, bouteilles, roues, etc.). Une méthode consistait par exemple à mouiller le sol avec un volume défini d'eau et puis à y poser une bouteille en verre de 75 cl. Ensuite, l'évaluation de la quantité de terre capté par la bouteille aurait pu fournir une information sur la stabilité des agrégats du sol. Pour cela, des tests ont été réalisés en posant la bouteille sur une feuille en papier et en répétant l'opération jusqu'à ne plus voir de marque (Figure 18). Cependant, cette méthode semblait trop variable et il a été décidé de la laisser tomber. De manière générale, comme pour toutes les méthodes maison, les problèmes rencontrés dans l'élaboration d'un protocole ont été de trouver un moyen de rendre la mesure répétable, indépendante de la variation d'humidité des sols et facile à réaliser.

Finalement, les méthodes USDA et du Quanti-Slake Test sont déjà des méthodes pratiques et font d'ailleurs référence à la quatrième observation faite par les agriculteurs et mentionnée ci-dessus. C'est pourquoi, compte tenu de la difficulté à inventer une nouvelle méthode maison et du manque de temps, il a été décidé de ne plus passer de temps sur le développement de cette méthode.



*Figure 18 : Test maison de mesure de la stabilité des agrégats. Photographies des marques laissées sur du papier par une bouteille en verre de 75 cL après l'avoir posée sur le sol.*

---

## 2.7 Analyses statistiques

---

L'ensemble des analyses statistiques ont été effectuées à l'aide des logiciels statistiques JMP et R (R Core Team, 2020; SAS Institute Inc, 2020) . Les méthodes d'inférence statistique employées dans ce mémoire sont décrites ci-dessous sur base du cours de biométrie LBIRA2101 (Draye and Govaerts, 2020).

### 2.7.1 Variables et facteurs de classification

Les facteurs de classification utilisés pour expliquer les variables quantitatives propre à chaque méthode de mesure sont les facteurs 'Champ' et 'Texture'. Le facteur Champ comporte trois niveaux : prairie permanente (Prairie), champ de betteraves (BET) et champ de pommes de terre (PDT). Celui de la texture en comporte deux : limono-sableuse (LS) et limoneuse (L). Dans le cas des mesures de compaction, un troisième facteur intervient qui est celui de la profondeur. Ce dernier est un facteur à six niveaux : 0-5, 5-10, 10-15, 15-20, 20-25 et 25-30 cm de profondeur.

### 2.7.2 Moyennes, écart-types et erreurs standards

Pour chaque méthode testée, les moyennes, écart-types et erreurs standards des mesures par parcelle ont été calculées sur base de la formule suivante :

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

où

- $x_i$  est la valeur obtenue pour une méthode à la placette de prélèvement  $i$ , c'est-à-dire à la  $i^{\text{ème}}$  répétition
- $n$  est le nombre de valeurs analysées pour calculer la statistique par rapport à la classification réalisée
- $\mu$  est la valeur moyenne des résultats
- $\sigma$  est l'écart-type lié à la moyenne
- $ES$  est l'erreur standard liée à la moyenne

### 2.7.3 Analyse de la variance et comparaison des moyennes

#### 2.7.3.1 ANOVA

Une analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée pour les méthodes pour lesquelles les hypothèses de normalité et d'homoscédasticité des résidus étaient satisfaisantes. Ainsi, le modèle suivant a été étudié, permettant de vérifier l'égalité des moyennes des différents niveaux d'un facteur entre elles par un test de Fisher :

$$Y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij} = \mu + \beta_i + \varepsilon_{ij}$$

Et l'hypothèse  $H_0$  testée par le test de Fisher est la suivante :

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_i$$

avec :

- $Y_{ij}$  est la variable quantitative étudiée, associée à une méthode de mesure
- $i$  est le niveau du facteur étudié
- $j$  est le numéro de la répétition, ou placette
- $\mu_i$  est la moyenne des valeurs d'une méthode pour le niveau  $i$  d'un facteur
- $\mu$  est la moyenne générale de l'ensemble des valeurs d'une méthode
- $\beta_i$  est l'effet du niveau  $i$  d'un facteur, avec  $\sum \beta_i = 0$
- $\varepsilon_{ij}$  est l'écart résiduel entre l'observation  $j$  et la moyenne  $\mu_i$ , avec  $\varepsilon_{ij} \sim iN(0, \sigma^2)$

Il y a rejet de l'hypothèse  $H_0$  lorsque la p-valeur du test de Fisher est inférieure à 0,05. Un rejet de l'hypothèse  $H_0$  implique qu'au moins une des moyennes  $\mu_i$  est significativement différente des autres.

La formule présentée ci-dessus est celle d'une ANOVA à un facteur, dans le cas de ce mémoire, des ANOVA à deux et à trois facteurs sont également utilisées. Le principe est le même si ce n'est que des termes d'interaction se rajoutent dans le modèle. Lorsque l'on fait une ANOVA à deux ou trois facteurs, il est possible de tester l'effet de chaque facteur ainsi que l'effet de leurs interactions sur la variable quantitative avec un test F similaire à celui de l'ANOVA I.

Finalement, l'effet de l'humidité sur les variables quantitatives de chaque méthode a été testé en faisant une régression linéaire. La régression linéaire est l'équivalent de l'ANOVA lorsque l'on veut utiliser des variables quantitatives pour expliquer d'autres variables quantitatives. En régression linéaire simple - quand il y a une seule variable explicative - l'hypothèse  $H_0$  du test F est la suivante, pour  $\beta_1$  étant l'effet de la variable explicative (l'humidité dans notre cas) :

$$H_0 : \beta_1 = 0$$

Ainsi, lorsque la p-valeur associée à ce test F est inférieure à 0,05, cela veut dire que l'effet de la variable quantitative  $\beta_1$  est significativement différent de 0.

### 2.7.3.2 Test de Tukey

Dans le cas où l'hypothèse nulle de l'analyse de variance est rejetée, un test de comparaison multiple, ou test de Tukey, permet de déterminer quels sont les niveaux d'un facteur qui diffèrent significativement entre eux. Le test de Tukey compare l'égalité des moyennes des niveaux d'un facteur deux à deux. L'hypothèse nulle ( $H_0$ ) pour chaque paire de moyenne ( $\mu_i$  et  $\mu_j$ ) est la suivante :

$$H_0 : \mu_i = \mu_j$$

Les moyennes seront considérées significativement différentes si l'hypothèse  $H_0$  est rejetée, c'est-à-dire si la p-valeur associée à ce test est inférieure à 0,05.

### 2.7.3.3 Alternatives non-paramétriques à l'ANOVA et au test de Tukey.

Pour certaines variables quantitatives étudiées dans ce mémoire, les hypothèses de l'ANOVA sur les résidus ne sont pas vérifiées. Il est parfois possible d'effectuer des transformations sur celles-ci pour modifier la distribution de leurs résidus et ainsi satisfaire les hypothèses de normalité et d'homoscédasticité des résidus propres à l'ANOVA. Quand aucune transformation ne permet de satisfaire les hypothèses de l'ANOVA, il est nécessaire d'avoir recours à des méthodes d'analyses non-paramétriques. Dans le cas de ce travail, les méthodes de Kruskal-Wallis et de la comparaison par paire de Wilcoxon ont été utilisées, puisqu'elles sont les équivalents non-paramétriques de l'ANOVA et du test de Tukey. Bien qu'utilisant des formules différentes, les hypothèses nulles de ces tests peuvent être comparées à leur analogue paramétrique.

## 2.7.4 Coefficient et test de corrélation

Le coefficient de corrélation donne une information sur l'intensité et le sens (positif ou négatif) de la relation linéaire entre deux variables quantitatives. Pour deux variables quantitatives X et Y, le coefficient de corrélation de Pearson  $r(X,Y)$  se calcule en divisant la covariance de X et Y,  $Cov(X,Y)$ , par le produit des écart-types de X et Y :

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

Des tests statistiques permettent de vérifier la signifiante des corrélations en testant l'hypothèse nulle suivante :

$$H_0: r(X,Y) = 0$$

## 3 RESULTATS

---

## 3.1 Influence de l'humidité du sol sur les résultats

---

L'humidité a pu être mesurée uniquement sur les parcelles Prairie\_SL et Prairie\_L en raison de l'épidémie du COVID-19. Son effet sur les variables quantitatives de chaque méthode a été étudié en réalisant une régression linéaire. L'effet de l'humidité s'est avéré non significatif pour l'ensemble des méthodes (Annexe 8). Il faut toutefois rester vigilant car les valeurs d'humidités et des variables quantitatives de chaque méthode qui ont été utilisées pour réaliser cette analyse statistique font référence uniquement à deux parcelles très similaires (Prairie\_LS et Prairie\_L). La seule méthode pour laquelle l'effet de l'humidité sur les valeurs mesurées n'a pas été vérifié est la méthode USDA puisque les hypothèses de normalité des résidus permettant d'analyser les résultats n'étaient pas respectées.

## 3.2 Résultats des méthodes qui évaluent la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol

### 3.2.1 Résultats de la méthode Simple anneau

L'ANOVA II montre que les effets liés au champ et à la texture ainsi que celui de leur interaction ne sont pas significatifs pour expliquer les valeurs de  $K_s$  mesurées par la méthode simple anneau (Tableau 16). Les résultats, non significatifs, sont toutefois présentés à la Figure 19 afin d'observer les tendances.

Tableau 16 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ) et résultat du test F (Prob. > F) de l'ANOVA II utilisant les facteurs Texture, Champ ainsi que leur interaction pour expliquer les valeurs de  $K_s$  mesurée par la méthode simple anneau. Résultats du test F (Prob. > F) testant les effets des différents facteurs.

| Analyse de la variance |          |
|------------------------|----------|
| $R^2$                  | Prob. >F |
| 0,1145                 | 0,6851   |
| Effets                 | Prob. >F |
| Texture                | 0,7472   |
| Champ                  | 0,3411   |
| Texture*Champ          | 0,6919   |

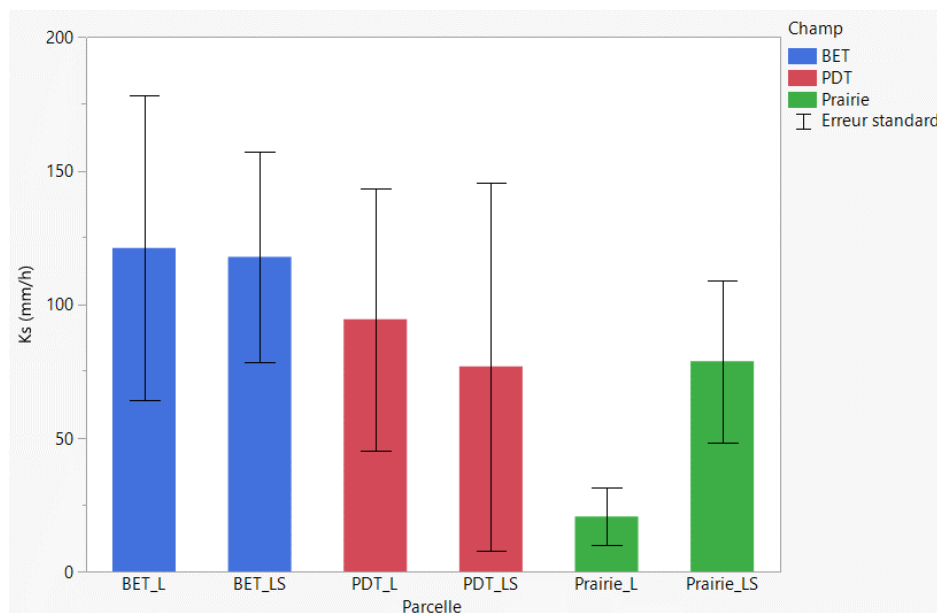


Figure 19 : Moyennes et erreurs standards des constantes hydrauliques à saturation ( $K_s$ ) par parcelle, mesurées par la méthode Simple anneau. BET : champ de betteraves. PDT : champ de pommes de terre. Prairie : Prairie permanente. X\_LS : champ X de texture limono-sableuse. X\_L : champ X de texture limoneuse.

### 3.2.1.1 Variabilité de la mesure

L'écart-type intra-parcelle de la parcelle PDT\_L est proche de l'écart-type total de tous les résultats (Tableau 17). De plus, l'écart-type intra-placette – de 30,81 mm/h pour la placette D5- est plus faible que celui au sein de la parcelle (109,58 mm/h).

*Tableau 17 : Valeurs des écart-types ( $\sigma$ ) intra-parcelle, intra-placette et pour l'ensemble des données de Ks mesurées par la méthode Simple anneau. Ces valeurs sont données pour la parcelle PDT\_L (champ de pommes de terre de texture limoneuse) et la placette D5 – qui est une des placettes de cette parcelle - car la placette D5 est la seule pour laquelle les échantillons ont été répétés plusieurs fois.*

| $\sigma$ (Parcelle PDT_L) | $\sigma$ (Placette D5) | $\sigma$ (total) |
|---------------------------|------------------------|------------------|
| 109,58 mm/h               | 30,81 mm/h             | 100,45 mm/h      |

## 3.2.2 Résultats de la méthode Ariane Chabert

Une mesure à conduit à une valeur très élevée (2460 mm/h) sur la placette C3 de la parcelle PDT\_LS qui présentait des fissures au niveau du sol pouvant expliquer une infiltration aussi grande. Cette valeur a été considérée comme aberrante et supprimée. Lors de la vérification des hypothèses nécessaires pour réaliser une analyse ANOVA, le QQ plot n'a pas permis de considérer que la distribution des résidus des valeurs d'infiltration ne la méthode Ariane Chabert suivait une loi normale. Une transformation racine carrée a été effectuée et a été considérée satisfaisante. Le test F de l'ANOVA II sur base d'un modèle linéaire employant la texture, le type de champ et leur interaction comme facteurs, indique que les effets de ces facteurs sont significatifs. Le coefficient de détermination montre que le modèle explique 74 % de la variabilité totale des mesures observées sur le terrain (Tableau 18).

*Tableau 18 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ) et résultat du test F (Prob. > F) de l'ANOVA II utilisant les facteurs Texture, Champ ainsi que leur interaction pour expliquer la racine carrée des valeurs d'infiltration mesurées par la méthode Ariane Chabert. « \* » indique que la p-valeur associée au test est significative (<0,05), c'est-à-dire qu'il y a au moins 95 % de chance que l'hypothèse nulle ne soit pas vérifiée.*

| Analyse de la variance |                    |
|------------------------|--------------------|
| <b>R<sup>2</sup></b>   | <b>Prob. &gt;F</b> |
| 0,7378                 | <.0001*            |
| <b>Effets</b>          | <b>Prob. &gt;F</b> |
| Texture                | 0,0275*            |
| Champ                  | <.0001*            |
| Texture*Champ          | <.0001*            |

Suite aux résultats significatifs de l'ANOVA, deux tests de Tukey ont été réalisés. Le premier a été réalisé pour comparer les parcelles et montre que l'infiltration est significativement plus grande sous la parcelle Prairie\_LS que sous les parcelles : PDT\_LS, PDT\_L, BET\_LS, et Prairie L (Figure 20). Il indique aussi que l'infiltration sous la parcelle BET\_L est significativement plus élevée que celle sous les parcelles Prairie\_L, PDT\_LS et PDT\_L. Le second test de Tukey a été réalisé pour comparer les différences d'infiltration entre les champs (Tableau 19). Il en résulte que l'infiltration sous le champ PDT est significativement plus faible que sous les champs Prairie et BET. Les infiltrations sous ces deux derniers ne sont pas distinctes entre elles. Il est important de noter que les p-valeurs dont sont déduites les relations dans ces deux tableaux font références à la racine carrée des infiltrations mesurée par la méthode Ariane Chabert. Les relations qui en découlent restent toutefois interprétables pour les valeurs non transformées des infiltrations.

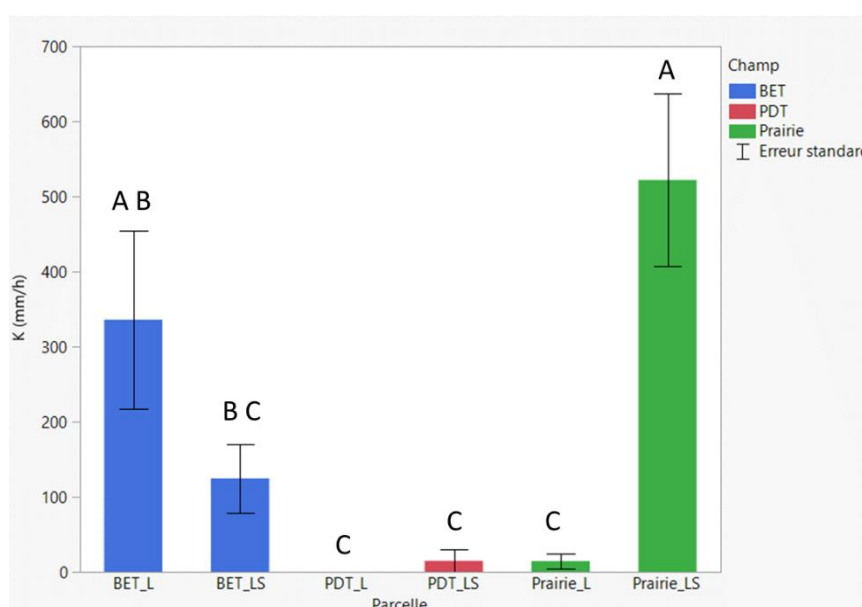


Figure 20 : Moyennes et erreurs standards des constantes hydrauliques (K) par parcelle, mesurées par la méthode Ariane Chabert. Les racines carrées de deux moyennes sont significativement différentes, si et seulement si, les lettres qui leur sont associées ne sont pas les mêmes. BET : champ de betteraves. PDT : champ de pommes de terre. Prairie : Prairie permanente. X\_LS : champ X de texture limono-sableuse. X\_L : champ X de texture limoneuse.

Tableau 19 : Résultats du test de Student (Prob. > |t|) et relations de grandeur entre les différents champs pour la méthode Ariane Chabert. Prairie : prairie permanente, PDT : champ de pommes de terre, BET : champ de betteraves. Le signe « > » dans la colonne « Relation » signifie : infiltration plus grande que. « \* » indique que la p-valeur associée au test est significative (<0,05), c'est-à-dire qu'il y a au moins 95 % de chance que l'hypothèse nulle ne soit pas vérifiée.

| Prob. >  t | Relation      |
|------------|---------------|
| 0,0004*    | Prairie > PDT |
| 0,0002*    | BET > PDT     |

### 3.2.2.1 Variabilité de la mesure

L'écart-type intra-placette représente 6,85 % de l'écart-type total des mesures (Tableau 20). L'écart-type de la parcelle PDT\_L est égal à zéro car l'ensemble des taux d'infiltration calculés pour cette parcelle était égal à 0 mm/h (sauf les valeurs supplémentaires utilisées pour calculer l'écart-type de la placette D5 qui n'ont pas été utilisées pour l'ANOVA<sup>7</sup>). Cette valeur de zéro provient du fait que le niveau de précision de la méthode Ariane Chabert n'a pas permis de calculer l'infiltration dans cette parcelle à ce moment. Afin de pouvoir quand même comparer les ordres de grandeur, l'écart-type de la parcelle PDT\_LS a été considéré pour étudier la variabilité de la méthode. Cette parcelle est la même que la PDT\_L mais avec une texture différente. Si l'on se réfère à ces valeurs, l'écart-type intra-placette est quasiment égal à l'écart-type intra-parcelle. Finalement, les variabilités intra-placette et intra-parcelle sont plus faibles que la variabilité totale.

*Tableau 20 : Valeurs des écart-types ( $\sigma$ ) intra-parcelle, intra-placette et inter-parcelle (total) à partir des données d'infiltration de la méthode Ariane Chabert. Ces valeurs sont données pour la parcelle PDT\_L et la placette D5 – qui est une des placettes de cette parcelle – car la placette D5 est la seule pour laquelle les échantillons ont été répétés plusieurs fois. En raison d'une valeur nulle pour l'écart-type de la parcelle PDT\_L, celui de la parcelle PDT\_LS (du même champ mais de texture différente) a été rajoutée pour donner un ordre de grandeur. PDT\_L : champ de pommes de terre de texture limoneuse. PDT\_LS : champ de pommes de terre de texture limono-sableuse.*

| $\sigma$ (Parcelle PDT_L) | $\sigma$ (Parcelle PDT_LS) | $\sigma$ (Placette D5) | $\sigma$ (total) |
|---------------------------|----------------------------|------------------------|------------------|
| 0 mm/h                    | 14,64 mm/h                 | 16, 97 mm/h            | 247,89 mm/h      |

### 3.2.3 Résultats de la méthode Maison

Pour rappel, la méthode Maison a été utilisée pour mesurer l'infiltration uniquement sur deux champs : la prairie permanente et le champ de pommes de terre. Le QQ plot n'a pas permis de considérer que la distribution des résidus des valeurs d'infiltration suivait une loi normale. Une transformation racine carrée a donc été effectuée et a été considérée satisfaisante. Le test F de l'ANOVA II sur base d'un modèle linéaire employant la texture, le type de champ et leur interaction comme facteurs, indique que les effets du facteur Champ et de son interaction avec la texture sont significatifs (Tableau 21). Le modèle linéaire explique 80% de la variabilité totale observée entre les valeurs d'infiltration. Bien que l'effet de la texture ne soit pas significatif, la p-valeur associée - de 0,051 - reste faible et est très proche de la valeur de 0,05 fixée pour le risque d'erreur.

<sup>7</sup> En effet, les mesures réalisées un autre jour pour calculer l'écart-type intra-placette n'étaient pas égales à zéro comme c'était le cas pour celles utilisées dans l'ANOVA.

Tableau 21 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ) et résultat du test F (Prob. > F) de l'ANOVA II utilisant les facteurs Texture, Champ ainsi que leur interaction pour expliquer la racine carrée des valeurs d'infiltrométrie mesurée par la méthode Maison. « \* » indique que la p-valeur associée au test est significative (<0,05), c'est-à-dire qu'il y a au moins 95 % de chance que l'hypothèse nulle ne soit pas vérifiée.

| Analyse de la variance |                    |
|------------------------|--------------------|
| <b>R<sup>2</sup></b>   | <b>Prob. &gt;F</b> |
| 0,7993                 | <.0001*            |
| <b>Effets</b>          | <b>Prob. &gt;F</b> |
| Texture                | 0,0501             |
| Champ                  | <.0001*            |
| Texture*Champ          | 0,0484*            |

Suite aux résultats significatifs de l'ANOVA, deux tests de Tukey ont été réalisés. Le premier concerne la comparaison des valeurs d'infiltration entre les parcelles. Il montre que la parcelle Prairie\_LS infiltre plus que la parcelle Prairie\_L et que les deux parcelles du champ PDT (PDT\_LS et PDT\_L ; Figure 21). Les valeurs d'infiltration de la parcelle Prairie\_L sont aussi plus élevées que celles des deux parcelles du champ PDT. Le second test de Tukey a été réalisé pour comparer les différences d'infiltration entre les champs. Résumant les différences observées avec le premier test, celui-ci indique que la prairie permanente infiltre plus que le champ de pommes de terre (Tableau 22). Il est important de noter que les p-valeurs dont sont déduites les relations dans ces deux tableaux font références à la racine carrée des infiltrations mesurée par la méthode Maison. Les relations qui en découlent restent toutefois interprétables pour les valeurs non transformées des infiltrations.

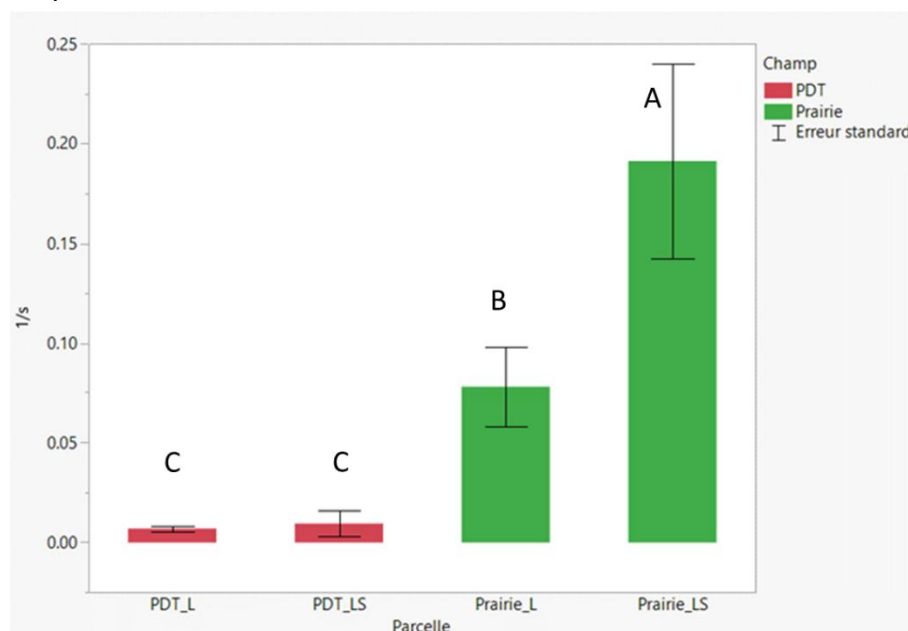


Figure 21 : Moyennes et erreurs standards des mesures d'infiltration (1/s) par parcelle, mesurées par la méthode Maison. Les racines carrées de deux moyennes sont significativement différentes, si et seulement si, les lettres qui leur sont associées ne sont pas les mêmes. PDT : champ de pommes de terre. Prairie : Prairie permanente. X\_LS : champ X de texture limoneuse-sableuse. X\_L : champ X de texture limoneuse.

Tableau 22 : Résultats du test de Student (Prob. > |t|) et relation de grandeur entre les différents champs pour la méthode Maison. Prairie : prairie permanente, PDT : champ de pommes de terre. Le signe « > » dans la colonne « Relation » signifie : infiltration plus grande que. « \* » indique que la p-valeur associée au test est significative (<0,05), c'est-à-dire qu'il y a au moins 95 % de chance que l'hypothèse nulle ne soit pas vérifiée.

| Prob. >  t | Relation      |
|------------|---------------|
| <.0001*    | Prairie > PDT |

### 3.2.3.1 Variabilité de la mesure

Les écart-types intra-placette et intra-parcelle sont assez similaires. Ils représentent respectivement 6 et 7 % de l'écart-type total entre les mesures (Tableau 23).

Tableau 23 : Valeurs des écart-types ( $\sigma$ ) intra-parcelle, intra-placette et pour l'ensemble des données d'infiltrométrie pour la méthode Maison. Ces valeurs sont données pour la parcelle PDT\_L et la placette D5 – qui est une des placettes de cette parcelle – car la placette D5 est la seule pour laquelle les échantillons ont été répétés plusieurs fois. PDT\_L : parcelle du champ de pommes de terre de texture limoneuse.

| $\sigma$ (Parcelle PDT_L) | $\sigma$ (Placette D5)   | $\sigma$ (total)         |
|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0,0069 sec <sup>-1</sup>  | 0,0057 sec <sup>-1</sup> | 0,0940 sec <sup>-1</sup> |

## 3.2.4 Corrélation entre les méthodes qui évaluent la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol

La méthode Ariane Chabert et la méthode Maison sont positivement corrélées (Tableau 24 ; Annexe 9) alors que la méthode Simple Anneau n'est corrélée avec aucune des deux autres méthodes.

Tableau 24 : Corrélation et p-valeur associée entre la méthode Maison et Ariane Chabert. « \* » indique que la p-valeur associée au test est significative (<0,05), c'est-à-dire qu'il y a au moins 95 % de chance que l'hypothèse nulle ne soit pas vérifiée.

| Méthodes          | Corrélation | P-valeur |
|-------------------|-------------|----------|
| Maison A. Chabert | 0,6126      | 0,0053*  |

---

## 3.3 Résultats des méthodes qui évaluent la résistance du sol à la compaction

---

### 3.3.1 Résultats de la mesure de densité apparente par des cylindres de Kopecky

L'ANOVA III réalisée pour étudier l'effet du champ, de la texture et de la profondeur sur les valeurs de densité apparente montre que ces trois effets sont significatifs (Tableau 25). L'ANOVA montre aussi qu'il y a un effet d'interaction significatif entre le type de champ et la profondeur.

*Tableau 25 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ) et résultat du test F (Prob. > F) de l'ANOVA III utilisant les facteurs texture, Champ et profondeur ainsi que leurs interactions pour expliquer les valeurs de densité apparente mesurées. « \* » indique que la p-valeur associée au test est significative (<0,05), c'est-à-dire qu'il y a au moins 95 % de chance que l'hypothèse nulle ne soit pas vérifiée.*

| Analyse de la variance   |          |
|--------------------------|----------|
| $R^2$                    | Prob. >F |
| 0,4340                   | <.0001*  |
| Effets                   | Prob. >F |
| Texture                  | 0,0319*  |
| Champ                    | 0,0011*  |
| Profondeur               | <.0001*  |
| Texture*Champ            | 0,2070   |
| Profondeur*Champ         | 0,0153*  |
| Profondeur*Texture       | 0,3850   |
| Profondeur*Texture*Champ | 0,4234   |

Suite aux résultats de l'ANOVA III, deux tests de Tukey ont été réalisés. Le premier a pour but de comparer les valeurs moyennes de densité apparente par parcelle. Celui-ci indique que les parcelles en prairie ont toutes les deux des valeurs moyennes de densité apparente plus faibles que les parcelles PDT\_LS et BET\_LS (Figure 22). Le deuxième test compare les valeurs moyennes de densité apparente des champs entre eux (Tableau 26). Ce test indique que la prairie a une densité apparente moyenne significativement plus faible que le champ de betteraves et que celui de pommes de terre.

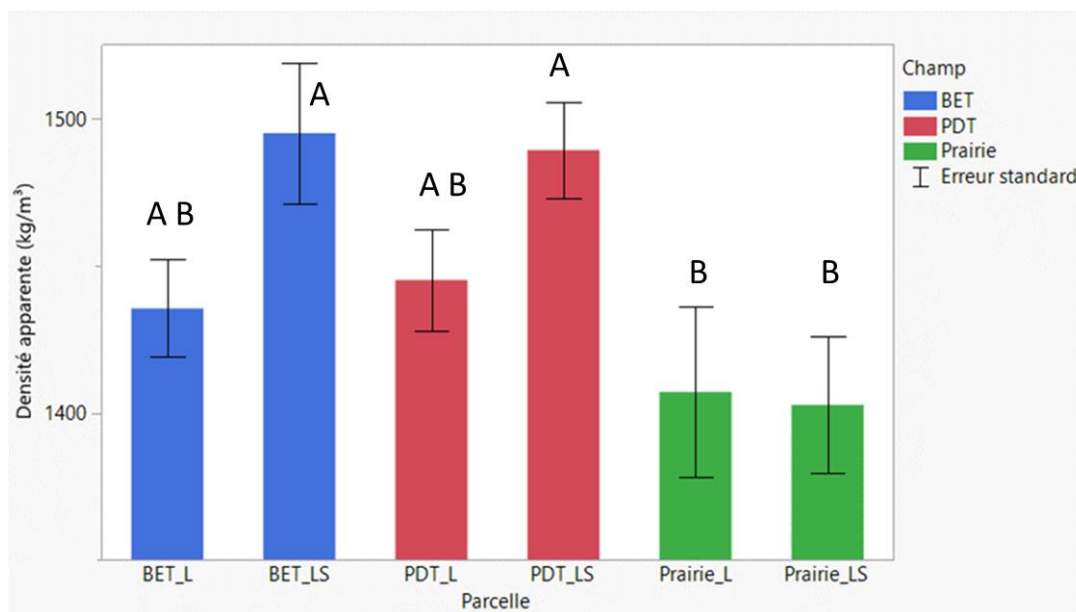


Figure 22 : : Moyennes et erreurs standards des mesures de densité apparente du sol sur 30 cm de profondeur par parcelle. Deux moyennes sont significativement différentes, si et seulement si, les lettres qui leur sont associées ne sont pas les mêmes. BET : champ de betteraves. PDT : champ de pommes de terre. Prairie : Prairie permanente. X\_LS : champ X de texture limono-sableuse. X\_L : champ X de texture limoneuse.

Tableau 26 : Résultats du test de Student (Prob. > |t|) et relations de grandeur entre les différents champs par rapport à leur densité apparente. Prairie : prairie, BET : champ de betteraves, PDT : champ de pommes de terre. Le signe « < » dans la colonne « Relation » signifie : densité apparente plus petite que. « \* » indique que la p-valeur associée au test est significative (<0,05), c'est-à-dire qu'il y a au moins 95 % de chance que l'hypothèse nulle ne soit pas vérifiée.

| Prob. >  t | Relation      |
|------------|---------------|
| 0,0044*    | Prairie < BET |
| 0,0031*    | Prairie < PDT |

Les résultats des densités apparente du sol par rapport à la profondeur montrent qu'à toutes les profondeurs, la densité apparente est plus faible sous la prairie (Figure 23). Pour la prairie, la densité augmente fortement de 0-5 à 10-15 cm puis semble se stabiliser, quel que soit la texture. Sous le champ de betterave, la densité augmente progressivement avec la profondeur, avec toutefois une diminution à 20-25 cm observée pour les deux textures. La densité apparente du sol est la plus faible en surface et la plus élevée à la profondeur maximale, quel que soit la texture. Pour le champ de pomme de terre, les variations de densité apparente du sol en fonction de la profondeur sont les plus faibles, surtout dans le cas de la parcelle limoneuse (PDT\_L).



Figure 23 : Moyennes et erreurs standards des mesures de densité apparente du sol en fonction de la profondeur pour chaque parcelle. BET : champ de betterave. PDT : champ de pommes de terre. Prairie : Prairie permanente. X\_LS : champ X de texture limono-sableuse. X\_L : champ X de texture limoneuse.

### 3.3.1.1 Variabilité de la mesure

L'écart-type intra-placette équivaut à 66 % de l'écart-type total et à 86% de l'écart-type intra-parcelle (Tableau 27). L'écart-type intra-parcelle, lui aussi, représente une grande partie de l'écart-type total (77%).

Tableau 27 : Valeurs des écart-types ( $\sigma$ ) intra-parcelle, intra-placette et pour l'ensemble des mesures de densité apparente. Ces valeurs sont données pour la parcelle PDT\_L (champ de pommes de terre de texture limoneuse) et la placette D5 – qui est une des placettes de cette parcelle - car la placette D5 est la seule pour laquelle les échantillons ont été répétés plusieurs fois.

| $\sigma$ (Parcelle PDT_L) | $\sigma$ (Placette D5)  | $\sigma$ (total)         |
|---------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 94,10 Kg/m <sup>3</sup>   | 80,68 Kg/m <sup>3</sup> | 121,84 Kg/m <sup>3</sup> |

### 3.3.2 Résultats du pénétromètre digital

Pour rappel, les résultats du pénétromètre digital représentent la pression nécessaire à exercer pour pénétrer de 1 cm dans le sol. Comme pour les mesures de densité apparente, l'impact du type de champ, de la profondeur et de leur interaction sont des effets significatifs lorsque l'on fait une ANOVA III (Tableau 28). En revanche, l'effet de la texture ainsi que celui des termes d'interaction qui y sont associés ne sont pas significatifs.

Tableau 28 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ) et résultat du test F (Prob. > F) de l'ANOVA III utilisant les facteurs Texture, Champ et Profondeur ainsi que leurs interactions pour expliquer les valeurs de pénétrométrie mesurées. « \* » indique que la p-valeur associée au test est significative (<0,05), c'est-à-dire qu'il y a au moins 95 % de chance que l'hypothèse nulle ne soit pas vérifiée.

| Analyse de la variance   |          |
|--------------------------|----------|
| $R^2$                    | Prob. >F |
| 0,7778                   | <.0001*  |
| Effets                   | Prob. >F |
| Texture                  | 0,3171   |
| Champ                    | <.0001*  |
| Profondeur               | <.0001*  |
| Texture*Champ            | 0,4902   |
| Profondeur*Champ         | <.0001*  |
| Profondeur*Texture       | 0,7219   |
| Profondeur*Texture*Champ | 0,8095   |

Etant donné l'effet significatif du facteur Champ sur les valeurs de pénétrométrie, un test de Tukey a été réalisé. Ce test montre que les valeurs de résistance à la pénétration sous la prairie et le champ de betteraves sont plus élevées que celles sous le champ de pommes de terre (Tableau 29 ; Figure 24).

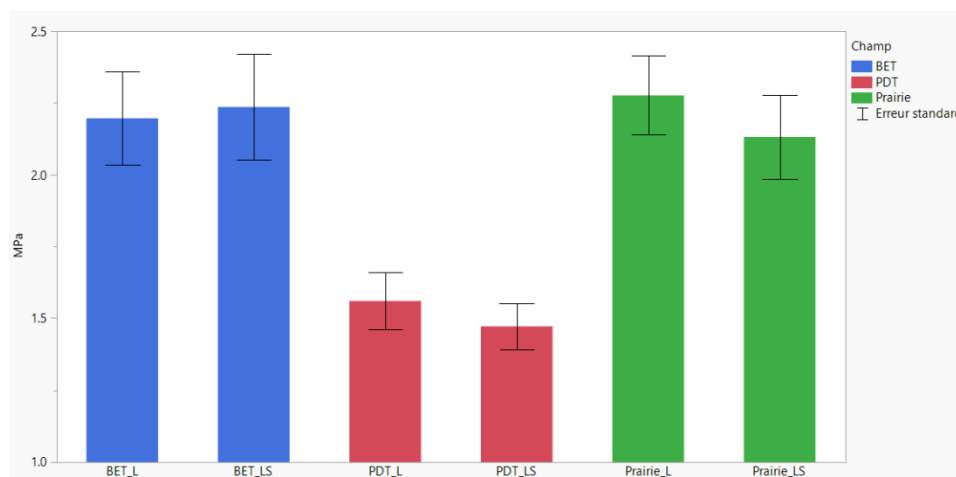


Figure 24 : Moyennes et erreurs standards des pressions moyennes nécessaires (MPa) pour pénétrer de 1 cm dans le sol entre 0 et 30 cm de profondeur. BET : champ de betteraves. PDT : champ de pommes de terre. Prairie : Prairie permanente. X\_LS : champ X de texture limono-sableuse. X\_L : champ X de texture limoneuse.

Tableau 29 : Résultats du test de Student (Prob. > |t|) et relations de grandeur entre les différents champs par rapport à leur résistance à la pénétration. Prairie : prairie, BET : champ de betteraves, PDT : champ de pommes de terre. Le signe « > » dans la colonne « Relation » signifie : résistance à la pénétration plus grande que. « \* » indique que la p-valeur associée au test est significative (<0,05), c'est-à-dire qu'il y a au moins 95 % de chance que l'hypothèse nulle ne soit pas vérifiée.

| Prob. >  t | Relation      |
|------------|---------------|
| <.0001*    | Prairie > PDT |
| <.0001*    | BET > PDT     |

Les profils de pénétrométrie en fonction de la profondeur de la prairie ressemblent à ceux observés pour le champ de betteraves (Figure 25). Dans les deux cas, la pression nécessaire pour pénétrer augmente avec la profondeur. Une augmentation légèrement plus grande au niveau des profondeurs de 25- 30 cm est toutefois observée dans le cas du champ de betterave par rapport à la prairie, et en particulier sur la parcelle BET\_LS. Tout comme pour les mesures de densité apparente, l'étendue du domaine des valeurs que prennent les parcelles du champ de pommes de terre en fonction de la profondeur est plus faible que celle observée sur les autres champs. Finalement, les profils au sein d'un même champ sont assez proches, peu importe la texture considérée.

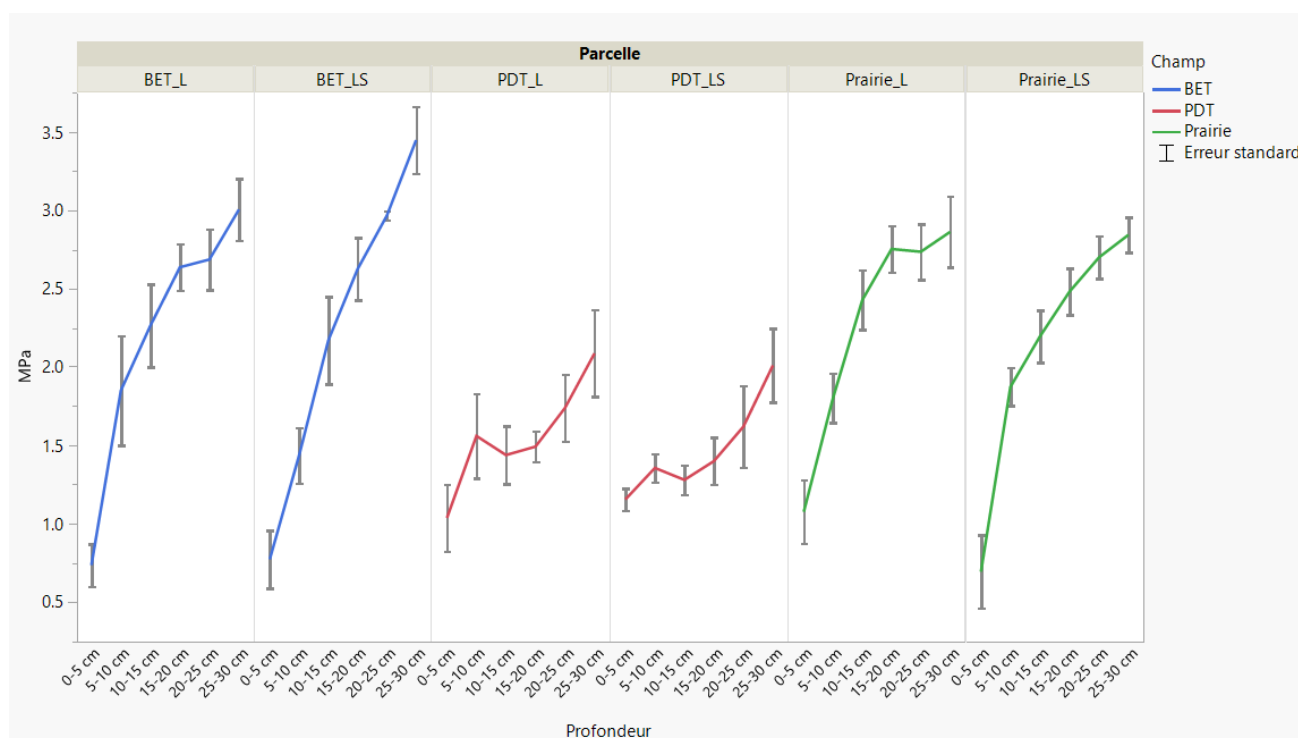


Figure 25 : Moyennes et erreurs standards des pressions moyennes nécessaires (MPa) pour pénétrer de 1 cm dans le sol en fonction de la profondeur pour chaque parcelle. BET : champ de betteraves. PDT : champ de pommes de terre. Prairie : Prairie permanente. X\_LS : champ X de texture limono-sableuse. X\_L : champ X de texture limoneuse.

### 3.3.2.1 Variabilité de la mesure

L'écart-type intra-placette vaut un peu plus que la moitié de celui intra-parcelle et l'écart-type intra-parcelle, lui-même, représente une partie assez grande de l'écart-type total (de l'ordre de 2/3 dans le cas de la parcelle PDT\_L ; Tableau 30).

Tableau 30 : Valeurs des écart-types ( $\sigma$ ) intra-parcelle, intra-placette et pour l'ensemble des mesures de pénétrométrie. Ces valeurs sont données pour la parcelle PDT\_L (champ de pommes de terre de texture limoneuse) et la placette D5 – qui est une des placettes de cette parcelle – car la placette D5 est la seule pour laquelle les échantillons ont été répétés plusieurs fois.

| $\sigma$ (Parcelle PDT_L) | $\sigma$ (Placette D5) | $\sigma$ (total) |
|---------------------------|------------------------|------------------|
| 0,55 MPa                  | 0,30 MPa               | 0,82 MPa         |

### 3.3.3 Résultats de la méthode VESS

Le QQ plot n'a pas permis de considérer que la distribution des résidus des scores VESS suivait une loi normale. Une transformation réciproque a été effectuée et a été considérée satisfaisante. Le test F de l'ANOVA III sur base d'un modèle linéaire employant les facteurs Texture, Champ, Profondeur et leurs interactions, indique que tous les effets sont significatifs sauf ceux de la texture et de son interaction avec la profondeur et avec le facteur Champ (Tableau 31). Le modèle linéaire choisit est intéressant puisqu'il explique 83, 76 % de la variabilité totale observées entre les scores VESS. Bien que significative, la p-valeur associée au test F concernant l'effet de l'interaction entre la texture et la profondeur est toutefois plus grande - donc moins significative - que les p-valeurs des autres effets.

Tableau 31 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ) et résultat du test F (Prob. > F) de l'ANOVA III utilisant les facteurs Texture, Champ et Profondeur ainsi que leurs interactions pour expliquer les scores VESS. « \* » indique que la p-valeur associée au test est significative (<0,05), c'est-à-dire qu'il y a au moins 95 % de chance que l'hypothèse nulle ne soit pas vérifiée.

| Analyse de la variance   |          |
|--------------------------|----------|
| $R^2$                    | Prob. >F |
| 0,8376                   | <.0001*  |
| Effets                   | Prob. >F |
| Texture                  | 0,4239   |
| Champ                    | <.0001*  |
| Profondeur               | <.0001*  |
| Texture*Champ            | <.0001*  |
| Profondeur*Champ         | <.0001*  |
| Profondeur*Texture       | 0,0294*  |
| Profondeur*Texture*Champ | 0,3571   |

La Figure 26 montre les scores attribués à chacune des parcelles. Pour rappel, les scores VESS varient de 1 (meilleure structure) à 5 (moins bonne structure). Puisque les effets du facteur Champ et de son interaction avec le facteur Texture sont significatifs, deux tests de Tukey ont été réalisés pour comparer les scores moyens entre les parcelles et entre les champs (Figure 26 ; Tableau 32). Les résultats de ces tests indiquent que les parcelles de la prairie obtiennent des scores VESS inférieurs aux parcelles des champs de pommes de terre et de betteraves. Les comparaisons entre les parcelles des champs de betteraves et de pommes de terre sont plus nuancées puisque les parcelles PDT\_L et BET\_LS ont des scores VESS plus faibles que les parcelles PDT\_LS et BET\_L. Il est important de noter que les p-valeurs dont sont déduites les relations dans cette figure et ce tableau font références à la réciproque des scores VESS. Les relations qui sont décrites dans le Tableau 32 ont par contre été retransformées afin d'avoir une interprétation en termes de scores VESS et pas de 1/scores VESS.

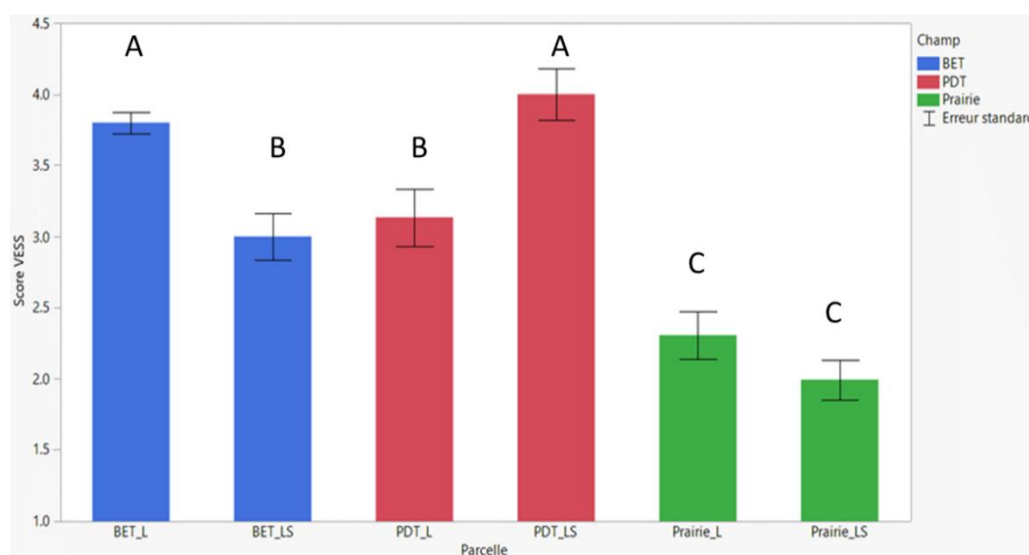


Figure 26 : Moyennes et erreurs standards des scores VESS sur 30 cm de profondeur par parcelle. Deux moyennes sont significativement différentes, si et seulement si, les lettres qui leur sont associées ne sont pas les mêmes. BET : champ de betteraves. PDT : champ de pommes de terre. Prairie : Prairie permanente. X\_LS : champ X de texture limono-sableuse. X\_L : champ X de texture limoneuse.

Tableau 32 : Résultats du test de Student (Prob. > |t|) et relations de grandeur entre les différents champs par rapport à leur score VESS. Prairie : Prairie permanente, BET : champ de betteraves, PDT : champ de pommes de terre. Le signe « < » dans la colonne « Relation » signifie : score VESS plus petit que. « \* » indique que la p-valeur associée au test est significative (<0,05), c'est-à-dire qu'il y a au moins 95 % de chance que l'hypothèse nulle ne soit pas vérifiée.

| Prob. >  t | Relation      |
|------------|---------------|
| <.0001*    | Prairie < BET |
| <.0001*    | Prairie < PDT |

Les scores de la méthode VESS en fonction de la profondeur sont représentés pour chaque parcelle à la Figure 27. Lorsque les mesures ont été prises sur le champ de betteraves, la culture de couverture avait été détruite juste avant et un passage au strip-till avait été entrepris. L'ensemble du profil sur 30 cm de profondeur était homogène d'un point de vue visuel. Ceci explique pourquoi il n'y a pas de variation au niveau des scores VESS en fonction de la profondeur pour ces deux parcelles. Concernant la prairie, les scores VESS pour les deux parcelles de textures différentes évoluent de la même manière en fonction de la profondeur. Dans les deux cas, de faibles scores sont observés entre 0 et 10 cm de profondeur. Puis, l'évolution des scores tend à augmenter avec la profondeur, présentant des valeurs plus grandes entre 20 et 30 cm. Pour ce qui est du champ de pommes de terre (parcelles PDT\_LS et PDT\_L), le profil des scores VESS varie en fonction de la texture. D'une part, la texture limono-sableuse comporte trois couches : à 0-10, 10-20 et 20-30 cm de profondeur. Ces trois couches ont chacune un score VESS différent, avec celle du milieu qui a la valeur la plus élevée. D'autre part, la texture limoneuse comporte deux couches : à 0-10 et 10-30 cm de profondeur. Parmi ces deux couches, c'est la plus profonde qui a le score le plus élevé.

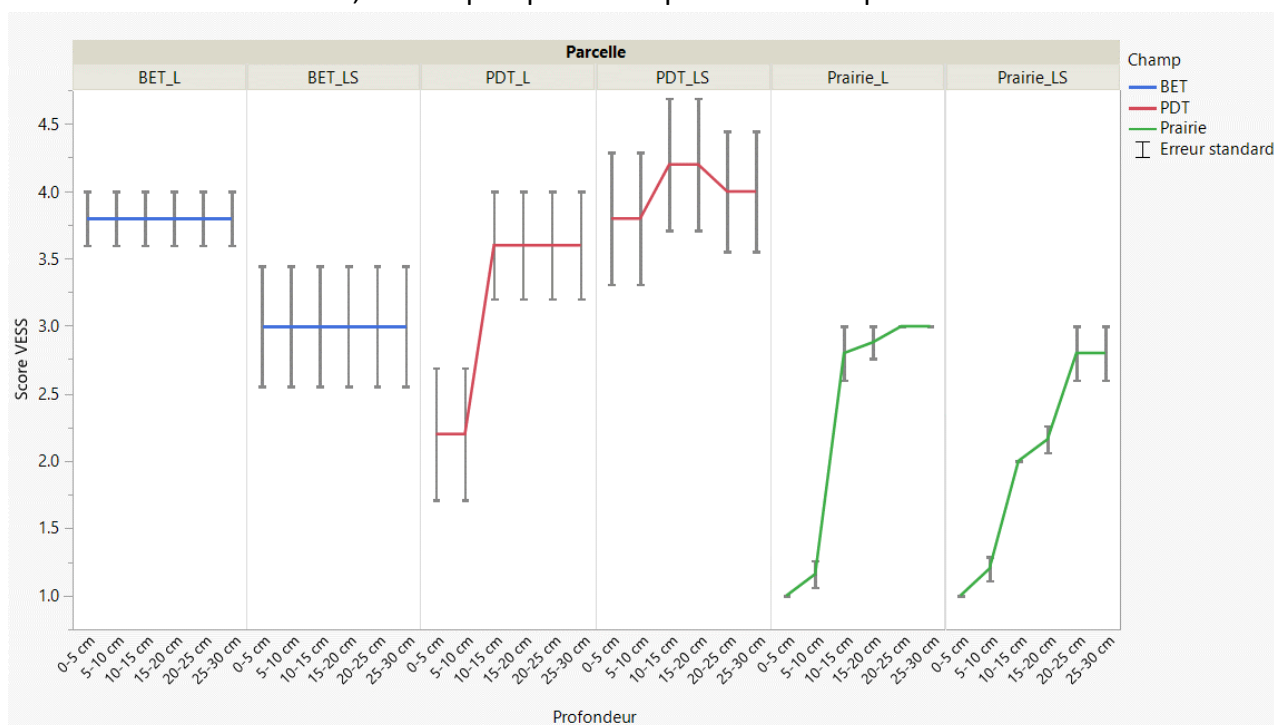


Figure 27 : Moyennes et erreurs standards des scores VESS en fonction de la profondeur pour chaque parcelle. BET : champ de betteraves. PDT : champ de pommes de terre. Prairie : Prairie permanente. X\_LS : champ X de texture limono-sableuse. X\_L : champ X de texture limoneuse.

### 3.3.4 Résultats de la méthode Maison

Etant donné l'hétérogénéité au niveau des variances, une transformation a été effectuée sur les résultats pour respecter l'hypothèse d'homoscédasticité des résidus. La réciproque des valeurs de la méthode Maison a donc été calculée pour réaliser une ANOVA II (Tableau 33). D'après cette analyse, seul l'effet de l'interaction entre les facteurs Texture et Champ est significatif.

Tableau 33: Coefficient de détermination ( $R^2$ ) et résultat du test F (Prob. > F) de l'ANOVA II utilisant les facteurs Texture et Champ ainsi que leur interaction pour expliquer les résultats de profondeur d'enfoncement de la méthode Maison. « \* » indique que la p-valeur associée au test est significative (<0,05), c'est-à-dire qu'il y a au moins 95 % de chance que l'hypothèse nulle ne soit pas vérifiée.

| Analyse de la variance |          |
|------------------------|----------|
| $R^2$                  | Prob. >F |
| 0,4280                 | 0,0145*  |
| Effets                 | Prob. >F |
| Texture                | 0,0770   |
| Champ                  | 0,2625   |
| Texture*Champ          | 0,0111*  |

Pour rappel, la méthode Maison consiste à mesurer la profondeur d'enfoncement d'une bouteille dans le sol quand elle est lâchée d'1 m de hauteur. La Figure 28 reprend les profondeurs moyenne d'enfoncement par parcelle. Suite aux résultats de l'ANOVA, un test de Tukey a été réalisé pour comparer les profondeurs d'enfoncement entre les différentes parcelles. Celui-ci indique que la parcelle PDT\_LS résiste plus à la pénétration que les deux parcelles du champ de betterave et que la parcelle PDT\_L. Il est important de noter que les p-

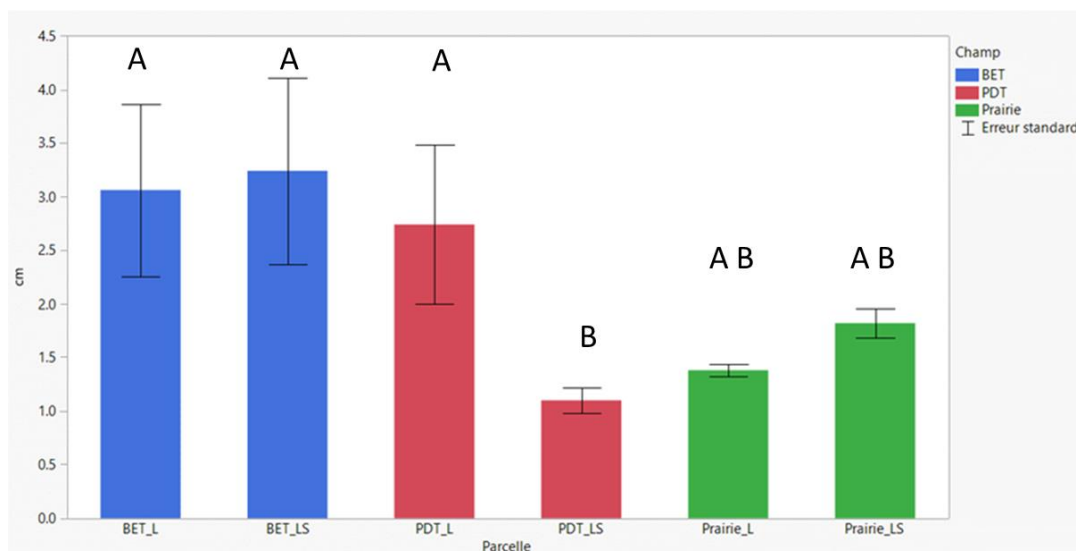


Figure 28 : Profondeurs moyennes d'enfoncement de la bouteille et erreurs standards par parcelle pour la méthode Maison. Deux moyennes sont significativement différentes, si et seulement si, les lettres qui leur sont associées ne sont pas les mêmes. BET : champ de betteraves. PDT : champ de pommes de terre. Prairie : Prairie permanente. X\_LS : champ X de texture limono-sableuse. X\_L : champ X de texture limoneuse.

valeurs dont sont déduites les relations dans ce tableau font références à la réciproque des valeurs de la méthode Maison.

### 3.3.4.1 Variabilité de la mesure

L'écart-type des différentes parcelles varie fortement. Celui de la parcelle PDT\_L qui est considérée ici - d'une valeur de 1,66 cm - , fait partie des plus élevés avec ceux des parcelles BET\_LS et BET\_L. On peut voir que dans le cas de ces parcelles l'écart-type intra-parcelle est aussi grand que l'écart-type total (Tableau 34). En revanche, si l'on s'intéresse à l'écart-type de la parcelle PDT\_LS par exemple - d'une valeur de 0,27 cm - , on remarque que celui-ci est plus faible que l'écart-type total des mesures. Finalement, si l'on considère que l'écart-type intra-placette est le même pour chaque placette, celui-ci représente 17 % de l'écart-type total.

*Tableau 34 : Valeurs des écart-types ( $\sigma$ ) intra-parcelle, intra-placette et pour l'ensemble des mesures de la méthode Maison. Ces valeurs sont données pour la parcelle PDT\_L et la placette D5 – qui est une des placettes de cette parcelle - car la placette D5 est la seule pour laquelle les échantillons ont été répétés plusieurs fois.*

| $\sigma$ (Parcelle PDT_L) | $\sigma$ (Placette D5) | $\sigma$ (total) |
|---------------------------|------------------------|------------------|
| 1,66 cm                   | 0,25 cm                | 1,44 cm          |

### 3.3.5 Corrélation entre les méthodes

Deux tests de corrélation ont été entrepris. Le premier, prend en compte les valeurs sur 30 cm de profondeur pour chaque méthode (Tableau 35 ; Annexe 10). Dans celui-ci, les corrélations des méthodes avec la méthode Maison n'ont pas été calculées puisque celle-ci n'étudie l'état de compaction que sur les 5 premiers centimètres du sol. Les résultats de ce premier test indiquent que les mesures de densité apparente sont corrélées positivement avec celles de pénétrométrie et celles de la méthode VESS. Il faut noter que le calcul de corrélation étudie également la corrélation entre les valeurs que prennent les méthodes en fonction de la profondeur.

*Tableau 35 : Corrélations de Pearson et p-valeurs associées entre les mesures de densité apparente avec celles de pénétrométrie et de la méthode VESS en tenant compte de la profondeur entre 0 et 30 cm. « \* » indique que la p-valeur associée au test est significative (<0,05), c'est-à-dire qu'il y a au moins 95 % de chance que l'hypothèse nulle ne soit pas vérifiée.*

|              | Méthodes          | Corrélation | P-valeur |
|--------------|-------------------|-------------|----------|
| Pénétromètre | Densité apparente | 0,3076      | <.0001*  |
| VESS         | Densité apparente | 0,3790      | <.0001*  |

Afin d'étudier la corrélation entre les méthodes sans l'effet de la profondeur ainsi que de pouvoir calculer les corrélations des différentes méthodes avec la méthode Maison, une seconde étude de corrélation a été entreprise uniquement avec les valeurs de 0 à 5 cm de profondeur (Tableau 36). Celle-ci révèle qu'il n'y a plus que la méthode VESS qui est positivement corrélée avec la méthode de densité apparente.

*Tableau 36 : Corrélation de Pearson et p-valeur associée entre les mesures de densité apparente avec celles de la méthode VESS en tenant compte de la profondeur entre 0 et 5 cm. « \* » indique que la p-valeur associée au test est significative (<0,05), c'est-à-dire qu'il y a au moins 95 % de chance que l'hypothèse nulle ne soit pas vérifiée.*

| Méthodes |                   | Corrélation | P-valeur |
|----------|-------------------|-------------|----------|
| VESS     | Densité apparente | 0,5451      | 0,0018*  |

---

## 3.4 Résultats des méthodes de mesure qui évaluent la stabilité des agrégats du sol

---

### 3.4.1 Résultats de la méthode Le Bissonnais

La méthode Le Bissonnais a pu être réalisée uniquement sur les deux parcelles de prairie en raison des mesures de confinement imposées par l'épidémie du COVID-19. Ces deux parcelles obtiennent des valeurs de diamètres moyens pondérés relativement proches - 1,68 et 1,98 mm - qui traduisent des sols stables, rarement sujets à la battance et avec des risques limités de ruissellement et d'érosion diffuse (Figure 29). C'est la parcelle Prairie\_L qui obtient en moyenne un diamètre moyen pondéré de 1,98 mm, plus élevé que pour le sol de texture limono-sableuse. Cependant, la différence entre les deux moyennes de diamètres moyens pondérés n'est pas significative lorsque l'on effectue une l'ANOVA I - expliquant les valeurs de diamètres moyens pondérés à partir de la texture - ( $R^2 = 0,32$  ; Prob. > F = 0,0855).

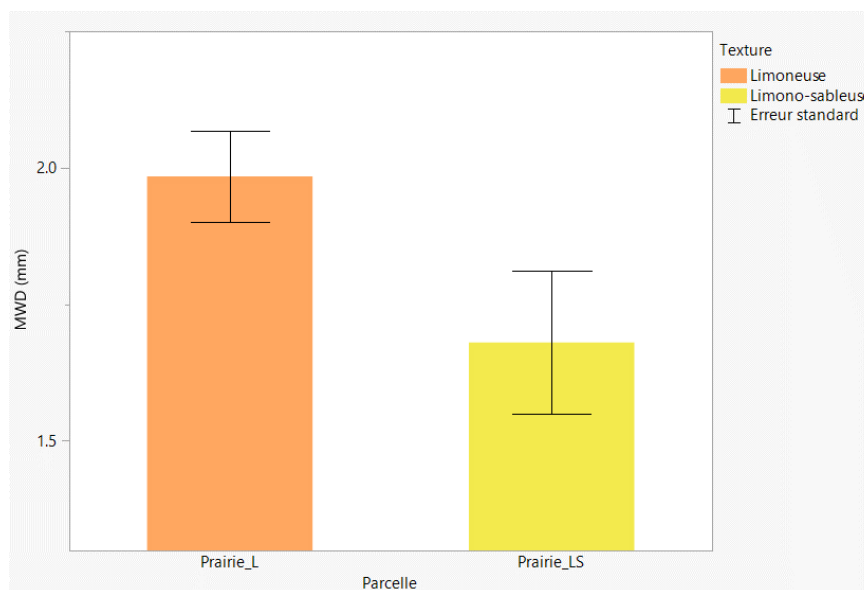


Figure 29 : Moyennes et erreurs standards des diamètres moyens pondérés (MWD) par parcelle, calculés par la méthode Le Bissonnais. Prairie\_L : parcelle de prairie avec un sol de texture limoneuse. Prairie\_LS : parcelle de prairie avec un sol de texture limono-sableuse.

### 3.4.2 Résultats de la méthode Ariane Chabert

Une ANOVA II a été réalisée pour étudier l'effet des facteurs Champ, Texture et de leur interaction sur les mesures de stabilité des agrégats évaluées par la méthode Ariane Chabert (Tableau 37). Ces trois effets sont significatifs et permettent ensemble d'expliquer 92,46 % de la variabilité observée entre les différentes mesures.

Tableau 37 : Coefficient de détermination ( $R^2$ ), résultat du test F (Prob. > F) de l'ANOVA II utilisant les facteurs Texture et Champ ainsi que leur interaction pour expliquer les valeurs de stabilité des agrégats évaluées par la méthode Ariane Chabert, et résultats du test F (Prob. > F) testant les effets des différents facteurs. « \* » indique que la p-valeur associée au test est significative (<0,05), c'est-à-dire qu'il y a au moins 95 % de chance que l'hypothèse nulle ne soit pas vérifiée.

| Analyse de la variance |                    |
|------------------------|--------------------|
| <b>R<sup>2</sup></b>   | <b>Prob. &gt;F</b> |
| 0,9246                 | <.0001*            |
| <b>Effets</b>          | <b>Prob. &gt;F</b> |
| Texture                | 0,0006*            |
| Champ                  | <.0001*            |
| Texture*Champ          | 0,0001*            |

Pour rappel, la stabilité des agrégats est évaluée par la méthode Ariane Chabert en étudiant la turbidité de l'eau à l'aide d'un tube de Secchi. Une valeur élevée indique que la profondeur jusqu'à laquelle on voit le disque de Secchi dans l'eau est grande, donc que la turbidité de l'eau est faible, ce qui serait indicateur d'une bonne stabilité des agrégats. Les résultats obtenus à l'aide de cette méthode sont représentés par parcelle dans la Figure 30. Puisque les effets du facteur Champ et de son interaction avec la texture sont significatifs, deux tests de Tukey ont été réalisés. Ceci dans le but de comparer les valeurs de profondeur à laquelle le tube de Secchi n'est plus visible entre les parcelles et entre les champs. Les résultats de ces tests indiquent que les parcelles de la prairie obtiennent des valeurs supérieures aux parcelles du champ de pommes de terre et de betteraves. De plus, la profondeur à laquelle on ne voit plus le disque de Secchi est plus grande pour la parcelle Prairie\_L que pour la parcelle Prairie\_LS (Figure 30 ; Tableau 38).

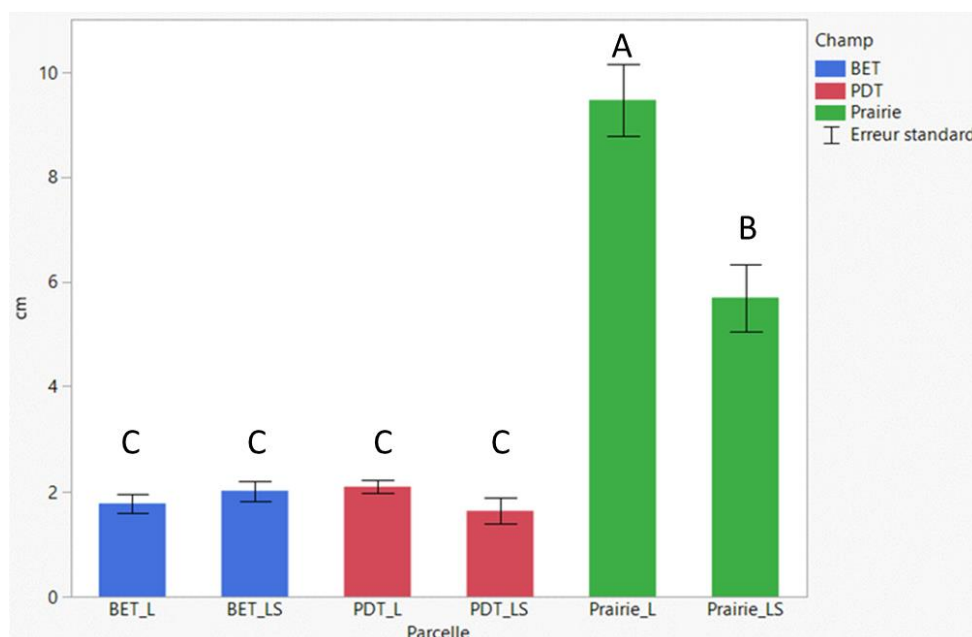


Figure 30 : Moyennes et erreurs standards des mesures de stabilité des agrégats par parcelle, mesurées par la méthode Ariane Chabert. Les valeurs sont mesurées en centimètres puisqu'elles indiquent la profondeur jusqu'à laquelle on voit le disque de Secchi dans l'eau. Des valeurs grandes sont indicatrices d'une bonne stabilité des agrégats. Deux moyennes sont significativement différentes, si et seulement si, les lettres qui leur sont associées ne sont pas les mêmes. BET : champ de betteraves. PDT : champ de pommes de terre. Prairie : Prairie permanente. X\_LS : champ X de texture limono-sableuse. X\_L : champ X de texture limoneuse.

Tableau 38 : Résultats du test de Student ( $\text{Prob.} > |t|$ ) et relations de grandeur entre les champs par rapport à leur stabilité mesurée par la méthode Ariane Chabert. BET : champ de betteraves. PDT : champ de pommes de terre. Prairie : Prairie permanente. Le signe « > » dans la colonne « Relation » signifie : plus grande stabilité des agrégats que. « \* » indique que la p-valeur associée au test est significative ( $<0,05$ ), c'est-à-dire qu'il y a au moins 95 % de chance que l'hypothèse nulle ne soit pas vérifiée.

| Prob. >  t | Relation      |
|------------|---------------|
| <.0001*    | Prairie > BET |
| <.0001*    | Prairie > PDT |

### 3.4.2.1 Variabilité de la mesure

Les valeurs des écart-types présentés dans le Tableau 39 montrent que l'écart-type intra-parcelles et intra-placettes sont bien plus faibles que l'écart-total puisqu'ils représentent respectivement 10 et 8 % de celui-ci.

Tableau 39 : Valeurs des écart-types ( $\sigma$ ) intra-parcelle, intra-placette et pour l'ensemble des mesures de la méthode Ariane Chabert. Ces valeurs sont données pour la parcelle PDT\_L et la placette D5 – qui est une des placettes de cette parcelle – car la placette D5 est la seule pour laquelle les échantillons ont été répétés plusieurs fois.

| $\sigma$ (Parcelle PDT_L) | $\sigma$ (Placette D5) | $\sigma$ (total) |
|---------------------------|------------------------|------------------|
| 0,26 cm                   | 0,31 cm                | 3,07 cm          |

### 3.4.3 Résultats de la méthode du Quanti-Slake Test

En raison de l'épidémie du COVID-19, les analyses du Quanti-Slake Test ont été réalisées uniquement sur les deux parcelles de prairie. Les résultats de ce test sont exprimés en masses relatives à 700 secondes, c'est-à-dire la masse de l'échantillon, 700 secondes après son immersion dans l'eau, par rapport à sa masse initiale. Ainsi, une valeur élevée de la masse relative à 700 secondes indique une meilleure stabilité des agrégats qu'une valeur plus faible. Parmi les deux parcelles de textures différentes, une très faible différence entre leur moyenne pourrait indiquer que le sol limoneux est plus stable que le sol limono-sableux (Figure 31). Une ANOVA à un facteur - la texture - rejette tout de même cette possibilité puisque l'effet de la texture n'est pas significatif sur la valeur des masses relatives mesurées à 700 secondes ( $R^2=0,10$  ; Prob. > F = 0,3599).

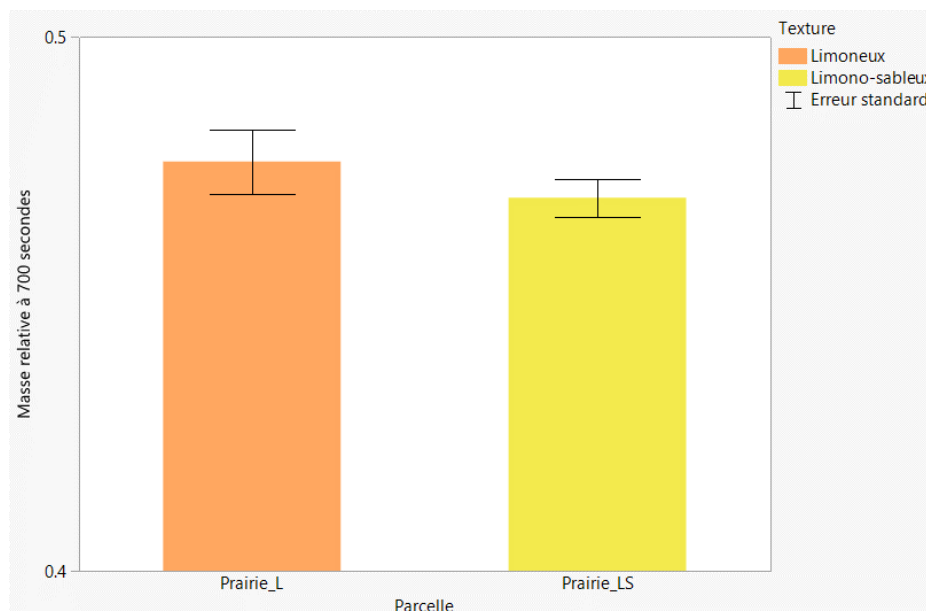


Figure 31 : Moyennes et erreurs standards des masses relatives par parcelle, mesurées à 700 sec par la méthode du Quanti-Slake Test. Prairie\_L: prairie permanente de texture limoneuse. Prairie\_LS: prairie permanente de texture limono-sableuse.

### 3.4.4 Résultats de la méthode VESS

La méthode VESS consiste à donner un score à chaque couche structurale observée en fonction d'observations de terrain à partir d'une bêche de 30 cm de profondeur. Ensuite, un score moyen est calculé en pondérant les scores de chaque couche par leur épaisseur. Etant donné que toutes les méthodes de mesure de stabilité des agrégats mesurent la stabilité en surface, si l'on veut comparer la méthode VESS avec toutes les autres il faut prendre la valeur du score attribué à la première couche. Ainsi, pour l'ensemble des analyses qui suivent, c'est

la valeur entre 0 et 5 centimètres de profondeur qui a été utilisée pour le score VESS (Figure 32). Cela n'impact pas énormément sur les différences observées entre les parcelles. En fait, considérer uniquement la couche de surface diminue surtout les valeurs observées pour les parcelles de la prairie puisque leur couche superficielle a un score de 1, étant donné sa forte teneur en matière organique. Pour rappel, les scores VESS vont de 1 à 5, de la meilleure structure à la moins bonne.

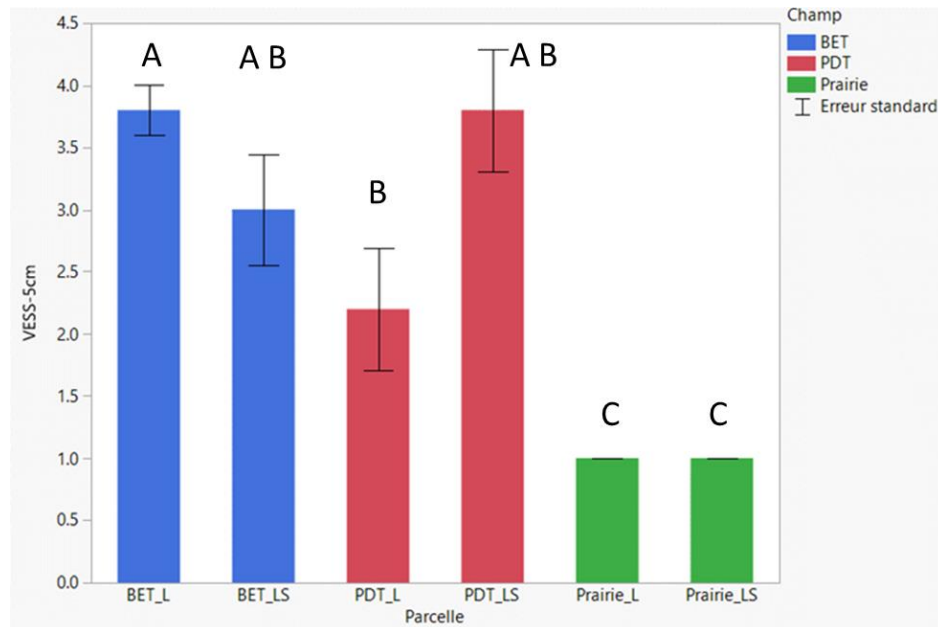


Figure 32 : Moyennes et erreurs standards des scores VESS moyens sur 5 cm de profondeur par parcelle. Les moyennes sont exprimées en scores VESS. Deux moyennes sont significativement différentes, si et seulement si, les lettres qui leur sont associées ne sont pas les mêmes. BET : champ de betteraves. PDT : champ de pommes de terre. Prairie : Prairie permanente. X\_LS : champ X de texture limono-sableuse. X\_L : champ X de texture limoneuse.

Les valeurs ne respectent pas les hypothèses de l'ANOVA puisque les variances varient entre les différentes parcelles. De plus, leur normalité est également contestable. Aucune transformation sur les valeurs de score VESS à 5 cm de surface ne permet de changer ces aspects. C'est pourquoi un test de Kruskal-Wallis a été utilisé. Ce test statistique qui ne nécessite pas les hypothèses de normalité et d'homoscédasticité sur les résidus est l'équivalent non-paramétrique de l'ANOVA à un facteur. Étant donné que l'analyse n'est pas possible avec deux facteurs, celui utilisé pour expliquer les scores VESS est le facteur « Parcelle ». Les résultats de ce test montrent qu'au moins une des parcelles a une valeur moyenne différente que les autres parcelles puisque l'hypothèse nulle est rejetée ( $p$ -valeur = 0,0004). La méthode de Wilcoxon nous permet de comparer chaque paire de parcelle entre elle, comme dans le cas d'un test de Tukey, pour savoir lesquelles sont différentes les unes des autres (Figure 32). Elle montre que les deux parcelles de prairie ont un score VESS inférieur à toutes les autres parcelles. Les résultats du test statistique montrent également que la parcelle BET\_L à un score VESS plus grand que la parcelle PDT\_L.

### 3.4.5 Résultats de la méthode USDA

Pour rappel, les scores USDA sont donnés en fonction du pourcentage d'agrégats qu'il reste après une immersion dans l'eau par rapport aux agrégats de départ. Ainsi, un score élevé indique un pourcentage élevé d'agrégats qui ne se sont pas désagrégés dans l'eau et donc une meilleure stabilité des agrégats. Les scores obtenus sont représentés par parcelle dans la Figure 33. On peut déjà y constater que les deux parcelles de prairie ont toutes les deux obtenues le score maximal de 6.

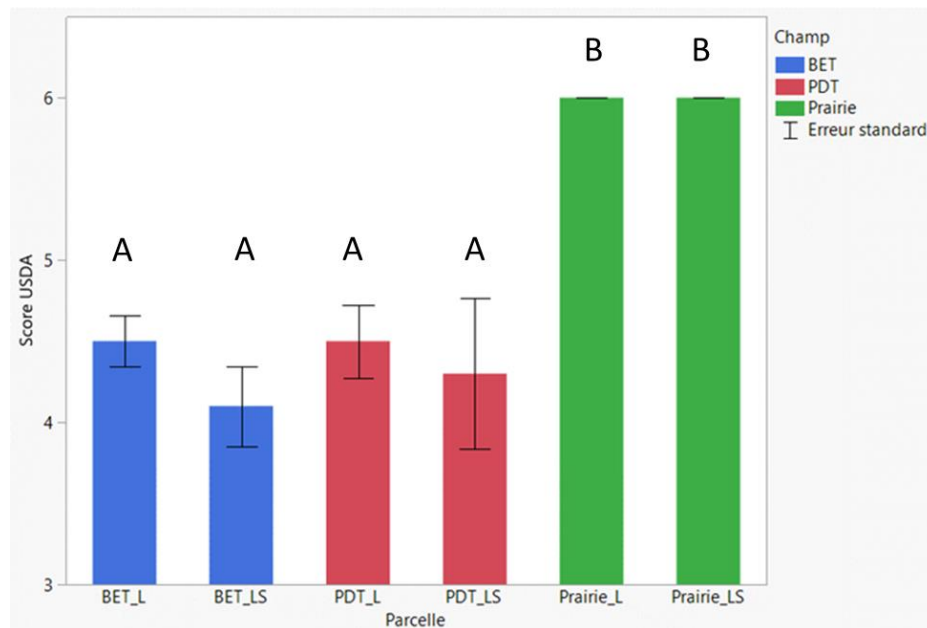


Figure 33 : Moyennes et erreurs standards des scores USDA par parcelle. Deux moyennes sont significativement différentes, si et seulement si, les lettres qui leur sont associées ne sont pas les mêmes. BET : champ de betteraves. PDT : champ de pommes de terre. Prairie : Prairie permanente. X\_LS : champ X de texture limono-sableuse. X\_L : champ X de texture limoneuse.

Puisque l'hypothèse d'homoscédasticité est rejetée et qu'aucune transformation permet d'améliorer cette propriété, une analyse non-paramétrique a été entreprise pour distinguer les valeurs des scores USDA entre les parcelles. La p-valeur de 0,0006 du test de Kruskal-Willis indique qu'au moins une des parcelles a un score USDA moyen différent des autres. Lorsque les moyennes des différentes parcelles sont comparées entre elles selon le test de Wilcoxon, on constate que les deux parcelles de prairie ont un plus grand score que les autres parcelles (Figure 33).

### 3.4.6 Corrélation entre les méthodes

Les méthodes USDA, Ariane Chabert et VESS sont corrélées entre-elles (Tableau 40 ; Annexe 11). La méthode VESS est corrélée négativement par rapport aux autres méthodes puisque l'échelle des scores VESS va dans le sens opposé à celles des scores USDA et des résultats de la méthode Ariane Chabert. Rappelons que si le Quanti-Slake test et la méthode Le Bissonnais ne sont pas corrélés avec les autres méthodes, c'est principalement dû au fait que les valeurs de ces deux tests ont été calculées uniquement sur les parcelles de prairie en raison des mesures de confinement imposées par l'épidémie du COVID-19.

*Tableau 40 : Corrélation et p-valeurs associées entre les méthodes USDA, VESS et Ariane Chabert pour la mesure de stabilité des agrégats. « \* » indique que la p-valeur associée au test est significative (<0,05), c'est-à-dire qu'il y a au moins 95 % de chance que l'hypothèse nulle ne soit pas vérifiée.*

| Méthodes     |            | Corrélation | P-valeur |
|--------------|------------|-------------|----------|
| USDA         | A. Chabert | 0,7725      | <.0001*  |
| VESS (0-5cm) | A. Chabert | - 0,6776    | <.0001*  |
| VESS (0-5cm) | USDA       | - 0,7045    | <.0001*  |

## 4 DISCUSSION

Dans la discussion qui va suivre, plusieurs aspects sur la variabilité des méthodes seront discutés. Il faut rester vigilant : les interprétations qui sont faites dans ces parties ne sont pas basées sur des tests statistiques. Aucune vérification de cet ordre n'a été effectuée pour comparer les écarts-types intra-placettes aux écarts-types intra-parcelles et totaux. Par conséquent, les interprétations sont uniquement hypothétiques et ne se basent que sur les valeurs calculées des différents écarts-types. De plus, l'écart-type intra-placette n'a été calculé que sur la placette D5 (de la parcelle PDT\_L). Dans l'ensemble des interprétations l'écart-type intra-placette est donc comparé à l'écart-type intra-parcelle de la parcelle PDT\_L mais parfois aussi d'autres parcelles, en supposant que l'écart-type intra-placette soit le même pour toutes les placettes. Cette hypothèse n'a pas été vérifiée puisque les écarts-types intra-placettes des autres placettes n'ont pas été calculés. Pour pouvoir réaliser une analyse des composantes de la variance plus poussée, il aurait été intéressant de réaliser plusieurs répétitions au niveau de chaque placette (Draye and Govaerts, 2020), ce qui ne faisait pas partie du plan expérimental de ce mémoire.

---

## 4.1 Discussion sur les résultats des méthodes qui évaluent la capacité d'infiltration de l'eau dans les sols

---

### 4.1.1 Confrontation des valeurs avec la littérature

Parmi les trois méthodes utilisées dans ce mémoire pour mesurer la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol, seules les données de la méthode Simple Anneau peuvent être comparées avec celles de la littérature. Nos valeurs moyennes de  $K_s$  par parcelle varient dans une gamme de 21 à 121 mm/h. Ces taux d'infiltration à saturation sont en accord avec ceux trouvés dans la littérature pour des sols limoneux et limono-sableux (Biielders and Javaux, 2019; Xu et al., 2012).

Dans sa thèse, Ariane Chabert ne donne pas d'exemples de valeurs qu'elle a obtenus avec sa méthode de mesure d'infiltration mais présente directement les résultats des études statistiques effectuées (Chabert and Sarthou, 2017). Il aurait été intéressant de pouvoir comparer nos résultats bruts avec les siens.

### 4.1.2 Variabilité des méthodes de mesure

#### 4.1.2.1 Méthode Simple Anneau

Des trois méthodes, c'est la méthode Simple Anneau qui présente la plus grande variabilité intra-placette et intra-parcelle par rapport à la variabilité totale observée entre les parcelles. De fait, quand on calcule les écarts-types intra-parcellaires, on remarque que leur valeur est parfois supérieure ou égale à celle de l'écart-type de l'ensemble des mesures. Ainsi, la variabilité intra-parcellaire pourrait jouer un rôle dans les résultats non-significatifs obtenus. Les essais réalisés pour calculer la répétabilité de la mesure montrent aussi que l'écart-type intra-placette correspond à environ 30 % de l'écart-type total. Non seulement les parcelles sont assez hétérogènes mais en plus, les résultats des mesures sur une même placette varient également et pourraient aussi expliquer l'absence de différences significatives observées entre les champs. Il aurait été judicieux de réaliser plus de mesures au niveau d'une même placette ou d'une même parcelle pour réduire les variabilités intra-parcelles et intra-placettes, mais la contrainte du temps et du matériel a rendu cela impossible. De plus, de part les conseils des experts et la consultation de la littérature, cinq essais par parcelle testée est une valeur habituelle, si pas déjà plus élevée que dans certaines études (Walsh and McDonnell, 2012; Xin et al., 2011).

Une limite concernant cette méthode, d'un point de vue opérationnel, est que lorsque l'infiltration est faible, les graduations sur la colonne d'infiltration rendent parfois difficile son observation, ce qui diminue la précision des mesures. En effet, l'unité minimale de la graduation est le millimètre et lorsque l'infiltration était faible, des valeurs de 0 mm/ 2 min d'infiltration étaient parfois notées après une infiltration d'1mm /2 minutes, alors que la vitesse d'infiltration était constante (Biielders, 2017; Garnier and Elamri, 2014).

#### 4.1.2.2 Méthode Ariane Chabert

La méthode est assez fidèle<sup>8</sup> puisque sa variabilité intra-placette est faible par rapport à la variabilité totale. Par contre, dans le cas de la parcelle PDT\_L, le protocole utilisé n'a pas permis de calculer le taux d'infiltration en raison d'une trop faible infiltration. Heureusement, il s'agissait de la seule parcelle concernée par ce problème mais si les infiltrations à comparer sont moins contrastées et toutes proches de la situation de la parcelle PDT\_L, la méthode ne saura alors pas déceler de différences parmi celles-ci.

Ce qui est plus interpellant, c'est que lorsque des mesures ont été prises un autre jour pour calculer la variabilité intra-placette de cette parcelle, les valeurs mesurées étaient supérieures à zéro. La méthode semble donc varier en fonction des conditions extérieures. Il

---

<sup>8</sup> La fidélité d'une méthode est « l'étroitesse de l'accord entre les résultats obtenus en appliquant le procédé expérimental à plusieurs reprises dans des conditions déterminées. Le procédé est d'autant plus fidèle que la partie ALÉATOIRE des erreurs expérimentales qui affectent les résultats est moindre » (Grappin, 1976).

aurait été intéressant d'avoir relevé les valeurs d'humidité de tous les sols lors des prises de mesure afin de vérifier si celle-ci peut expliquer la variabilité observée entre deux jours différents ou bien si cela dépend d'un autre facteur. Contrairement à la méthode Simple Anneau qui attend d'atteindre la saturation du sol en eau avant de prendre les mesures, la méthode Ariane Chabert la mesure directement après un certain temps (après l'infiltration d'1,25L ou après 15 min). Elle est donc plus sujette à être influencée par l'humidité. Même si la régression linéaire réalisée pour étudier l'effet de l'humidité sur les deux parcelles de prairie ne montre pas l'impact de cette variable de manière significative, cette analyse ne suffit pas pour tirer une conclusion. En effet, elle n'est basée que sur les données d'humidité et d'infiltration relatives à la prairie permanente. Ces résultats partiels ne suffisent donc pas à exclure l'hypothèse que la variation observée entre deux jours différents puisse être induite par des changements d'humidité. Une amélioration qui pourrait être envisagée serait de mesurer plusieurs fois la vitesse d'infiltration durant l'expérience, et de garder les valeurs où celle-ci est constante. Le taux d'infiltration serait alors mesuré, comme dans le cas de la méthode Simple Anneau, lorsque le sol est saturé en eau.

Rappelons aussi qu'un autre élément déterminant est la texture du sol. Or, si l'on veut évaluer l'impact de plusieurs pratiques culturales sur la capacité d'infiltration de l'eau sous des sols de textures légèrement différentes, il est souhaitable que celle-ci n'influence pas les valeurs mesurées. Malgré que l'effet de la texture soit significatif, dans notre cas, des différences d'infiltration ont quand même été observées entre les champs.

#### *4.1.2.3 Méthode Maison*

Pour rappel, la méthode Maison a été développée dans le cadre de ce mémoire à partir d'observations d'agriculteurs. Elle n'a pu être utilisée que dans la prairie permanente et le champ de pommes de terre. Avec cette méthode, la variabilité intra-placette est plus faible que la variabilité totale. De fait, l'écart-type intra-placette représente 6% de l'écart-type total calculé entre les mesures, ce qui rend la méthode assez fidèle dans notre cas.

Comme pour le cas de la méthode Ariane Chabert, l'effet de la texture sur les mesures, qui est presque significatif ( $p$ -valeur = 0,051), pourrait être problématique si l'on souhaite uniquement mesurer les différences d'infiltration dues aux pratiques culturales sur des champs ayant des textures légèrement différentes. Bien que son effet ne soit pas significatif non plus, quand on utilise les données qui concernent les deux parcelles de la prairie, il est fort possible que l'humidité influence les mesures prises par la méthode Maison puisque celle-ci mesure un taux d'infiltration d'un sol non-saturé.

Un autre facteur qui pourrait influencer les mesures est la pente du champ. En effet, comme la mesure n'utilise pas d'anneau, en plus de s'infiltrer dans le sol, une partie de l'eau peut ruisseler lorsqu'il y a une pente importante. Pour éviter cet inconvénient, une

amélioration de la méthode Maison pourrait être de creuser un trou dans lequel l'eau sera versée (comme dans le cas de la méthode de Porchet ; Colombani et al., 1973). Notons que ceci pourrait faciliter également la détermination de la fin de l'infiltration, opération parfois très subjective : quand il ne reste plus qu'un film d'eau très fin à la surface, le moment où l'on décide d'arrêter la mesure n'est pas facile à choisir et peut varier d'un expérimentateur à un autre. Cette difficulté rend la comparaison de prairies - ce qui n'est pas le but premier de la méthode - compliquée puisque l'infiltration est très rapide en prairie et que la décision du temps où on arrête l'infiltration risque d'avoir un impact plus important sur le résultat final que la réelle variabilité d'infiltration observée au sein du champ. Ce problème pourrait être amoindri en proposant un critère plus facile à respecter comme par exemple : lorsque l'on tapote avec notre doigt sur le film d'eau restant, tant que l'eau fait encore des petites éclaboussures c'est que l'infiltration n'est pas encore terminée. Notons que le fait de tapoter sur l'eau pourrait cependant influencer la vitesse d'infiltration. Au final, malgré l'erreur provenant de la subjectivité de l'expérimentateur sur la décision de fin d'infiltration, la méthode permet d'appuyer les observations des agriculteurs dont elle est inspirée en ce qui concerne l'infiltration de l'eau en surface : elle permet de voir qu'une prairie infiltre plus qu'un sol travaillé.

### 4.1.3 Quelles sont les différences mises en évidence par chaque méthode ?

#### 4.1.3.1 *Corrélations et comparaison des méthodes*

Il est intéressant de voir que les deux méthodes pratiques (simples, rapides et peu coûteuses) sont corrélées et donnent des résultats similaires que ce soit en termes de relation de grandeur entre les parcelles ou de variabilité des prises de mesure. Aucune des deux méthodes n'est toutefois corrélée avec celle de l'infiltromètre Simple Anneau qui est une méthode plus reconnue dans le monde scientifique. Il faut noter que la grande différence entre les méthodes pratiques et la méthode Simple Anneau est qu'elles ne mesurent pas l'infiltration à saturation et qu'elles la mesurent avec une charge d'eau variable.

Le fait d'avoir une charge d'eau variable peut influencer la valeur du débit d'eau mesurée. En effet, plus il y a d'eau déjà infiltrée, moins la force exercée par l'eau sur le sol est importante et plus le débit sera réduit (Bielders, 2017). Dans le cas des deux méthodes pratiques, la charge d'eau initiale est équivalente pour chaque répétition de mesure mais on pourrait se poser les deux questions suivantes. La variabilité du débit engendrée par la charge d'eau variable est-elle la même entre les tests ? La quantité d'eau utilisée - étant assez faible par rapport à la méthode Simple Anneau - a-t-elle un effet négligeable sur les valeurs de débits mesurées. Notons, qu'une charge constante n'est pas spécialement représentative de la réalité de terrain

et est surtout pratique pour mesurer facilement la conductivité hydraulique à saturation par l'équation de Darcy.

Il est intéressant de mesurer la conductivité hydraulique à saturation puisqu'elle peut être utilisée pour comparer des résultats d'infiltration entre différents sols. En effet, le fait d'être à saturation permet de s'affranchir de l'impact de l'humidité ou des conditions climatiques sur la mesure d'infiltration relevée (Biielders and Javaux, 2019). Le risque des méthodes pratiques utilisées dans ce mémoire, est qu'elles soient influencées par l'humidité, étant donné qu'elles ne mesurent pas l'infiltration à la saturation du sol en eau. Il serait intéressant de tester ces méthodes sur un même sol mais à des valeurs d'humidité différentes afin d'avoir une idée de l'influence de cette variable sur les résultats. Précisons qu'étudier la conductivité hydraulique à saturation n'est pas toujours le plus représentatif des réalités de terrain. Par exemple, la FAO indique que les effets du compactage seraient plus visibles avec la conductivité hydraulique non-saturée qu'avec la conductivité hydraulique à saturation (FAO, 1994).

Les différences observées entre les mesures « pratiques » et celles de la méthode Simple Anneau peuvent aussi s'expliquer par la profondeur sur laquelle l'infiltration est mesurée. En effet, la méthode Simple Anneau mesure probablement une infiltration sur une profondeur plus grande que les deux autres méthodes puisqu'elle utilise des volumes d'eau beaucoup plus importants et sur un laps de temps plus élevé. Or, les différences structurales entre deux champs soumis à un travail du sol différent ne sont pas toujours décelables quand on regarde une valeur moyenne de  $K_s$  sur l'ensemble du profil. De fait, une étude au Brésil sur des Oxisols a montré qu'entre une prairie et un champ travaillé, les valeurs moyennes d'infiltration à saturation peuvent être similaires, alors que celles par profondeur sont différentes (Macedo et al., 2017). Ceci pourrait expliquer pourquoi, dans le cas de la méthode Ariane Chabert et la méthode Maison - qui mesurent l'infiltration en surface - des distinctions entre les champs ont été observées, différences qui n'étaient pas décelables par la méthode Simple Anneau.

#### *4.1.3.2 Différences au niveau de la texture*

Pour rappel, contrairement à la méthode Simple Anneau, les méthodes Ariane Chabert et Maison montrent un effet significatif de la texture<sup>9</sup>. Ces deux méthodes montrent également un effet d'interaction entre la texture et le champ considéré.

La méthode Maison et la méthode Ariane Chabert montrent que l'eau s'infiltre plus sur un sol de texture sablo-limoneuse que sur un sol de texture limoneuse, dans le cas de la

---

<sup>9</sup> L'effet de la texture pour la méthode Maison n'est pas significatif pour une erreur de 0,05 fixée ( $p$ -valeur = 0,051) mais est très proche de la limite. C'est pourquoi, l'effet de la texture est considéré comme important dans cette discussion.

prairie et du champ de pommes de terre. Cette relation est en accord avec les propriétés physiques du sol qui indiquent qu'un sol plus grossier est plus drainant qu'un sol plus fin (Nielsen et al., 1973). Notons que cette relation, bien que non significative, est également observable sur la prairie avec la méthode Simple Anneau.

Dans notre cas, la méthode Ariane Chabert montre quand même une grande différence d'infiltration au sein de la prairie entre les deux textures. Ceci peut être expliqué par les propriétés physiques propres aux différences de textures (une parcelle plus sableuse est plus drainante) ou par le fait que la parcelle limono-sableuse de la prairie avait une pente plus élevée que la parcelle limoneuse (la pente, pouvant favoriser un flux d'eau latéral ou diminuer la profondeur d'enfoncement de l'anneau dans le sol du côté le plus bas de la pente). Il faut rappeler également que le pâturage de bovin peut jouer un rôle sur la compaction superficielle du sol et donc réduire l'infiltration en surface (Macedo et al., 2017). Or, la méthode Ariane Chabert mesure plutôt l'infiltration de l'eau sur les premiers centimètres du sol où la compaction aurait pu avoir eu lieu (Chabert and Sarthou, 2017). Justement, durant la période des mesures, les bovins étaient surtout présents dans la parcelle limoneuse. Lorsque l'on compare nos résultats à ceux du pénétromètre digital, on remarque que la parcelle Prairie\_L présente des valeurs de résistance à la pénétration plus élevées entre 0 et 5 cm que la parcelle Prairie\_LS. Ces différences ne sont cependant pas significatives lorsque l'on réalise un test de Tukey.

En ce qui concerne le champ de betteraves, seule la méthode Ariane Chabert montre des différences liées à texture (la méthode Maison n'a pas été utilisée sur ce champ). Celle-ci montre un effet opposé de la texture par rapport à l'effet observé sur les autres champs : l'infiltration est plus élevée sous un sol limoneux qu'un sol limono-sableux. Cette tendance est observée également pour la méthode Simple Anneau, bien que non-significative. Elle peut être le résultat d'une des sources d'erreur la plus courante des infiltromètres Simple Anneau : le flux latéral non-saturé. Ce flux est une conséquence d'une infiltration latérale et pas uniquement verticale. Cette infiltration latérale, quand elle est importante, peut causer une augmentation de la vitesse d'infiltration mesurée puisqu'il s'agit d'un flux non-saturé et d'une voie supplémentaire par laquelle l'eau peut s'infiltrer. Cette erreur augmente quand la texture du sol est plus fine et lorsque des couches de compaction sont présentes dans le sol (Rice et al., 2014). Elle peut être réduite en ayant recours à un deuxième anneau, qui a pour but d'assurer une humectation latérale du sol (Biielders, 2017; Garnier and Elamri, 2014). La méthode Ariane Chabert, faisant aussi recours à un anneau, pourrait également être influencée par le flux latéral non-saturé. Elle pourrait même être plus influencée que la méthode Simple Anneau puisque moins d'eau est versée pour saturer le sol avant la mesure. Il est cependant difficile d'appuyer cette hypothèse puisque la méthode Ariane Chabert n'observe pas cette tendance sur tous les sols étudiés. Il est toutefois possible que l'influence du flux latéral non-saturé sur les mesures soit aussi dépendante de l'humidité du sol lors de la mesure (le flux latéral non-saturé serait moins important quand le sol est plus saturé en eau).

Un changement d'humidité des sols entre les mesures prises dans les différents champs pourrait alors expliquer les différents effets de la texture sur l'infiltration mesurée.

#### *4.1.3.3 Différences au niveau des champs*

De nouveau, contrairement à la méthode Simple Anneau, la méthode Ariane Chabert et la méthode Maison montrent des différences significatives d'infiltration entre les champs. Toutes les deux ont mesuré des vitesses d'infiltration plus élevées pour la prairie que pour le champ de pommes de terre et uniquement la méthode Ariane Chabert (puisque la méthode Maison n'a pas été mesurée sur le champ de betteraves) mesure une infiltration plus élevée sous le champ de betteraves que sous le champ de pommes de terre.

Ces résultats ont été discutés lors d'un entretien téléphonique avec Hugues Falys, responsable de la ferme universitaire de Marbaix de l'UCLouvain. Celui-ci a expliqué que, selon lui, lorsque l'on regarde l'infiltration sur les premiers centimètres du sol (infiltration en surface), l'infiltration sous la prairie devrait être plus grande que sous le champ de pommes de terre. Il a ajouté à cela que l'infiltration en surface sous le champ de pommes de terre devrait être moins bonne que sous le champ de betteraves au moment où les mesures ont été prises. Pour clarifier ses intuitions il a notamment évoqué l'impact de la couverture du sol. Il est vrai que l'infiltration de l'eau en surface est améliorée par la quantité de végétation sur pied (Dee et al., 1966; Duley and Domingo, 1949). Dans le cas de la prairie comme dans le cas du champ de betteraves (qui était précédé par une culture de couverture, présente au moment des mesures) le sol était bien couvert par de la végétation. Le froment présent sur le champ après la culture de pommes de terre (champ PDT) était quant à lui encore à un stade jeune lors des mesures, ce qui fait que celles-ci ont été mesurées sur des surfaces exemptes de plantes (notons que l'impact de ce choix méthodologique sur les différences d'infiltration observées peut être questionné). Le fait qu'il y avait une couverture plus dense du sol par la végétation dans le cas de la prairie, et du champ de betteraves, pourrait expliquer leur meilleure infiltration par rapport au champ de pommes de terre.

Rappelons cependant que la méthode Ariane Chabert ne perçoit aucune différence entre la prairie permanente et le champ de betteraves. Ceci est probablement dû à la forte variabilité d'infiltration entre les deux parcelles de la prairie résultant en une valeur moyenne assez proche de celle observée sur le champ de betteraves. La méthode Simple Anneau n'a pas décelé de différence significative entre ces deux champs non plus. Une étude réalisée au Brésil, sur des Oxisols, comparant les Ks d'une prairie permanente avec ceux d'un champ de culture de betteraves montre des résultats similaires. Bien qu'aucune différence ne soit observée au niveau des Ks moyens des deux champs, l'étude montre que l'infiltration varie en fonction du profil – sur 1 m de profondeur – entre la prairie et le champ de betteraves. En fait, les caractéristiques physiques (porosité, densité apparente, taille des agrégats, etc...) varient de manière différente avec la profondeur entre des champs cultivés et des prairies. Elles

mettent en évidence des couches avec des propriétés différentes, notamment en terme d'infiltration de l'eau dans le sol (Macedo et al., 2017).

Pour finir, la comparaison entre le champ de betteraves et celui de pommes de terre est plus compliquée. Pour rappel, leurs sols ont été travaillés sous labour conventionnel jusqu'en 2018 et sont maintenant gérés en suivant les principes de TCS. Les rotations des cultures mises en place sur les deux champs, bien qu'elles soient décalées dans le temps, ont été similaires. La différence majeure en termes de travail du sol entre ces deux champs, quand les mesures ont été prises, devrait donc surtout provenir des pratiques effectuées au cours de l'année des mesures (2019-2020) et des antécédents culturels. Au moment de l'étude, les différences en termes d'intensité de travail du sol effectué entre les deux champs sont surtout marquées par un labour et un travail du sol important pour le champ de pommes de terre (en raison de la culture de pommes de terre) et par l'usage d'une culture de couverture ainsi que d'un passage au strip-till pour celui de betteraves. Il est intéressant de confronter les résultats obtenus sur ces deux champs avec ceux de la littérature concernant les différences observées entre un champ labouré et un champ non-labouré ou avec une culture de couverture. A court terme, l'utilisation d'une culture de couverture, l'absence de labour et le fait que les mesures d'infiltration aient été prises au printemps devraient engendrer une infiltration plus grande pour le champ de betteraves comparé à celui de pommes de terre (Rice et al., 2014). En effet, la culture de couverture améliore la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol. D'autre part, l'infiltration augmentée par le retournement du labour en automne tend à diminuer jusqu'au printemps alors que dans le cas d'un non-labour, l'infiltration augmente au printemps étant donné la reprise de l'activité biologique favorisant l'infiltration (Rice et al., 2014). Il faut toutefois rester vigilant puisque dans notre cas, les différences de travail du sol ne sont que de l'ordre de l'année et peuvent ne pas être les seules explications aux valeurs d'infiltration obtenues. Rappelons que les propriétés physiques qui influencent l'infiltration à saturation, bien que variables également au cours d'une année, peuvent parfois prendre du temps à changer lorsqu'elles sont modifiées par des pratiques culturales (Rice et al., 2014). De plus, d'autres facteurs que le travail du sol pourraient aussi intervenir puisque ces champs présentent des différences en termes de couvertures des sols, d'orientations, de pentes, etc...

En considérant cela, la méthode Ariane Chabert coïncide avec les hypothèses liées au travail du sol à court terme expliquées dans le paragraphe précédent. En effet, l'infiltration sous le champ de pommes de terre – avec un travail du sol élevé – est plus faible que celle sous le champ de betteraves – avec un travail du sol intermédiaire et une culture de couverture -. Ariane Chabert avait montré des résultats un peu contradictoires dans sa thèse puisque que l'infiltration était plus faible pour des champs soumis à un travail du sol plus faible en raison d'une compaction en surface causée par le non-labour. Elle avait réalisé ses mesures plus tôt dans l'année que nous, et il est possible que l'impact positif du labour sur l'infiltration de l'eau l'ait emporté sur l'amélioration de l'infiltration par l'activité biologique – qui était encore moindre au moment où elle a pris ses mesures - (Chabert and Sarthou, 2017; Macedo

et al., 2017). Il faut donc rester prudent dans l'interprétation de ces résultats, ne pas les généraliser à un type de travail du sol et les nuancer en fonction du moment dans l'année où les mesures sont prises.

#### 4.1.4 Résumé sur la comparaison des méthodes qui évaluent la capacité d'infiltration de l'eau dans les sols

Finalement, la méthode Simple Anneau n'est pas pertinente pour donner une information sur des différences en termes de capacités d'infiltration engendrées par un changement de pratique culturale dans le cas d'une recherche participative à la ferme. Ceci pour deux raisons : cette méthode est trop demandeuse en temps et en matériel et elle ne montre pas de différences significatives parmi des champs même soumis à des intensités de travail du sol différentes. Vu que la méthode Simple Anneau, qui est scientifiquement reconnue et utilisée, ne permet pas de voir des différences significatives entre les champs, il est possible qu'il n'y en ait pas en termes de Ks entre les champs considérés dans ce mémoire sur la profondeur d'étude de cette méthode.

La méthode Ariane Chabert et la méthode Maison, elles, sont plus intéressantes pour une recherche participative à la ferme puisqu'elles sont beaucoup plus faciles à mettre en place. Alors que la méthode Maison est prometteuse mais nécessite plus d'essais pour s'assurer de son efficacité, la méthode Ariane Chabert semble pouvoir identifier des différences intéressantes au niveau de l'infiltration de l'eau à la surface du sol des champs étudiés dans ce mémoire. Néanmoins, il serait judicieux de faire une analyse plus approfondie de l'impact de l'humidité sur les valeurs mesurées par ces deux méthodes.

Des différences entre la méthode Simple Anneau et les deux méthodes pratiques ont été discutées précédemment : les méthodes pratiques n'utilisent pas de charges d'eau constante, ne mesurent pas l'infiltration de l'eau à saturation et elles semblent la mesurer sur des profondeurs distinctes à celle de la méthode Simple Anneau.

Une question reste ouverte : est-ce plus intéressant d'avoir une information sur l'infiltration de l'eau en surface - comme mesurée par les méthodes Ariane Chabert et Maison - ou sur l'infiltration de l'eau à des profondeurs plus importantes – comme mesurée par la méthode Simple Anneau - ? Les deux informations nous procurent des renseignements intéressants et peuvent conduire à différentes interprétations. Pour comparer l'impact de pratiques culturales sur la capacité d'infiltration, il serait judicieux d'étudier les conséquences de l'infiltration, à ces deux niveaux, sur la croissance des plantes, sur la vie du sol, sur les pertes économiques et autres caractéristiques importantes pour une exploitation agricole. Notons que dans sa thèse, Ariane Chabert établit des corrélations entre l'infiltration mesurée par sa méthode et les rendements agricoles. Elle observe aussi que l'infiltration est corrélée aux taux d'infections par des maladies cryptogamiques (Chabert and Sarthou, 2017). D'un autre côté,

la conductivité hydraulique à saturation permet aussi d'expliquer des différences observées au niveau des rendements agricoles, quand elle est mesurée par une autre méthode que celle du Simple Anneau (Keller et al., 2012). Une autre interrogation en suspens concerne la pertinence de mesurer l'infiltration de l'eau à saturation et avec une charge d'eau constante. La saturation semble indispensable pour pouvoir comparer les données entre elles. Mais peut-être que le fait de verser quelques litres d'eau au préalable – comme pour les méthodes pratiques – suffit pour « standardiser » l'humidité du sol si l'on veut observer des différences entre des champs soumis à des pratiques culturales différentes. L'effet de la charge d'eau sur les résultats des méthodes pratiques et la pertinence de mesurer une infiltration avec une charge d'eau constante si l'on veut étudier des conditions de terrain méritent réflexion également. Au final, pour pouvoir valider les deux méthodes pratiques, il est nécessaire de réaliser plus d'essais, dans des conditions contrôlées ou non, afin d'évaluer les effets de chaque facteur sur les mesures d'infiltration.

---

## 4.2 Discussion sur les résultats des méthodes qui évaluent la résistance des sols à la compaction.

---

### 4.2.1 Confrontation des valeurs avec la littérature

Les valeurs moyennes par parcelle de densité apparente du sol que nous avons obtenues varient entre 1403 et 1495 kg/m<sup>3</sup>, résultats habituels pour des sols limono-sableux et limoneux (Van Dijk, 2013).

Les valeurs des moyennes de résistance à la pénétration par parcelle – allant de 1,47 à 2,28 MPa - sont également en accord avec celles mesurées sur des sols travaillés ou des prairies, rencontrées dans la littérature (Moraes et al., 2014).

Les scores VESS peuvent difficilement avoir des valeurs qui diffèrent de celles de la littérature puisqu'ils ne varient qu'entre 1 et 5, toutes les valeurs étant possibles pour des sols cultivés et des prairies. Une étude en Belgique avait enregistré des scores de 2,9-3,4 pour des champs cultivés et de 2,8-2,6 pour des prairies non pâturées (Pulido Moncada et al., 2017). Nos données montrent une différence plus marquée entre les scores moyens des parcelles de prairie - 2 et 2,3 - et ceux des champs cultivés - de 3 à 4 -.

## 4.2.2 Variabilité des méthodes de mesure

### 4.2.2.1 Densité apparente du sol

L'écart-type intra-placette représente la plus grande partie (66%) de l'écart-type total des densités apparentes mesurées dans les sols des différents champs. L'écart-type total, lui, est assez faible par rapport aux valeurs mesurées (inférieur à 10%). De fait, quand on compare les densités apparentes moyennes entre les parcelles, la plus grande différence observée est de 92 kg/m<sup>3</sup>. Ces variations sont assez normales quand on sait que les densités apparentes d'un sol limoneux à sablo-limoneux peuvent varier entre 1360 et 1440 kg/m<sup>3</sup> (Van Dijk, 2013). Le fait d'avoir beaucoup de mesures par parcelle et par placette a sûrement permis de pouvoir mettre en évidence les différences observées. En effet, plus le nombre d'échantillons pris au sein d'une parcelle et d'une placette augmente, plus leur écart-type respectif diminuera. Pour rappel, les mesures de densité apparente ont été prélevées pour chaque placette sur six profondeurs différentes à l'aide de cylindres de Kopecky. Cela a permis d'avoir 30 mesures de densité apparente par parcelle (6 profondeurs X 5 placettes). Il est donc important de savoir qu'il faut au moins un nombre aussi grand de mesures par parcelle que celui qui a été utilisé dans ce mémoire pour montrer des différences de densité apparente entre des sols similaires à ceux des champs qui ont été étudiés. Dans la littérature, le nombre de répétitions varie entre les différents auteurs et dépend souvent du nombre de profondeurs et de parcelles qui sont testées (Bauer and Black, 1981; Keen et al., 2011).

L'erreur due à la précision de la mesure - qui dans notre cas est la composante majoritaire de la variabilité totale observée entre les résultats de densité apparente, mais qui reste assez faible – peut provenir de différentes sources. D'une part, la précision pourrait être impactée par le fait qu'un maillet ait été utilisé avec une force variable pour enfoncer les cylindres de Kopecky dans le sol. D'autre part, le fait que certains échantillons aient été séchés soit dans un four classique soit dans une étuve pourrait également jouer un rôle sur la précision des résultats<sup>10</sup>. En effet, il est possible que les températures réelles dans le four et dans l'étuve n'aient pas été exactement les mêmes. Ajouté à cela, l'usage de deux balances différentes pourrait être responsable d'une partie de l'erreur liée à la précision de la mesure. Finalement, bien que plusieurs sources d'erreurs soient possibles, la variabilité de la mesure reste assez faible, ce qui confère à la méthode de bonnes propriétés de répétabilité. Le fait que les mesures aient pu être réalisées dans un appartement avec un four classique de cuisine sans impacter énormément la variabilité des résultats rend cette méthode intéressante puisqu'elle peut être réalisée chez les agriculteurs dans le cas d'une recherche participative en réseau de fermes. Il faut toutefois noter que l'échantillonnage en champ est assez laborieux

---

<sup>10</sup> Pour rappel, en raison de l'épidémie du COVID-19, une partie des mesures a dû être réalisée à domicile.

et prend du temps (4 h pour 5 placettes). De plus, la mesure nécessite d'avoir un cylindre de volume connu, et d'avoir une balance suffisamment précise.

#### *4.2.2.2 Pénétromètre digital*

L'écart-type total des mesures de résistance à la pénétration dans le sol est de 0,82 MPa, ce qui est une valeur élevée par rapport aux valeurs moyennes mesurées par parcelle qui ne dépassent pas les 2,28 MPa. Cette variabilité provient surtout de l'hétérogénéité au sein d'une parcelle puisque l'écart-type intra-parcelle représente 67% de l'écart-type total. Au final, 54% de l'écart-type intra-parcellaire provient de l'écart-type intra-placette. Ces résultats indiquent que les parcelles sont hétérogènes dans leur résistance à la pénétration et que la mesure au sein d'une placette n'a pas une très bonne répétabilité.

L'hétérogénéité des valeurs de résistance à la pénétration au sein d'une parcelle est connue. Le facteur qui l'influence le plus est l'humidité (M. Yasin et al., 1993; O'sullivan et al., 1987). Or l'humidité n'a pas été mesurée sur les 2/3 des parcelles dans notre cas, il faudra donc rester extrêmement prudent dans l'interprétation des résultats. Les mesures de pénétrométrie varient également en fonction d'autres facteurs comme la texture du sol, la densité apparente, la porosité du sol et la vitesse de pénétration dans le sol (Herrick and Jones, 2002; M. Yasin et al., 1993). Dans notre cas, la texture du sol n'a pas joué un rôle significatif, probablement parce que les deux textures testées sont assez proches. Par contre, les résultats ont montré une corrélation positive entre les valeurs de densité apparente et de pénétrométrie, ce que des travaux scientifiques ont déjà reconnu (M. Yasin et al., 1993). La vitesse de pénétration a pu clairement impacter les résultats puisqu'il est très difficile de garder une vitesse de pénétration constante et que deux expérimentateurs différents ont pris les mesures.

Les résultats du pénétromètre sont donc fort variables mais peuvent être mesurés facilement et rapidement sur le terrain ce qui permet de pouvoir augmenter le nombre de mesures et de diminuer leur variabilité totale. Dans notre cas 15, mesures par parcelle avaient été prises et ont permis d'observer quelques différences entre les champs. A refaire, multiplier le nombre de mesures aurait été intéressant et n'aurait pas demandé beaucoup plus de travail.

#### *4.2.2.3 Méthode VESS*

Suite aux premiers résultats obtenus pour la prairie, aucun essai supplémentaire n'a été entrepris pour déterminer la variabilité intra-placette. En effet, étant issu d'une appréciation visuelle, les scores VESS varient peu – voire pas du tout – au sein d'une placette

vu que le profil observé est très similaire. Par contre, au niveau de la parcelle, les scores calculés par la méthode fluctuent avec des écarts-types intra-parcelle allant de 0,4 à 1,1 score VESS. Une variation semblable entre les scores a été observée en Belgique (Pulido Moncada et al., 2017). Elle peut provenir du fait que la délimitation des couches de structures différentes et l'attribution des scores VESS changent selon les observateurs. Pour réduire cette variabilité liée à la subjectivité des expérimentateurs, il aurait été conseillé, comme mentionné dans le travail de Emmet-Booth et al. (2018), de leur faire suivre une formation courte sur la manière d'attribuer les scores VESS avant de faire les expériences. Peu d'études qui utilisent la méthode VESS existent à l'heure actuelle en Belgique, ou sur des sols similaires aux sols belges et il serait nécessaire d'en entreprendre davantage afin de pouvoir créer une base de données facilitant l'interprétation des profils observés. Il est cependant intéressant de constater que, même avec des expérimentateurs différents, la méthode VESS a pu mettre en évidence des relations significatives.

#### *4.2.2.4 Méthode Maison*

L'écart-type intra-placette est assez faible puisqu'il représente 17% de l'écart-type total. L'écart-type intra-parcelle, lui, varie entre les parcelles et peut parfois être plus grand que l'écart-type total. En conclusion, bien que la méthode ait une bonne répétabilité, les valeurs mesurées varient fortement au sein même des parcelles. Notons que cela ne veut pas dire que la méthode est mauvaise. Cela indique surtout que la variabilité au sein d'une parcelle sur la profondeur de pénétration de la bouteille est assez élevée, et qu'elle est trop grande pour permettre de voir des différences significatives entre les champs considérés dans ce mémoire. Notons, que cela pourrait changer si plus de répétitions par parcelles sont effectuées ou si les différences en termes de résistance à la pénétration en surface des sols des champs des participants de l'étude sont plus importantes que celles observées entre les champs considérés dans ce mémoire. Lorsque l'on étudie l'effet du type de champ (BET, PDT ou Prairie) sur les valeurs de pénétrométrie entre 0 et 5 cm de profondeur, l'effet n'est pas significatif non plus. Les valeurs de pénétrométrie mesurent aussi une résistance à la pénétration et le fait qu'aucune des deux méthodes ne conduisent à un effet significatif du type de champ sur la résistance à la pénétration en surface, pourrait laisser croire que cette dernière ne serait pas différente entre les champs considérés dans ce mémoire.

### **4.2.3 Quelles sont les différences mises en évidences par chaque méthode ?**

#### *4.2.3.1 Corrélations et comparaison des méthodes*

Contrairement aux méthodes de mesure de la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol, où toutes les méthodes testées mesurent au final le même paramètre selon des modalités différentes, les méthodes utilisées pour évaluer la résistance du sol à la compaction mesurent des caractéristiques différentes : densité apparente (mesure de densité apparente par des cylindres de Kopecky), résistance du sol à la pénétration (pénétromètre digital et méthode maison) et structure visuelle du sol (méthode VESS). Alors que le calcul de la densité apparente et l'observation de la structure visuelle du sol sont des indicateurs sur l'état de compaction du sol, la résistance du sol à la pénétration est plutôt indicatrice d'une fonction du sol qui peut être influencée par l'état de compaction. Dans tous les cas, ces méthodes de mesures ne donnent pas d'informations directes sur la résistance du sol à la compaction. Il est donc important de signaler un risque de confusion dans ce mémoire puisque la fonction dans laquelle sont répertoriées ces méthodes de mesure est appelée « résistance à la compaction » alors que ces méthodes donnent plutôt une information sur l'état de compaction du sol. Or, ces deux informations ne sont pas nécessairement liées. De fait, si un sol est compacté en un endroit donné, cela ne nous donne pas spécialement une information sur la capacité de ce sol à résister à la compaction. L'état compact d'un sol n'est pas obligatoirement la conséquence d'un phénomène de compaction et n'indique pas nécessairement qu'un sol résistera moins bien ou mieux à une pression mécanique. L'amalgame fait dans ce travail provient du fait que le nom donné à la fonction en lien au processus de compaction est basé sur la même méthodologie que celle des services écosystémiques pour laquelle on reformule le nom de la fonction de l'écosystème sous forme d'un service. Dans notre cas, un sol bien structuré rendra en effet un service de « bonne résistance à la compaction ». Et on sait qu'une meilleure structure améliore la capacité du sol à résister à la compaction (Destain, 2013). Cependant, comme les méthodes, qui ont été retenues par le processus de sélection participative de ce mémoire, donnent toutes une information sur l'état de compaction et pas sur la résistance à la compaction du sol, c'est plutôt l'état de compaction qui sera discuté dans les paragraphes qui suivent, pour ne pas faire des conclusions non fondées.

Une autre difficulté d'interprétation provient du lien entre la compaction du sol et la résistance à la pénétration. De nombreuses études montrent que plus un sol est compact, plus la résistance à la pénétration de ce sol est élevée. Et souvent, ce concept est utilisé pour mettre en évidence des zones compactes au sein d'un profil (comme par exemple les semelles de labour, causées par le labour). En conséquence de cette interprétation, une valeur limite à ne pas dépasser de 2MPa – ou de 3,5 MPa pour les sols non-labourés<sup>11</sup> - est souvent utilisée

---

<sup>11</sup> Certains auteurs indiquent qu'augmenter la limite à 3,5 MPa serait plus adéquat pour les sols non-labourés, qui présentent en générale une plus grande compaction en surface mais qui gardent de très bonnes propriétés physiques grâce à la présence de pores biologiques et de racines (Moraes et al., 2014)

pour évaluer une bonne qualité physique du sol (Herrick and Jones, 2002; M. Yasin et al., 1993; Moraes et al., 2014; O'sullivan et al., 1987; Sun et al., 2013). Cependant, une résistance à la pénétration n'est pas forcément synonyme de compaction ou de mauvaise structure. De fait, certains auteurs ont observé des valeurs plus élevées de résistance à la pénétration pour des prairies ou des champs de meilleure structure (évaluée visuellement) et expliquent que cela est en partie dû à une densité importante de racines (Newell-Price et al., 2013; Rosolem et al., 2002). Au final, l'interprétation des résultats de pénétrométrie est donc très compliquée et nécessite souvent d'avoir recours à d'autres méthodes complémentaires. Rappelons également, que ces résultats sont fortement dépendant de l'humidité, qui n'a pas pu être mesurée sur l'ensemble des champs dans ce mémoire.

L'analyse des corrélations entre les méthodes lorsque l'on considère leurs valeurs sur une profondeur de 30 cm, montre que les mesures de densité apparente sont positivement corrélées à celles de pénétrométrie ainsi qu'à celle de la méthode VESS. La corrélation positive entre la densité apparente et la résistance à la pénétration se vérifie dans la littérature scientifique (M. Yasin et al., 1993; Rosolem et al., 2002). Cette relation positive pourrait indiquer, qu'a priori, dans notre cas, une résistance à la pénétration élevée est synonyme d'une densité apparente élevée, et donc d'une compaction plus élevée. Cependant, lorsque l'on calcule la corrélation entre les méthodes à une profondeur de 0 jusqu'à 5 cm, la corrélation entre les mesures de densité apparente et de pénétrométrie n'est plus significative. En fait, si les données du pénétromètre digital sont corrélées à celles de la densité apparente, c'est surtout parce qu'elles varient de la même manière en fonction de la profondeur, puisque lorsque l'on calcule la corrélation entre les deux méthodes sur une même profondeur, celle-ci n'apparaît plus comme significative. Cette hypothèse est renforcée lorsque l'on constate que les résultats du test de Tukey de comparaison des moyennes de chaque parcelle montrent que les relations de grandeur entre les parcelles sont opposées dans le cas du pénétromètre digital et de la mesure de densité apparente. En effet, alors que la prairie a les plus faibles valeurs moyennes de densité apparente, elle fait partie des deux champs avec les valeurs les plus élevées de résistance à la pénétration. Cette réflexion nous amène à dire que malgré une corrélation positive significative lorsque l'on compare les valeurs des deux méthodes sur 30 cm de profondeur, leurs mesures ne varient pas de la même manière et ne sont pas corrélées quand on s'intéresse à leur valeur moyenne par parcelle. Donc au final, dans notre cas, les valeurs de densité apparente élevées indiqueraient une compaction du sol, qu'on les compare entre les parcelles ou au sein de profondeurs différentes, puisqu'une densité apparente élevée indiquera dans tous les cas que le sol sera moins aéré et plus dense. Pour la pénétrométrie, c'est plus compliqué : il est possible que les valeurs élevées de résistance à la pénétration soient corrélées à une meilleure structure lorsque l'on compare les valeurs moyennes par parcelles. En effet, cela pourrait être interprété par le fait que les parcelles avec

de grandes valeurs de résistance aient une présence plus élevée de racines, et une meilleure porosité (Newell-Price et al., 2013; Rosolem et al., 2002). En revanche, lorsque l'on compare les valeurs de pénétrométrie sur une même parcelle, au niveau de ses différentes profondeurs, une résistance élevée serait alors indicatrice d'une couche compacte, puisqu'elle serait corrélée à une densité apparente plus élevée.

Finalement, la méthode maison n'est corrélée à aucune des autres méthodes et ceci est probablement dû au fait qu'elle variait trop au sein d'une même parcelle et que contrairement aux trois autres méthodes elle n'a pas permis de mettre en évidence des différences significatives entre les champs et parcelles. Quant à la méthode VESS<sup>12</sup>, elle est corrélée positivement avec les valeurs de densité apparente du sol, ce qui est une relation déjà observée dans d'autres travaux scientifiques (Emmet-Booth et al., 2018; Pulido Moncada et al., 2017). Ceci montre que la méthode VESS, bien que visuelle, pourrait fournir une information sur la densité apparente d'un sol. Une régression linéaire a été effectuée dans le but de voir s'il était possible de prédire de manière relativement précise les valeurs de densité apparente à partir des scores VESS mais le modèle a permis de prédire une part trop faible de la variabilité observée au niveau des densités apparentes (modèle polynomial d'ordre 3 :  $R^2 = 0,25$  ; Prob. > F = <.0001).

#### *4.2.3.2 Différences au niveau des profondeurs*

En raison de la quantité de travail considérable que cela aurait représenté, au-delà des possibilités d'un travail de mémoire, aucune étude statistique n'a été réalisée pour comparer les six profondeurs par méthode. Cependant, à l'exception de la méthode Maison qui n'évalue que l'état de surface du sol, un effet significatif de la profondeur a pu être observé sur les résultats récoltés par les trois méthodes qui l'étudiaient : la méthode VESS, celle du pénétromètre digital et celle de la mesure de la densité apparente. Certes, il aurait été intéressant de comparer les méthodes entre elles, profondeur par profondeur, afin repérer les couches compactes qui diffèrent d'un sol à un autre, plutôt que de comparer les valeurs moyennes de chaque méthode sur un profil de 30 cm de profondeur. Notons que de toute manière, réaliser des mesures sur les 30 cm de profondeur sera nécessaire puisque des zones compactes peuvent apparaître à des couches différentes en fonction du type de travail du sol effectué (Bauer and Black, 1981; Marahatta et al., 2014). Par conséquent, se focaliser sur une seule couche à une profondeur donnée aurait favorisé une pratique culturale plutôt qu'une autre.

#### *4.2.3.3 Différences au niveau de la texture*

---

<sup>12</sup> Pour rappel, un score VESS élevé est synonyme d'une moins bonne structure visuelle.

Parmi toutes les méthodes testées pour évaluer l'état de compaction du sol, l'effet de la texture s'avère significatif uniquement pour les mesures de densité apparente qui montrent que les sols de texture limono-sableuse ont des valeurs de densité apparente plus élevées que ceux de texture limoneuse ( $\text{Prob} > |t| = 0,0319$ ). Cette tendance est fréquente et reportée dans d'autres travaux selon lesquels plus un sol est riche en sable, plus sa densité apparente est élevée (Chaudhari et al., 2013; Van Dijk, 2013).

Bien que l'effet de la texture ne soit pas significatif au niveau de la pénétrométrie dans notre cas, elle est connue comme étant un facteur pouvant l'influencer (Herrick and Jones, 2002; M. Yasin et al., 1993; To and Kay, 2005). Rappelons que les deux textures étudiées dans ce mémoire n'étaient peut-être pas suffisamment contrastées que pour avoir un effet sur les valeurs mesurées.

Il est fort possible aussi que, bien que son impact ne soit pas significatif dans notre cas comme pour les valeurs de pénétrométrie, la texture influence tout de même les résultats de la méthode Maison.

Enfin, la méthode VESS est utilisée à travers le monde sur différents types de sol avec la même échelle de pondération (Franco et al., 2019). S'agissant d'une observation visuelle, le fait que la texture n'ait pas d'effet sur les résultats n'est pas si surprenant, surtout pour les faibles différences de textures étudiées dans ce mémoire.

#### *4.2.3.4 Différences au niveau des champs*

Pour rappel, les méthodes pour lesquelles les différents types de champs avaient des valeurs significativement différentes étaient : la méthode de mesure de densité apparente par les cylindres de Kopecky, la méthode VESS et le pénétromètre digital. Parmi celles-ci, toutes ont mis en évidence des différences significatives entre la prairie et le champ de pommes de terre. Les mesures de densité apparente ont montré que le champ de pommes de terre avait une densité apparente plus élevée que la prairie, en moyenne. Cette tendance se retrouve également dans la littérature entre des prairies et des champs cultivés, et peut être expliquée en partie par la quantité de matière organique plus élevée dans une prairie, qui est négativement corrélée aux valeurs de densité apparente (Bauer and Black, 1981; Chaudhari et al., 2013; Keen et al., 2011). Dans le cas de la pénétrométrie, les valeurs de résistance à la pénétration sont significativement plus élevées pour la prairie que pour le champ de pommes de terre. Comme expliqué précédemment, ceci peut être le résultat d'une densité plus importante de racines, et d'une meilleure structure visuelle au niveau de la prairie que du champ de pommes de terre (Rosolem et al., 2002). Justement, la structure visuelle évaluée par la méthode VESS montre que la prairie obtient des scores significativement plus faibles – et donc de meilleure structure – que le champ de pommes de terre. Des résultats similaires

qui indiquent une meilleure structure visuelle pour les prairies que pour des champs cultivés ont été observés en Belgique (Pulido Moncada et al., 2017).

La méthode de mesure de la densité apparente par des cylindres de Kopecky ainsi que la méthode VESS ont aussi montré des différences significatives entre la prairie et le champ de betteraves. Pour les deux méthodes, les relations entre la prairie et le champ de betteraves sont les mêmes que celles observées entre la prairie et le champ de pommes de terre. Les différences entre la prairie et les deux champs travaillés peuvent donc être interprétées de la même manière.

Finalement, seul le pénétromètre digital différencie les deux champs travaillés : le champ de betteraves a une plus grande résistance à la pénétration que le champ de pommes de terre. Il est possible que cette différence soit due à la présence du couvert sur le champ de betteraves, dont les racines pourraient jouer le même rôle que celles d'une prairie. Lorsque l'on confronte nos résultats à ceux de la littérature concernant le non-labour et le labour<sup>13</sup>, nous constatons que les champs en non-labour ont souvent des valeurs de résistance à la pénétration plus élevées que celles des champs labourés. En effet, les champs non-labourés présentent en général une plus grande compaction en surface mais gardent de très bonnes propriétés physiques grâce à la présence de pores biologiques et de racines (Askari et al., 2013; Bueno et al., 2006; Moraes et al., 2014). Ces constats rejoignent les nôtres qui indiquent que le champ de betteraves, avec un travail du sol intermédiaire, résiste plus à la pénétration que le champ de pommes de terre, avec un travail du sol plus important dont un labour. Rappelons toutefois qu'il est très difficile d'interpréter les résultats de pénétrométrie puisque l'humidité des sols est inconnue.

#### 4.2.4 Résumé sur la comparaison des méthodes de mesure qui évaluent la résistance des sols à la compaction

Toutes les méthodes sauf la méthode Maison ont mis en évidence des différences significatives entre certains champs. La méthode Maison présente pourtant des avantages pour être employée dans le cas d'une recherche participative à la ferme. En effet, celle-ci est peu coûteuse, très facile et rapide. La variabilité observée dans ce mémoire la rend toutefois inefficace pour la comparaison de champs soumis à un travail du sol différent. Il serait intéressant d'augmenter les répétitions par parcelle et d'étudier l'effet de l'humidité sur les

---

<sup>13</sup> La raison pour laquelle nos résultats sont confrontés à la littérature scientifique concernant le non-labour et le labour a été expliquée dans la partie infiltrométrie. D'un point de vue travail du sol, les champs de pommes de terre et de betteraves diffèrent surtout au niveau des opérations culturales réalisées durant l'année 2019-2020, c'est-à-dire, par un labour pour le champ de pommes de terre, et un passage au strip-till ainsi que la mise en place d'une culture de couverture pour le champ de betteraves. Il faut toutefois rester vigilant dans les interprétations puisqu'il ne s'agit que de différences de travail du sol au niveau de l'année.

valeurs mesurée de profondeur de pénétration de la bouteille afin d'avoir une meilleure opinion sur sa précision. Pour le moment, cette méthode n'est donc pas utilisable en pratique, tant que d'autres essais n'ont pas été effectués pour la valider.

Le pénétromètre digital est un outil intéressant car il est très utilisé dans la littérature, et est simple et rapide. Etant donné sa faible précision il nécessite de prendre beaucoup de mesures (au moins 15 -25 par parcelle), ce qui ne rend pas spécialement le travail plus compliqué vu son utilisation rapide. Par contre, les données mesurées nécessitent ultérieurement une analyse qui peut représenter un temps non négligeable. De plus, l'interprétation des valeurs de résistance à la pénétration n'est pas facile car les valeurs de pénétrométrie varient en fonction de beaucoup de facteurs (humidité, texture, densité de racines, densité apparente, etc...). L'humidité est celui qui les influence le plus, et il est impératif qu'elle soit mesurée en même temps que les mesures de pénétrométrie. Cet outil peut être utilisé dans le cadre d'une recherche participative en réseau de fermes à condition que l'université (ou structure responsable de la recherche) mette à disposition le matériel nécessaire aux agriculteurs étant donné son coût. Au final, le pénétromètre digital est intéressant comme mesure de terrain, et est la seule méthode qui a permis de mettre en lien des différences significatives entre les deux champs travaillés (BET et PDT). Or, ces deux champs sont ceux qui ressembleront le plus aux champs des participants à la recherche de Lola Leveau. Cependant, l'interprétation des résultats est difficile et peut poser problème quand le but est de comparer des pratiques agricoles entre elles. En fait, si le pénétromètre peut facilement être utilisé, il est nécessaire d'utiliser d'autres méthodes de mesure de l'état de compaction du sol ou d'autres propriétés physiques afin de pouvoir mieux l'interpréter.

La méthode de mesure de densité apparente à l'aide de cylindres de Kopecky est intéressante puisqu'elle est reconnue et très utilisée dans le monde scientifique. Mis à part qu'elle nécessite des cylindres spécifiques de volume connu, le matériel est simple et peu coûteux. Bien qu'il s'agisse initialement d'une méthode de laboratoire, ce mémoire a montré qu'elle pouvait également être réalisée à domicile. Il s'agit toutefois de la méthode la plus lente quand on la compare avec les autres méthodes étudiées dans ce mémoire. En effet, l'échantillonnage sur le terrain prend un certain temps (4 h pour 5 placettes) et est assez physique, comparativement aux autres méthodes. De plus, une fois les échantillons récoltés, un séchage au four ou à l'étuve est nécessaire, ce qui rallonge aussi le temps total de la mesure par rapport aux méthodes de terrain. Enfin, cette méthode n'est utilisable dans le cas d'une recherche participative en réseau de fermes que dans la mesure où les agriculteurs participants entreprendraient les mesures chez eux. Si celles-ci doivent être réalisées par le chercheur, cela risque de représenter un temps et un travail trop important.

La méthode VESS est probablement la plus adaptée pour une recherche participative en réseau de fermes. En effet, celle-ci est rapide, simple, peu coûteuse et déjà utilisée dans le monde scientifique. Si elle est utilisée directement par les agriculteurs ou par plusieurs

expérimentateurs, une formation pour les familiariser avec la méthodologie et pour diminuer la subjectivité de l'expérimentateur sera recommandée et pourrait justement permettre d'évaluer la part de variabilité liée à l'expérimentateur. Que les mesures soient prises par les agriculteurs ou par les chercheurs, l'application smartphone utilisée dans ce mémoire est recommandée car elle permet de comparer les photographies des différents profils et d'uniformiser la méthodologie. Finalement, la méthode VESS peut être complémentée par une mesure de densité apparente par des cylindres de Kopecky si la charge de travail n'est pas trop importante pour le chercheur.

---

## 4.3 Discussion sur les résultats des méthodes qui évaluent la stabilité des agrégats des sols

---

### 4.3.1 Confrontation des résultats avec la littérature

Pour rappel, les mesures de la méthode Le Bissonnais et du Quanti-Slake Test n'ont été effectuées que sur les deux parcelles de prairie en raison de l'épidémie du COVID-19. Les valeurs du Bissonnais obtenues font référence à des sols stables, rarement sujets à la battance et avec des risques limités de ruissellement et d'érosion diffus (Le Bissonnais, 1995). Pour rappel, pour cette méthode, un diamètre moyen pondéré élevé est synonyme d'une meilleure stabilité des agrégats. Pulido Moncada et al. (2017) avaient obtenu des diamètres moyens pondérés plus faibles que nous – de 0,83 à 0,94 mm – sur des sols limono-sableux de prairies belges. Les données du Quanti-Slake Test, bien qu'étudiées de façon différentes, sont similaires aux résultats présentés pour les sols de prairie par Vanwindekens et al. (2020) et montrent que ces sols sont plus stables que des sols travaillés (Vanwindekens et al., 2020, 2018).

Aucune donnée comparable n'a été trouvée, faisant référence à la méthode USDA utilisée dans ce mémoire. Les données de la méthode Ariane Chabert, elles, peuvent difficilement être comparées puisque le diamètre des anneaux utilisés pour réaliser les mesures dans ce mémoire est légèrement inférieur à celui des anneaux employés par Ariane Chabert dans sa thèse (12 et 14 cm de diamètre). Les profondeurs jusqu'auxquelles le disque de Secchi est visible, sont du même ordre de grandeur mais toutefois différentes que celles observées par Ariane Chabert puisque les nôtres varient entre 1 et 10,5 cm par rapport à environ 3 à 21 cm pour Ariane Chabert.

Finalement, les résultats de la méthode VESS sont en accord avec la littérature, comme expliqué dans la partie concernant la discussion sur les mesures de compaction. Remarquons une légère différence : cette fois-ci, uniquement le score donné à l'horizon de 0 à 5 cm a été conservé pour comparer les résultats avec ceux des autres méthodes puisqu'elles mesurent toutes la stabilité des agrégats à cette profondeur déterminée.

## 4.3.2 Variabilité des méthodes de mesure

La variabilité des méthodes Le Bissonnais et du Quanti-Slake Test ne seront pas discutées dans ce travail, étant donné le faible nombre de résultats récoltés. Quant à celle de la méthode VESS, nous l'avons déjà dans la partie discussion sur les méthodes de mesure de l'état de compaction du sol.

### 4.3.2.1 Méthode Ariane Chabert

L'écart-type intra-placette représente 10 % de l'écart-type total entre les mesures de stabilité des agrégats de la méthode Ariane Chabert. Les résultats montrent aussi que l'écart-type intra-placette est aussi grand que l'écart-type intra-parcelle. La méthode Ariane Chabert a donc une assez bonne précision dans notre cas, et les valeurs de profondeurs auxquelles on ne voit plus le disque de Secchi sont constantes au niveau d'une parcelle. Une partie des erreurs de précision peut provenir du fait qu'il n'est pas facile de décider au millimètre près à quelle profondeur exacte, on ne voit plus le disque de Secchi. Une autre source d'erreur pourrait provenir de la manière dont les 1,25 L d'eau sont versés dans l'anneau. En effet, celle-ci a pu légèrement varier d'une mesure à l'autre et modifier ainsi l'énergie cinétique, qui joue un rôle sur l'arrachage des particules.

### 4.3.2.2 Méthode USDA

L'écart-type intra-placette des mesures USDA n'a pas été évalué. Quand on regarde la variabilité des mesures par parcelle, on constate que celle des parcelles de prairie est nulle. En effet, tous les échantillons prélevés en prairie ont eu le même score USDA de 6, indicateur de la meilleure structure possible. Une remarque personnelle quant à l'échelle de pondération utilisée pour attribuer un score est qu'elle devrait au moins ajouter des scores supplémentaires. En effet, ceci permettrait d'affiner les mesures et d'éviter d'attribuer un score semblable à deux sols étant légèrement différents. Par exemple, des scores de 6 ont été attribués à certains échantillons prélevés dans les champs travaillés (les champs de pommes de terre et de betteraves) et à tous les prélèvements provenant des parcelles de prairie, alors que lors de l'expérience, les agrégats se comportaient de manière différente : pour les

agrégats de la prairie, il restait plus de 90-95% des agrégats de départ sous forme intacte après la cinquième immersion, alors que dans le cas des échantillons provenant des champs travaillés, il restait plutôt entre 60 et 80 % des agrégats de départ après l'immersion. Une échelle plus adéquate pourrait se présenter ainsi : un score de 5 lorsqu'il reste entre 25 et 50 % des agrégats de départ après les 5 immersions, 6 pour 50 à 75 %, 7 pour 75 à 90% et 8 pour 90 à 100%.

### 4.3.3 Quelles sont les différences mises en évidence par chaque méthode ?

#### 4.3.3.1 *Corrélations et comparaison des méthodes*

Les méthodes USDA, Ariane Chabert et VESS sont corrélées entre-elles. La méthode VESS est corrélée négativement par rapport aux deux autres méthodes puisque l'échelle des scores VESS va dans le sens opposé à celles des scores USDA et des résultats de la méthode Ariane Chabert. La bonne corrélation observée entre ces trois méthodes montre qu'elles semblent donner des informations similaires sur la stabilité des agrégats du sol, malgré le fait qu'elle la mesure chacune d'une manière différente. En effet, la méthode VESS l'évalue à partir de critères visuels, la méthode Ariane Chabert en évaluant la turbidité de l'eau et la méthode USDA en immergeant les agrégats dans l'eau. En plus de cela, contrairement aux deux autres méthodes, la méthode VESS n'évalue pas la désagrégation mécanique provoquée par l'impact des gouttes de pluies, puisqu'il ne s'agit que d'une observation visuelle. Aussi, La méthode USDA est la seule de ces trois méthodes à évaluer la stabilité des agrégats à partir d'un tamisage humide, comme le fait la méthode Le Bissonnais, largement utilisée dans le monde scientifique. Une autre remarque intéressante est que les trois méthodes montrent des différences similaires en termes de stabilité des agrégats entre les parcelles, alors que deux d'entre elles ne tiennent pas compte de l'humidité dans leur protocole. En effet, la méthode USDA est la seule à s'affranchir de l'impact de l'humidité dans son protocole, en séchant les agrégats récoltés à l'air libre.

Rappelons que si le Quanti-Slake test et la méthode du Bissonnais ne sont pas corrélées avec les autres méthodes, c'est principalement parce que les valeurs de ces deux tests ont été calculées uniquement sur les parcelles de la prairie. Dans la littérature, la méthode Le Bissonnais - ou les méthodes apparentées (comme le test de Henin par exemple) - font partie d'une référence lorsque l'on évalue la stabilité structurale des agrégats et ont déjà permis d'établir des différences de stabilité structurale entre des sols soumis à des pratiques culturales différentes (Gryze et al., 2006; Keller et al., 2012; Pulido Moncada et al., 2017). Le Quanti-Slake test est moins reconnu dans la littérature, mais des premiers essais se sont

montrés très prometteurs dans la comparaison des stabilités structurales de sol labourés et non-labourés (Vanwindekens et al., 2018).

#### *4.3.3.2 Différences au niveau de la texture*

La méthode Ariane Chabert, est la seule pour laquelle l'effet de la texture est significatif. Ariane Chabert avait observé que plus la teneur en limon fin augmentait dans les sol, plus la stabilité des agrégats était diminuée (Chabert and Sarthou, 2017). Dans notre cas, c'est la texture limoneuse qui présentait une meilleure stabilité des agrégats que la texture limono-sableuse ( $p\text{-valeur} = 0,0006$ ). Justement, Gryze et al. (2006) ont montré que la stabilité des agrégats, mesurée en calculant le diamètre moyen pondéré après un tamisage humide, augmentait avec des textures plus fines.

Bien qu'à part la méthode Ariane Chabert, les autres méthodes n'aient pas été influencées par ce facteur dans notre cas, il est clair que la texture, notamment la teneur et minéralogie des argiles joue un rôle sur la stabilité des agrégats du sol (Amézketa, 1999). Une explication de l'effet non significatif de la texture, peut provenir du fait que les champs étudiés dans ce mémoire avaient deux textures relativement proches et qu'uniquement la couche superficielle (0 et 5 cm de profondeur) a été étudiée.

#### *4.3.3.3 Différences au niveau des champs*

Selon les méthodes Ariane Chabert, VESS et USDA, la prairie permanente présente une meilleure stabilité des agrégats que les deux autres champs travaillés. Cela est probablement dû à la teneur élevée en matière organique présente en surface dans la prairie, qui joue un rôle majeur dans les processus de stabilité des agrégats (Amézketa, 1999).

Le fait qu'aucune méthode n'observe de différences significatives entre les deux champs travaillés nous laisse penser qu'au moment des mesures, les deux sols avaient une stabilité des agrégats similaire. Ce constat semble normal puisque la stabilité des agrégats est fortement influencée par le taux de matière organique du sol qui lui-même prend du temps à être modifié par les pratiques culturales. Dès lors, une simple différence d'intensité de travail du sol au niveau de l'année n'est pas susceptible d'influencer la teneur en matière organique des sols et donc la stabilité de leurs agrégats (Roger-Estrade et al., 2011).

#### 4.3.4 Résumé sur la comparaison des méthodes qui évaluent la stabilité des agrégats des sols

Les méthodes Le Bissonnais et du Quanti-Slake Test n'ont pas vraiment pu être analysées dans ce travail. La méthode Le Bissonnais est la méthode la plus lente de toutes puisqu'elle nécessite un travail au laboratoire de plusieurs heures par groupe d'échantillons. Bien que fiable et rigoureuse, il ne s'agit pas d'une méthode simple, peu coûteuse et rapide. Elle n'est donc pas conseillée dans le cas d'une recherche participative en réseau de fermes. Le Quanti-Slake Test demande un temps de traitement moins important en laboratoire et est plus simple à effectuer. Il pourrait être utilisé dans une recherche participative en réseau de fermes, dans la mesure où tous les échantillons seraient traités dans un même laboratoire qui serait muni du dispositif expérimental (une balance programmée, un bécher, un panier grillagé et un ordinateur connecté à la balance). Cela représenterait quand même un coût en matériel et en temps plus élevé que les méthodes de terrain : VESS, USDA et Ariane Chabert.

Ces trois méthodes de terrain, plus adaptées à une recherche participative en réseau de fermes, sont assez équivalentes en termes de temps, de facilité d'implémentation et de coût. La méthode USDA est probablement légèrement plus exigeante en temps puisqu'elle nécessite de faire sécher les échantillons à l'air libre. Notons aussi que ces trois méthodes pourraient être réalisées par les agriculteurs eux-mêmes.

Suite à l'interprétation des résultats obtenus, une question apparaît essentielle : la stabilité des agrégats est-elle, dans notre évaluation, un indicateur pertinent pour comparer des pratiques agricoles innovatrices propres à différentes exploitations, sachant que la durée de l'étude participative de Lola Leveau ne repose que sur quelques années seulement ? S'il est vrai que des variations de stabilité des agrégats pourraient être observées entre différentes pratiques culturales, ces résultats permettront-ils d'affirmer que ces variations seraient uniquement liées à un choix d'une pratique plutôt qu'une autre ? Par exemple, une pratique meilleure qu'une autre sur un sol de moins bonne qualité au départ, pourrait ne pas être retenue puisqu'il faudrait beaucoup trop de temps avant que son effet bénéfique ne puisse agir sur le taux de matière organique dans le sol et que dès lors on puisse mesurer effectivement cette amélioration. Comme la stabilité des agrégats dépend fortement du taux en matière organique dans le sol, les mesures effectuées maintenant dans les différentes exploitations risquent d'être plus corrélées au taux de matière organique du sol d'une exploitation à un moment « t » qu'à la pratique innovante réalisée dans celle-ci. Cet indicateur sera intéressant surtout si des pratiques culturales mises en place depuis plusieurs années sont comparées entre elles (Pulido Moncada et al., 2017; Roger-Estrade et al., 2011) mais l'évaluation à court terme risque de ne pas être suffisamment éloquente.

---

## 4.4 Quelles améliorations et perspectives ?

---

*La seule frustration lorsque l'on travaille sur quelque chose de multidisciplinaire c'est de ne pas pouvoir étudier chaque sujet dans les détails, puisque chaque sujet abordé pourrait être le fruit d'un travail supplémentaire.*

Dans ce mémoire, certaines décisions méthodologiques auraient pu être prises d'une autre manière, certains sujets auraient pu être plus approfondis, et enfin, certaines questions restent sans réponses et méritent d'être étudiées.

Tout d'abord, d'un point de vue méthodologique, il aurait peut-être été intéressant de comparer les méthodes de mesure sur des champs soit plus contrastés – pour tester leur aptitude à montrer des différences entre des sols de structures distinctes et connues – soit plus représentatifs des champs sur lesquels les méthodes seront testées dans l'étude participative de Lola Leveau. Pour cette deuxième option, notre analyse aurait pu porter sur des champs soumis à différentes pratiques culturelles : agriculture biologique, agriculture conventionnelle, agriculture de conservation, etc... Une option aurait pu être aussi de tester les méthodes directement sur les terrains des agriculteurs participant à l'étude de Lola Leveau.

Pour une analyse plus poussée des composantes des variances pour chaque méthode, des répétitions supplémentaires au niveau des placettes auraient pu être réalisées. Il faut toutefois noter que cela aurait représenté une charge de travail importante et que ce choix, bien qu'« idéal » deviendrait un peu irréaliste lorsqu'il s'agit de comparer un éventail aussi diversifié de méthodes que celui expérimenté dans ce mémoire.

Plusieurs sujets auraient pu être plus approfondis dans ce mémoire. Tout d'abord, il aurait été intéressant, pour les mesures de densité apparente, de pénétrométrie et de la méthode VESS, d'étudier les tendances et différences des valeurs pour chaque profondeur en analysant les résultats des tests de Tukey liés à la profondeur. Cela aurait pu améliorer la discussion sur ces méthodes et la compréhension des phénomènes de compaction qui entrent en jeu en fonction de la profondeur.

Une réflexion supplémentaire aurait pu être apportée à la manière de comparer les courbes obtenues pour la méthode du Quanti-Slake Test, comme nous l'avons prévu au départ, mais étant donné le peu de mesures effectuées en raison de l'épidémie du COVID-19, cette idée a été abandonnée. Si cette méthode est utilisée dans d'autres travaux, il est impératif de réfléchir à la meilleure manière de comparer les courbes. Vanwindekens et al. (2020) sont en pleine réflexion sur ce sujet et ont déjà tenté de comparer les valeurs en calculant les poids relatifs des échantillons à un moment donné (de la même façon que dans ce mémoire, mais en prenant le poids initial comme étant celui de l'échantillon à l'instant où

il est plongé dans l'eau) ou en se basant sur la pente de la courbe. Dans une méthode de mesure assez similaire au Quanti-Slake Test, Arulanandan et al. (1980) proposent, par exemple, de comparer les résultats en calculant une valeur normalisée du poids de l'échantillon après 15 minutes.

Un autre aspect qui mérite davantage d'attention est l'élaboration des méthodes de terrain. Dans le cadre de ce mémoire, le développement des méthodes Maison a été plutôt considéré comme un sous-objectif puisque ce type d'innovation requiert beaucoup de réflexions et représente un projet à part entière. Les techniques expérimentées ne sont pas parfaites et servent surtout d'exemples, de points de départ pour l'élaboration collective de nouvelles méthodes de terrain plus abouties, à perfectionner progressivement. Il serait bienvenu de continuer à tester ces dispositifs (ou leurs modèles dérivés) avec plus de répétitions et en testant plusieurs situations contrastées - comme par exemple, différentes textures de sol ou différentes teneurs en eau – pour observer leur comportement.

Finalement, différentes questions techniques encore sans réponse évidente ont surgi au cours de cette expérience : est-il plus intéressant de comparer l'infiltration en surface ou en profondeur, à saturation ou non, et avec une charge d'eau variable ou pas ? Les facteurs à considérer sont nombreux et la problématique reste complexe et interdisciplinaire !

---

## 4.5 Conclusion

---

L'agriculture telle qu'elle a été pratiquée au XX<sup>ème</sup> siècle a eu des effets négatifs sur l'environnement partout dans le monde. Dans ce mémoire, une attention particulière a été donnée aux conséquences relatives à la dégradation des sols dans les régions sablo-limoneuses et limoneuses de Belgique, où les problèmes de diminution de matière organique, d'érosion et de compaction ont déjà été mis en exergue. Face à ces conséquences environnementales, la Région wallonne promeut une agriculture écologiquement intensive, plus durable. Cependant il est nécessaire de pouvoir caractériser et comparer de manière scientifique les différentes pratiques culturales innovantes par rapport à cette évolution souhaitée. Pour ce faire, une manière pertinente d'étudier les systèmes agricoles est une approche agroécologique multidisciplinaire et collaborative étudiant les dimensions écologiques, économiques et sociales, en réseau de fermes. Lola Leveau utilise cette approche dans le cadre de sa thèse pour évaluer la durabilité des systèmes culturaux innovants en Wallonie. Ce mémoire s'insère dans la dimension écologique de la thèse de Lola Leveau et avait pour but de sélectionner et de tester un set d'indicateurs et de méthodes de mesure qui permet d'évaluer l'impact de différentes pratiques culturales sur la fourniture du service écosystémique de la stabilité structurale du sol. Ceci dans le but d'identifier des outils de mesures adéquats pour évaluer la capacité de chaque exploitation à fournir ce service écosystémique.

Ce mémoire s'est basé sur les principes d'une recherche participative dans la sélection des indicateurs et des méthodes de mesure à tester. De fait, des entretiens avec des experts et agriculteurs ainsi que des recherches dans la littérature ont été entrepris afin de sélectionner les indicateurs et méthodes de mesure pertinents. Cette démarche a permis de mettre en avant trois indicateurs - ou fonctions de l'écosystème – pour évaluer la stabilité structurale des sols : la résistance des sols à la compaction, la capacité d'infiltration de l'eau dans les sols et la stabilité des agrégats des sols. Pour chaque fonction de l'écosystème considérée, des méthodes scientifiquement reconnues et des méthodes pratiques (simples, rapides et peu coûteuses) ont été sélectionnées. Parmi celles-ci, certaines méthodes dites « Maison » ont été développées en se basant sur les observations d'agriculteurs. Au total, 11 méthodes ont été identifiées et testées à la ferme universitaire de Marbaix et sur trois champs différents : une prairie permanente, un champ de froment après une culture de pommes de terre (champ de pommes de terre ou PDT) et un champ dans lequel les mesures ont été effectuées entre une culture de froment suivie d'une culture de couverture et un semis de betteraves (champ de betteraves ou BET). Chaque champ a été divisé en deux parcelles de texture limoneuse et limono-sableuse et chaque méthode de mesure a au moins été effectuée à cinq placettes par parcelle, résultant en un minimum de 10 mesures par champ (2 parcelles

x 5 placettes). Pour certaines méthodes jugées plus variables, des mesures supplémentaires ont été effectuées dans le but de calculer l'écart-type intra-placette. Des analyses statistiques ont ensuite été entreprises afin d'évaluer l'effet de l'humidité, de la texture, du type de champ et, pour les méthodes qui évaluent la résistance des sols à la compaction, de la profondeur sur les résultats des mesures.

Ces résultats montrent que l'effet de la texture est significatif pour deux des trois méthodes qui évaluent la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol : la méthode Ariane Chabert et la méthode Maison. En ce qui concerne les méthodes qui évaluent la résistance du sol à la compaction, une seule s'est avérée être impactée par la texture du sol : la méthode de mesure de densité apparente par des cylindres de Kopecky. Finalement, uniquement la méthode Ariane Chabert était influencée par la texture du sol pour les méthodes de mesure de la stabilité des agrégats du sol. Il est clair que la texture joue un rôle sur une majorité de propriétés physiques du sol dont celles qui concernent l'infiltration de l'eau, la compaction et la stabilité des agrégats des sols. Dans le cas de la démarche de sélection suivie dans ce mémoire, les méthodes dont les résultats ne sont pas biaisés par la texture sont les plus intéressantes. De fait, les champs des participants sur lesquels les méthodes devront être utilisées dans la thèse de Lola Leveau, auront des textures légèrement différentes, similaires à celles observées dans ce travail. Il est intéressant de constater que seulement 4 des 11 méthodes testées sont impactées par la texture.

En ce qui concerne la comparaison entre les champs, presque aucune méthode n'a permis de distinguer les champs BET et PDT, que ce soit en regardant l'infiltration du sol, la résistance à la compaction ou la stabilité des agrégats du sol. Le pénétromètre digital est le seul outil qui a révélé des différences significatives, en termes de résistance à la compaction, entre ces deux champs et est celui dont l'interprétation est la plus contestée, compte tenu du manque de données sur l'humidité du sol et de la difficulté d'interpréter des résultats de pénétrométrie. Pour la fonction de l'écosystème qui concerne l'infiltration de l'eau, la méthode Ariane Chabert est la seule à révéler des différences d'infiltration entre ces deux champs. Ces résultats indiquent que soit presque aucune des méthodes de mesure n'est suffisamment précise que pour observer des différences au niveau de ces deux champs, soit, qu'il n'y a pas de différences entre les deux champs en termes d'infiltration d'eau, de résistance à la compaction et de stabilité des agrégats du sol.

Plusieurs méthodes ont par contre montré des différences significatives de stabilité structurale entre la prairie permanente et les deux champs cultivés : la mesure de densité apparente, la méthode VESS, la méthode USDA et la méthode Ariane Chabert (pour la partie stabilité des agrégats). Ceci va en faveur de la validation de ces méthodes puisqu'il est connu, dans la littérature, qu'une prairie a une meilleure stabilité structurale que des champs travaillés. A ces méthodes, la méthode Maison de mesure de l'infiltration pourrait être rajoutée, puisqu'elle observe des différences significatives entre la prairie et le champ de

pommes de terre mais qu'elle n'a pas été utilisée sur le champ de betteraves. Des mesures supplémentaires seraient donc nécessaires pour permettre de la valider. D'après la littérature, les méthodes Le Bissonais et du Quanti-Slake Test auraient pu également être intéressantes pour comparer la prairie et les champs cultivés, mais n'ont pu être mesurées que sur la prairie en raison de l'épidémie du COVID-19, ce qui explique qu'elles ne figurent pas dans la liste.

Au final, dans le cas d'une recherche participative en réseau de fermes, certaines méthodes semblent plus intéressantes que d'autres. La méthode VESS est probablement la plus adéquate puisqu'elle fait partie des méthodes qui ont permis de révéler des différences significatives entre les deux champs travaillés et la prairie, qu'elle est rapide, simple et peu coûteuse. De plus, elle a déjà été utilisée en Belgique, et dans d'autres pays pour évaluer l'impact de pratiques culturales sur la structure du sol. Ensuite, la méthode Ariane Chabert est intéressante également puisque, comme la méthode VESS, elle est pratique et a permis de voir des différences significatives entre les différents champs. Son principal atout est qu'en une seule méthode elle peut évaluer la stabilité structurale en mesurant à la fois l'infiltration de l'eau dans le sol et la stabilité des agrégats du sol. Son point faible par rapport à la méthode VESS, est qu'elle est impactée par la texture du sol et qu'elle n'a été utilisée qu'une seule fois, dans le cadre d'une thèse. La méthode USDA s'est également avérée prometteuse, mais nécessite sûrement une révision des critères de classification de ses scores pour permettre un meilleur diagnostic sur la stabilité des agrégats des sols. Ses autres faiblesses sont sa faible utilisation dans la littérature et qu'elle nécessite une étape ultérieure en laboratoire (ou à domicile) pour effectuer les analyses sur les échantillons. La mesure de densité apparente est la plus reconnue lorsqu'il s'agit d'évaluer l'état de compaction d'un sol. Elle s'est avérée intéressante dans ce mémoire puisqu'il a été montré qu'elle pouvait être réalisée à domicile. Elle nécessite néanmoins plus de temps et de main d'œuvre que les méthodes citées précédemment, ce qui la rend moins intéressante lorsque beaucoup d'échantillons sont évalués. Si la charge de travail n'est pas le facteur limitant, alors cette méthode est appréciable puisqu'elle est hautement référencée dans la littérature. Pour sa part, le pénétromètre digital, bien que largement utilisé dans la littérature, semble trop variable et trop difficile à interpréter pour être un bon indicateur, à lui seul, de la stabilité structurale du sol. Cependant, si l'humidité est mesurée en même temps, et en complément à d'autres méthodes de mesure, il pourrait être un outil pratique et intéressant à utiliser pour une recherche participative en réseau de fermes. La méthode la moins adéquate pour ce type de recherche semble être la méthode Simple Anneau. De fait, cette méthode n'a révélé aucune différence significative entre les champs travaillés et la prairie permanente, qui présentent pourtant des stabilités structurales supposées différentes. De plus, le mode opératoire n'est pas aisé, il est coûteux et demande beaucoup de temps et de main d'œuvre.

Les deux méthodes Maison sont prometteuses mais nécessitent une étude plus approfondie afin de pouvoir les valider. Celle développée pour évaluer la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol retient notre intérêt plus que l'autre puisqu'elle a permis de mettre en

évidence des différences entre les deux champs où elle a été testée et qu'elle est moins variable. La méthode Le Bissonnais est une référence en termes de stabilité des agrégats mais demande un temps de traitement en laboratoire trop élevé pour une étude participative en réseau de fermes. La méthode du Quanti-Slake Test, quant à elle, pourrait être utilisée dans ce contexte mais nécessite plus d'essais pour valider son utilisation et pour standardiser la manière de l'utiliser. Elle reste aussi plus chronophage que les méthodes pratiques et de terrain présentées dans ce mémoire.

De manière plus générale, ce travail propose une série de méthodes pratiques d'évaluation de la stabilité structurale des sols qui peuvent être utilisées sur le terrain, que ce soit dans le cas d'une recherche participative ou pour une évaluation rapide de leur sol par les agriculteurs. Il est nécessaire de continuer à développer des outils pratiques qui permettent d'évaluer les services écosystémiques d'une exploitation agricole pour pouvoir construire l'agriculture de demain. Ce travail a montré qu'il existe de tels outils mais que la comparaison de systèmes cultureux est multidisciplinaire et complexe. Par exemple, ce travail souligne l'importance d'intégrer la dimension temporelle dans l'évaluation de la stabilité des agrégats du sol.

Dans le contexte actuel, de plus en plus d'acteurs interpellent le monde agricole mais aussi politique, associatif, citoyen par rapport à l'urgence de protéger et d'améliorer la qualité des sols, de garantir la durabilité des activités agricoles, et de sauvegarder l'environnement en général. Or les impacts des nouvelles pratiques prometteuses ne pourront pas nécessairement être effectifs et observables, mesurables directement alors qu'il faut déjà décider dès aujourd'hui quelles options entreprendre, développer ou approfondir. Il faut pouvoir assurer une certaine continuité, en poursuivant l'innovation et son évaluation régulière. Dans ce travail, le partage d'informations, le développement de nouvelles méthodes et de méthodologies de recherche seront des étapes obligatoires. Voilà un défi fondamental dans lequel la recherche devra jouer un rôle complexe mais essentiel en collaboration avec les professionnels de terrain, les universités, la société civile organisée et les pouvoirs publics.

---

# Bibliographie

---

- Al-Shammary, A.A.G., Kouzani, A.Z., Kaynak, A., Khoo, S.Y., Norton, M., Gates, W., 2018. Soil Bulk Density Estimation Methods: A Review. *Pedosphere* 28, 581–596.  
[https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(18\)60034-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60034-7)
- Amézqueta, E., 1999. Soil Aggregate Stability: A Review. *Journal of Sustainable Agriculture* 14, 83–151.  
[https://doi.org/10.1300/J064v14n02\\_08](https://doi.org/10.1300/J064v14n02_08)
- Antier, C., Baret, P., Petel, T., 2019. Quelle agriculture en 2050?
- Arshad, M.A., Franzluebbers, A.J., Azooz, R.H., 1999. Components of surface soil structure under conventional and no-tillage in northwestern Canada. *Soil and Tillage Research* 53, 41–47.  
[https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00075-6](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00075-6)
- Arulanandan, K., Gillogley, E., Tully, R., 1980. Development of a quantitative method to predict critical shear stress and rate of erosion of natural undisturbed cohesive soils. Civil Engineering Department of the University of California at Davis.
- Askari, M.S., Cui, J., Holden, N.M., 2013. The visual evaluation of soil structure under arable management. *Soil and Tillage Research* 134, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.06.004>
- Asseline, J., 1997. Le simulateur de pluie en 1997 (type ORSTOM, Asseline-Valentin) : adaptations aux zones semi-arides et de montagne. Centre ORSTOM 10.
- Ball, B., Munkholm, L.J. (Eds.), 2015. Visual soil evaluation: realizing potential crop production with minimum environmental impact. CAB International, Wallingford, Oxfordshire ; Boston, MA.
- Ball, B.C., Batey, T., Munkholm, L.J., 2007. Field assessment of soil structural quality – a development of the Peerlkamp test. *Soil Use & Management* 23, 329–337. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2007.00102.x>
- Balloy, B., Bispo, A., Bouthier, A., Chenu, C., Cluzeau, D., Degan, F., Metzger, L., 2017. Tour d’horizon des indicateurs relatifs à l’état organique et biologique des sols.
- Baret, P., 2020. Diapositives du cours LBIRAI 2110 - Elements of agroecology [WWW Document]. URL <https://moodleucl.uclouvain.be/course/view.php?id=7876>
- Bartkowski, B., Bartke, S., Helming, K., Paul, C., Techen, A.-K., Hansjürgens, B., 2020. Potential of the economic valuation of soil-based ecosystem services to inform sustainable soil management and policy. *PeerJ* 8, e8749. <https://doi.org/10.7717/peerj.8749>
- Bauer, A., Black, A.L., 1981. Soil Carbon, Nitrogen, and Bulk Density Comparisons in Two Cropland Tillage Systems after 25 Years and in Virgin Grassland. *Soil Science Society of America Journal* 45, 1166–1170. <https://doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500060032x>
- Bengtsson, J., 2015. Biological control as an ecosystem service: partitioning contributions of nature and human inputs to yield. *Ecological Entomology* 40, 45–55.  
<https://doi.org/10.1111/een.12247>
- Bennett, E.M., Cramer, W., Begossi, A., Cundill, G., Díaz, S., Egoh, B.N., Geijzendorffer, I.R., Krug, C.B., Lavorel, S., Lazos, E., Lebel, L., Martín-López, B., Meyfroidt, P., Mooney, H.A., Nel, J.L., Pascual, U., Payet, K., Harguindeguy, N.P., Peterson, G.D., Prieur-Richard, A.-H., Reyers, B., Roebeling, P., Seppelt, R., Solan, M., Tschakert, P., Tschardtke, T., Turner, B., Verburg, P.H., Viglizzo, E.F., White, P.C., Woodward, G., 2015. Linking biodiversity, ecosystem services, and human well-being: three challenges for designing research for sustainability. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 14, 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.03.007>
- Bertin, P., 2019. Diapositives du cours LBIRA2109 : Systèmes agraires [WWW Document]. URL <https://moodleucl.uclouvain.be/course/search.php?search=syst%C3%A8mes+agaires> (accessed 4.4.19).

- Biielders, C., 2017. L'eau et les sols - hydrodynamique des milieux poreux : Perméamètre à charge variable.
- Biielders, C., 2009. Mesure de l'infiltration au moyen d'un infiltromètre à charge constante. Prosensol : Protégeons nos sols.
- Biielders, C., Javaux, M., 2019. LBRES2103 - Physique du sol appliquée à l'agronomie et l'environnement [WWW Document]. URL <https://moodleucl.uclouvain.be/course/view.php?id=7103> (accessed 4.10.20).
- Biielders, C.L., Ramelot, C., Persoons, E., 2003. Farmer perception of runoff and erosion and extent of flooding in the silt-loam belt of the Belgian Walloon Region. *Environmental Science & Policy* 6, 85–93. [https://doi.org/10.1016/S1462-9011\(02\)00117-X](https://doi.org/10.1016/S1462-9011(02)00117-X)
- Birkhofer, K., Arvidsson, F., Ehlers, D., Mader, V.L., Bengtsson, J., Smith, H.G., 2016. Organic farming affects the biological control of hemipteran pests and yields in spring barley independent of landscape complexity.
- Boeraeve, F., Dufrêne, M., Dendoncker, N., 2018. How can integrated ecosystem service valuation help understand agroecological transition? Université de Liège, Liège, Belgique.
- Boerema, A., Rebelo, A.J., Bodi, M.B., Esler, K.J., Meire, P., 2017. Are ecosystem services adequately quantified? *Journal of Applied Ecology* 54, 358–370. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12696>
- Bourgeois, M., Coquillart, E., Cournarie, M., Fassino, C., 2020. La matière organique - Qu'est-ce que la matière organique ? [WWW Document]. supagro.fr. URL [https://www.supagro.fr/ress-pepites/matiereorganique/co/1\\_DefinitionMO.html](https://www.supagro.fr/ress-pepites/matiereorganique/co/1_DefinitionMO.html) (accessed 4.15.20).
- Bueno, J., Amiama, C., Hernanz, J.L., Pereira, J.M., 2006. PENETRATION RESISTANCE, SOIL WATER CONTENT, AND WORKABILITY OF GRASSLANDS SOILS UNDER TWO TILLAGE SYSTEMS. *Transactions of the ASABE* 49, 875–882. <https://doi.org/10.13031/2013.21727>
- Cáceres, D.M., Tapella, E., Quétier, F., Díaz, S., 2015. The social value of biodiversity and ecosystem services from the perspectives of different social actors. *E&S* 20, art62. <https://doi.org/10.5751/ES-07297-200162>
- Cambardella, C.A., Elliott, E.T., 1993. Carbon and Nitrogen Distribution in Aggregates from Cultivated and Native Grassland Soils. *Soil Science Society of America Journal* 57, 1071–1076. <https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700040032x>
- Campbell, D.J., 1994. Determination and Use of Soil Bulk Density in Relation to Soil Compaction, in: *Developments in Agricultural Engineering*. Elsevier, pp. 113–139. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-88286-8.50014-3>
- Chabert, A., Sarthou, J.P., 2017. Expression combinée des services écosystémiques en systèmes de production agricole conventionnels et innovants: étude des déterminants agroécologiques de gestion du sol, des intrants et du paysage. Université de Toulouse.
- Chaudhari, P.R., Ahire, D.V., Ahire, V.D., Chkravarty, M., Maity, S., 2013. Soil Bulk Density as related to Soil Texture, Organic Matter Content and available total Nutrients of Coimbatore Soil. *International Journal of Scientific and Research Publications*.
- CIMMYT Economics Program (Ed.), 1988. From agronomic data to farmer recommendations: an economics training manual, Completely rev. ed. ed. CIMMYT Economics Program, México, D.F., México.
- Colombani, J., Lamagat, J.-P., Thiebaut, J., 1973. Mesure de la perméabilité des sols en place : un nouvel appareil pour la méthode Muntz, une extension de la méthode Porchet aux sols hétérogènes. *Hydrological Sciences Bulletin* 18, 197–235. <https://doi.org/10.1080/02626667309494027>
- Commission Européenne, 2016. Soil protection [WWW Document]. EU Science Hub - Soil protection. URL <https://ec.europa.eu/jrc/en/research-topic/soil-protection> (accessed 3.18.20).
- Commission Européenne, 2006. Thematic Strategy for Soil Protection [SEC(2006)620][SEC(2006)1165] - 52006DC0231 [WWW Document]. URL <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A52006DC0231> (accessed 3.18.20).

- Dalgaard, T., Hutchings, N.J., Porter, J.R., 2003. Agroecology, scaling and interdisciplinarity. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 100, 39–51. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00152-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00152-X)
- Dautrebande, S., Bièdiers, C., Cordonnier, H., Thirion, M., 2006. Lutter contre l'érosion des terres. Les livrets de l'agriculture, Direction générale de l'Agriculture.
- Debruyn, A., Triest, Q., 2020. Réseau d'acteurs de l'innovation.
- Dee, R.F., Box, T.W., Ed Robertson, J., 1966. Influence of Grass Vegetation on Water Intake of Pullman Silty Clay Loam. *J Range Manag* 19(2):77-79.
- Dendoncker, N., Keune, H., Jacobs, S., Gómez-Baggethun, E., 2013. Inclusive Ecosystem Services Valuation, in: *Ecosystem Services*. Elsevier, pp. 3–12. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-419964-4.00001-9>
- Destain, M.-F., 2013. La compaction des sols agricoles en Wallonie, Gembloux Agro-Bio Tech (ULg). ed. Service public wallonie, Gembloux.
- Draye, X., Govaerts, B., 2020. Cours : LBIRA2101 - Biométrie [WWW Document]. URL <https://moodleucl.uclouvain.be/course/view.php?id=7524> (accessed 4.29.20).
- Duley, F.L., Domingo, C.R., 1949. Effects of grass on intake of water. Nebraska Agricultural Experiment Station.
- Eijkelkamp, 2020a. Penetrologger [WWW Document]. [fr.eijkelamp.com](http://fr.eijkelamp.com). URL <https://fr.eijkelkamp.com/produit/appareils-de-mesure-sur-le-terrain/penetrologger.html> (accessed 4.13.20).
- Eijkelkamp, 2020b. Penetroviewer V6.08 [WWW Document]. URL <https://en.eijkelkamp.com/products/software/penetroviewer-v6-08.htm> (accessed 4.16.20).
- Eijkelkamp, 2020c. Soil moisture measuring set Thetaprobe - Sensors & monitoring | Eijkelkamp [WWW Document]. [en.eijkelkamp.com](http://en.eijkelkamp.com). URL <https://en.eijkelkamp.com/products/field-measurement-equipment/soil-moisture-measuring-set-thetaprobe.html> (accessed 4.13.20).
- Elliott, J., Fondation Roi Baudouin, Vlaams Instituut voor Wetenschappelijk en Technologisch Aspectenonderzoek, 2005. Participatory methods toolkit: a practitioner's manual. King Baudouin Foundation / Flemish Institute for Science and Technology Assessment, Brussels.
- Elliott, J.A., Efetha, A.A., 1999. Influence of tillage and cropping system on soil organic matter, structure and infiltration in a rolling landscape. *Can. J. Soil. Sci.* 79, 457–463. <https://doi.org/10.4141/S98-075>
- Emmet-Booth, J.P., Bondi, G., Fenton, O., Forristal, P.D., Jeuken, E., Creamer, R.E., Holden, N.M., 2018. GrassVESS: a modification of the visual evaluation of soil structure method for grasslands. *Soil Use and Management* 37–47. <https://doi.org/10.1111/sum.12396> @10.1111/(ISSN)14752743.celebrating-bsss-anniversary
- FAO, 2006. Guidelines for soil description, 4th ed. ed. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FAO (Ed.), 2003. Explore on-farm: on-farm trials for adapting and adopting good agricultural practices. Rome.
- FAO, 1994. Le Travail du Sol pour une Agriculture Durable [WWW Document]. URL <http://www.fao.org/3/w7304f/w7304f00.htm#Contents>
- Franco, H.H.S., Guimarães, R.M.L., Tormena, C.A., Cherubin, M.R., Favilla, H.S., 2019. Global applications of the Visual Evaluation of Soil Structure method: A systematic review and meta-analysis. *Soil and Tillage Research* 190, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.002>
- Franzluebbers, A.J., 2002. Contents of Soil and Tillage Research, Volume 66. *Soil and Tillage Research* 66, 197–205. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00047-8](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00047-8)
- Gardner, W.R., Mayhugh, M.S., 1958. Solutions and tests of the diffusion equation for the movement of water in soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 197–201.
- Garnier, F., Elamri, Y., 2014. Automatisation du dispositif de Müntz pour la détermination in situ de la conductivité hydraulique à saturation [WWW Document]. URL [https://www6.inrae.fr/cahier\\_des\\_techniques/Les-Cahiers-parus/Les-N-reguliers/2014/Cahier-N-83/Art3-ct83-2014](https://www6.inrae.fr/cahier_des_techniques/Les-Cahiers-parus/Les-N-reguliers/2014/Cahier-N-83/Art3-ct83-2014) (accessed 5.26.20).

- Gillijns, K., Govers, G., Poesen, J., Mathijs, E., Biielders, C., 2005. Erosion des sols en Belgique, état de la question. Institut royal pour la Gestion durable des Ressources naturelles et la Promotion des Technologies propres, ASBL.
- Gobat, J.-M., Aragno, M., Matthey, W., 2010. Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols. PPUR Presses polytechniques.
- Google Play, 2020. VESS - Évaluation visuelle structure du sol (bêta) – Applications sur Google Play [WWW Document]. URL <https://play.google.com/store/apps/details?id=ch.hepia.vess&hl=fr> (accessed 4.13.20).
- Gouvernement wallon, 2014. Décret relatif au Code wallon de l'Agriculture du 27 mars 2014.
- Grappin, R., 1976. Guide pour l'évaluation des méthodes d'analyses de routine. *Le Lait* 56, 608–621.
- Gras, R., Benoit, M., Deffontaines, J.P., Duru, M., Lafage, M., Langlet, A., Osty, P.L., 1989. Le fait technique en agronomie. Activite agricole, concepts et methodes d'etude, L'Harmattan, Paris (France). ed, Collection Alternatives Rurales. UR 0126 Station d'agronomie et de physiologie végétale, Centre de recherche d'Antibes, 06606 Antibes, France.
- Grønsten, H.A., Børresen, T., 2009. Comparison of two methods for assessment of aggregate stability of agricultural soils in southeast Norway. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science* 59, 567–575. <https://doi.org/10.1080/09064710802495356>
- Gryze, S.D., Jassogne, L., Bossuyt, H., Six, J., Merckx, R., 2006. Water repellence and soil aggregate dynamics in a loamy grassland soil as affected by texture. *European Journal of Soil Science* 57, 235–246. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2005.00733.x>
- Guimarães, R.M.L., Ball, B.C., Tormena, C.A., 2011. Improvements in the visual evaluation of soil structure: Visual evaluation of soil structure. *Soil Use and Management* no-no. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00354.x>
- Haines-Young, R., Potschin, M., 2018. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and Guidance on the Application of the Revised Structure 53.
- Håkansson, I., Lipiec, J., 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil and Tillage Research* 53, 71–85. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00095-1](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00095-1)
- Hamza, M.A., Anderson, W.K., 2005. Soil compaction in cropping systems. *Soil and Tillage Research* 82, 121–145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>
- Hansson, S.O., 2019. Farmers' experiments and scientific methodology. *Euro Jnl Phil Sci* 9, 32. <https://doi.org/10.1007/s13194-019-0255-7>
- Hauggaard-Nielsen, H., Jørnsgaard, B., Kinane, J., Jensen, E.S., 2008. Grain legume–cereal intercropping: The practical application of diversity, competition and facilitation in arable and organic cropping systems. *Renewable Agriculture and Food Systems* 23, 3–12. <https://doi.org/10.1017/S1742170507002025>
- Hazell, P., Wood, S., 2008. Drivers of change in global agriculture. *Phil. Trans. R. Soc. B* 363, 495–515. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2166>
- Hemmat, A., Adamchuk, V.I., 2008. Sensor systems for measuring soil compaction: Review and analysis. *Computers and Electronics in Agriculture* 63, 89–103. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.03.001>
- Herrick, J.E., Jones, T.L., 2002. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. *Soil Science Society of America Journal* 66, 1320–1324. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1320>
- HORSCH Maschinen GmbH, 2020. HORSCH | Pronto DC [WWW Document]. URL <https://www.horsch.com/fr/produits/semis/semoir-a-disques/pronto-dc> (accessed 5.23.20).
- INRA, 2019. Protocole de tests de stabilité structurale [WWW Document]. INRAE. URL <https://inra-dam-front-pad.wedia-group.com/player-preview-7860a7d00f0e405ca771d7ea642175d9.html> (accessed 4.14.20).
- ISO, 2012. ISO 10930:2012(fr), Qualité du sol — Mesure de la stabilité d'agrégats de sols soumis à l'action de l'eau [WWW Document]. URL <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:10930:ed-1:v1:fr> (accessed 4.8.20).

- Jensen, J.L., Schjøning, P., Watts, C.W., Christensen, B.T., Peltre, C., Munkholm, L.J., 2019. Relating soil C and organic matter fractions to soil structural stability. *Geoderma* 337, 834–843. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.034>
- Juriga, M., Šimanský, V., 2018. Effect of biochar on soil structure - review. *Acta fytotechn zootechn* 21, 11–19. <https://doi.org/10.15414/afz.2018.21.01.11-19>
- Keen, Y.C., Jalloh, M.B., Ahmed, O.H., Sudin, M., Besar, N.A., 2011. Soil organic matter and related soil properties in forest, grassland and cultivated land use types. *Int. J. Phys. Sci.* 6. <https://doi.org/10.5897/IJPS11.427>
- Keller, T., Sutter, J.A., Nissen, K., Rydberg, T., 2012. Using field measurement of saturated soil hydraulic conductivity to detect low-yielding zones in three Swedish fields. *Soil and Tillage Research* 124, 68–77. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.05.002>
- Larousse, É., 2020. Définitions : compactage - Dictionnaire de français Larousse [WWW Document]. URL <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/compactage/17590> (accessed 3.16.20).
- Le Bissonnais, Y., 1995. Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. *Étude et Gestion des Sols* 13.
- Le Roux, X., 2008. Agriculture et biodiversité: valoriser les synergies ; expertise scientifique collective Inra, Juillet 2008. Ed. Quæ, Versailles.
- Lebacqz, T., Baret, P.V., Stilmant, D., 2013. Sustainability indicators for livestock farming. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 33, 311–327. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0121-x>
- Lehmann, J., Kleber, M., 2015. The contentious nature of soil organic matter. *Nature* 528, 60–68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>
- Lettens, S., Orshoven, J., Wesemael, B., Muys, B., Perrin, D., 2005. Soil organic carbon changes in landscape units of Belgium between 1960 and 2000 with reference to 1990. *Global Change Biol* 11, 2128–2140. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001074.x>
- Lipiec, J., Kuś, J., Słowińska-Jurkiewicz, A., Nosalewicz, A., 2006. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. *Soil and Tillage Research* 89, 210–220. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.07.012>
- Liu, L., Zhang, K., Fu, S., Liu, B., Huang, M., Zhang, Z., Zhang, F., Yu, Y., 2019. Rapid magnetic susceptibility measurement for obtaining superficial soil layer thickness and its erosion monitoring implications. *Geoderma* 351, 163–173. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.030>
- Lozano-Baez, S.E., Cooper, M., Meli, P., Ferraz, S.F.B., Rodrigues, R.R., Sauer, T.J., 2019. Land restoration by tree planting in the tropics and subtropics improves soil infiltration, but some critical gaps still hinder conclusive results. *Forest Ecology and Management* 444, 89–95. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.04.046>
- M. Yasin, R. D. Grisso, L. L. Bashford, A. J. Jones, L. N. Mielke, 1993. Normalizing Cone Resistance Values by Covariance Analysis. *Transactions of the ASAE* 36, 1267–1270. <https://doi.org/10.13031/2013.28458>
- Macedo, S. de F.S., Grimaldi, M., Medina, C.C., Cunha, J.E. da, Guimarães, M. de F., Tavares Filho, J., Macedo, S. de F.S., Grimaldi, M., Medina, C.C., Cunha, J.E. da, Guimarães, M. de F., Tavares Filho, J., 2017. Physical Properties of Soil Structures Identified by the Perfil Cultural under Two Soil Management Systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 41. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20160503>
- Mapit GIS, 2020. Mapit GIS [WWW Document]. mapitGIS. URL <https://mapitgis.com/> (accessed 4.17.20).
- Marahatta, S., Sah, S.K., MacDonald, A., Timilnisa, J., Devkota, K.P., 2014. Review article. Influence of conservation agriculture practices on physical and chemical properties of soil. *International Journal of Advanced Research* 2, 43–52.
- Marsden, C., 2014. Importance de la Matière Organique du Sol [WWW Document]. Supagro Montpellier. URL <https://www.supagro.fr/ress-pepites/processusecologiques/co/ImportanceMOS.html> (accessed 3.14.20).

- Matson, P.A., 1997. Agricultural Intensification and Ecosystem Properties. *Science* 277, 504–509. <https://doi.org/10.1126/science.277.5325.504>
- Mazoyer, M., 2002a. *Larousse agricole : Le monde paysan au XXI<sup>e</sup> siècle*, 4<sup>e</sup> ed. Larousse, Paris.
- Mazoyer, M., 2002b. *Larousse agricole*. Larousse, Paris.
- MEA (Ed.), 2005. *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- Meek, B.D., Rechel, E.R., Carter, L.M., DeTar, W.R., Urie, A.L., 1992. Infiltration Rate of a Sandy Loam Soil: Effects of Traffic, Tillage, and Plant Roots. *Soil Science Society of America Journal* 56, 908–913. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030038x>
- Meul, M., Nevens, F., Reheul, D., 2009. Validating sustainability indicators: Focus on ecological aspects of Flemish dairy farms. *Ecological Indicators* 9, 284–295. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2008.05.007>
- Ministère de la Région Wallonne, 1994. *Etat de l'Environnement Wallon*.
- Moraes, M.T. de, Debiasi, H., Carlesso, R., Franchini, J.C., Silva, V.R. da, 2014. Critical limits of soil penetration resistance in a rhodic Eutrudox. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* 38, 288–298. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100029>
- Musy, A., 2005. *Cours Hydrologie générale* - prof. André Musy.
- Newell-Price, J.P., Whittingham, M.J., Chambers, B.J., Peel, S., 2013. Visual soil evaluation in relation to measured soil physical properties in a survey of grassland soil compaction in England and Wales. *Soil and Tillage Research, Special issue: Applications of Visual Soil Evaluation* 127, 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.03.003>
- Nielsen, D.R., Biggar, J.W., Erh, K.T., 1973. Spatial Variability of Field-Measured Soil-Water Properties. *Hilgardia* 42.
- Nkurunziza, L., Chongtham, I.R., Watson, C.A., Marstorp, H., Öborn, I., Bergkvist, G., Bengtsson, J., 2017. Understanding effects of multiple farm management practices on barley performance. *European Journal of Agronomy* 90, 43–52. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.07.003>
- NMSP Cornell University, 2020. 2020 New York On-Farm Research Partnership Projects [WWW Document]. URL <http://nmsp.cals.cornell.edu/NYOnFarmResearchPartnership/index.html> (accessed 3.10.20).
- Obalum, S.E., Obi, M.E., 2010. Physical properties of a sandy loam Ultisol as affected by tillage-mulch management practices and cropping systems. *Soil and Tillage Research* 108, 30–36. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.03.009>
- Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 2002. *Agriculture mondiale horizon 2015/2030: Rapport abrégé*. FAO, Rome.
- O'sullivan, M.F., Dickson, J.W., Campbell, D.J., 1987. Interpretation and presentation of cone resistance data in tillage and traffic studies. *Journal of Soil Science* 38, 137–148. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1987.tb02131.x>
- Pagliai, M., Vignozzi, N., Pellegrini, S., 2004. Soil structure and the effect of management practices. *Soil and Tillage Research* 79, 131–143. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.07.002>
- Patel, A., 2019. Geotechnical investigation, in: *Geotechnical Investigations and Improvement of Ground Conditions*. Elsevier, pp. 87–155. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817048-9.00009-3>
- Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R., Blair, R., 1995. Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits. *Science* 267, 1117–1123. <https://doi.org/10.1126/science.267.5201.1117>
- Preisendorfer, R.W., 1986. Secchi disk science: Visual optics of natural waters1. *Limnology and Oceanography* 31, 909–926. <https://doi.org/10.4319/lo.1986.31.5.0909>
- Prosenol, 2012. *Projet INTERREG "PROSENSOLS"* [WWW Document]. URL <http://www.paysdescollines.be/brochures-sol.html?lang=fr> (accessed 4.16.20).
- Pulido Moncada, M., Helwig Penning, L., Timm, L.C., Gabriels, D., Cornelis, W.M., 2017. Visual examination of changes in soil structural quality due to land use. *Soil and Tillage Research*,

- Visual soil evaluation and soil compaction research 173, 83–91.  
<https://doi.org/10.1016/j.still.2016.08.011>
- Pulido Moncada, M., Helwig Penning, L., Timm, L.C., Gabriels, D., Cornelis, W.M., 2014. Visual examinations and soil physical and hydraulic properties for assessing soil structural quality of soils with contrasting textures and land uses. *Soil and Tillage Research* 140, 20–28.  
<https://doi.org/10.1016/j.still.2014.02.009>
- R Core Team, 2020. R: The R Project for Statistical Computing [WWW Document]. URL <https://www.r-project.org/> (accessed 5.22.20).
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., Vogel, H.-J., 2018. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma* 314, 122–137.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>
- Reynolds, W.D., Elrick, D.E., 1990. Ponded Infiltration From a Single Ring: I. Analysis of Steady Flow. *Soil Science Society of America Journal* 54, 1233–1241.  
<https://doi.org/10.2136/sssaj1990.03615995005400050006x>
- Rice, R., Milczarek, M., Keller, J., 2014. A Critical Review of Single Ring Cylinder Infiltrometers with Lateral Flow Compensation.
- Rodríguez-Ortega, T., Oteros-Rozas, E., Ripoll-Bosch, R., Tichit, M., Martín-López, B., Bernués, A., 2014. Applying the ecosystem services framework to pasture-based livestock farming systems in Europe. *Animal* 8, 1361–1372. <https://doi.org/10.1017/S1751731114000421>
- Roger-Estrade, J., Labreuche, J., Richard, G., 2011. Effects of no-ploughing methods on soil physical properties: Consequences on soil erosion in a temperate climate. *Cahiers Agricultures* 20, 186–193. <https://doi.org/10.1684/agr.2011.0490>
- Roose, E., 1999. Introduction à la gestion conservatoire de l’eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). FAO, Roma.
- Roose, E., Smolikowski, B., 1997. Comparaison de trois techniques de mesure de l’infiltration sur fortes pentes : monocylindre et 2 simulateurs de pluies. Application à un versant de la vallée de Godim au Cap Vert 17, 282–296.
- Rosolem, C.A., Foloni, J.S.S., Tiritan, C.S., 2002. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. *Soil and Tillage Research* 65, 109–115.  
[https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00286-0](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00286-0)
- SARE, 2012. What is On-Farm Research? [WWW Document]. URL <https://www.sare.org/Learning-Center/Bulletins/How-to-Conduct-Research-on-Your-Farm-or-Ranch/Text-Version/Introduction/What-is-On-Farm-Research> (accessed 3.10.20).
- SAS Institute Inc, 2020. Statistical Software [WWW Document]. URL [https://www.jmp.com/en\\_be/home.html](https://www.jmp.com/en_be/home.html) (accessed 5.22.20).
- Sauvenier, X., Biolders, C., Valckx, J., Van Cauwenbergh, N., Wauters, E., Bachev, H., Biala, K., Brouckaert, V., Franchois, L., Garcia-Cidad, V., Goyens, S., Hermy, M., Mathijs, E., Muys, B., Reijnders, J., Vanclooster, M., Van der Veken, S., Peeters, A., 2005. SAFE - Framework for assessing sustainability levels in Belgian agricultural systems, Belgian Science Policy Office. ed. Bruxelles.
- Service Public Wallon, 2017. State of environment report - Wallonia 2017.
- Shaxson, T.F., 2009. Re-Thinking the Conservation of Carbon, Water and Soil: A Different Perspective, in: Lichtfouse, E., Navarrete, M., Debaeke, P., Véronique, S., Alberola, C. (Eds.), *Sustainable Agriculture*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 61–74. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_6)
- Shepherd, T.G., Manawatu-Wanganui (N.Z.), Horizons.mw, Manaaki Whenua-Landcare Research New Zealand Ltd, Hawke’s Bay (N.Z.), Regional Council, Wellington (N.Z. : Region), Regional Council, New Zealand, Ministry for the Environment, 2000. Field guide for cropping and pastoral grazing on flat to rolling country. Horizons.mw : Landcare Research, Palmerston North, N.Z.
- SPW, 2015. Carte Numérique des Sols de Wallonie.

- Stroosnijder, L., 2005. Measurement of erosion: Is it possible? *CATENA* 64, 162–173.  
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.08.004>
- Sun, Y., Cheng, Q., Lin, J., Schellberg, J., Schulze Lammers, P., 2013. Investigating soil physical properties and yield response in a grassland field using a dual-sensor penetrometer and EM38. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 176, 209–216.  
<https://doi.org/10.1002/jpln.201200104>
- To, J., Kay, B.D., 2005. Variation in penetrometer resistance with soil properties: the contribution of effective stress and implications for pedotransfer functions. *Geoderma* 126, 261–276.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.08.006>
- Triest, Q., 2017. Cartographie du réseau d'acteurs de l'innovation en agriculture (Wallonie). Culturalité en Hesbaye brabançonne asbl.
- Unger, P.W., Kaspar, T.C., 1994. Soil Compaction and Root Growth: A Review. *Agronomy Journal* 86, 759–766. <https://doi.org/10.2134/agronj1994.00021962008600050004x>
- Valé, M., Bouthier, A., Trochard, R., Chaussod, R., Nouaïm-Chaussod, R., 2011. Pertinence de nouveaux indicateurs pour évaluer l'impact des pratiques culturales sur le fonctionnement biologique des sols. 10èmes rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse du COMIFER et du GEMAS.
- Van Dijk, P., 2013. Estimer la densité apparente pour ABC-Terre. Comparaison des fonctions de pédotransfert. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13005.03040>
- Van Oost, K., Govers, G., Desmet, P., 2000. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landscape Ecology* 15, 577–589.  
<https://doi.org/10.1023/A:1008198215674>
- Vanclooster, M., Biolders, C., 2018. Transparent du cours LBIR1348- Hydrologie générale (Infiltration) UCLouvain.
- Vanhove, P., 2018. Classification des pratiques d'agriculteurs et relation avec les caractéristiques structurales et biologiques des sols en régions limoneuse et sablo-limoneuse de Wallonie.
- Vanwindekens, F., 2020. Fred Vanwin / slaker [WWW Document]. GitLab. URL <https://gitlab.com/FrdVnW/slaker> (accessed 5.1.20).
- Vanwindekens, F., André, C., Merchier, M., Planchon, V., Stilmant, D., Roisin, C., 2018. A Quantitative Approach of the Slake Test as a Pragmatic Assessment of Soil Stability. Innovative cropping and farming systems for high quality food production systems. XV European Society for Agronomy Congress 128.
- Vanwindekens, F., Hardy, B., Leroy, C., Delporte, F., 2020. Évaluer les fonctions physiques et biologiques des sols à l'aide d'approches pragmatiques [WWW Document]. URL <https://frdvnw.gitlab.io/intersoil2020/> (accessed 6.6.20).
- Vrešak, T., Aendekerk, R., Drexler, D., Hilgertová, M., Kranzler, A., Pelikan, B., Stoll, E., 2016. GUIDEBOOK PARTICIPATORY ON-FARM RESEARCH FOR ORGANIC FARMERS.  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2317.4802>
- Walsh, E., McDonnell, K.P., 2012. The Influence of Measurement Methodology on Soil Infiltration Rate. *International J. of Soil Science* 7, 168–176. <https://doi.org/10.3923/ijss.2012.168.176>
- Weil, R., Brady, N.C., 2016. The nature and properties of soils, Fifteenth edition. ed. Pearson, Columbus.
- Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D., David, C., 2009. Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 29, 503–515.  
<https://doi.org/10.1051/agro/2009004>
- Williams, A., Hedlund, K., 2013. Indicators of soil ecosystem services in conventional and organic arable fields along a gradient of landscape heterogeneity in southern Sweden. *Applied Soil Ecology* 65, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.12.019>
- Wu, J., Wu, T., 2012. SUSTAINABILITY INDICATORS AND INDICES: AN OVERVIEW, in: Handbook of Sustainability Management. WORLD SCIENTIFIC, pp. 65–86.  
[https://doi.org/10.1142/9789814354820\\_0004](https://doi.org/10.1142/9789814354820_0004)

- Xin, H., Gates, R.S., Green, A.R., Mitloehner, F.M., Moore, P.A., Wathes, C.M., 2011. Environmental impacts and sustainability of egg production systems. *Poultry Science* 90, 263–277. <https://doi.org/10.3382/ps.2010-00877>
- Xu, X., Lewis, C., Liu, W., Albertson, J.D., Kiely, G., 2012. Analysis of single-ring infiltrometer data for soil hydraulic properties estimation: Comparison of BEST and Wu methods. *Agricultural Water Management* 107, 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.01.004>
- Zhang, W., Ricketts, T.H., Kremen, C., Carney, K., Swinton, S.M., 2007. Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecological Economics* 64, 253–260. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.02.024>

## Comparaison de méthodes d'évaluation de la fourniture du service écosystémique de la stabilité structurale sur des sols limoneux et limono-sableux en Belgique

Présenté par Nicolas Biot

Pour pallier les effets négatifs sur l'environnement des formes d'agriculture développées au XX<sup>ème</sup> siècle, la Région wallonne encourage maintenant une transition vers une agriculture écologiquement intensive et plus durable, qui s'inspire de processus écologiques sans compromettre les objectifs de production. Dans cette intention de changement vers plus de durabilité, la thèse de Lola Leveau soutient que l'évaluation objective et scientifique, à partir d'approches participatives et multidisciplinaires, des pratiques culturales innovantes déjà présentes dans les exploitations agricoles wallonnes devient un enjeu majeur. Ce mémoire partage ses hypothèses et s'insère spécifiquement dans la dimension écologique de son travail de recherche. L'objectif de ce mémoire est de sélectionner puis de tester des indicateurs et des méthodes de mesure qui permettent d'évaluer les résultats de différentes pratiques culturales sur la fourniture du service écosystémique de la stabilité structurale du sol.

Trois indicateurs pour évaluer la stabilité structurale du sol ont été sélectionnés à partir de la littérature et par une approche participative basée sur des interviews d'agriculteurs et d'experts scientifiques : la capacité d'infiltration de l'eau dans le sol, la résistance du sol à la compaction et la stabilité des agrégats du sol. Pour chaque indicateur, des méthodes scientifiquement reconnues ont été comparées à des méthodes simples, rapides et peu coûteuses. Certaines méthodes « Maison » ont été développées en se basant sur les observations d'agriculteurs. Onze méthodes ont été testées à la ferme universitaire de Marbaix sur trois champs différents : une prairie permanente, un champ de froment après une culture de pommes de terre et un champ occupé par une couverture après une culture de froment et avant une culture de betterave. Chaque champ a été divisé en deux parcelles de texture limoneuse et limono-sableuse. Pour chaque méthode, les effets de l'humidité, de la texture et du type de culture sur les résultats des mesures ont été testés.

Presque aucune méthode n'a permis de distinguer les champs soumis à un travail du sol. En revanche, 9 des 11 méthodes testées ont montré que ces deux champs, ou au moins un des deux, avaient une moins bonne stabilité structurale que la prairie. La méthode Maison qui évalue l'infiltration de l'eau dans le sol, s'est montrée prometteuse et peut servir de point de départ pour l'élaboration collective d'une nouvelle méthode de terrain.

L'élaboration de méthodes d'évaluation de la stabilité structurale des sols reste un enjeu majeur pour le monde agricole et la recherche scientifique. Ces outils, s'ils sont bien utilisés, peuvent soutenir une évolution vers une agriculture plus durable.