

Faculté des bioingénieurs

La conductivité hydraulique à saturation : comparaison de méthodes de mesure et utilisation comme indicateur physique de la santé du sol

Auteur : Hugo Taburiaux

Promoteur : Charles Bielders (ELI)

Lecteurs : Brieuc HARDY (CRA-W) et Marnik Vanclooster (ELI)

Année académique 2025-2026

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de Bioingénieur en sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à sa réalisation et m'ont accompagné tout au long de ce parcours.

Je souhaite tout d'abord adresser mes remerciements les plus sincères à mon promoteur, Charles Bielders, qui a accepté ma demande de changement de sujet de mémoire et m'a ainsi permis de découvrir le domaine passionnant de l'étude des sols et de leur hydrologie. Sa disponibilité tout au long de ce travail, que ce soit pour superviser l'avancement de mes recherches lors de nos réunions régulières ou pour m'aider sur des aspects plus pratiques tels que l'organisation des convoiturages ou le dépôt de matériel, a été d'un soutien inestimable. Je le remercie pour sa rigueur scientifique, sa disponibilité et ses conseils avisés qui ont grandement enrichi ce mémoire.

Je remercie également l'ensemble du GERU, et tout particulièrement Sébastien, pour le prêt et la construction du matériel expérimental indispensable à la réalisation de mes campagnes de mesure sur le terrain.

Mes remerciements vont aussi aux employés de la ferme de Marbaix, et à Hugues Falys, pour avoir mis à ma disposition les parcelles nécessaires à la réalisation de mes mesures dans des conditions optimales.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers les employés du CRA-W à Gembloux, et plus particulièrement Simon, Briec, Thomas et David, pour m'avoir donné accès à l'essai SYCI et pour leur aide précieuse dans le transport du matériel et de ma personne jusqu'au site expérimental.

Je remercie chaleureusement l'UCLouvain, et plus particulièrement la faculté des Bioingénieurs ainsi que l'Earth and Life Institute, pour la mise à disposition de locaux, de matériel et de ressources qui m'ont permis de mener à bien ce travail dans les meilleures conditions.

Enfin, mes derniers remerciements, non des moindres, vont à ma famille, à Manon ainsi qu'à mes ami.e.s, pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements constants et les nombreux moments de joie partagés. Leur présence à mes côtés m'a donné toute la motivation nécessaire pour mener ce travail à son terme.

À toutes et à tous, un grand merci.

Répartition des contributions

	Taburiaux Hugo	Autres contributeur·ice	Intelligence artificielle
Conceptualisation	X	M. Bielders	
Méthodologie	X	M. Bielders	
Investigation	X	CRA-W (<i>partage d'une partie de leurs données</i>)	
Analyse formelle	X		Claude Opus (<i>pour des conseils et de l'aide pour la compréhension des résultats statistiques</i>)
Validation	X	M. Bielders	
Rédaction – version original	X		Claude Opus (<i>reformulation, synthétisation, aide sur la structure globale</i>)
Rédaction – révision et édition	X	M. Bielders	
Visualisation	X		Claude Opus (aide sur les techniques de mises en forme sur JMP)
Supervision		M. Bielders	

Table des matières

Remerciements.....	1
Répartition des contributions.....	2
Liste des figures	6
Liste des tableaux	8
1. Introduction.....	9
2. État de l'art	12
2.1. La conductivité hydraulique à saturation	12
2.1.1. Définition et bases théoriques	12
2.1.2. Valeurs de référence et seuils critiques	12
2.1.3. Ks comme indicateur de la santé des sols	13
2.1.4. Variabilité spatiale et temporelle de Ks	14
2.1.5. Services écosystémiques associés.....	15
2.2. Facteurs de variation de Ks.....	15
2.2.1. Texture et composition granulométrique	15
2.2.2. Minéralogie.....	16
2.2.3. Masse volumique apparente et état de compaction	16
2.2.4. Structure du sol et réseau poral.....	17
2.2.5. Matière organique et activité biologique.....	18
2.2.6. État hydrique et écoulements préférentiels	18
2.3. Impact des pratiques culturales sur Ks.....	19
2.3.1. Le travail du sol	19
2.3.2. Les cultures de couverture et le couvert végétal hivernal	20
2.3.3. La charge mécanique : trafic agricole et compaction	21
2.3.4. La rotation culturale et la diversification	21
2.3.5. Prairie versus culture annuelle : la référence haute	22
2.4. Méthodes de mesure de la conductivité hydraulique à saturation	23
2.4.1. Vue d'ensemble et critères de classification	23
2.4.2. La distinction fondamentale entre Ks et K_{fs}	25
2.4.3. La méthode Porchet	25
2.4.4. L'infiltromètre à simple anneau (et double anneau).....	27
2.4.5. Le perméamètre de Guelph.....	28
3. Objectifs et démarche	30
4. Matériels et méthodes	31
4.1. Organisation de la section	31

4.2	. Première série de mesures : comparaison de méthodes	31
4.2.1.	Site et dispositif expérimental	31
4.2.2.	Description du plan expérimental.....	32
4.3	. Deuxième série de mesure : Effet des systèmes culturaux sur la conductivité hydraulique.....	33
4.3.1.	Site et dispositif expérimental	33
4.3.2.	Description du plan expérimental.....	34
4.4	. Description détaillée et traitement des mesures	35
4.4.1.	Méthode « Porchet »	35
4.4.2.	Méthode ISA	37
4.4.3.	Pénétrométrie.....	39
4.4.4.	Densité apparente	40
4.4.5.	Données supplémentaires fournies par le CRA-W	41
4.5.	Visualisation graphique et analyses statistiques	42
5.	Résultats.....	44
5.1	. Expérience n°1 : Comparaison des méthodes de mesure de Ks.....	44
5.1.1.	Modèle mixte global sur l'ensemble des données.....	44
5.1.2.	Évolution du Ks selon la profondeur au sein de chaque occupation du sol.....	46
5.1.3.	Relations du Ks avec la densité apparente et la pénétrométrie	49
5.1.4.	Aspects opérationnels des deux méthodes	53
5.2.	Discussion des résultats de la 1 ^{ère} expérience.....	54
5.2.1.	Origine de l'interaction méthode × profondeur.....	54
5.2.2.	Comparaison Porchet vs ISA.....	54
5.2.3.	Corrélations avec la densité apparente et la pénétrométrie : hypothèse explicative	55
5.2.4.	Indice d'une semelle de labour dans la parcelle cultivée.....	55
5.2.5.	Justification du choix de la méthode Porchet pour la seconde expérience.....	56
5.3.	Expérience n°2 : effet des systèmes de culture sur Ks mesuré par Porchet	56
5.3.1.	Modèle mixte global sur l'ensemble des données de Log ₁₀ Ks	56
5.3.2.	Effet du système et de la profondeur sur Ks.....	58
5.3.3.	Propriétés du sol mesurées sur les parcelles de mesure et relations avec Ks	60
5.3.4.	Mise en relation avec les indicateurs disponibles à l'échelle du système.....	66
5.4.	Discussion globale.....	69
5.4.1.	Effet des systèmes de culture sur la conductivité hydraulique.....	69
5.4.2.	Un découplage entre Ks et les indicateurs biologiques et de stabilité.....	70
5.4.3.	Pourquoi les corrélations Ks–propriétés physiques s'effacent en seconde expérience.....	71
5.4.4.	Retour sur les sous-objectifs : la méthode Porchet et Ks comme indicateur.....	71
5.4.5.	Limites de l'étude.....	72

5.4.6. Perspectives.....	73
6. Conclusion	74
Annexes.....	76
Bibliographie	83

Liste des figures

Figure 1 : Effet du semis direct (variation en % par rapport au labour conventionnel) sur (a) le diamètre moyen des agrégats, (b) les agrégats stables à l'eau, (c) les macroagrégats et (d) les microagrégats dans différentes couches du sol (Mondal & Chakraborty, 2022)	19
Figure 2 : 1ère expérience - Localisation de la Ferme de Marbaix à Corroy-le-Grand en Wallonie. Les cadres blancs indiquent la position approximative des zones de mesure sur les 2 parcelles.....	32
Figure 3 : Sur la gauche : schéma de la disposition des sous-parcelles de mesure au sein d'une parcelle. Sur la droite : schéma de la position des différents points de mesure pour une sous-parcelle	32
Figure 4 : Localisation de l'essai SYCI en Wallonie et visualisation satellite de la disposition des blocs d'expérimentation	33
Figure 5 : Représentation de la disposition des mesures au sein d'un bloc. Les 4 systèmes de mesure y sont représentés, avec sur la droite un schéma détaillé pour une parcelle puis pour un point de mesure	34
Figure 6 : Schéma descriptif pour la méthode Porchet	35
Figure 7 : Photo du dispositif expérimental d'une mesure Porchet	35
Figure 8 : Exemple de tableur pour le calcul du débit, exemple avec le point de mesure PD1	36
Figure 9 : Schéma des différentes caractéristiques d'une mesure ISA	37
Figure 10 : Photo illustrant le pénétromètre utilisé pour les mesures (SDEC France, 2026)	339
Figure 11 : Comparaison des valeurs de log (Ks) pour l'interaction parcelle × profondeur Les lettres de Tukey représentent les valeurs moyennes qui diffèrent significativement entre les 4 résultats.....	45
Figure 12 : Interaction méthode × profondeur sur le Log ₁₀ du Ks ; les lettres de Tukey ne sont pas présentes car il n'y a pas de différence significative	46
Figure 13 : Log (Ks) pour la prairie en fonction de la profondeur, illustrant la seule variable significative	47
Figure 14 : Boîte à moustaches du log (Ks) pour les mesures réalisées sur la parcelle « culture » par rapport à la profondeur (cm), séparé selon la méthode	48
Figure 15 : Valeurs mesurées de densité apparente selon la parcelle et la profondeur	49

Figure 16 : valeurs de pénétrométrie moyenne et élargie par profondeur selon la parcelle et la méthode de calcul (élargie ou non). Les lettres de Tukey ont été remplacées par des chiffres pour la pénétrométrie élargie afin de faciliter la lecture	50
Figure 17 : Log Ks en fonction de la densité apparente, séparé selon la méthode	51
Figure 18 : Log Ks ₁₀ en fonction de la pénétrométrie moyenne, séparé selon la méthode ...	51
Figure 19 : Distribution du Log ₁₀ Ks (Porchet) par profondeur, tous systèmes confondus. Les lettres indiquent les groupes du test de Tukey ($\alpha = 0,05$)	58
Figure 20 : Distribution du Log ₁₀ Ks (Porchet) par profondeur et par système de culture.....	59
Figure 21 : Profils moyens de résistance à la pénétration (MPa) en fonction de la profondeur (0-30 cm) pour les quatre systèmes de culture. La zone colorée représente l'intervalle de confiance autour de la moyenne	62
Figure 22 : Valeurs de pénétrométrie selon la densité apparente dans les différents systèmes de culture	65
Figure 23 : Score structural VESS par système de culture et par profondeur. SdC1 = Conv ; SdC2 = Sol ; SdC3 = GES ; SdC4 = Zérophyto. Un score faible traduit une structure favorable. Lettres : groupes de Tukey (source CRA-W)	66
Figure 24 : Indice de stabilité structurale Wend (QuantiSlake Test) par système de culture. SdC1 = Conv ; SdC2 = Sol ; SdC3 = GES ; SdC4 = Zérophyto. Lettres : groupes de Tukey (source CRA-W)	67
Figure 25 : Abondance des vers de terre (nombre d'individus par m ²) par système de culture. SdC1 = Conv ; SdC2 = Sol ; SdC3 = GES ; SdC4 = Zérophyto. Lettres : groupes de Tukey (source CRA-W)	68

Liste des tableaux

Tableau 1 : Catégories de conductivité hydraulique à saturation (adapté de Reynolds et al., 2009)	12
Tableau 2 : Caractéristiques comparatives des principales méthodes de mesure de Ks Tableau original, construit à partir de Angulo-Jaramillo et al. (2016), Reynolds et al. (2002) et Elrick & Reynolds (1992)	23
Tableau 3 : Résumé des résultats du modèle mixte linéaire de la conductivité hydraulique à saturation ($\log_{10}(K_s)$)	44
Tableau 4 : Récapitulatif des coefficients de Spearman pour la corrélation log Ks 10, densité, pénétrrométrie	52
Tableau 5 : Comparaison entre les deux méthodes de mesure de l'expérience 1	53
Tableau 6 : Modèle linéaire à effets mixtes ajusté sur le $\log_{10} K_s$ (méthode Porchet) : composantes de la variance et tests des effets fixes (n = 96)	56
Tableau 7 : Moyennes des indicateurs de qualité du sol par système de culture (essai SYCI)	60
Tableau 8 : Coefficients de corrélation de rang de Spearman (ρ) entre le $\log_{10} K_s$ (Porchet) et les propriétés du sol, par profondeur et à l'échelle globale (***) $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; ns : non significatif)	64

1. Introduction

Les sols constituent une ressource naturelle limitée et difficilement renouvelable à l'échelle des temps humains, la formation d'un centimètre de sol nécessitant plusieurs centaines d'années dans les conditions tempérées (FAO, 2015). Ils assurent simultanément des fonctions de production, de régulation et de support qui en font un élément central des grands enjeux actuels que sont la sécurité alimentaire, la gestion durable de l'eau et l'adaptation au changement climatique (Keesstra et al., 2016 ; European Commission, 2021). Le sol joue notamment un rôle déterminant dans le cycle de l'eau, en contrôlant l'infiltration des précipitations, le stockage de l'eau dans le profil et les flux vers les nappes souterraines ou le ruissellement de surface (Bormann & Klaassen, 2008). La capacité d'un sol à remplir ces fonctions dépend fortement de ses propriétés physiques, et en particulier de sa structure et de sa porosité, qui conditionnent les transferts d'eau et d'air ainsi que l'activité biologique (Or et al., 2021).

Parmi les différents usages du sol, l'usage agricole occupe une place particulière, tant par l'étendue des surfaces concernées que par l'intensité des interventions humaines. En Belgique, les terres agricoles couvrent environ 44 % du territoire national, dont une part importante est consacrée aux terres arables (Statbel, 2026). L'augmentation des besoins alimentaires et l'essor de l'agriculture mécanisée se sont traduits, ces dernières décennies, par une intensification des pratiques, marquée entre autres par l'alourdissement des engins, la simplification des rotations et une réduction de la couverture du sol en interculture (Keller et al., 2019). Si ces évolutions ont permis d'accroître les rendements, elles ont également entraîné des pressions considérables sur les sols, au point que la dégradation des sols agricoles est aujourd'hui reconnue comme une menace majeure à l'échelle européenne (Panagos et al., 2020). Le travail du sol répété, le trafic en conditions humides ou encore certaines cultures particulièrement exigeantes, telles que la betterave, la pomme de terre ou le maïs ensilage, favorisent la compaction et la dégradation de la structure. Il en résulte une diminution de la macroporosité et une réduction de la conductivité hydraulique (Lipiec & Hatano, 2003), avec des conséquences directes sur la capacité d'infiltration des sols. Dans certaines conditions, cela augmente le ruissellement et aggrave les coulées boueuses observées de manière récurrente en Hesbaye et en Brabant wallon (Alaoui et al., 2018 ; Evrard et al., 2007).

Le changement climatique vient amplifier ces risques en augmentant la fréquence des épisodes de pluies intenses, tendances déjà documentées pour la Belgique (IRM, 2020). Dans ce contexte, la capacité des sols agricoles à tamponner les excès d'eau et à limiter le ruissellement devient un enjeu majeur, tant pour la production que pour la protection des ressources en eau (FAO, 2015). Or ces fonctions sont intimement liées aux propriétés hydrauliques du sol, et en particulier à la conductivité hydraulique, qui contrôle la vitesse d'entrée et de déplacement de l'eau dans la matrice poreuse (Hillel, 1998).

Face à ces enjeux, la notion de "santé des sols" s'est progressivement imposée comme un cadre conceptuel permettant d'évaluer dans quelle mesure un sol est capable de remplir durablement ses fonctions au sein d'un agroécosystème donné (Lehmann et al., 2020). Elle est généralement appréhendée à travers un ensemble d'indicateurs physiques, chimiques et biologiques, tels que la teneur en carbone organique, la stabilité structurale, la densité apparente ou la résistance à la pénétration (Orgiazzi et al., 2018). Ces indicateurs sont de plus en plus mobilisés dans les dispositifs expérimentaux visant à caractériser l'impact des systèmes de culture sur l'état des sols. Dans cette perspective, les propriétés hydrauliques du sol, et en particulier la conductivité hydraulique à saturation (K_s), apparaissent comme des candidats pertinents pour compléter la caractérisation de la santé physique des sols.

Cependant, la mesure de K_s en conditions de terrain reste délicate. De nombreuses méthodes coexistent, se différenciant par le principe de mesure, la profondeur d'investigation, le volume de sol sollicité et les hypothèses de modélisation utilisées pour interpréter les données (Angulo-Jaramillo et al., 2016). Les méthodes de mesure de K_s se caractérisent aussi par leur lourdeur expérimentale (matériel nécessaire, durée de la mesure), ce qui est d'autant plus contraignant que K_s est reconnue comme étant très variable spatialement et donc nécessitant un nombre élevé de répétitions. Parmi les méthodes utilisées, les essais de type Porchet, basés sur l'infiltration d'eau dans un trou cylindrique, sont historiquement employés dans le domaine de l'assainissement et du génie civil pour leur relative simplicité de mise en œuvre et l'existence de procédures de calcul simplifiées permettant d'en déduire K_s . Les infiltromètres à simple anneau, qui mesurent l'infiltration sous une lame d'eau maintenue à la surface du sol, sont fréquemment mobilisés dans le cadre de travaux de recherche pour caractériser K_s dans les horizons superficiels. Bien que visant à quantifier la même grandeur physique, ces méthodes ne sollicitent pas le sol de la même manière et ne concernent pas nécessairement les mêmes volumes élémentaires. Les valeurs de K_s qui en résultent peuvent donc différer sensiblement (Reynolds et al., 2000), ce qui complique leur utilisation comme indicateur physique de la santé des sols.

Dans ce contexte, ce mémoire s'intéresse à la détermination de K_s sous un double angle. Il vise, d'une part, à comparer deux méthodes de mesure de K_s couramment employées sur le terrain, la méthode Porchet et la méthode de l'infiltromètre à simple anneau (ISA), afin d'évaluer dans quelle mesure elles fournissent des estimations concordantes sur des sols soumis à des usages contrastés. Il cherche, d'autre part, à explorer le potentiel de K_s comme indicateur de santé physique des sols, en analysant la manière dont cette grandeur réagit à des systèmes de culture contrastés et comment elle se met en relation avec d'autres indicateurs de la santé du sol.

La suite du document s'organise en six sections. L'état de l'art synthétise les connaissances actuelles sur K_s , ses méthodes de mesure et son usage comme indicateur de santé du sol. Les objectifs et la démarche précisent ensuite les questions de recherche abordées et le cheminement pour y répondre. La section « matériels et méthodes » décrit les deux campagnes de mesure réalisées, l'une à la ferme universitaire de Marbaix, l'autre sur l'essai

SYCI du CRA-W et le traitement des données permettant de produire les résultats. Les résultats sont ensuite présentés et discutés au regard de la littérature, puis mis en perspective dans la conclusion.

2. État de l'art

2.1. La conductivité hydraulique à saturation

2.1.1. Définition et bases théoriques

La conductivité hydraulique à saturation, notée K_s [$L \cdot T^{-1}$], est une propriété physique du sol qui exprime la facilité avec laquelle l'eau s'écoule à travers la matrice poreuse lorsque l'ensemble des pores est saturé en eau. Elle est définie à partir de la loi de Darcy, établie en 1856 à partir d'expériences sur des colonnes de sable, qui relie le flux d'eau au gradient de charge hydraulique (Hillel, 1998) :

$$q = -K_s \cdot \nabla H \quad \text{Eq 1}$$

Où q [$L \cdot T^{-1}$] est la densité de flux et ∇H [-] le gradient de charge hydraulique total. La conductivité hydraulique à saturation représente ainsi la valeur maximale que peut atteindre la conductivité hydraulique d'un sol, la conductivité non saturée $K(\theta)$ étant systématiquement inférieure et fonction de la teneur en eau.

Il faut noter que cette loi repose sur l'hypothèse d'un écoulement laminaire. Elle décrit l'écoulement en régime permanent, mais peut être étendue au régime transitoire en la combinant à l'équation de conservation de la masse (équation de Richards). La validité de ces hypothèses sur les mesures de terrain peut néanmoins être contestée, notamment en présence de macropores ou de chemins préférentiels d'écoulement (Jury & Horton, 2004).

2.1.2. Valeurs de référence et seuils critiques

En raison de l'étendue considérable de ses valeurs, K_s est classiquement déclinée en catégories qualitatives. Le tableau suivant (Tableau 1), adapté de Reynolds et al. (2009), propose une classification fonctionnelle largement utilisée dans la littérature :

Tableau 1 : Catégories de conductivité hydraulique à saturation (adapté de Reynolds et al., 2009)

Plage de K_s (mm/h)	Catégorie	Description qualitative	Implications hydrologiques
< 10	Très faible	Ruissellement probable / engorgement fréquent	Infiltration insuffisante
10 – 100	Adéquate	Infiltration équilibrée, drainage modéré	Fonction hydrique satisfaite
100 – 1 000	Élevée	Bonne infiltration / drainage rapide	Risque de lessivage / faible rétention

$\geq 1\ 000$	Excessive	Drainage très rapide / faible rétention en eau	Lessivage accru
---------------	-----------	--	-----------------

Ces catégories sont utiles pour contextualiser les résultats de mesure, mais il convient de garder à l'esprit que les valeurs seuils exactes dépendent du contexte pédoclimatique. Dans le contexte pédoclimatique wallon, les sols limoneux profonds présentent généralement des valeurs comprises entre 10 et 100 mm/h, tandis que les sols sableux ou structurés peuvent dépasser 100 mm/h (Weynants et al., 2009).

Sur base de données belges, Weynants et al. (2009) ont rapporté des valeurs médianes de K_s de l'ordre de 10 mm/h pour 166 horizons de sol échantillonnés, avec une variabilité importante : les sols sableux (texture légère) pouvant atteindre 100 mm/h, contre moins de 5 mm/h pour les horizons argileux compacts. À l'échelle mondiale, la compilation de Jarvis et al. (2013), incluant plus de 750 mesures réalisées à l'infiltromètre à succion, a mis en évidence une médiane de l'ordre de 50 mm/h pour les sols sous grandes cultures, soit des valeurs 2 à 3 fois inférieures à celles rapportées pour les sols sous couvert naturel, probablement en lien avec le développement moindre de la structure (Jarvis, 2007).

2.1.3. K_s comme indicateur de la santé des sols

K_s trouve sa place parmi les indicateurs physiques mobilisés pour évaluer l'état fonctionnel des sols. Cette notion a d'abord été formalisée sous le terme de qualité des sols par Doran et Parkin (1994), qui la définissent comme la capacité d'un sol à fonctionner au sein d'un écosystème, à soutenir la productivité des plantes et des animaux, à maintenir ou améliorer la qualité de l'eau et de l'air, et à favoriser la santé des plantes et des animaux. Ce cadre conceptuel a depuis évolué vers la notion de santé des sols, définie par Lehmann et al. (2020) comme la capacité continue d'un sol à fonctionner comme un système vivant qui soutient les plantes, les animaux et les humains.

La fonction de support de la productivité des plantes suppose une infiltration suffisante pour éviter l'engorgement tout en maintenant une réserve hydrique utilisable. Reynolds et al. (2009) ont proposé des seuils pour évaluer la fonction de support : 18 mm/h comme valeur minimale pour éviter l'engorgement racinaire, et 180 mm/h comme valeur maximale au-delà de laquelle la rétention en eau devient insuffisante.

Il convient de souligner que ces seuils diffèrent de ceux présentés dans le Tableau 1, et que la littérature propose d'autres jeux de valeurs. Cette absence de consensus reflète le fait que les seuils dépendent du contexte pédoclimatique et de la fonction hydrologique visée ; ils doivent donc être interprétés comme des ordres de grandeur indicatifs plutôt que comme des limites absolues.

Malgré sa pertinence théorique, K_s reste peu intégrée dans les jeux d'indicateurs opérationnels utilisés sur le terrain. Sa forte variabilité spatiale impose de multiplier les

répétitions pour obtenir une estimation représentative, ce qui alourdit considérablement les campagnes de mesure (Angulo-Jaramillo et al., 2016). À cela s'ajoutent la lourdeur expérimentale des méthodes, qu'il s'agisse de la durée des mesures, des équipements nécessaires ou des volumes d'eau à transporter, ainsi que la difficulté de standardiser la mesure d'une méthode à l'autre. Ces deux dernières limitations sont développées à la section 2.4.

Ces réserves n'invalident cependant pas l'intérêt de K_s comme indicateur physique de la santé des sols, à condition de l'employer dans une logique comparative plutôt que normative. Plutôt que de confronter une valeur absolue à un seuil dont la validité locale est incertaine, il est souvent plus robuste de comparer des situations contrastées au sein d'un même contexte pédoclimatique, par exemple des systèmes de culture différents établis sur un sol initialement homogène, ou une terre arable et une prairie permanente voisines.

2.1.4. Variabilité spatiale et temporelle de K_s

K_s est l'une des propriétés du sol les plus variables spatialement, avec des coefficients de variation couramment compris entre 50 et 350 % au sein d'une même parcelle en apparence homogène (Warrick & Nielsen, 1980 ; Sobieraj et al., 2004). Cette variabilité s'explique par le fait que K_s est gouvernée par la fraction la plus large et la plus continue du réseau poreux, c'est-à-dire par des éléments structuraux discrets et spatialement discontinus tels que les galeries de vers anéciques, les canaux racinaires ou les fentes de retrait. La présence ou l'absence d'un unique macropore fonctionnel dans le volume investigué peut modifier la valeur mesurée d'un ordre de grandeur, ce qui distingue nettement K_s des propriétés texturales ou chimiques dont la variabilité spatiale est bien moindre. Les travaux menés sur les sols limoneux de Basse-Belgique illustrent cette particularité, avec des variations de K_s d'un facteur supérieur à cent sur des distances de l'ordre du mètre au sein d'un même horizon (Mallants et al., 1996).

Une conséquence directe de ce mode de fonctionnement est que la distribution statistique des valeurs de K_s est fortement asymétrique et généralement bien décrite par une loi log-normale. La moyenne arithmétique surestime alors la valeur centrale de la distribution et se trouve fortement influencée par les valeurs extrêmes ; la moyenne géométrique ou la médiane sont dès lors préférées comme indicateurs de tendance centrale. Pour les comparaisons statistiques entre traitements ou entre méthodes, l'usage est de travailler sur les valeurs transformées en logarithmes, ce qui normalise approximativement la distribution, stabilise les variances et rend légitime l'application de tests statistiques paramétriques supposant la normalité des résidus.

À cette variabilité spatiale se superpose une variabilité temporelle marquée. K_s n'est pas une constante du sol mais une grandeur dynamique qui évolue au cours de la saison culturale sous l'effet du travail du sol, du tassement par les pluies, de la formation puis de la destruction des croûtes de battance, des cycles d'humectation-dessiccation et de l'activité biologique. Cette

dynamique implique qu'une valeur de K_s n'a de sens qu'associée à une date et à un historique cultural, et rend délicate la comparaison de mesures réalisées à des moments différents de la saison. Elle justifie que les mesures destinées à comparer des traitements soient réalisées dans une fenêtre temporelle aussi resserrée que possible.

2.1.5. Services écosystémiques associés

K_s , en tant que contrôle des flux d'eau dans le sol, est directement reliée à plusieurs services écosystémiques pédologiques. Le Millennium Ecosystem Assessment (2005) classe ces services en quatre catégories. La régulation hydrique, d'abord, qui correspond à la capacité du sol à absorber, infiltrer et redistribuer les eaux de pluie, est directement dépendante de K_s : une valeur trop faible génère du ruissellement et des risques d'inondation, tandis qu'une valeur excessive entraîne un drainage rapide (Adhikari & Hartemink, 2016). La régulation de la qualité de l'eau, ensuite, qui correspond à la filtration des polluants et à la dénitrification dans le profil de sol ; K_s intervient ici en déterminant le temps de résidence de l'eau et donc la capacité d'épuration (Dominati et al., 2010). Les services d'approvisionnement, incluent la production végétale et la disponibilité en eau pour les cultures, fonctions pour lesquelles un équilibre infiltrateur-drainant est nécessaire (Adhikari & Hartemink, 2016). Le soutien, quatrième catégorie, rassemble les fonctions biologiques fondamentales comme le cycle des nutriments ou la formation de la structure, qui dépendent indirectement des conditions hydriques du sol (Dominati et al., 2010).

2.2. Facteurs de variation de K_s

K_s est hautement variable dans l'espace, dans le temps et sensible aux caractéristiques structurales du sol. D'un point de vue physique, elle dépend de la distribution de la taille des pores, de leur continuité et de la tortuosité du réseau poral. L'analyse de Jarvis et al. (2013), portant sur un large jeu de données issu de bases européennes, a par ailleurs montré que les facteurs explicatifs de K_s diffèrent selon la profondeur : dans l'horizon de surface (0–0,3 m), K_s est principalement déterminée par la densité apparente, la teneur en carbone organique et l'usage du sol, tandis que dans les horizons plus profonds, la texture devient le facteur dominant. Les sous-sections suivantes détaillent successivement ces différents facteurs, des plus stables (texture, minéralogie) aux plus dynamiques (structure, matière organique, état hydrique).

2.2.1. Texture et composition granulométrique

La texture, soit la répartition des particules minérales par classe de diamètre (argiles, limons, sables), constitue le premier facteur explicatif de K_s , en particulier à l'échelle du profil complet et dans les horizons profonds non perturbés. La relation entre texture et K_s a été documentée sur la base de données européennes (Weynants et al., 2013), montrant que les sols sableux

(teneur en sable > 60 %) présentent des valeurs médianes de K_s de l'ordre de 200 mm/h, contre moins de 10 mm/h pour les sols argileux lourds. La base de données EU-HYDI (Tóth et al., 2015), qui agrège plus de 8 000 mesures de K_s en Europe, confirme ces tendances : les médianes par classe texturale varient de 5 mm/h (argiles) à 300 mm/h (sables).

Ce constat peut sembler en tension avec l'observation de Jarvis et al. (2013) selon laquelle la texture n'est pas le facteur dominant dans l'horizon de surface. Ces résultats ne sont toutefois pas contradictoires : la texture demeure le premier prédicteur structurel de fond à l'échelle du profil et des grandes bases de données, tandis que dans l'horizon travaillé, ce sont les facteurs structuraux dynamiques qui modulent le plus fortement K_s autour de cette base texturale.

La présence d'éléments grossiers de diamètre supérieur à 2 mm modifie la relation entre texture et K_s de manière ambivalente. D'une part, les éléments grossiers étant imperméables, ils réduisent la section effective disponible pour l'écoulement et allongent le trajet des lignes de courant, ce qui tend à diminuer K_s . D'autre part, le contact imparfait entre les éléments grossiers et la matrice fine génère une porosité lacunaire susceptible de constituer des chemins d'écoulement préférentiels, ce qui tend au contraire à augmenter K_s . Le sens de l'effet net dépend donc de la teneur en éléments grossiers et de la qualité du contact matrice-squelette. Novák et al. (2011) indiquent qu'au-delà d'un seuil d'environ 30 % d'éléments grossiers en volume, le comportement hydraulique du sol se rapproche de celui d'un matériau squelettique dominé par la porosité lacunaire. Dans le contexte des sols limoneux profonds de Basse et Moyenne Belgique, cette question reste toutefois secondaire, les teneurs en éléments grossiers y étant généralement faibles.

2.2.2. Minéralogie

La composition minéralogique de la phase solide influence K_s de manière indirecte par son contrôle sur l'agencement des particules et des agrégats. Les minéraux gonflants (smectite) confèrent au sol une forte capacité de gonflement-retrait en réponse aux variations de la teneur en eau, ce qui peut modifier profondément la structure porale au cours du cycle hydrique et, par conséquent, K_s . À l'inverse, les sols à dominante kaolinitique conservent une structure plus stable, avec des valeurs de K_s plus constantes dans le temps (Hardie et al., 2011). La présence d'oxydes de fer ou d'aluminium peut également influencer la stabilité des agrégats et donc la conductivité, bien que les mécanismes soient complexes.

2.2.3. Masse volumique apparente et état de compaction

La masse volumique apparente sèche (ρ_d) est un indicateur synthétique de l'état de compaction du sol, elle est définie comme le rapport entre la masse sèche de sol et le volume total occupé, pores compris, et s'exprime en $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (ou $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$). Le terme « densité apparente », désigne stricto sensu une grandeur adimensionnelle, à savoir le rapport de cette masse volumique à celle de l'eau.

Une augmentation de ρ_d traduit une diminution du volume poral total, mais son effet sur K_s est disproportionné. Le tassement affecte en effet prioritairement les pores les plus larges et les plus continus, c'est-à-dire précisément la fraction du réseau poreux qui gouverne l'écoulement en conditions saturées (section 2.1.4). Une variation modérée de ρ_d peut ainsi se traduire par une réduction bien plus que proportionnelle de K_s , ce qui rend la relation entre les deux grandeurs fortement non linéaire. Lipiec et Hatano (2003) ont documenté cette dégradation conjointe de la macroporosité et de la conductivité hydraulique sous l'effet du tassement, tout en soulignant que ρ_d seule n'en rend pas pleinement compte : à masse volumique apparente égale, deux sols peuvent présenter des K_s très différentes selon l'organisation et la continuité de leur porosité.

Reichert et al. (2009) ont identifié un seuil critique de masse volumique apparente qui dépend de la texture et qui s'établit autour de $1,55 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ pour les sols limoneux : au-delà de ce seuil, K_s chute brutalement, indiquant une perte de fonctionnalité hydrique. Schjønning et al. (2015) ont proposé une approche alternative fondée sur la masse volumique apparente relative (ρ_r), soit le rapport entre la masse volumique apparente mesurée et celle d'un échantillon compacté à l'essai Proctor standard. Ce rapport étant sans dimension, il permet de normaliser les mesures entre textures et constitue l'un des rares cas où le terme « densité » est formellement approprié. Selon ces auteurs, une ρ_r supérieure à 0,90 signale un sol physiquement dégradé, avec des conséquences marquées sur K_s .

Enfin, la masse volumique apparente n'est pas une propriété stable dans le temps. Le travail du sol la réduit temporairement dans l'horizon travaillé, mais le sol se reconsolide ensuite progressivement sous l'effet de son propre poids, de la désagrégation des mottes par la pluie et des cycles d'humectation-dessiccation, jusqu'à retrouver un état structural proche de son état initial (Strudley et al., 2008). Dans les sols limoneux cultivés, cette reconsolidation naturelle se superpose au tassement induit par le trafic des engins, dont la charge n'a cessé d'augmenter au cours des dernières décennies (Keller et al., 2019). Cette dynamique implique qu'une valeur de ρ_d , comme une valeur de K_s , n'a de sens qu'associée à une date et à un historique cultural.

2.2.4. Structure du sol et réseau poral

La structure du sol, soit l'arrangement spatial des agrégats et des particules primaires, détermine la configuration du réseau poral et constitue le facteur le plus déterminant de la conductivité hydraulique en surface (Jarvis, 2007). Watson et Luxmoore (1986) ont estimé que, dans un sol forestier, 73 % du flux saturé transitait par 0,32 % du volume poral total, occupé par les macropores. Cette inégale distribution du flux illustre l'importance de la connectivité des pores grossiers.

Si la porosité totale conditionne le volume d'eau stockable, c'est bien la distribution de la taille des pores et leur connectivité qui déterminent K_s . Selon la loi de Hagen-Poiseuille, la contribution d'un pore au flux augmente très rapidement avec son rayon, si bien qu'une faible

fraction de macropores peut conduire l'essentiel du flux saturé. La conduction rapide de l'eau dans les macropores se superpose à la transmission plus lente au sein de la matrice poreuse.

La classification poreuse de Jarvis (2007) distingue les micropores ($< 30 \mu\text{m}$), les mésopores ($30\text{--}300 \mu\text{m}$) et les macropores ($> 300 \mu\text{m}$), en lien avec leur rôle respectif dans la rétention et la transmission de l'eau. Les macropores, constitués principalement par les galeries biologiques (vers de terre, racines) et les fentes de retrait, sont les principaux vecteurs de l'infiltration rapide et des écoulements préférentiels (Jarvis, 2007). La stabilité structurale, qui conditionne la pérennité de ces macropores, est donc un facteur clé. Le test de battance (Le Bissonnais, 1996) permet d'évaluer cette stabilité et de prédire la dégradation de la structure sous l'effet du splash et du ruissellement, avec un impact indirect sur K_s .

2.2.5. Matière organique et activité biologique

La matière organique agit sur K_s selon plusieurs mécanismes. D'une part, elle favorise la formation d'agrégats stables qui maintiennent un réseau poreux connecté, d'autre part, elle améliore la résistance du sol à la battance et au compactage. L'ampleur de cet effet sur les propriétés hydriques reste toutefois débattue : Minasny et McBratney (2018) montrent par exemple que l'effet d'une augmentation de la teneur en matière organique sur la capacité de rétention en eau est plus limité que ce qui est souvent avancé. Les vers de terre anéciques, qui creusent des galeries verticales de 3 à 11 mm de diamètre, constituent le principal réseau de macropores biologiques. Capowiez et al. (2012) ont montré que l'activité des vers de terre contribue de façon déterminante à la régénération de la structure d'un sol agricole compacté en travail réduit, et le rôle des galeries dans la conduction de l'eau en conditions saturées est aujourd'hui bien documenté (Bottinelli et al., 2010).

2.2.6. État hydrique et écoulements préférentiels

Un sol initialement très sec peut présenter deux comportements aux effets opposés. D'une part, une hydrophobie temporaire peut ralentir l'infiltration initiale et conduire à une sous-estimation de K_s . D'autre part, la présence de fentes de retrait, dans les sols contenant des argiles gonflantes, active des chemins préférentiels qui provoquent une infiltration initiale rapide, suivie d'une diminution progressive lorsque ces fentes se referment par gonflement (Hardie et al., 2011). L'effet net dépend donc des propriétés du sol et de son état de dessiccation.

Les écoulements préférentiels, définis comme le déplacement non laminaire de l'eau le long de chemins privilégiés tels que les macropores, les fentes de retrait ou les interfaces entre horizons, contournent une partie de la matrice poreuse et modifient profondément le transport de l'eau et des solutés. Jarvis (2007) a montré que la présence de macropores actifs peut multiplier K_s mesurée par l'infiltromètre d'un facteur 10 à 100 par rapport à la conductivité de la matrice seule. Cette contribution disproportionnée des écoulements préférentiels constitue à la fois la principale explication de la variabilité spatiale de K_s discutée

à la section 2.1.4 et une difficulté majeure pour l'interprétation des mesures, puisque la valeur obtenue dépend fortement du volume de sol investigué par la méthode employée.

2.3. Impact des pratiques culturales sur Ks

2.3.1. Le travail du sol

Le travail du sol constitue l'intervention agricole qui modifie le plus directement et le plus rapidement Ks, par son action mécanique sur la structure et la porosité. Trois grandes catégories de travail sont classiquement distinguées : le labour conventionnel (inversion de l'horizon de surface jusqu'à 25–30 cm), le travail réduit ou superficiel (sur env. 15 cm de profondeur sans inversion), et le semis direct (aucune perturbation hormis la ligne de semis).

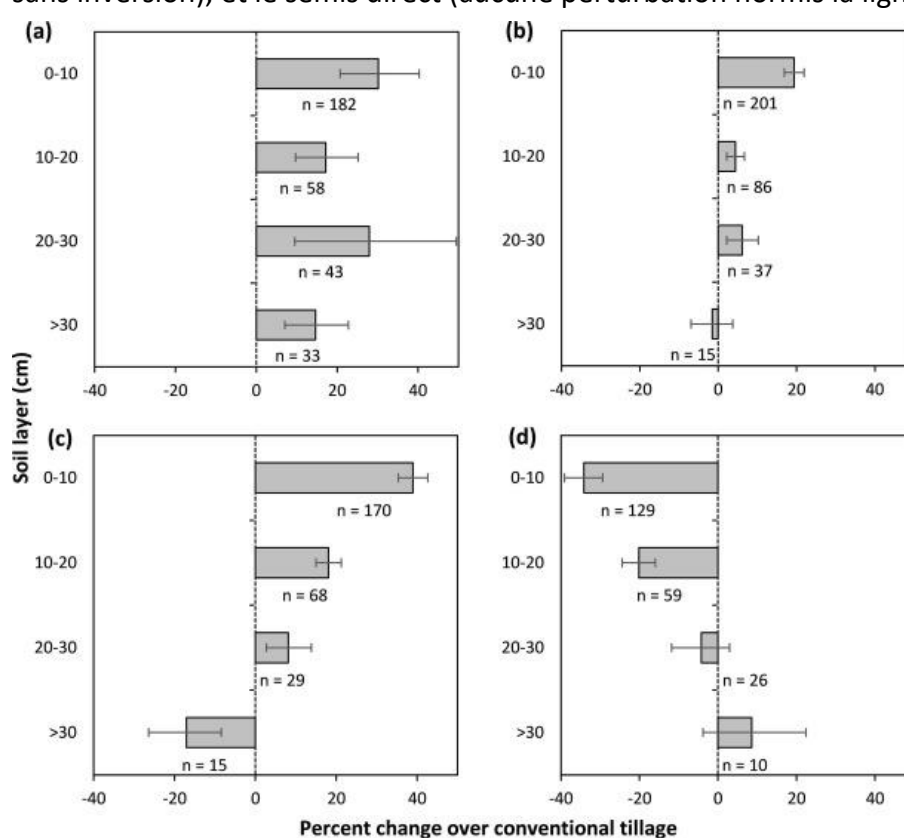


Figure 1 : Effet du semis direct (variation en % par rapport au labour conventionnel) sur (a) le diamètre moyen des agrégats, (b) les agrégats stables à l'eau, (c) les macroagrégats et (d) les microagrégats dans différentes couches du sol ; (Mondal & Chakraborty, 2022)

L'effet du travail du sol sur Ks est ambivalent et dépend fortement de l'échelle temporelle considérée. À court terme, quelques jours à quelques semaines après l'opération, le labour augmente transitoirement Ks par la création d'une macroporosité mécanique élevée dans l'horizon travaillé (Strudley et al., 2008). Le passage à des techniques de travail réduit ou au semis direct favorise généralement la formation d'agrégats plus stables et de plus grande taille, en particulier dans l'horizon de surface (Figure 1). La méta-analyse de Mondal et Chakraborty (2022), qui synthétise plusieurs centaines de comparaisons appariées entre semis direct et labour conventionnel, en donne une quantification. Dans la couche 0-10 cm, le diamètre moyen des agrégats augmente d'environ 30 % et la proportion d'agrégats stables à

l'eau d'environ 20 %. Ce gain correspond avant tout à une redistribution des classes de taille : les macroagrégats progressent de près de 40 % tandis que les microagrégats reculent dans des proportions comparables, ce qui traduit l'incorporation des seconds dans les premiers plutôt qu'une agrégation nette supplémentaire. L'amplitude de ces écarts décroît nettement avec la profondeur et tend à s'inverser au-delà de 30 cm, mais les effectifs y deviennent faibles et les intervalles de confiance larges, ce qui invite à limiter l'interprétation aux horizons superficiels.

Il convient de préciser que cette figure documente l'état d'agrégation et non la porosité ou K_s directement : le lien avec la conductivité hydraulique reste indirect, médié par la taille, la stabilité et la continuité des pores interagrégats. Elle illustre néanmoins le mécanisme structural sous-jacent aux différences de K_s évoquées plus haut, une agrégation plus grossière et plus résistante à l'humectation permettant le maintien de pores interagrégats fonctionnels là où le labour les reconstitue à chaque saison sous une forme instable. Le gradient vertical qu'elle met en évidence, avec un signal concentré dans les vingt premiers centimètres, justifie par ailleurs que les mesures de ce travail aient été réalisées à deux profondeurs distinctes au sein de l'horizon travaillé. Ces bénéfices structuraux restent cependant soumis à la charge mécanique ultérieure, développée dans la section 2.3.3.

Un effet particulier mérite d'être souligné : la formation de semelles de labour. Le passage répété de roues ou d'outils à la même profondeur génère, à la base de l'horizon travaillé, une couche compactée d'épaisseur centimétrique caractérisée par une densité apparente élevée et une K_s très faible (souvent < 1 mm/h). Cette semelle constitue un obstacle hydraulique majeur qui provoque des engorgements temporaires et limite la recharge des nappes (Schjønning & Rasmussen, 2000). Dans les systèmes en travail réduit ou semis direct, cette semelle disparaît progressivement sous l'action de la faune et des racines.

2.3.2. Les cultures de couverture et le couvert végétal hivernal

L'introduction de cultures de couverture constitue un levier majeur des systèmes en agriculture de conservation. Ces cultures modifient K_s par plusieurs mécanismes complémentaires.

Le premier mécanisme est l'action structurante des racines. Les systèmes racinaires créent et maintiennent des biopores qui, après décomposition des racines, peuvent persister comme conduits d'écoulement préférentiel. L'efficacité de cette action dépend fortement de l'architecture racinaire des espèces choisies. Les espèces à racines pivotantes profondes sont particulièrement efficaces pour percer les couches compactées et créer des conduits verticaux de plusieurs millimètres de diamètre (Chen & Weil, 2010). Les graminées comme le ray-grass ou le seigle produisent plutôt un dense réseau de racines fasciculées qui améliore la stabilité structurale des horizons de surface sans atteindre la profondeur.

Le deuxième mécanisme est la protection contre la battance. Un couvert vivant pendant l'interculture intercepte les gouttes de pluie, réduit leur énergie cinétique au sol et limite la

formation de croûtes de battance. Cet effet, bien documenté pour la limitation de l'érosion, se traduit également par un maintien de K_s de surface significativement plus élevée sous couvert (Basche & DeLonge, 2019).

Le troisième mécanisme est l'apport de matière organique fraîche, qui stimule l'activité biologique comme développé en section 2.2.5. Cet effet est cumulatif dans le temps et explique pourquoi les bénéfices des couverts sur K_s sont généralement faibles les premières années puis s'amplifient. La méta-analyse de Basche & DeLonge (2019) portant sur 89 études montre une augmentation moyenne de K_s en surface (0–10 cm) sous couverts de 35 % par rapport aux intercultures nues, avec une forte variabilité visible par un intervalle de confiance à 95 % de 17 à 53 %.

Le mode de destruction et de gestion des résidus du couvert influence fortement l'effet net (Blanco-Canqui & Ruis, 2020 ; Yan & Arthur, 2025). Une destruction par broyage et enfouissement mécanique annule partiellement les bénéfices structuraux en remobilisant les agrégats, tandis que le maintien des résidus en surface préserve mieux la macroporosité biologique créée au cours de la croissance du couvert et se traduit par des gains d'infiltration nettement supérieurs.

2.3.3. La charge mécanique : trafic agricole et compaction

Au-delà du travail du sol proprement dit, l'ensemble des opérations culturales implique le passage répété d'engins dont la masse et la pression au sol n'ont cessé de croître depuis les années 1960 (van den Akker & Schjønning, 2004). Cette charge mécanique constitue un déterminant majeur de la dégradation de K_s , distinct de l'effet du travail du sol et souvent sous-estimé dans les comparaisons de systèmes.

Le mécanisme principal est la compaction du sol sous l'effet de la pression exercée par les pneumatiques. Cette compaction se traduit par une augmentation de la densité apparente, une réduction préférentielle de la macroporosité (les pores les plus larges sont les plus sensibles à l'écrasement) et donc une chute marquée de K_s (Alaoui et al., 2011 ; Lipiec & Hatano, 2003). L'effet est particulièrement sévère lorsque le passage s'effectue sur un sol humide, où la portance est réduite et la déformation plastique maximale.

La distinction entre compaction de surface, qui peut être levée par le travail du sol suivant, par les cycles gel-dégel ou par l'action biologique, et compaction profonde, quasi-irréversible sur échelle de temps agricole, est cruciale. La compaction profonde échappe à ces processus de régénération naturelle ou techniques et tend à s'accumuler au fil des années, créant une dégradation cumulative de la structure du sous-sol (Reichert et al., 2009).

2.3.4. La rotation culturale et la diversification

La rotation culturale, c'est-à-dire la succession ordonnée d'espèces différentes sur une même parcelle, influence K_s par des mécanismes indirects mais cumulatifs sur le long terme. Le

premier mécanisme est lié à la diversification des architectures racinaires. Une rotation incluant des espèces à pivots (colza, betterave, féverole), des espèces à racines fasciculées (céréales) et des légumineuses pérennes (luzerne, trèfle) sollicite et structure différentes profondeurs du profil, créant un réseau de biopores plus diversifié et plus continu qu'une monoculture ou qu'une rotation courte. Williams & Weil (2004) ont montré expérimentalement que la présence d'une culture à pivot dans la rotation pouvait améliorer Ks de 20 à 40 % dans la culture suivante, par un effet de décompactage résiduel lié aux galeries racinaires.

Le deuxième mécanisme est lié à la quantité et à la qualité des résidus retournés au sol. Les rotations diversifiées, et particulièrement celles incluant des légumineuses fourragères pluriannuelles, génèrent des apports de carbone plus importants et plus variés, qui stimulent la biodiversité microbienne et la formation d'agrégats stables, et se traduisent à long terme par une amélioration de la stabilité structurale (King & Blesh, 2018).

Il importe de souligner que les effets de la rotation sur Ks sont plus lents à se manifester que ceux du travail du sol ou des couverts végétaux. Les méta-analyses européennes suggèrent qu'un cycle complet de rotation, soit quatre à six ans, constitue un minimum pour observer des effets statistiquement significatifs, et que les bénéfices maximaux n'apparaissent qu'après dix à quinze ans (King & Blesh, 2018). Cette inertie a une implication méthodologique directe pour l'interprétation des essais de longue durée : la durée écoulée depuis la mise en place des traitements conditionne fortement l'amplitude des différences observables entre systèmes.

2.3.5. Prairie versus culture annuelle : la référence haute

La comparaison entre prairies permanentes et terres arables constitue un cadre interprétatif utile pour positionner les résultats de Ks obtenus sur des systèmes culturaux. La prairie permanente est en effet souvent considérée comme la situation de référence représentant le potentiel maximal de qualité physique atteignable dans un contexte pédoclimatique donné, en dehors des écosystèmes forestiers.

Les écarts mesurés entre prairies et cultures sont systématiquement marqués. La synthèse réalisée par Bormann & Klaassen (2008) sur des sites européens montre des Ks en prairie permanente supérieurs d'un facteur 2 à 10 par rapport aux terres arables adjacentes de même texture. Plusieurs mécanismes expliquent cet écart.

Le premier est l'absence de perturbation mécanique. La prairie permanente n'est pas travaillée et n'est soumise qu'à un trafic limité (fauche, pâturage), ce qui permet le développement d'une structure pédologique pleinement exprimée, avec une macroporosité biologique continue et stable. Le second est la couverture végétale permanente, qui élimine la battance et maintient la stabilité structurale de surface. Le troisième est le développement d'un système racinaire dense et permanent qui maintient en activité un réseau de biopores en équilibre dynamique avec la décomposition racinaire. Le quatrième est la stimulation continue de la faune du sol. La méta-analyse de Spurgeon et al. (2013), portant sur cinquante-

quatre jeux de données comparant terres arables et prairies, rapporte une abondance moyenne de 229 individus/m² en prairie contre 56 individus/m² en culture, soit un rapport d'environ quatre, avec une variabilité importante entre sites.

Un aspect important pour l'interprétation comparative est la variabilité spatiale. La prairie présente généralement une variabilité de Ks supérieure à celle de la culture, avec des coefficients de variation typiquement de 100 à 200 % contre 60 à 100 % respectivement. Cette variabilité accrue résulte de la mosaïque biologique qui caractérise les prairies, à savoir l'hétérogénéité des galeries de vers, des touffes racinaires et, en cas de pâturage, des zones de piétinement et de déjections. Cette hétérogénéité impose un nombre de répétitions plus élevé pour caractériser une prairie avec la même précision qu'une culture (Bormann & Klaassen, 2008).

2.4. Méthodes de mesure de la conductivité hydraulique à saturation

2.4.1. Vue d'ensemble et critères de classification

La mesure de Ks constitue un défi métrologique reconnu de longue date. Aucune méthode ne fait aujourd'hui l'objet d'un consensus universel et le choix d'une méthode dépend d'un compromis entre précision, représentativité spatiale, coût, temps de mise en œuvre, profondeur d'investigation et conditions de terrain (Tableau 2). Cette diversité méthodologique explique en grande partie la variabilité considérable des valeurs de Ks rapportées dans la littérature pour des sols apparemment similaires : Reynolds et al. (2000) ont ainsi montré que la mesure d'un même sol par cinq méthodes différentes pouvait conduire à des valeurs s'étalant sur deux ordres de grandeur.

Tableau 2 : Caractéristiques comparatives des principales méthodes de mesure de Ks (Tableau original, construit à partir d'Angulo-Jaramillo et al. (2016), Reynolds et al. (2002) et Elrick & Reynolds (1992)).

Méthode	Type	Profondeur d'investigation	Durée typique	Coût matériel	Avantages principaux	Inconvénients principaux
Perméamètres "ex-situ"	Laboratoire	0–30cm	30 min–2 h	Très bas (< 100 €)	Précision élevée, conditions contrôlées	Volume petit (100–250 cm ³), ignore macroporosité structurale, perturbation au prélèvement

Infiltromètre anneau simple (ISA)	Terrain	0–10 cm	30 min–2 h	Bas (< 200 €)	Matériel simple, rapide, peu coûteux, reproductibilité bonne	Perturbation lors enfoncement, divergence latérale, sensible au contact sol-anneau
Infiltromètre anneau double (IAD)	Terrain	0–10 cm	1–4 h	Bas (< 300 €)	Réduit les effets de divergence latérale	Consommation eau importante, durée mesure plus longue
Méthode Porchet	Terrain	10–50 cm	30 min–plusieurs h	Très bas (< 50 €)	Matériel minimal, peu coûteux, caractériser des horizons plus profonds	Perturbation parois trou, consommation eau élevée, équation approximée
Perméamètre Guelph	Terrain	10–100 cm	1–6 h	Elevé (3000–5000 €)	Régime permanent assuré, sépare composantes gravitaire et capillaire	Complexité mathématique, durée très longue sur sols peu perméables

Plusieurs critères de classification permettent d'organiser cette diversité méthodologique. Le premier critère oppose les mesures de laboratoire aux mesures de terrain. Les méthodes de laboratoire, principalement le perméamètre à charge constante ou variable, s'effectuent sur des échantillons monolithiques prélevés avec le moins de perturbation possible (cylindres de Kopecky). Elles offrent un contrôle précis des conditions expérimentales (température, gradient hydraulique, qualité de l'eau) mais souffrent de deux limitations majeures : le faible volume échantillonné (typiquement 100 à 250 cm³) qui ne capture pas la macroporosité structurale aux échelles supérieures, et le risque de perturbation lors du prélèvement et du transport. Les méthodes de terrain, à l'inverse, s'affranchissent du prélèvement mais imposent de travailler dans des conditions environnementales non contrôlées.

Le deuxième critère oppose les mesures par infiltration de surface aux mesures par puits ou trou de tarière. Les méthodes par infiltration de surface (infiltromètres à anneau simple ou double, infiltromètre de Hood, infiltromètre à tension) mesurent l'infiltration verticale à partir de la surface du sol et caractérisent donc principalement l'horizon de surface, en ce compris l'effet d'une croûte de battance éventuellement présente. La caractérisation d'horizons plus profonds est possible mais implique des déplacements de terre significatifs qui perturbent la

structure du profil. Les méthodes par puits ou trou de tarière (Porchet, Guelph) mesurent l'infiltration latérale et verticale à partir d'une cavité creusée dans le sol. Elles permettent de caractériser aussi bien les horizons de surface que les horizons plus profonds sans nécessiter le retrait de couches supérieures. Un avantage important est que la présence d'une croûte de battance superficielle n'affecte pas ces mesures, puisque l'infiltration s'effectue à partir d'une profondeur intermédiaire.

Le troisième critère oppose les méthodes ponctuelles (Porchet, ISA, Guelph) aux méthodes intégratives. Les premières mesurent K_s en un point donné et nécessitent un grand nombre de répétitions pour caractériser une parcelle compte tenu de la forte variabilité spatiale de K_s . Les secondes, encore en développement, tentent de caractériser K_s sur une surface plus large via des approches inverses à partir de mesures de teneur en eau ou de réponses pluie-débit. Elles présentent l'avantage théorique de fournir une valeur de K_s directement utilisable dans les modèles hydrologiques distribués, sans nécessiter d'étape de changement d'échelle supplémentaire, mais leurs limites principales incluent la nécessité d'une instrumentation complexe à l'échelle de la parcelle et l'absence de consensus méthodologique (Ritter et al., 2003).

Dans les sections 2.4.3. et 2.4.4., les deux méthodes utilisées dans ce mémoire (Porchet et infiltromètre à simple anneau) seront détaillées. Le perméamètre de Guelph est également présenté (section 2.4.5.) à titre comparatif, bien qu'il n'ait pas été déployé dans cette étude.

2.4.2. La distinction fondamentale entre K_s et K_{fs}

Avant d'aborder les méthodes spécifiques, il est essentiel de clarifier une distinction conceptuelle souvent source de confusion lors de l'interprétation des mesures : celle entre la conductivité hydraulique à saturation vraie (K_s) et la conductivité hydraulique à saturation de terrain (K_{fs} , field-saturated hydraulic conductivity).

La saturation vraie correspond à un état où l'intégralité de la porosité du sol est remplie d'eau, sans aucune phase gazeuse résiduelle. Cet état n'est généralement atteint qu'en laboratoire, après saturation lente par le bas sous vide partiel. Sur le terrain, l'infiltration d'eau depuis la surface piège systématiquement des bulles d'air dans la porosité, conduisant à un état de quasi-saturation appelé saturation de terrain. La fraction d'air piégée représente typiquement 5 à 15 % de la porosité totale (Bouwer, 1966), ce qui se traduit par une K_{fs} systématiquement inférieure à K_s d'un facteur 2 environ en moyenne.

Cette distinction doit être considérée lors de la comparaison entre résultats de laboratoire et mesures de terrain, car les méthodes de terrain mesurent toutes K_{fs} et non K_s stricto sensu.

2.4.3. La méthode Porchet

La méthode Porchet, parfois appelée méthode du trou de tarière à charge variable, est l'une des plus anciennes méthodes de mesure in situ de K_s , développée dans les années 1930 par

Porchet et Laferrère pour les besoins du drainage agricole en France (Porchet & Laferrère, 1935). Sa simplicité conceptuelle et matérielle en fait une méthode encore largement utilisée aujourd'hui, particulièrement dans le contexte de l'assainissement non collectif et des études de drainage.

Le principe consiste à creuser un trou cylindrique à la tarière, typiquement 10–15 cm de diamètre, 30–50 cm de profondeur, à le remplir d'eau jusqu'à une hauteur définie, puis à mesurer la vitesse de descente du niveau d'eau au cours du temps. La saturation préalable des parois est obtenue par plusieurs remplissages successifs jusqu'à stabilisation du rythme de descente, considéré comme l'atteinte du régime quasi-permanent.

L'eau infiltrée s'écoule à la fois latéralement à travers les parois et verticalement à travers le fond du trou. L'équation classique de Porchet, dérivée par hypothèse de symétrie cylindrique et de gradient hydraulique unitaire, s'écrit :

$$Ks = \frac{r}{2(t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{2h_1 + r}{2h_2 + r} \quad \text{Eq 2}$$

où r est le rayon du trou (en mm), h_1 et h_2 les hauteurs d'eau (en mm) aux temps t_1 et t_2 (en heures). Cette équation suppose implicitement que le sol entourant le trou est uniformément saturé et que le gradient de charge matricielle est négligeable, hypothèses qui sont approchées mais jamais strictement vérifiées.

La méthode Porchet présente plusieurs avantages opérationnels qui expliquent sa popularité persistante : matériel minimal (tarière, mètre ruban, chronomètre, eau), coût quasi nul, mise en œuvre rapide et possibilité de mesurer à différentes profondeurs dans le profil. Elle est particulièrement adaptée aux sols à conductivité intermédiaire (Ks typiquement entre 1 et 100 mm/h), pour lesquels la descente du niveau d'eau est observable sur des durées raisonnables. Pour des $Ks < 0,5$ mm/h, la mesure devient problématique (plusieurs heures à plusieurs jours), tandis que pour $Ks > 100$ mm/h, la descente devient trop rapide pour permettre des mesures fiables avec la précision requise.

Ses limites sont toutefois nombreuses. La consommation d'eau est élevée (plusieurs dizaines de litres par mesure pour la phase de saturation préalable), ce qui peut poser un problème en conditions de terrain isolées. Surtout, le creusement du trou perturbe significativement la structure du sol : le tariérage peut lisser et compacter les parois et masquer les macropores, conduisant à une sous-estimation systématique de Ks pouvant atteindre un facteur 2 à 5 selon les textures (Angulo-Jaramillo et al., 2016). Enfin, l'hypothèse de gradient unitaire conduit à ignorer la composante matricielle du flux et à supposer un écoulement strictement vertical, alors que l'écoulement réel autour du trou de tarière est tridimensionnel avec des composantes latérales significatives. Cela surestime Ks dans les sols à forte capillarité et introduit un biais supplémentaire dans l'estimation.

Plusieurs variantes de la méthode Porchet ont été développées pour pallier ses limites. La variante à charge constante, dont le principe remonte aux travaux de Kirkham (1945) sur la mesure in situ de la perméabilité, en est une amélioration majeure : au lieu de mesurer la

descente du niveau d'eau, elle maintient une charge hydraulique constante à l'aide d'un régulateur et mesure le débit d'alimentation nécessaire. Cela permet de travailler directement en régime permanent et d'éviter les approximations du calcul en charge variable, mais ce gain en précision s'accompagne d'une complexification du dispositif. L'équation de cette méthode est la suivante :

$$K_s = Q/C \quad \text{Eq 3}$$

Avec $C [m^2]$, la surface de sol mouillé au contact de la cavité et $Q [m^3/s]$.

Le perméamètre de Guelph (section 2.4.5) peut être considéré comme une synthèse encore plus sophistiquée, intégrant explicitement la composante matricielle et le caractère tridimensionnel de l'écoulement.

2.4.4. L'infiltromètre à simple anneau (et double anneau)

L'ISA mesure l'infiltration en surface et est répandu en raison de sa simplicité, de son faible coût et de sa polyvalence. Son principe a été formalisé pour la première fois par Müntz à la fin du XIX^e siècle et a connu de nombreux raffinements théoriques au cours du XX^e siècle.

Le principe consiste à enfoncer un anneau cylindrique de 10 à 30 cm de diamètre sur 3 à 5 cm de profondeur dans le sol, à y maintenir une lame d'eau de hauteur connue, et à mesurer le débit d'alimentation nécessaire pour maintenir cette lame d'eau. Lorsque le régime permanent est atteint, c'est-à-dire lorsque le débit se stabilise dans le temps, ce débit est utilisé pour calculer K_s .

La principale difficulté théorique de l'ISA tient au fait que l'écoulement n'est pas purement vertical sous l'anneau : une composante latérale (divergence) se développe en dessous et autour de l'anneau, dont l'importance dépend du rayon de l'anneau, de la profondeur d'enfoncement, de la hauteur de la lame d'eau et des propriétés capillaires du sol. Ignorer cette divergence conduit à surestimer K_s d'un facteur 2 à 5 (Lassabatère et al., 2006).

L'équation de Wooding (1968) est aujourd'hui la formulation de référence pour le calcul de K_s à partir d'une mesure d'ISA en régime permanent :

$$K_s = \frac{G*Q}{r*H + G\pi r^2 + \frac{r}{\alpha}} \quad \text{Eq 4}$$

où Q est le débit en régime permanent (m^3/s), r le rayon de l'anneau (mm), H la hauteur de la lame d'eau (mm), G un coefficient géométrique empirique, et α un paramètre de forme du sol caractérisant l'effet des forces capillaires. Pour les sols limons argileux, Reynolds & Elrick (1990) proposent une valeur de référence $\alpha = 0,012 \text{ mm}^{-1}$, tandis que d'autres classes texturales (sableux, argileux) présentent d'autres valeurs de référence. Ce paramètre peut aussi être déterminé expérimentalement par des mesures d'infiltration à charges multiples. Cette équation intègre explicitement la divergence latérale et permet une estimation moins biaisée que les approches plus anciennes.

L'ISA présente plusieurs avantages : matériel peu coûteux et facilement transportable, durée de mesure raisonnable (typiquement 30 minutes à 2 heures par point), bonne reproductibilité quand les conditions opératoires sont standardisées, possibilité d'automatisation des mesures et mesure directement représentative de l'horizon de surface, ce qui est pertinent pour les problématiques d'érosion et de ruissellement.

Ses limites principales incluent la perturbation du sol lors de l'enfoncement de l'anneau, qui peut induire des écoulements préférentiels le long de la paroi de l'anneau. Ces écoulements peuvent être atténués par l'application de graisse sur les bords intérieurs de l'anneau, ce qui améliore le contact sol-métal. D'autres limites sont la consommation d'eau qui peut être importante sur sols perméables, et la sensibilité de la mesure à la qualité du contact anneau-sol. Sur sols à forte teneur en éléments grossiers, l'enfoncement peut être difficile voire impossible sans perturbation majeure de la structure.

La version double anneau (IAD) utilise un anneau externe servant de « garde » pour confiner l'écoulement de l'anneau interne à un flux principalement vertical, ce qui permet de s'affranchir partiellement de la divergence latérale. Cependant, elle consomme nettement plus d'eau et de temps que la version simple.

2.4.5. Le perméamètre de Guelph

Le perméamètre de Guelph, développé par Reynolds et Elrick à l'Université de Guelph (Canada) dans les années 1980, peut être considéré comme une synthèse sophistiquée des méthodes Porchet et ISA, conçue pour pallier les limites principales de chacune. Il s'agit aujourd'hui d'une méthode largement utilisée en recherche et dans les bureaux d'études, notamment pour les investigations de drainage, de pollution des sols et de génie civil.

Le perméamètre de Guelph consiste à maintenir une hauteur d'eau constante dans un trou de tarière de petit diamètre (typiquement 6 cm) au moyen d'un dispositif de Mariotte gradué, et à mesurer le débit d'alimentation nécessaire pour maintenir cette hauteur. Contrairement à la méthode Porchet à charge variable, la mesure s'effectue en régime permanent et avec une charge hydraulique constante.

Une innovation majeure du Guelph est la possibilité de réaliser la mesure successivement à deux hauteurs d'eau différentes (typiquement $H_1 = 5$ cm et $H_2 = 10$ cm). Cette double mesure repose sur le principe fondamental que l'écoulement en régime permanent peut être décomposé en trois composantes : le flux gravitaire (purement vertical), le flux capillaire (flux matriciel) et le flux hydrostatique (pression de la lame d'eau). À deux hauteurs d'eau différentes, ces deux composantes varient différemment, ce qui permet de les résoudre mathématiquement. Le flux total peut être formalisé comme :

$$Q = K_s \cdot S + K_s \cdot \varphi_m \cdot T \quad \text{Eq 5}$$

où Q est le débit observé, K_s la conductivité hydraulique à saturation, φ_m le potentiel de flux matriciel (variable représentant l'effet des forces capillaires sur le flux), et S et T sont des

termes géométriques dépendant de la profondeur et de la géométrie du trou. En effectuant deux mesures à deux hauteurs d'eau différentes, on obtient deux équations à deux inconnues (K_s et ϕ_m), ce qui permet de résoudre pour chacune.

La résolution mathématique conduit à l'équation suivante :

$$K_s = \frac{C_2 Q_1 - C_1 Q_2}{\pi a^2 (C_2 - C_1)(H_1 - H_2)} \quad \text{Eq 6}$$

où Q_1 et Q_2 sont les débits (en régime permanent) aux hauteurs H_1 et H_2 , C_1 et C_2 des coefficients géométriques adimensionnels tabulés en fonction du rapport H/a (où a est le rayon du trou), et a le rayon du trou en mm. Les coefficients C_1 et C_2 sont disponibles dans les tables originales de Reynolds & Elrick (1985) ou dans les manuels méthodologiques de la méthode. Cette approche à deux charges fournit simultanément K_s et le potentiel de flux matriciel ϕ_m , ce qui constitue un avantage théorique notable.

Le perméamètre de Guelph présente plusieurs avantages : faible consommation d'eau (entre deux et cinq litres par mesure), précision élevée grâce au régime permanent assuré, possibilité de mesurer à différentes profondeurs dans le profil, bonne reproductibilité quand le protocole est respecté, et surtout la séparation explicite des différentes composantes.

Ses limites incluent un coût matériel très élevé (de l'ordre de 3000 à 5000 € pour un dispositif commercial), ce qui s'explique principalement par la petite série de fabrication et la nécessité d'amortir les coûts de conception sur un nombre limité d'appareils. La mesure est néanmoins possible avec des tubes de la méthode Porchet avec une adaptation. Une autre limitation est la durée potentiellement longue de la mesure sur sols peu perméables, car l'atteinte du régime permanent à deux charges successives peut prendre plusieurs heures. En outre, la méthode reste sensible aux biais de perturbation des parois du trou de tarière, similaires à la méthode Porchet. Enfin, la mathématique d'interprétation est plus complexe et peut conduire à des valeurs négatives non physiques de K_s ou ϕ_m lorsque les conditions expérimentales varient significativement entre les deux mesures (par exemple, drainage partiel du trou entre les deux mesures) ou lorsque le rapport signal/bruit des débits mesurés est trop faible (Elrick & Reynolds, 1992).

Une simplification pratique de la méthode Guelph consiste à n'effectuer qu'une seule mesure à une hauteur d'eau fixe, en supposant une valeur raisonnée du potentiel de flux matriciel ϕ_m basée sur la texture du sol ou estimée à partir de régressions empiriques. Cela réduit considérablement la durée de la mesure, ce qui est particulièrement important sur sols peu perméables, mais au prix d'une perte de précision comparée à la double charge. Cette variante simplifie la relation entre Q et K_s : l'hypothèse implicite d'une valeur de ϕ_m (comparable à l'hypothèse sur α pour l'ISA) permet de dériver K_s rapidement, au prix de l'introduction d'une hypothèse supplémentaire sur les propriétés capillaires du sol.

3. Objectifs et démarche

L'état de l'art a mis en évidence trois constats. La conductivité hydraulique à saturation intègre les effets combinés de la texture et de la structure, ce qui en fait un indicateur pertinent de santé physique des sols. Elle est par ailleurs sensible aux pratiques culturales, en particulier au travail du sol et à la couverture végétale. Sa mesure reste néanmoins un défi métrologique, en raison d'une forte variabilité spatiale et de l'absence de consensus sur la méthode de référence.

L'objectif général de ce mémoire est de contribuer à une meilleure compréhension du potentiel et des limites de la conductivité hydraulique à saturation comme indicateur de santé des sols agricoles wallons, en combinant une réflexion méthodologique sur sa mesure et une analyse de sa sensibilité aux systèmes de culture.

Le premier sous-objectif, de nature méthodologique, vise à comparer la méthode Porchet et l'ISA sur deux occupations du sol contrastées que sont la prairie permanente et le champ cultivé, afin d'évaluer la cohérence des valeurs de K_s obtenues et de discuter les limites pratiques de chaque approche. L'ISA est régulièrement utilisé dans des projets de recherche, entre autres à l'UCLouvain, alors que la méthode Porchet est couramment utilisée par les bureaux d'études en hydrologie. Le second sous-objectif, de nature agronomique, vise à évaluer la capacité de la mesure Porchet à discriminer des systèmes de culture contrastés au sein d'un essai de longue durée (essai SYCI du CRA-W à Gembloux), et à mettre les valeurs de K_s obtenues en relation avec d'autres indicateurs de santé du sol disponibles sur l'essai à savoir la résistance à la pénétration, la densité apparente, la qualité structurale évaluée par le test VESS, l'abondance des vers de terre et la stabilité structurale mesurée par le QuantiSlake Test.

La démarche adoptée repose sur deux campagnes de terrain complémentaires, conduites en novembre 2025 et en mars 2026, suivies d'une phase d'analyse statistique et d'interprétation croisée des résultats selon le sous-objectif de la campagne : une comparaison de méthodes et une comparaison des systèmes cultureux.

La première campagne, à vocation méthodologique, a été menée sur deux parcelles proches situées sur le site de la Ferme de Marbaix, l'une en prairie permanente et l'autre en culture en système conventionnel. Sur chacune de ces deux parcelles, les mesures de K_s ont été réalisées en parallèle par la méthode Porchet et par la méthode ISA, sur des points de mesure spatialement appariés afin de minimiser l'effet de la variabilité spatiale dans la comparaison inter-méthodes.

La seconde campagne a été menée sur l'essai SYCI de Gembloux. Ce dispositif expérimental en blocs randomisés, établi depuis 6 ans, permet d'attribuer les différences observées aux systèmes cultureux plutôt qu'à la variabilité pédologique de fond. Les mesures de K_s par la méthode Porchet y ont été complétées par les autres indicateurs physiques de santé du sol mentionnés ci-dessus, afin de permettre une analyse intégrée.

4. Matériels et méthodes

4.1. Organisation de la section

Les mesures s'organisent en deux séries distinctes. La première série vise à comparer deux méthodes de mesure de la conductivité hydraulique à saturation sur le terrain, à savoir la méthode Porchet et la méthode ISA. La seconde série s'inscrit dans le cadre de l'essai SYCI développé au CRA-W de Gembloux et vise à évaluer l'effet de différents systèmes de culture sur la conductivité hydraulique du sol. Pour chacune de ces séries, les mesures de conductivité hydraulique sont complétées par des mesures de pénétrométrie et de densité apparente, permettant une caractérisation plus large de l'état physique du sol. La structure de cette section suit cette organisation en deux séries, chacune introduite par une présentation du site et du dispositif expérimental, suivie du détail des méthodes de mesure employées et du traitement des données puis des analyses statistiques réalisées pour l'ensemble du mémoire.

4.2. Première série de mesures : comparaison de méthodes

4.2.1. Site et dispositif expérimental

Les mesures ont été réalisées sur deux parcelles de la Ferme de Marbaix à Corroy-le-Grand. Celle-ci fait partie des Fermes Universitaires de l'UCLouvain. Cet emplacement a été sélectionné car il offre deux occupations du sol différentes sur un environnement proche et qu'il est facilement accessible depuis Louvain-la-Neuve. Le premier site est une prairie permanente, composée d'un mélange de graminées et de trèfle blanc, n'ayant subi aucun travail du sol depuis 7 ans. Elle est néanmoins proche d'un des accès aux champs et subit donc le passage occasionnel de tracteur. Le deuxième site est un champ cultivé avec labour qui était occupé par une culture d'interculture au moment des relevés. Les mesures ont été effectuées en novembre 2025 pendant des périodes de temps sec pour faciliter les mesures. L'emplacement présente une pente faible et la carte des sols de Wallonie montre une homogénéité texturale sur l'ensemble de la zone d'étude avec un sol limoneux à drainage naturel modéré ou imparfait, ce qui en fait un site adapté pour comparer les méthodes de mesure de K_s . La figure 2 présente la position des parcelles de mesure et la situation du site.

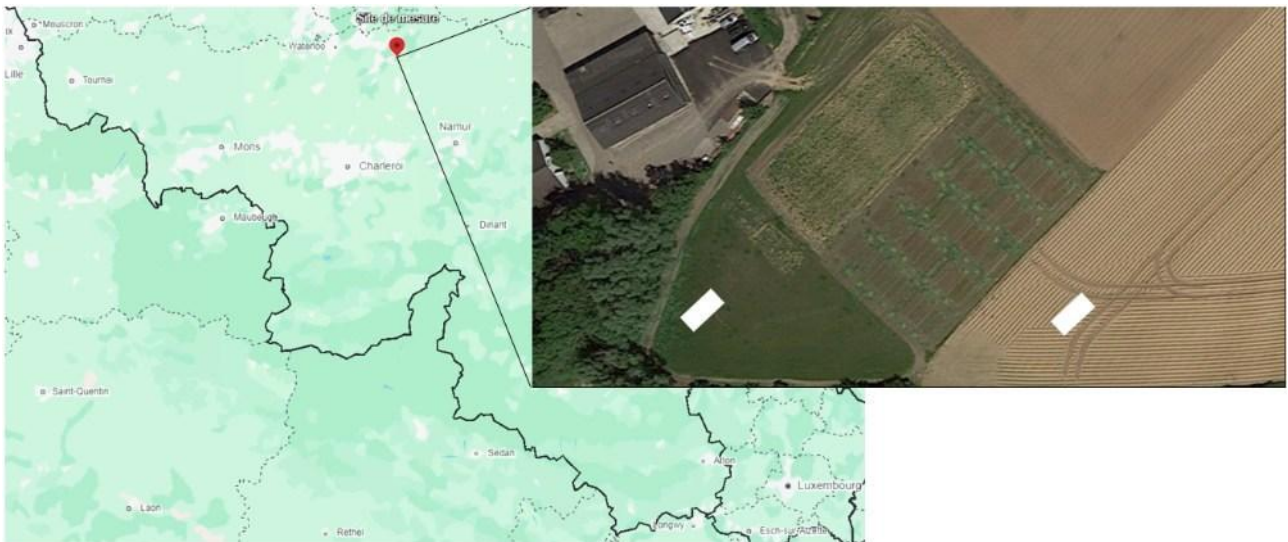


Figure 2 : 1^{ère} expérience - Localisation de la Ferme de Marbaix à Corroy-le-Grand en Wallonie. Les cadres blancs indiquent la position approximative des zones de mesure sur les 2 parcelles.

4.2.2. Description du plan expérimental

Sur chacune des deux parcelles (prairie et culture), une zone expérimentale de 15 m x 11 m a été délimitée pour la réalisation des mesures (Figure 3). Au sein de chaque zone expérimentale, 10 sous-parcelles de dimensions équivalentes (1m sur 1m) ont été sélectionnées de façon à assurer une répartition homogène des points de mesure. Dans chaque sous-parcelle, un ensemble de mesures a été effectué : une mesure d'infiltration par la méthode « Porchet », une mesure d'infiltration par la méthode ISA, deux carottages de sol en vue de déterminer la densité apparente, et quatre mesures de pénétrométrie à l'aide d'un pénétromètre électronique. Une zone de passage centrale a été aménagée pour permettre

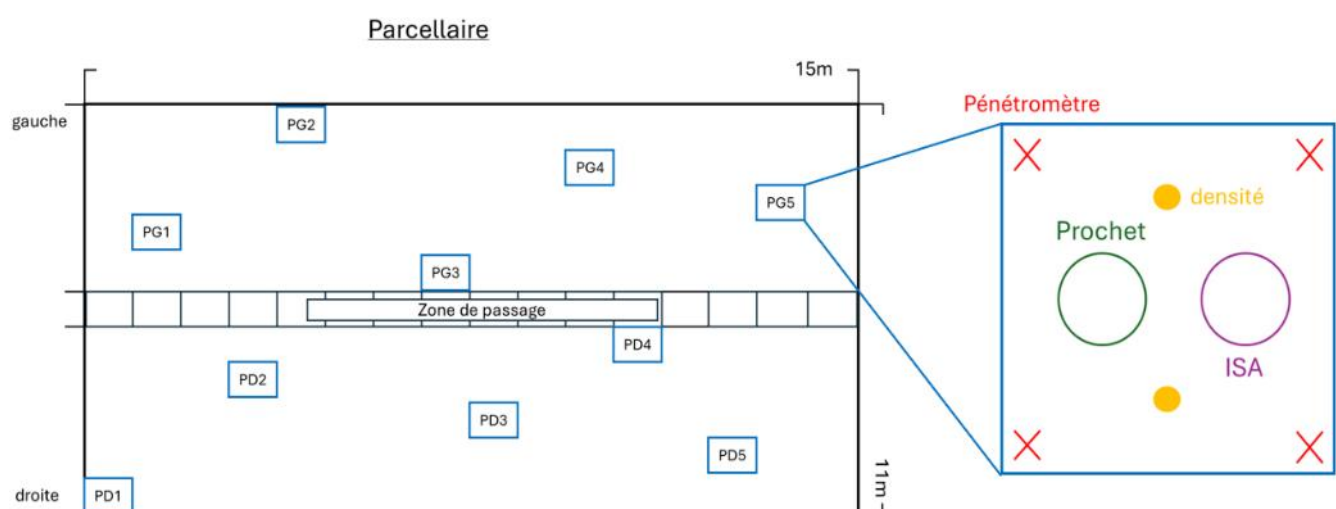


Figure 3 : Sur la gauche : schéma de la disposition des sous parcelles de mesure au sein d'une parcelle. Sur la droite, schéma de la position des différents points de mesure pour une sous-parcelle.

de circuler sans risquer de perturber les points de mesure, évitant ainsi toute compaction supplémentaire du sol qui aurait pu biaiser les résultats.

4.3. Deuxième série de mesure : Effet des systèmes culturaux sur la conductivité hydraulique

4.3.1. Site et dispositif expérimental

Les mesures ont été réalisées sur certaines parcelles de l'essai Systèmes de Culture Innovants (SYCI), qui est un dispositif expérimental de longue durée mis en place par le CRA-W sur son site de Gembloux. Mis en place à partir de l'automne 2019, l'essai compare quatre systèmes culturaux contrastés sur un même sol : un système conventionnel (CONV) servant de référence, un système orienté vers la conservation des sols (SOL), un système visant la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) et un système tendant vers la suppression des produits phytosanitaires (ZP). Chacun de ces systèmes suit une rotation culturale de six ans, ce qui implique qu'au moment des mesures, l'essai a déjà complété un cycle culturel complet. Les six cultures de chaque rotation sont représentées chaque année. Le détail des rotations est présenté en Annexe 1.

Le dispositif est organisé en trois blocs disposés côte à côte (Figure 4), dont la répétition spatiale permet notamment de prendre en compte les variations de pente du terrain. La moitié supérieure de l'essai se situe sur un plateau et la moitié inférieure est en pente jusqu'à rejoindre la route comme le montrent les valeurs d'altitude. La position respective des systèmes au sein de chaque bloc est permutée, de sorte que chaque système est représenté une fois par bloc, pour un total de trois répétitions par système à l'échelle de l'essai. Il y a aussi une répétition supplémentaire pour le système Sol et GES qui n'a pas été utilisée dans le cadre de ce mémoire.

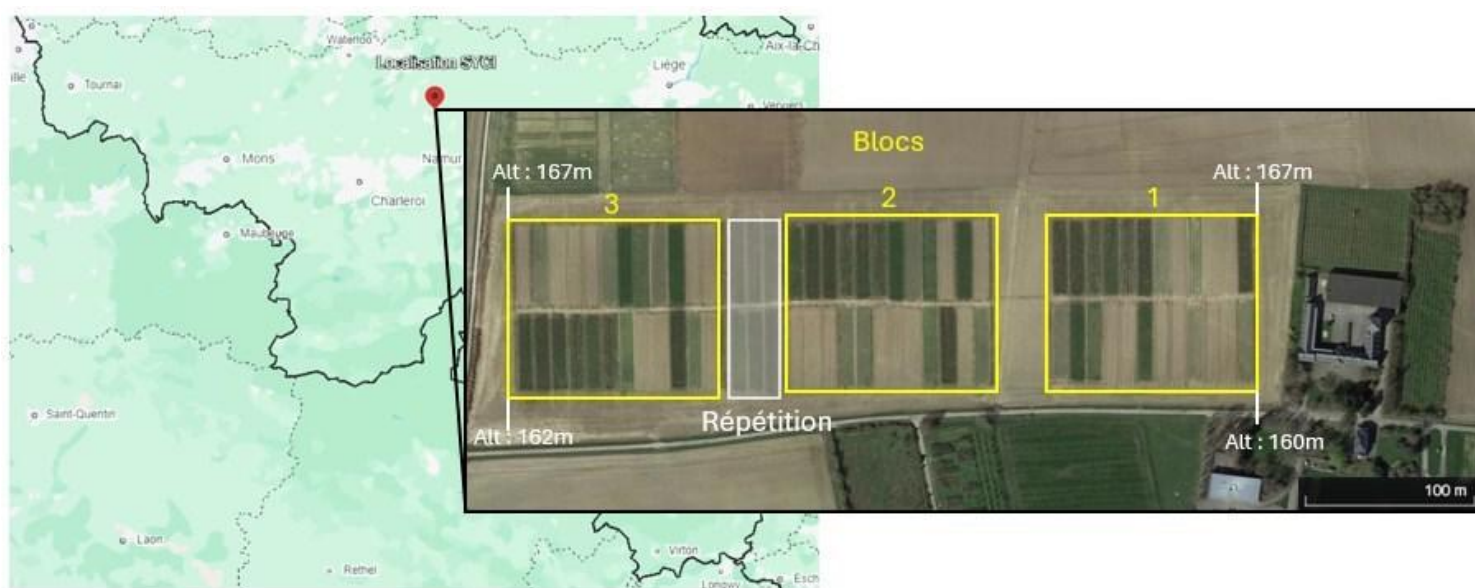


Figure 4 : Localisation de l'essai SYCI en Wallonie et visualisation satellite de la disposition des blocs d'expérimentation.

Les mesures ont été réalisées sur la culture de froment d'hiver, plantée entre la mi-octobre et début novembre, présente simultanément dans les quatre systèmes lors de la campagne de mesure. Ce choix permet une comparaison directe entre systèmes à conditions culturales équivalentes. Il convient néanmoins de noter que la culture précédant le froment diffère selon le système considéré : il s'agit de pommes de terre dans le système CONV, de maïs dans le système GES et de betterave dans le système SOL — des cultures dont le passage est susceptible d'induire des modifications importantes des propriétés physiques du sol, notamment par compaction. Dans le système ZP en revanche, le froment succède à une prairie temporaire de deux ans, ce qui constitue un précédent cultural de nature différente des trois autres avec un impact potentiellement positif sur la structure du sol.

Les mesures se sont étalées entre la mi-mars et la mi-avril, durant la période de croissance active du froment. À l'exception du passage d'une désherbeuse mécanique et de l'épandage de fumier dans les systèmes le nécessitant, aucune intervention culturale qui pourrait fortement impacter les propriétés du sol n'a eu lieu.

4.3.2. Description du plan expérimental

Quatre mesures de Ks par la méthode « Porchet » ont été prises au sein de chaque parcelle de froment, soit un total de douze mesures par système pour l'ensemble du dispositif (Figure 5). Le positionnement des points de mesure, comprenant une mesure « Porchet » et trois mesures de pénétrérométrie, a été défini de manière systématique afin d'éviter les effets de bordure tout en restant en dehors des zones centrales dédiées à la détermination des rendements. Chaque point a été placé à environ dix mètres de la bordure amont ou aval et à environ trois mètres de la bordure latérale de la parcelle.

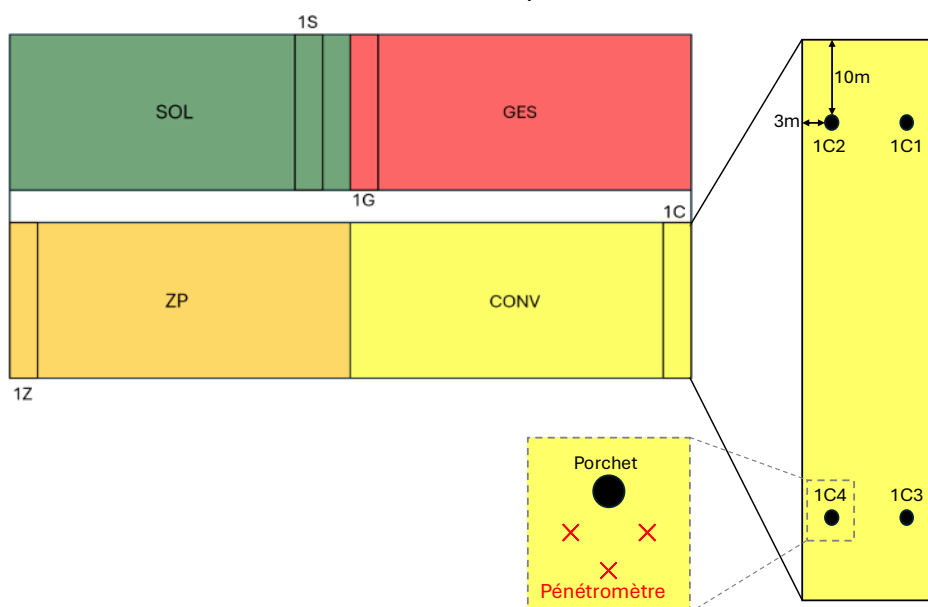


Figure 5 : Représentation de la disposition des mesures au sein d'un bloc. Les 4 systèmes de mesure y sont représentés avec sur la droite un schéma détaillé pour une parcelle puis pour un point de mesure.

4.4. Description détaillée et traitement des mesures

4.4.1. Méthode « Porchet »

La méthode « Porchet » (Figure 6 et 7) consiste à mesurer le débit d'infiltration de l'eau à partir d'un trou cylindrique creusé dans le sol, dans lequel on maintient un niveau d'eau constant. Un trou de la profondeur désirée et de 15cm de diamètre est creusé à l'aide d'une tarière. Les parois du trou sont nettoyées et scarifiées à l'aide d'une fourchette pour limiter le lissage dû au passage de la tarière. Le trou est ensuite rempli d'eau et laissé en saturation pendant au moins une heure afin de garantir une humidité uniforme du sol autour du trou et d'assurer des conditions proches du régime permanent dès le début de la mesure. Un tube en PVC de 5,1 cm de diamètre intérieur est alors inséré dans le trou et rempli d'eau jusqu'à ras bord. Ce tube est percé d'un trou de 7mm de diamètre à une certaine distance de la base du tube. La position de ce trou conditionne la hauteur d'eau dans le trou de tarière. La mesure démarre lorsque des bulles sont observées dans le tube. Le niveau d'eau dans le tube est ensuite noté à intervalles réguliers pendant 30 minutes. Si le tube se vide complètement avant la fin des mesures, le temps de vidange est noté, le tube est rempli à nouveau et les mesures reprennent jusqu'à la fin des 30 minutes. Lorsque la mesure est effectuée à deux profondeurs, le même trou est utilisé : la première mesure est réalisée à la profondeur initiale, puis le trou est prolongé à la tarière pour effectuer la seconde mesure. Les profondeurs mesurées sont de 0-15 cm et 15-30 cm pour la première série de mesures réalisée à la Ferme De Marbaix, et de 0-10 cm et 10-25 cm pour la seconde série réalisée au sein de l'essai SYCI.

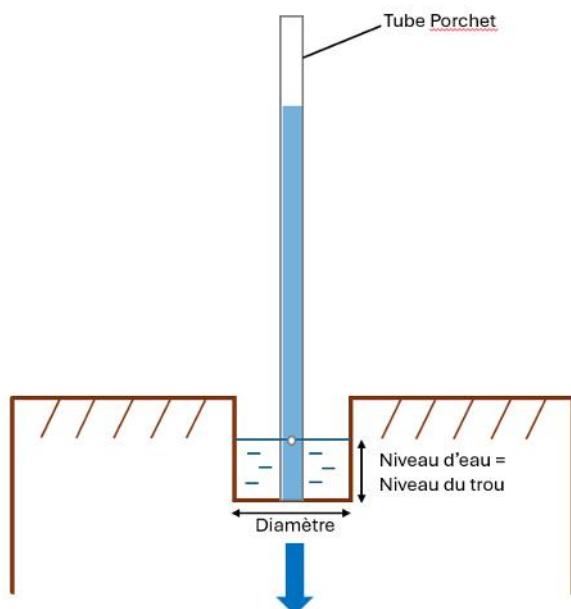


Figure 6 : Schéma descriptif pour la méthode Porchet



Figure 7 : Photo du dispositif expérimental d'une mesure Porchet

Traitement des données

Les hauteurs d'eau relevées dans le tube sont converties en volumes infiltrés cumulés sur base de la section intérieure du tube. Lorsqu'un remplissage intermédiaire a été nécessaire, les volumes avant et après remplissage sont additionnés de manière à reconstituer une série continue de volumes cumulés.

Le débit d'infiltration à régime permanent Q [m^3/s] est estimé à partir de la pente a de la régression linéaire du volume infiltré cumulé en fonction du temps ($V = at + b$). Seuls les points correspondant à une phase d'infiltration stable sont retenus pour cette régression, les premières valeurs transitoires étant écartées si elles s'écartent significativement de la tendance linéaire (Figure 8).

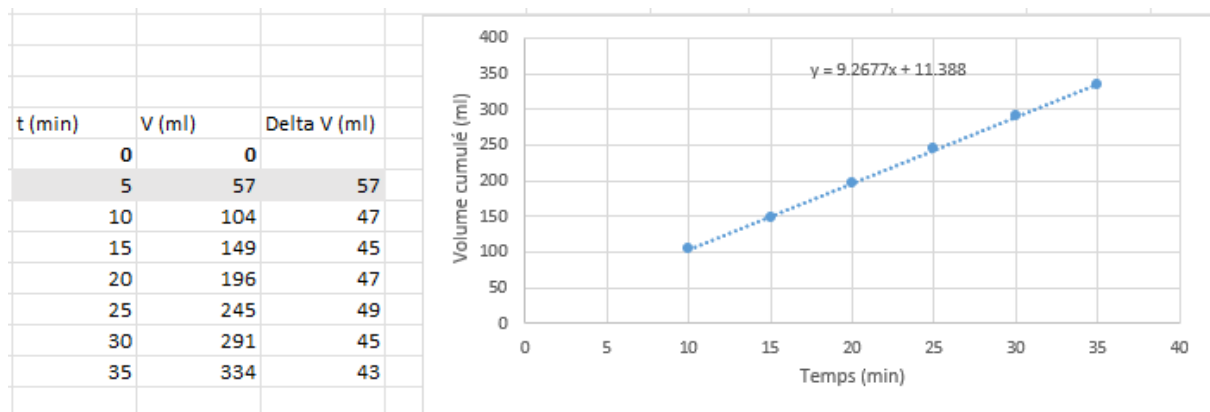


Figure 8 : Exemple de tableau pour le calcul du débit, exemple avec le point de mesure PD1

K_s est ensuite calculée selon la formule suivante :

$$K_s = Q/C \quad \text{Eq 3}$$

Avec C [m^2], la surface de sol mouillé au contact de la cavité. K_s final est converti en mm/h . L'utilisation de cette formule simplifiée, qui correspond au flux d'un débit à travers un cylindre de sol creusé, est basée sur plusieurs hypothèses. Premièrement, la présence d'un régime permanent, vérifiée ici par l'observation d'une relation linéaire entre le débit et le temps. Deuxièmement, la dominance de la composante gravitaire dans l'écoulement, et troisièmement, l'homogénéité de la surface de contact, où l'on suppose un écoulement uniforme sur l'ensemble de la surface du cylindre.

4.4.2. Méthode ISA

La méthode ISA (Figure 9) consiste à maintenir une lame d'eau constante dans un anneau de 15cm de diamètre enfoncé dans le sol et à mesurer le débit d'infiltration qui en résulte. Avant l'enfoncement de l'anneau, la surface du sol est nettoyée (végétaux et débris) pour garantir un contact uniforme entre l'anneau et le sol. Les bords de l'anneau destinés à être enfoncés dans le sol sont biseautés et préalablement graissés afin d'assurer l'étanchéité latérale. L'anneau est ensuite enfoncé verticalement jusqu'à 3 cm de profondeur. Une pré-humectation est réalisée avec un goutteur jusqu'à saturation superficielle, maintenue pendant une heure afin d'établir des conditions proches du régime permanent avant le début de la mesure. Un tube de Mariotte de 9,2 cm de diamètre est ensuite installé pour maintenir une lame d'eau fixe de 7,5 cm dans l'anneau (la lame d'eau était dépendant de l'infiltromètre utilisé, le deuxième produisait une lame d'eau de 9,6cm). Le volume d'eau consommé pour maintenir cette lame d'eau constante est relevé toutes les 5 minutes pendant 30 minutes.

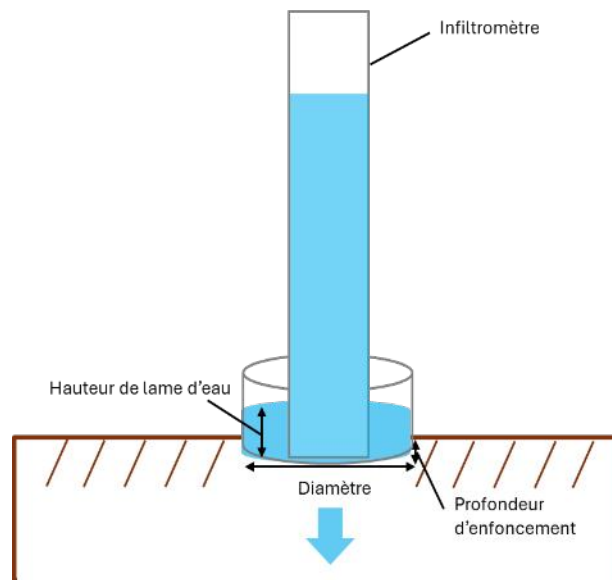


Figure 9 : Schéma des différentes caractéristiques d'une mesure ISA

Traitement des données

Le niveau initial dans le tube de Mariotte est fixé comme référence et les relevés suivants expriment la hauteur d'eau cumulée infiltrée par différence par rapport à ce niveau. Lorsqu'un remplissage intermédiaire du tube a été nécessaire, les volumes sont additionnés de manière à reconstituer une série continue, équivalente à celle d'un tube de longueur infinie. Lorsqu'aucune variation de niveau n'est observée durant toute la durée de la mesure, le débit est considéré comme nul et la valeur de K_s correspondante est fixée à zéro.

Le débit instantané Q [m^3/h] est calculé à chaque intervalle de 5 minutes à partir de la variation de hauteur mesurée dans le tube de Mariotte, convertie en volume via la section intérieure du tube de Mariotte :

$$Q = \pi * r_{infiltr}^2 * \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad \text{Eq 7}$$

Avec $r_{\text{infiltr}} [m]$ le rayon intérieur du tube de Mariotte (0,046 m), $\Delta H [m]$ la variation de hauteur d'eau mesurée dans la bouteille sur l'intervalle $\Delta t [h]$.

La conductivité hydraulique à saturation K_s est ensuite calculée pour chaque intervalle de temps à l'aide de la relation à une seule charge (*one-ponding-depth*) de Reynolds & Elrick (1990), qui étend au cas d'un anneau enfoncé dans le sol la solution en régime permanent de Wooding (1968). Il s'agit de la formulation présentée à la section 2.4.4 (Eq 4), reprise ici avec les notations et les unités propres au dispositif utilisé :

$$K_s = \left(\frac{G \cdot Q}{\left(r \cdot H + G \cdot \pi \cdot r^2 + \frac{r}{\alpha} \right)} \right) \times 1000 \quad \text{Eq 8}$$

Avec :

- $K_s [mm/h]$: conductivité hydraulique à saturation
- $Q [m^3/h]$: débit instantané infiltré en régime permanent, calculé selon l'Eq 7
- $r [m]$: rayon intérieur de l'anneau, soit 0,075 m
- $H [m]$: hauteur de la lame d'eau maintenue au-dessus de la surface du sol (0,075 m avec le premier infiltromètre, 0,096 m avec le second)
- $G [-]$: facteur de forme adimensionnel corrigeant la divergence latérale de l'écoulement sous l'anneau, fonction de la profondeur d'enfoncement d et du rayon r (Reynolds & Elrick, 1990) :

$$G = 0,316 \cdot \left(\frac{d}{r} \right) + 0,184 \quad \text{Eq 9}$$

Avec $d = 0,03$ m, soit $G = 0,310$ pour le dispositif utilisé. Le rapport $d/r = 0,4$ se situe dans le domaine de validité de cette relation.

- $\alpha [m^{-1}]$: paramètre de forme du sol traduisant le rapport entre forces gravitaires et forces capillaires. La valeur de référence $\alpha = 12 \text{ m}^{-1}$ (soit $0,012 \text{ mm}^{-1}$, valeur citée à la section 2.4.4) a été retenue : elle correspond, dans les catégories proposées par Reynolds & Elrick (1990), à la majorité des sols structurés, des argiles aux limons, et donc aux sols limoneux des sites étudiés.
- le facteur 1000 convertit le résultat de m/h en mm/h.

Cette formulation permet d'estimer K_s à partir de l'infiltration en régime permanent en tenant compte à la fois de l'écoulement gravitaire et de la composante capillaire. Elle repose sur plusieurs hypothèses fondamentales. Le sol est supposé homogène, isotrope et initialement à une teneur en eau uniforme. L'écoulement est considéré comme tridimensionnel et axisymétrique autour de l'anneau. Enfin, le régime permanent est supposé atteint, ce qui implique que le débit est constant dans le temps.

Une valeur de K_s est ainsi obtenue pour chaque intervalle de temps. La valeur finale retenue correspond à la moyenne des valeurs calculées sur les intervalles présentant un débit stable,

traduisant l'atteinte du régime permanent. Les premiers intervalles, correspondant à la phase transitoire, sont écartés si les valeurs de Q s'écartent significativement de la tendance stabilisée.

4.4.3. Pénétrométrie

La résistance à la pénétration du sol a été mesurée à l'aide d'un pénétromètre électronique de marque Eijkelkamp (Figure 10). Cet appareil enregistre automatiquement la résistance mécanique exercée par le sol sur le cône d' 1 cm^2 de section à chaque centimètre de profondeur, jusqu'à une profondeur maximale de 80 cm. La vitesse de pénétration doit être constante et la cible imposée par l'appareil est de 2 cm/s. Les données brutes sont exportées et visualisées via le logiciel Eijkelkamp Penetroviewer 6.

Comme précisé dans les sections décrivant les deux séries de mesure, 4 répétitions ont été réalisées par sous-parcelle pour la première série et 3 pour la seconde. L'ensemble des mesures nécessaires pour une série a été réalisé sur une période d'un à deux jours en conditions sèches. La teneur en eau du sol pouvant fortement influencer la résistance à la pénétration, cette organisation permet de considérer cette variable comme constante au sein d'une même série et de rendre les comparaisons relatives entre systèmes pertinentes.



Figure 10 : Photo illustrant le pénétromètre utilisé pour les mesures (SDEC France, 2026)

Traitement des données

Pour chaque centimètre de profondeur, une valeur moyenne de résistance est calculée à partir de l'ensemble des répétitions disponibles au sein d'une même sous-parcelle, accompagnée de l'écart-type correspondant. Les profils ainsi obtenus sont représentés graphiquement en fonction de la profondeur, permettant une lecture visuelle directe de la distribution de la résistance à la pénétration au sein du profil de sol.

Les données retenues pour l'analyse statistique couvrent les 30 premiers centimètres pour la première série de mesure et les 25 premiers centimètres pour la seconde, correspondant aux

horizons de sol les plus directement influencés par les pratiques culturales étudiées. Une moyenne globale de résistance est calculée sur cette plage, ainsi qu'un écart-type associé.

Afin de détecter une éventuelle compaction sous-jacente à la plage d'analyse principale, une pénétrométrie moyenne dite « élargie » est également calculée. Elle consiste à intégrer dans la moyenne les 5 centimètres de profondeur immédiatement suivant la plage retenue, portant ainsi la profondeur analysée à 35 cm pour la première série et 30 cm pour la seconde. Cette approche permet d'évaluer si une différence de conductivité hydraulique observée entre deux systèmes présentant une résistance similaire sur la plage principale pourrait s'expliquer par une compaction localisée juste en dessous de celle-ci.

4.4.4. Densité apparente

La densité apparente du sol pour le site de la ferme de Marbaix a été mesurée à deux profondeurs distinctes, soit 0-15 cm et 15-30 cm, correspondant aux plages analysées lors des mesures de Ks. La méthode retenue devait permettre un échantillonnage rapide et répétable sur l'ensemble des points de mesure. Le choix s'est donc porté sur un prélèvement à la tarière, moins contraignant à mettre en œuvre sur le terrain qu'une méthode volumétrique par cylindre de type Kopecky.

Pour chaque point de mesure et chaque profondeur, deux carottes de sol ont été prélevées à la tarière sur les 15 centimètres correspondants, puis physiquement mélangées afin d'obtenir un échantillon composite représentatif. Les échantillons ont ensuite été séchés en étuve à 105°C pendant au moins 48 heures, conformément au protocole standard, puis pesés à l'état sec. Le volume de sol prélevé a été estimé à partir de la surface de section de la tarière multipliée par la hauteur de prélèvement de 15 cm. La densité apparente est alors obtenue par le rapport entre la masse sèche et ce volume estimé.

Cette méthode présente plusieurs sources d'erreurs potentielles qu'il convient de mentionner. D'une part, l'enfoncement de la tarière dans le sol est susceptible de provoquer une compaction latérale du matériau prélevé, conduisant à une surestimation de la densité apparente. D'autre part, une perte de matériel fin lors du retrait de la carotte est possible, notamment en conditions sèches ou pour des sols peu cohésifs. Enfin, le volume de prélèvement est estimé sur base de la géométrie théorique de la tarière et ne reflète pas nécessairement le volume réel de sol échantillonné. Pour ces raisons, les valeurs obtenues ne sont pas considérées comme des valeurs absolues fiables mais sont utilisées comme des valeurs relatives, permettant des comparaisons entre systèmes et entre profondeurs au sein d'une même série de mesure.

4.4.5. Données supplémentaires fournies par le CRA-W

Des données complémentaires collectées par le CRA-W dans le cadre du suivi de l'essai SYCI sont mobilisées dans ce travail afin de contextualiser et d'enrichir l'interprétation des résultats de conductivité hydraulique.

Une première catégorie regroupe des données collectées sur les mêmes parcelles que les mesures de Ks. Il s'agit des mesures de texture du sol (2024), de teneur en carbone organique (Corg) (2025) et de densité apparente (2026). Ces variables sont susceptibles d'influencer directement la conductivité hydraulique et pourront donc être utilisées pour expliquer d'éventuelles différences observées entre les systèmes culturaux mais aussi au sein du même système.

La texture a été déterminée sur des échantillons composites constitués de six sous-échantillons par parcelle. Selon les parcelles, l'analyse a été réalisée soit par horizon (0-10 et 10-25 cm), soit sur un composite 0-25 cm ; dans le premier cas, la valeur 0-25 cm utilisée ici correspond à la moyenne pondérée des deux horizons.

L'analyse granulométrique a été réalisée selon la méthode de référence belge par pipette de Robinson après destruction de la matière organique à l'eau oxygénée et dispersion au pyrophosphate de sodium, permettant de distinguer les fractions argile, limon fin, limon grossier, sable fin et sable grossier.

La teneur en Corg a été déterminée sur des échantillons composites prélevés avec une méthodologie semblable à celle utilisée pour la texture. Elle a été obtenue par la méthode d'oxydation par voie sèche qui consiste en une combustion à haute température avec détection infrarouge.

La densité apparente a été mesurée par une tarière de diamètre connu pour les différentes profondeurs (0-10cm et 10-25cm), permettant une correspondance directe avec les mesures de Ks réalisées en surface.

Une seconde catégorie regroupe des données prises dans des parcelles différentes ou à l'échelle du système. Ces données ne permettent donc pas d'établir une correspondance directe point à point, mais peuvent néanmoins servir à corroborer des tendances différenciées entre systèmes.

Parmi celles-ci figurent les évaluations VESS (Visual Evaluation of Soil Structure, octobre–novembre 2025), qui constituent un diagnostic visuel de la qualité structurale du sol basé sur l'observation morphologique de blocs de sol extraits, en évaluant notamment la taille, la forme et la porosité des agrégats selon une échelle de 1 (structure friable) à 5 (structure très compacte) (Ball et al., 2007 ; Guimarães et al., 2011). Les évaluations ont été réalisées sur des blocs de sol non perturbés extraits à la bêche dans la couche 0-25 cm, à raison de trois répétitions par système cultural. Chaque bloc est posé sur une surface plane, fragmenté manuellement et noté selon les critères visuels de la méthode VESS2020, version révisée

intégrant notamment une description affinée de la porosité visible et de la résistance à la fragmentation.

Les données de densité de population de vers de terre (2025) ont été obtenues par la méthode combinée d'extraction chimique (solution de moutarde) et de triage manuel sur des monolithes de sol de 25 cm × 25 cm × 30 cm, à raison de neuf répétitions par système. Cette méthode permet de quantifier le nombre d'individus, leur stade de développement (juvéniles, adultes, clitellates) ainsi que les groupes écologiques (épigés, endogés, anéciques), offrant ainsi une image de la diversité fonctionnelle des communautés lombriciennes.

Les résultats du QuantiSlake Test (QST, 2025), et particulièrement l'indicateur Wend, développé par Vanwindekens & Hardy (2023), fournissent une mesure quantitative de la stabilité structurale des agrégats par pesée dynamique d'échantillons de sol non perturbés immergés dans de l'eau déminéralisée. Le protocole consiste à prélever des cylindres de sol non remanié de volume standardisé (hauteur 3 cm, diamètre 5,4 cm, soit environ 69 cm³) à l'aide de cylindres de Kopecky, à la profondeur 0-5 cm. Chaque cylindre est pesé avant immersion, puis placé sur une balance de précision connectée à un enregistreur de données, et immergé dans un bac d'eau déminéralisée. La masse de l'échantillon est enregistrée en continu pendant 24 heures. L'indicateur Wend correspond à la masse relative de l'échantillon en fin d'expérience (exprimée en pourcentage de la masse initiale) et constitue un indicateur synthétique de la résistance des agrégats à la désagrégation par voie hydrique : une valeur élevée de Wend traduit une bonne cohésion structurale, tandis qu'une valeur faible indique une forte susceptibilité à l'effondrement des agrégats lors du contact avec l'eau. Le test a été réalisé sur trois répétitions par système, les prélèvements ayant été effectués dans des parcelles distinctes de celles utilisées pour les mesures de Ks.

4.5. Visualisation graphique et analyses statistiques

L'ensemble des analyses statistiques a été réalisé à l'aide du logiciel JMP, qui a également servi à produire les représentations graphiques des résultats. Le seuil de signification a été fixé à 5 % pour l'ensemble des tests.

Compte tenu de la distribution approximativement log-normale de Ks, déjà évoquée dans l'état de l'art, les valeurs de Ks ont systématiquement été transformées en logarithme décimal (Log_{10} Ks) avant analyse, afin de stabiliser la variance et de satisfaire l'hypothèse de normalité des résidus requise par les modèles paramétriques. Dans la première expérience, une observation de la parcelle cultivée (CG4, 0-15 cm ; Ks = 417,2 mm/h) a par ailleurs été écartée des analyses en raison de son caractère extrême au regard du reste de la distribution (Annexe 2), ce qui a amélioré la robustesse des ajustements et la lisibilité des graphiques.

La comparaison des méthodes (expérience n°1) a d'abord été conduite à l'échelle de l'ensemble du dispositif au moyen d'un modèle linéaire à effets mixtes ajusté sur le Log_{10} Ks, intégrant la méthode de mesure, la profondeur et l'occupation du sol ainsi que leurs

interactions comme effets fixes, et deux effets aléatoires rendant compte de la structure emboîtée et appariée des observations (« identifiant » qui fait référence à la sous-parcelle de mesure et « trou » qui lie les mesures réalisées aux 2 profondeurs dans le même trou). Les composantes de la variance ont été estimées par la méthode du maximum de vraisemblance restreint (REML) et la significativité des effets fixes évaluée par des tests F dont les degrés de liberté ont été approchés par la méthode de Satterthwaite.

La seconde expérience a suivi la même logique. Le Log_{10} Ks a été modélisé sur l'ensemble des données au moyen d'un modèle mixte comprenant la profondeur, le système de culture et leur interaction en effets fixes, ainsi que le bloc et le trou de mesure en effets aléatoires. L'interaction entre la profondeur et le système s'étant révélée significative, l'effet du système a ensuite été analysé séparément dans chaque horizon.

Les comparaisons deux à deux des moyennes ajustées ont reposé sur le test de Tukey-Kramer (HSD), qui contrôle le taux d'erreur global lié à la multiplicité des comparaisons.

Les relations entre le Log_{10} Ks et les propriétés physiques du sol (densité apparente, pénétrométrie, rapport carbone sur argile) ont été quantifiées par des coefficients de corrélation de rang de Spearman. Cette approche non paramétrique, fondée sur les rangs, a été préférée au coefficient de Pearson car elle ne suppose ni normalité bivariée ni linéarité de la relation et se montre robuste aux valeurs extrêmes. Les corrélations ont été calculées séparément par profondeur, puis à l'échelle globale, afin de distinguer les liaisons établies à profondeur constante d'une corrélation apparente induite par le seul gradient vertical.

Le respect des conditions d'application des modèles a été vérifié graphiquement : la normalité des résidus a été appréciée au moyen d'un diagramme quantile-quantile, et leur homoscedasticité par l'examen du nuage des résidus en fonction des valeurs prédites. Après transformation logarithmique, ces hypothèses se sont révélées acceptables pour l'ensemble des modèles portant sur Ks, tandis que l'indépendance des observations est assurée par la prise en compte explicite de la structure hiérarchique des données au travers des effets aléatoires. Le recours aux corrélations de Spearman, non paramétriques, permet enfin de s'affranchir de ces hypothèses pour l'analyse des relations entre variables.

Deux conventions de lecture s'appliquent enfin aux figures. Sur les boîtes à moustaches, la barre centrale représente la médiane, les limites de la boîte les premier et troisième quartiles (intervalle interquartile), et les moustaches s'étendent jusqu'aux valeurs les plus extrêmes situées à moins de 1,5 fois l'intervalle interquartile, les points au-delà étant figurés individuellement. Les lettres accompagnant les modalités traduisent les groupes du test de Tukey : deux modalités partageant au moins une lettre commune ne diffèrent pas significativement au seuil de 5 %, tandis que deux modalités sans lettre commune sont statistiquement distinctes. On notera que ces comparaisons portent sur les moyennes (moyennes des moindres carrés dans le cas des modèles mixtes), alors que les boîtes représentent les médianes et la dispersion des données, ce qui peut occasionner de légers décalages visuels entre la hiérarchie des lettres et celle des boîtes.

5. Résultats

5.1. Expérience n°1 : Comparaison des méthodes de mesure de Ks

5.1.1. Modèle mixte global sur l'ensemble des données

Un modèle linéaire à effets mixtes a d'abord été ajusté sur l'ensemble des données de la première campagne (Tableau 3).

Tableau 3 : Résumé des résultats du modèle mixte linéaire de la conductivité hydraulique à saturation ($\log_{10} K_s$)

Modèle linéaire mixte – Log10(Ks) – Effets fixes + 2 effets aléatoires (Identifiant, Trou) – n=40/groupe, 80 total				
Statistiques du modèle	R ² marginal	R ² conditionnel		
	0.342	0.506	-	-
Composantes de la variance (REML)				
Source	Variance	% du total	Écart-type	
identifiant	0.103	14.2%	0.321	
Trou	0.011	1.5%	0.105	
Résidu	0.611	84.3%	0.782	
Total	0.725	100.0%	0.851	
Tests des effets fixes (F de Satterthwaite)				
Source	F	p	Sign.	
Profondeur	2.31	0.137	NS	
Méthode	2.86	0.108	NS	
Profondeur × Méthode	4.32	0.045	*	
Parcelle	1.08	0.313	NS	
Profondeur × Parcelle	32.40	0.001	***	
Méthode × Parcelle	1.16	0.296	NS	
*** p<0,001 / ** p<0,01 / * p<0,05 / NS : non significatif.				

Ce modèle rend compte d'un peu plus de la moitié de la variabilité totale, avec un coefficient de détermination conditionnel de 0,51, tandis que la seule part fixe en explique environ un tiers, ce qui traduit une contribution non négligeable de la structure aléatoire du dispositif. La décomposition des composantes de variance montre d'ailleurs que la variabilité résiduelle domine largement, puisqu'elle représente à elle seule près de 84 % de la variance totale, contre environ 14 % pour l'effet aléatoire lié à la sous-parcelle ('Identifiant' dans le tableau) et une part marginale pour l'effet lié au 'Trou' de mesure. Cette prépondérance de la variance résiduelle illustre le caractère intrinsèquement variable du Ks mesuré.

L'examen des tests des effets fixes fait ressortir un résultat net (Tableau 3) : aucun des trois facteurs pris isolément n'exerce d'effet significatif sur la conductivité, ni la méthode, ni la profondeur, ni l'occupation du sol. Ce ne sont donc pas les facteurs considérés séparément qui gouvernent le comportement du Ks, mais bien la manière dont ils se combinent. Deux interactions ressortent en effet. L'interaction entre la profondeur et l'occupation du sol est

très hautement significative et constitue de loin l'effet le plus marqué du modèle, ce qui signifie que l'évolution du Ks avec la profondeur diffère entre la parcelle de prairie et la culture.

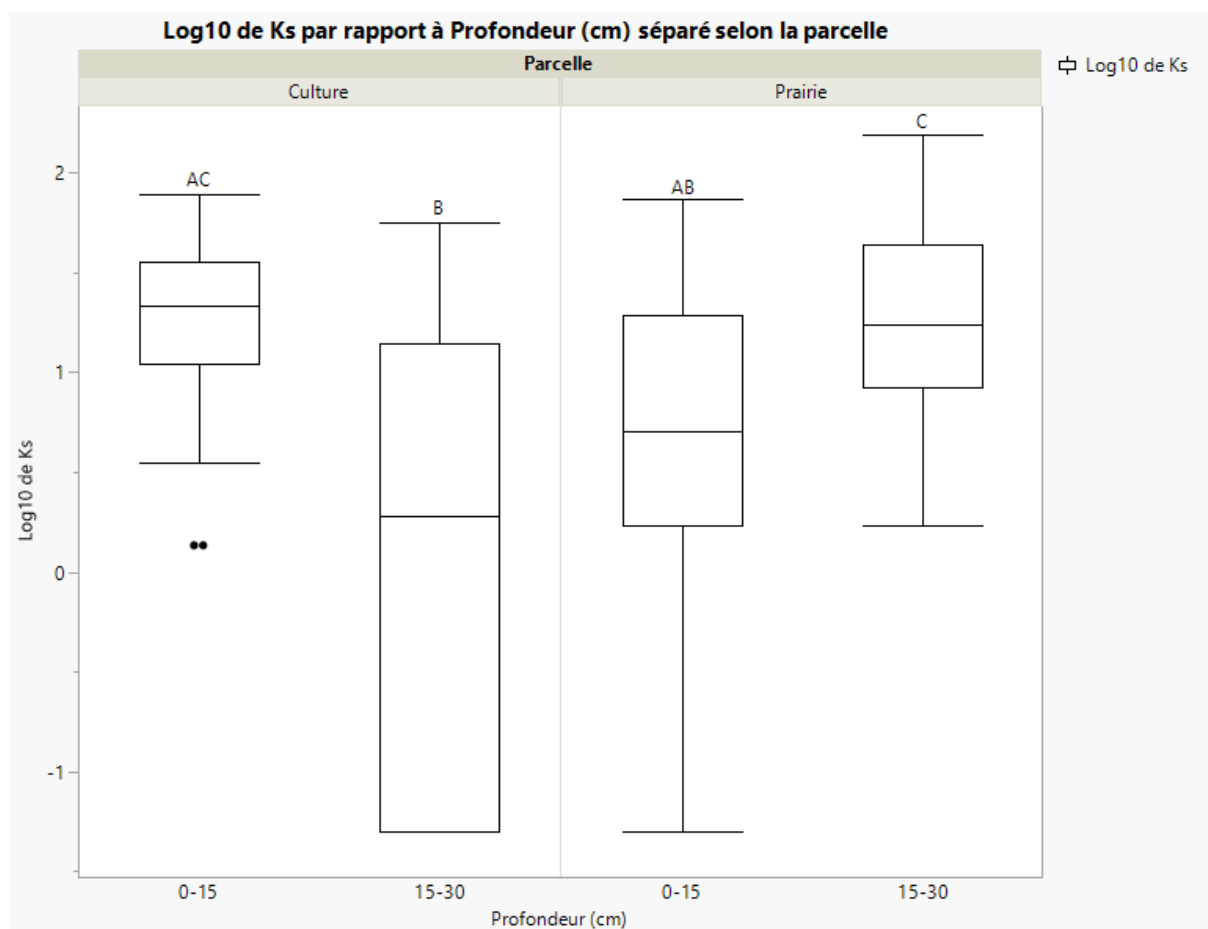


Figure 11 : Comparaison des valeurs de $\text{Log}_{10} K_s$ pour l'interaction parcelle x profondeur. Les lettres de Tukey représentent les valeurs moyennes qui diffèrent significativement entre les 4 résultats

La figure 11 révèle des comportements inversés selon l'occupation du sol. En prairie, les valeurs sont modérées et étalées en surface, puis se resserrent et augmentent en profondeur. En culture, le schéma s'inverse, les valeurs étant élevées et homogènes en surface puis plus faibles et fortement étalées en profondeur, l'horizon profond de la culture se distinguant statistiquement de celui de la prairie d'après les lettres de comparaison.

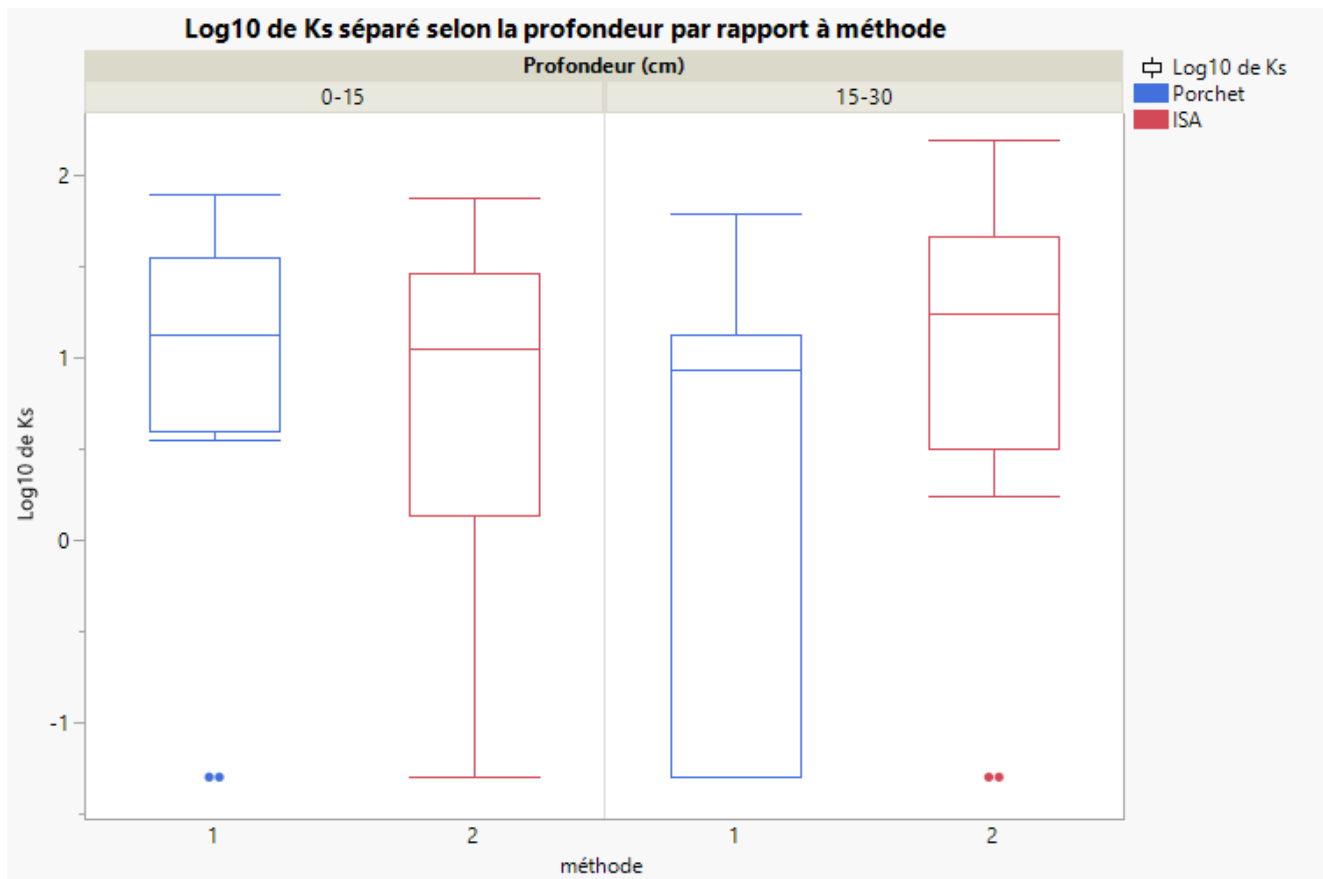


Figure 12 : Interaction méthode $\times$ profondeur sur le Log_{10} Ks, les lettres de Tukey ne sont pas présentes car il n'y a pas de différences significatives entre les modalités présentées

L'interaction entre la méthode et la profondeur est également significative, quoique plus modérément, avec une probabilité de 0,045. La figure 12 en illustre la nature. Il importe de souligner qu'une interaction significative ne traduit pas nécessairement l'existence d'une modalité se détachant des autres, mais bien le fait que l'écart entre les deux méthodes n'est pas constant d'un horizon à l'autre. C'est ce que l'on observe ici. Dans l'horizon de surface, la méthode Porchet fournit une distribution resserrée, alors que l'ISA produit une distribution beaucoup plus étalée, pour une médiane pourtant comparable. Dans l'horizon profond, le rapport s'inverse en partie : la méthode Porchet devient la plus dispersée vers les valeurs basses et sa médiane, proche de 0,9, se situe en dessous de celle de l'infiltromètre, voisine de 1,25. C'est cette modification du positionnement relatif et de la dispersion des deux méthodes entre les deux horizons qui fonde la significativité de l'interaction. Les comparaisons par paires selon Tukey-Kramer, non représentées sur la figure, ne parviennent toutefois pas à isoler de couple significativement distinct. En revanche, l'interaction entre la méthode et l'occupation du sol n'est pas significative, ce qui suggère que les deux techniques se comportent de façon comparable d'une parcelle à l'autre lorsque l'on raisonne toutes profondeurs confondues.

5.1.2. Évolution du Ks selon la profondeur au sein de chaque occupation du sol

Afin de préciser l'origine de cette interaction, un modèle de même structure a été ajusté séparément sur la prairie et sur la culture, en conservant les deux effets aléatoires par souci

de cohérence. Il convient toutefois de préciser que la réduction des effectifs induite par cette partition fragilise l'estimation des composantes aléatoires, comme en témoigne l'estimation nulle de l'une d'elles dans le modèle relatif à la prairie, ce qui invite à interpréter les valeurs de variance avec prudence tout en n'altérant pas la lecture des effets fixes.

En prairie, le modèle n'explique pratiquement aucune part de la variance, le coefficient de détermination retourné par le logiciel étant très légèrement négatif, à moins 0,003. Cette valeur doit être interprétée comme l'indication que la part de variance attribuable aux effets fixes est nulle, ou du moins indiscernable de zéro. Seule la profondeur y exerce un effet significatif ($p=0,0122$), K_s étant plus faible dans l'horizon 0-15 cm que dans l'horizon 15-30 cm. Ni la méthode ($p=0,545$), ni son interaction avec la profondeur ($p=0,802$), ne se distinguent significativement.

En culture, le modèle se comporte de manière radicalement différente puisqu'il explique 71 % de la variance. L'effet de la profondeur y est très hautement significatif ($p<0,0001$), mais son sens est inversé par rapport à la prairie, traduisant une K_s nettement plus élevée en surface qu'en profondeur. L'interaction entre la profondeur et la méthode devient par ailleurs significative ($p=0,005$), alors que l'effet principal de la méthode reste non significatif ($p=0,18$). L'ensemble des statistiques sont rassemblées sous forme de tableau dans l'annexe 3.

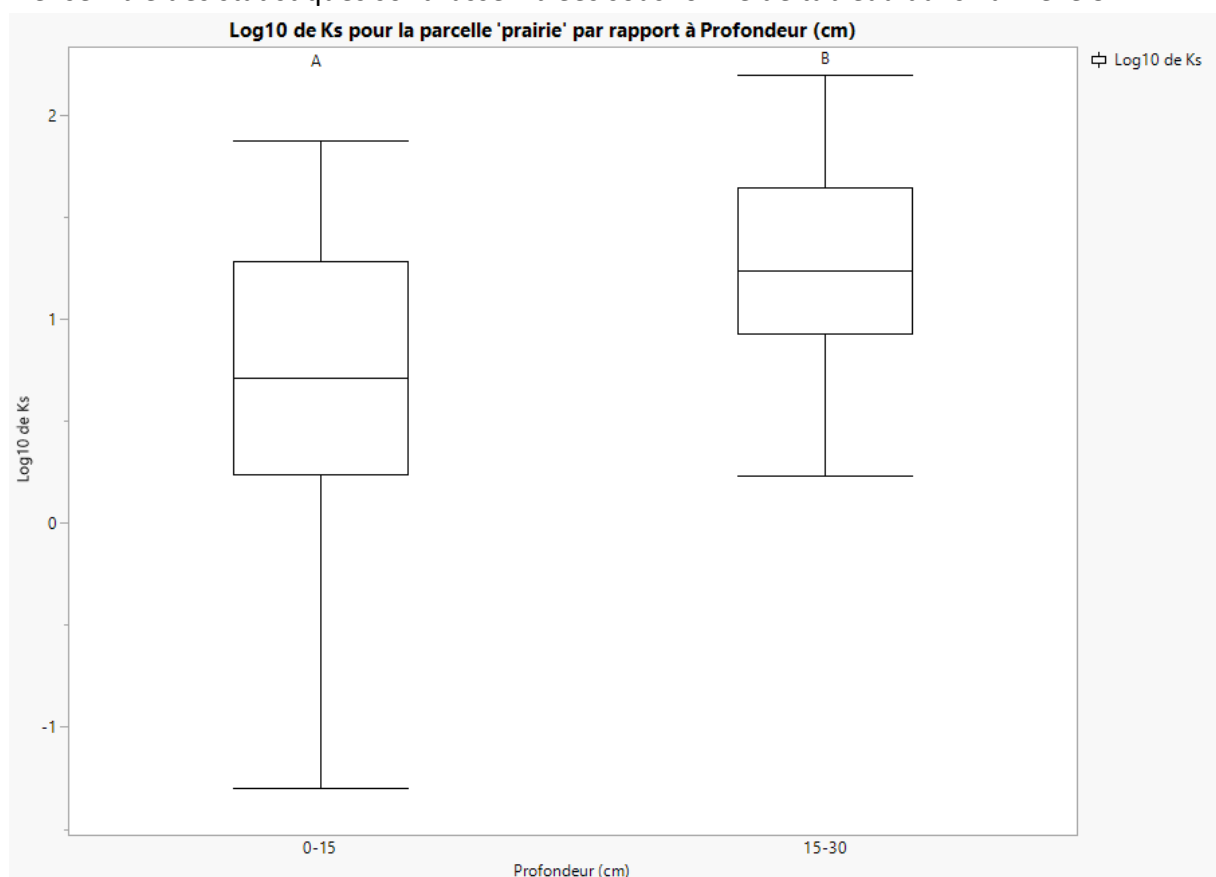


Figure 13 : $\text{Log}_{10} K_s$ pour la prairie en fonction de la profondeur, illustrant la seule variable significative

La figure 13 illustre cet effet de la profondeur en prairie. La médiane du logarithme du Ks passe d'environ 0,7 dans l'horizon de surface à environ 1,25 dans l'horizon profond, et la dispersion se réduit nettement. Les lettres de comparaison confirment que les deux horizons se distinguent significativement. L'interaction entre la profondeur et la méthode n'étant pas significative dans ce modèle, ce comportement se retrouve de manière identique pour les deux techniques de mesure, ce qui justifie de ne présenter ici que la distribution toutes méthodes confondues.

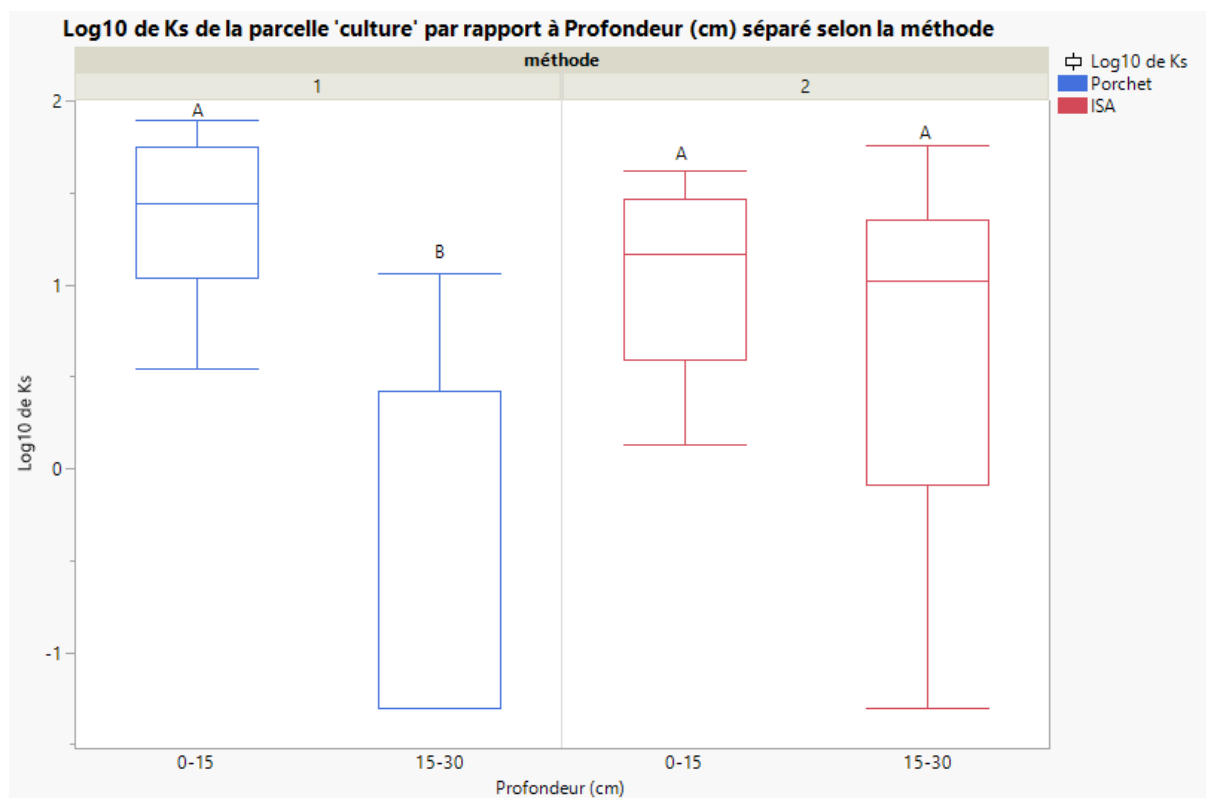


Figure 14 : Log₁₀ Ks pour les mesures réalisées sur la parcelle 'culture' par rapport à la profondeur (cm) séparé selon la méthode.

Sur la parcelle « culture », la déclinaison par méthode fait apparaître une évolution de sens opposé à celle de la prairie et surtout d'ampleur très inégale selon la technique employée (Figure 14). Avec la méthode Porchet, la médiane du logarithme du Ks chute d'environ 1,4 dans l'horizon de surface à environ 0,4 dans l'horizon profond, et la dispersion s'accroît considérablement. Avec l'ISA, la médiane ne diminue que faiblement mais l'étendue interquartile s'élargissant toutefois vers les valeurs basses. Les lettres de comparaison traduisent cette dissymétrie : seule la modalité associant l'horizon profond à la méthode Porchet se distingue significativement des trois autres, lesquelles forment un ensemble homogène.

Le contraste le plus marquant réside donc dans le comportement de l'horizon profond, où la méthode Porchet s'écarte de l'ISA, alors que les deux techniques fournissent des valeurs médianes proches dans l'horizon de surface.

5.1.3. Relations du Ks avec la densité apparente et la pénétrométrie

Les relations entre la conductivité et les propriétés physiques mesurées, à savoir la densité apparente et la résistance à la pénétration, ont été explorées graphiquement à l'échelle globale, en distinguant les deux méthodes de mesure. Avant cela, les figures suivantes (Figure 15 et 16) permettent d'avoir une idée de la médiane et de la distribution de ces propriétés physiques.

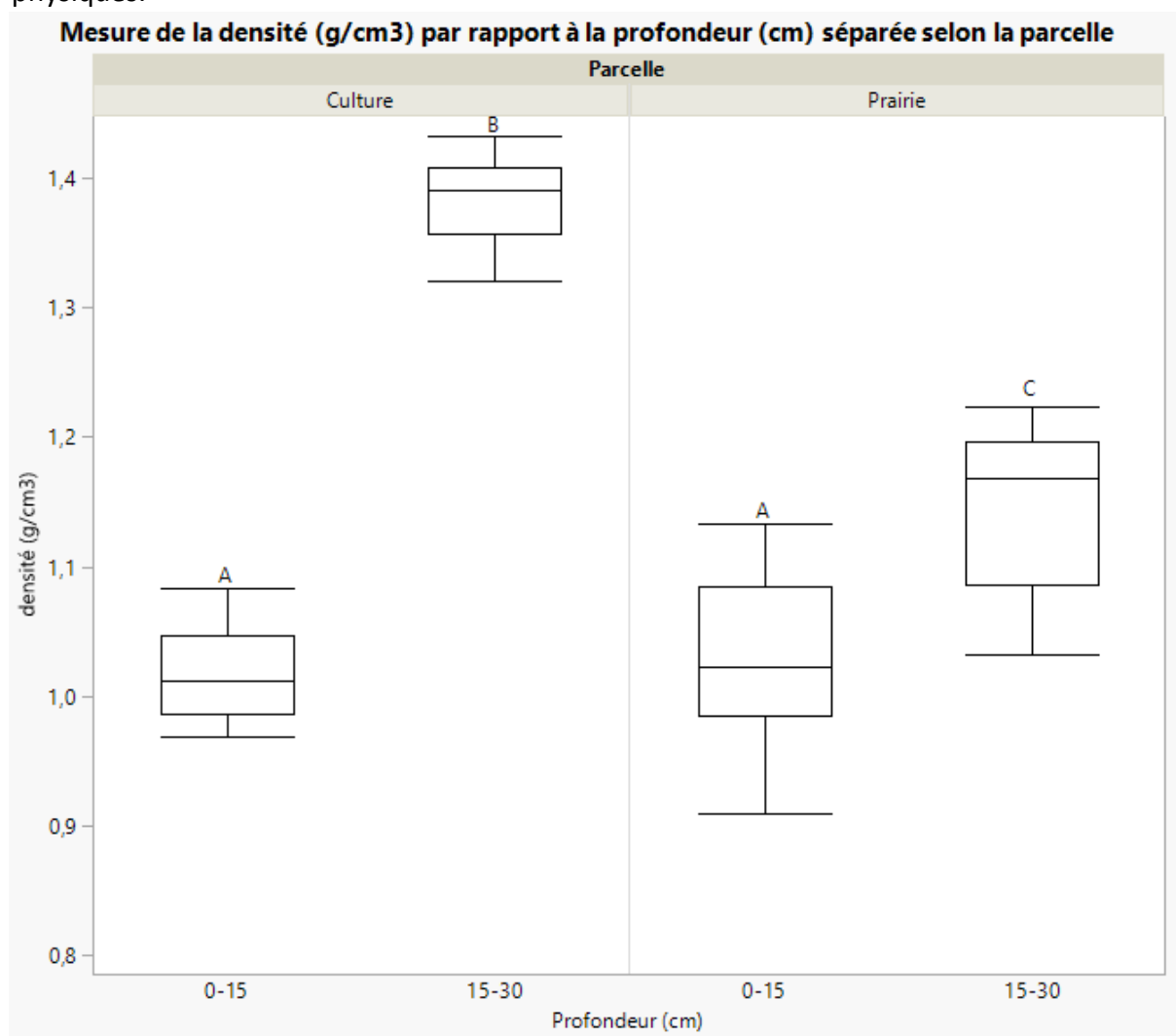


Figure 15 : Valeurs mesurées de densité apparente selon la parcelle et la profondeur

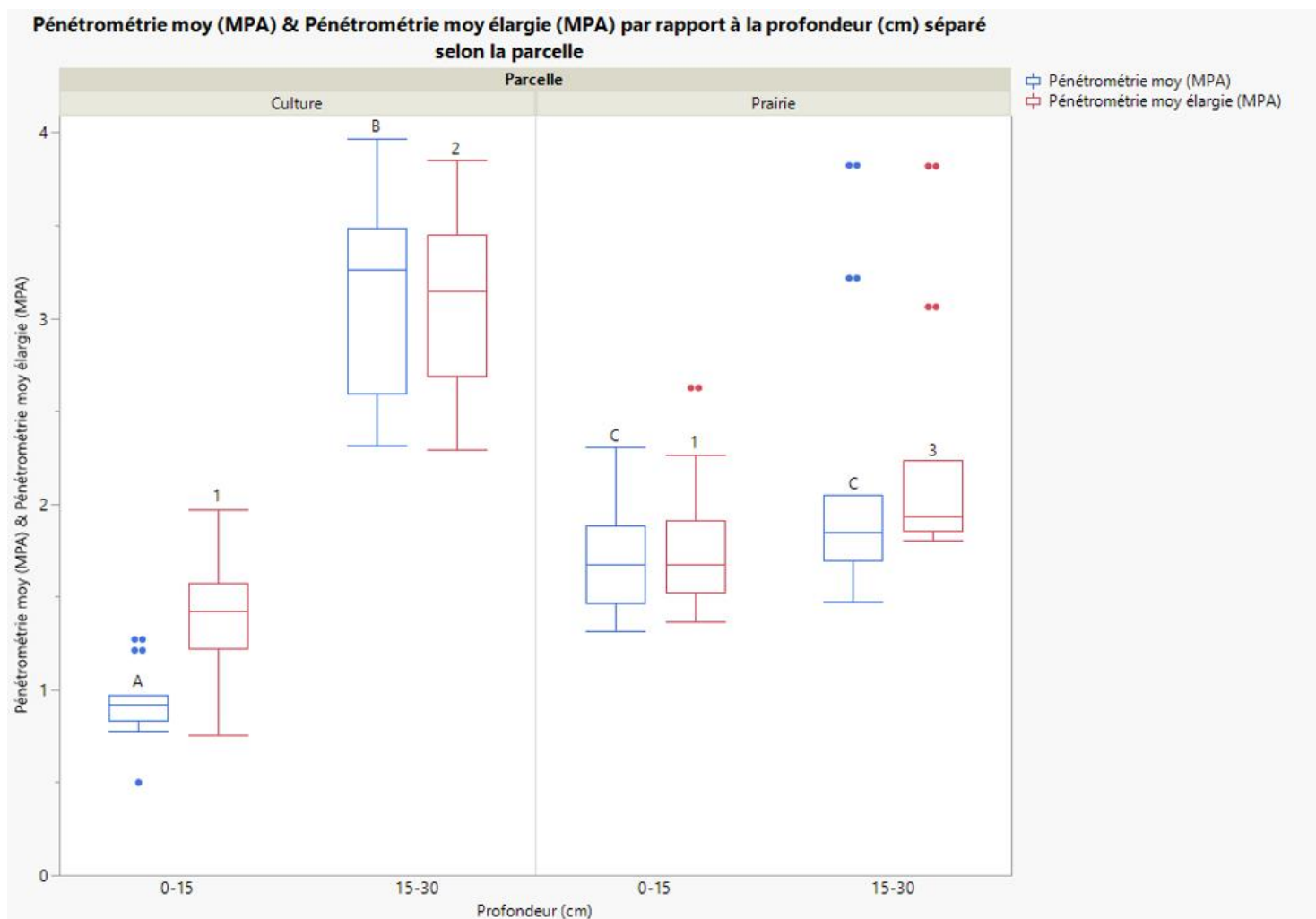


Figure 16 : Valeurs de pénétrométrie moyenne et élargie par profondeur selon la parcelle et la méthode de calcul (élargie ou non). Les lettres de Tukey ont été remplacées par des chiffres pour la pénétrométrie élargie pour faciliter la lecture.

Parmi les deux indicateurs de résistance à la pénétration calculés, la pénétrométrie moyenne et la pénétrométrie moyenne élargie, seule la première a été retenue pour la mise en relation avec K_s . Les deux indicateurs se comportent en effet de manière très similaire dans les modèles ajustés, avec des coefficients de même signe et de magnitude comparable, les mêmes effets ressortant significatifs dans les deux cas et une hiérarchie identique des composantes de variance, de sorte que la valeur moyenne élargie n'apporte pas d'information distincte justifiant son maintien dans l'analyse (Annexe 4).

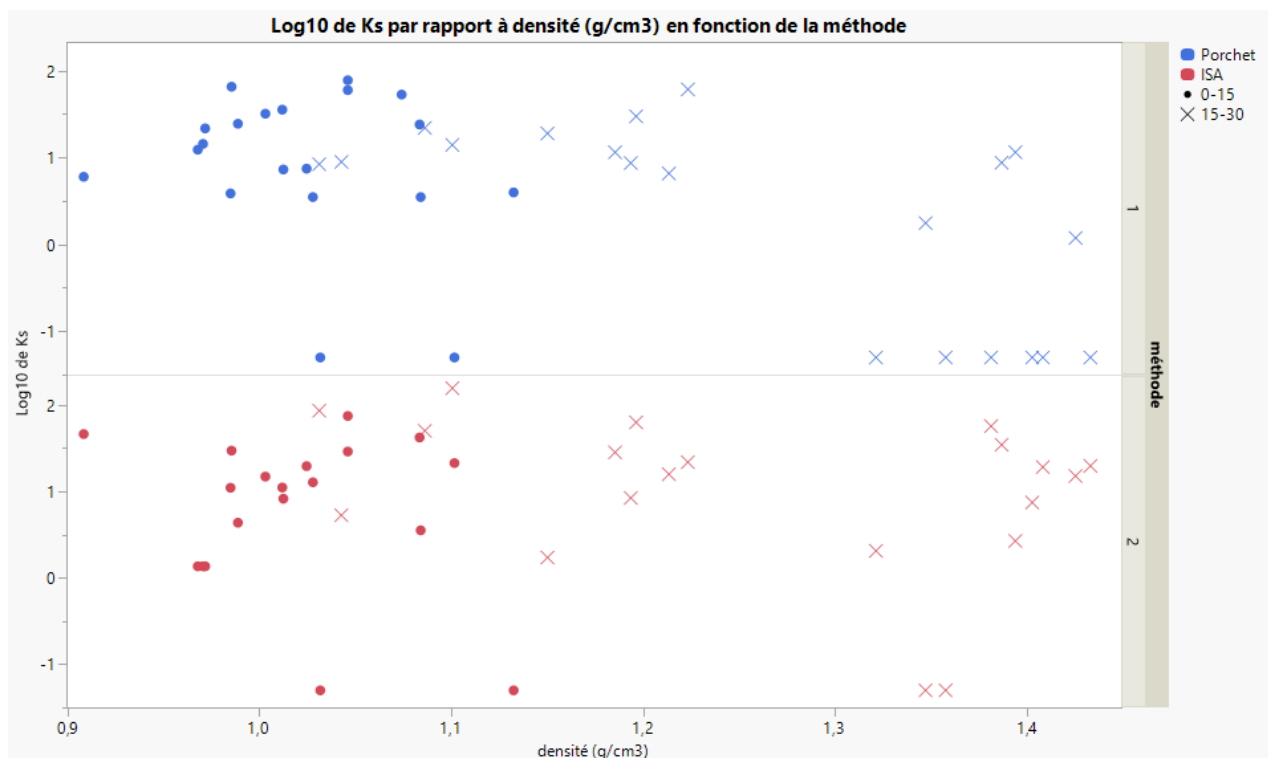


Figure 17 : $\text{Log}_{10} K_s$ en fonction de la densité apparente séparé selon la méthode

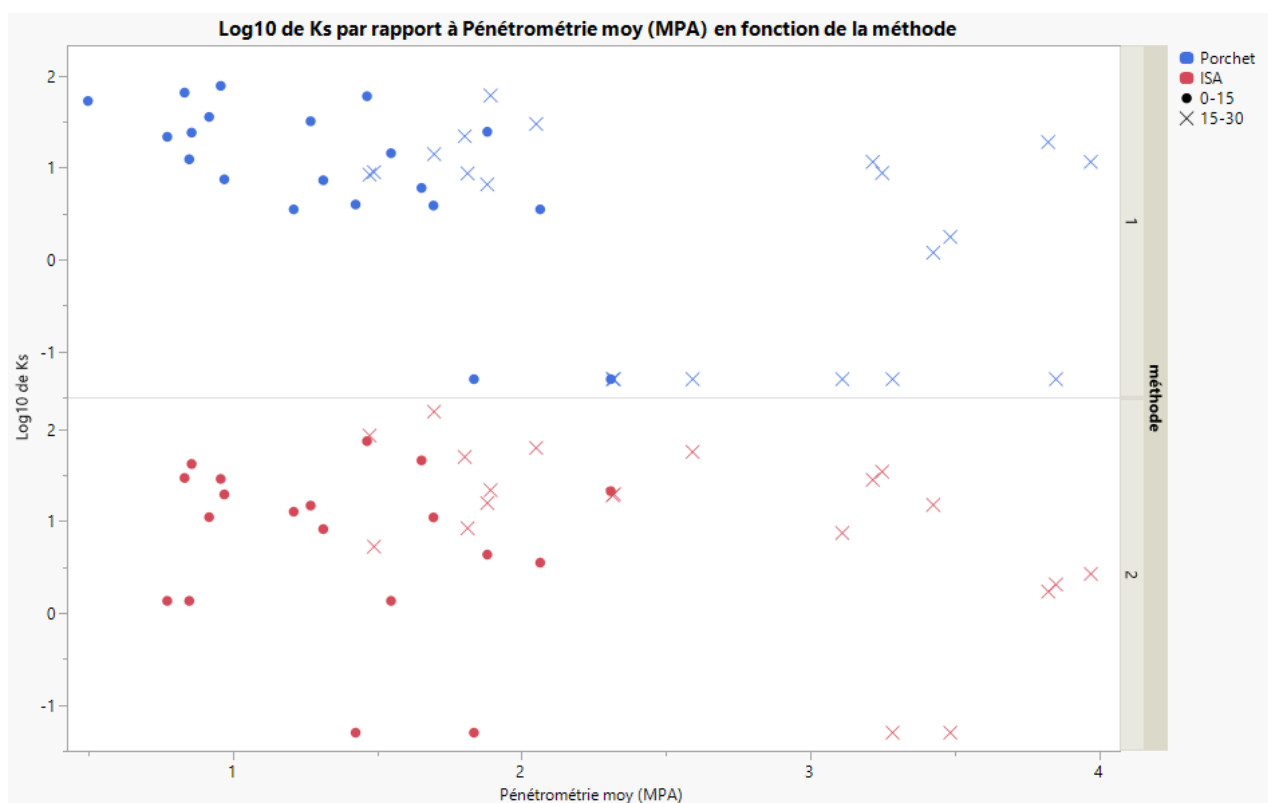


Figure 18 : $\text{Log}_{10} K_s$ en fonction de la pénétrétrie moyenne séparé selon la méthode

Les deux nuages de points ne font apparaître, à l'échelle globale, qu'une tendance décroissante ténue et bruitée, le logarithme de K_s ayant tendance à diminuer lorsque la densité et la résistance à la pénétration augmentent, sans qu'une relation nette ne se dégage (Figures 17 et 18). Cette faiblesse apparente doit toutefois être nuancée par la lecture du tableau récapitulatif des coefficients de Spearman (Tableau 4), qui révèle une structure

contrastée selon la méthode et la profondeur considérées. Pour la méthode Porchet, la corrélation globale entre le log (Ks) et la densité apparente atteint -0,44 et celle avec la pénétrométrie -0,54, toutes deux significatives, tandis que pour l'ISA ces mêmes relations globales sont respectivement de 0,05 et -0,20 et ne se distinguent pas du hasard.

Tableau 4 : Récapitulatif des coefficients de Spearman pour la corrélation Log_{10} Ks, densité, pénétrométrie

Relation testée	Porchet global	ISA global	Porchet 0-15	Porchet 15-30	ISA 0-15	ISA 15-30
Log10 Ks vs densité	-0.44 **	0.05 ns	-0.15 ns	-0.61 **	0.16 ns	-0.26 ns
Log10 Ks vs Pénétrométrie	-0.54 ***	-0.20 ns	-0.61 **	-0.28 ns	-0.26 ns	-0.62 **

*** pour p inférieur à 0,001, ** pour p inférieur à 0,01, * pour p inférieur à 0,05, et ns pour non significatif.

La déclinaison par horizon montre que ces relations ne s'expriment pas aux mêmes profondeurs selon la technique employée. Avec la méthode Porchet, la corrélation entre le logarithme de Ks et la densité n'est significative que dans l'horizon profond, où elle atteint -0,61, alors que la relation avec la pénétrométrie s'exprime au contraire dans l'horizon de surface, avec un coefficient de -0,61 également. Avec l'ISA, aucune relation avec la densité ne ressort à l'une ou l'autre profondeur, mais la corrélation entre le logarithme de Ks et la pénétrométrie devient significative dans l'horizon 15-30 cm, avec une valeur de -0,62.

La relation entre densité apparente et pénétrométrie a aussi été calculé et c'est la liaison la plus robuste, avec un coefficient de 0,77 hautement significatif à l'échelle globale, et une valeur de 0,57 significative dans l'horizon profond, alors qu'elle disparaît en surface où elle tombe à 0,16 et n'est pas significative.

5.1.4. Aspects opérationnels des deux méthodes

Au-delà de la comparaison statistique, qui n'a pas mis en évidence de différence significative de niveau entre les deux techniques au niveau global, il importe de confronter les méthodes sur leurs aspects opérationnels. Le tableau ci-dessous détaille une série de critères de comparaison et la description des caractéristiques de chaque méthode pour ces critères. La police verte permet de repérer quelle méthode est la plus pertinente selon le critère étudié.

Tableau 5 : Comparaison entre les deux méthodes de mesure de l'expérience 1

Critère	Méthode Porchet	ISA
Temps de mise en œuvre par mesure	Semblable: 1h15	
Volume d'eau nécessaire pour la mesure (hors saturation)	Entre 3 l à 10 l	10 l à 20 l
Matériel requis et coûts	Simple Bouteille de Mariotte	Bouteille de Mariotte plus complexe, cylindre et gouteur
Difficulté opératoire et technicité	Légèrement plus simple	
Sensibilité à l'état de la surface (culture, croûte de battance, ...)	Destruction de la couche superficielle = pas d'influence	Sensible aux conditions de la surface
Répétabilité observée dans la campagne	Plus de facilité pour réaliser plusieurs mesures en même temps	
Aptitude à la mesure en profondeur	La mesure à différentes profondeurs est sans changement	L'enterrement de l'anneau nécessite une tarière en plus et sera difficile pour des profondeurs > 15cm, de plus il y a des risques de capillarité le long des parois du cylindre
Biais opérationnels potentiels	Lissage des parois du trou	Ecoulement préférentiel entre le cylindre et le sol

5.2. Discussion des résultats de la 1^{ère} expérience

5.2.1. Origine de l'interaction méthode × profondeur

Le modèle global ne fait ressortir aucun effet principal significatif : c'est la manière dont profondeur, méthode et occupation du sol se combinent qui structure la variabilité de K_s . L'interaction « profondeur × occupation du sol », de loin la plus marquée, oppose une prairie dont K_s augmente avec la profondeur à une culture qui suit le schéma inverse. C'est un contraste cohérent avec le fonctionnement attendu de ces deux systèmes (section 2.3.1 et 2.3.5 et figure 15 et 16) : en prairie, l'absence de travail du sol depuis sept ans a pu permettre l'installation d'un réseau de macropores biologiques (galeries de vers de terre, racines) continu sur le profil, tandis qu'en culture, la macroporosité mécanique du labour, concentrée en surface et instable, s'oppose à un horizon plus profond affecté par une semelle de labour. C'est précisément dans ce contexte que l'interaction méthode × profondeur, plus discrète mais significative, prend son sens : elle ne se manifeste que là où existe une rupture structurale marquée entre horizons, c'est-à-dire dans la parcelle cultivée. Quand le profil est structuralement plutôt homogène (prairie), Porchet et ISA convergent ; quand il ne l'est pas (culture), les deux méthodes divergent. Cette lecture suggère que le désaccord entre méthodes n'est pas un simple bruit de mesure, mais un signal informatif sur l'hétérogénéité verticale du sol.

5.2.2. Comparaison Porchet vs ISA

Dans l'horizon de surface, les deux méthodes fournissent des médianes comparables. C'est en profondeur, dans la parcelle cultivée, que Porchet se détache nettement vers des valeurs plus faibles et plus dispersées.

Ce comportement peut s'expliquer par les biais respectifs des deux méthodes, documentées en 2.4.3 et 2.4.4. Pour Porchet, l'obtention d'une mesure en profondeur impose de poursuivre le forage à la tarière jusqu'à l'horizon 15-30 cm, précisément l'horizon où la densité apparente atteint 1,35-1,4 g/cm³ en culture (Figure 15), proche du seuil critique de dégradation physique évoqué par Reichert et al. (2009) pour les sols limoneux (~1,55 g/cm³). Le lissage des parois du trou, déjà identifié comme un biais systématique de sous-estimation de K_s (facteur 2 à 5, Angulo-Jaramillo et al., 2016), est vraisemblablement amplifié dans un horizon déjà compacté, ce qui explique à la fois la baisse de médiane et l'augmentation de la dispersion observée avec Porchet en profondeur (Figure 14) : l'intensité du lissage dépend probablement de l'état local du sol de chaque trou, introduisant une variabilité supplémentaire d'un point de mesure à l'autre.

Pour l'ISA, atteindre l'horizon profond nécessite d'enterrer l'anneau dans un trou préalablement taraudé, ce qui crée une interface artificielle entre le sol et l'anneau. En effet,

avec la forme en obus de la tarière, il faut aussi dégager les côtés du cylindre quand la profondeur atteint 15cm. Cette manipulation peut modifier la surface de contact sol-anneau, ce qui peut créer un chemin d'écoulement préférentiel potentiel au contact anneau-sol, susceptible de compenser, au moins partiellement, la réduction de K_s attendue du fait de la compaction. Ce mécanisme, opposé à celui du lissage Porchet, pourrait expliquer pourquoi l'ISA ne montre pas la même chute de K_s en profondeur dans la culture : les deux méthodes seraient alors affectées par des biais de sens contraire, l'un accentuant l'effet de la compaction, l'autre le masquant partiellement.

5.2.3. Corrélations avec la densité apparente et la pénétrométrie : hypothèse explicative

Le Tableau 4 montre que les corrélations entre K_s et densité apparente, ou entre K_s et pénétrométrie, ne sont significatives que pour Porchet, jamais pour l'ISA. Cette asymétrie est cohérente avec la distinction, développée en 2.2.4, entre flux dominé par la matrice et flux dominé par les macropores. L'ISA, mesure de surface peu profonde, capte un régime d'écoulement où une fraction réduite du volume poral (les macropores biologiques et fissuraux) porte l'essentiel du flux (Watson & Luxmoore, 1986 ; Jarvis, 2007), un régime largement découplé des propriétés moyennes de la matrice que sont la densité apparente et la résistance à la pénétration. À l'inverse, en perturbant et en lissant les parois du trou, Porchet tend précisément à détruire une partie de cette continuité macroporale ; la mesure obtenue se rapprocherait alors davantage d'un flux matriciel, ce qui expliquerait qu'elle se corrèle mieux aux indicateurs de compaction. La robustesse de la relation densité-pénétrométrie ($r = 0,77$, hautement significative pour les deux méthodes) confirme par ailleurs que ces deux indicateurs traduisent un même état physique du sol, renforçant la lecture selon laquelle c'est bien le mode d'interaction de chaque méthode avec la structure du sol, et non un artefact de mesure de la densité ou de la pénétrométrie, qui explique le contraste observé.

5.2.4. Indice d'une semelle de labour dans la parcelle cultivée

Bien que les pénétrométries moyenne et élargie ne se distinguent pas statistiquement (Annexe 4), la Figure 16 montre, en culture, une augmentation nettement plus abrupte de la résistance à la pénétration entre 0-15 cm (< 1 MPa) et 15-30 cm (~ 3 MPa) qu'en prairie ($\sim 1,7$ à ~ 2 MPa). Ce saut survient à partir de 15cm et augmente jusqu'à son maximum à 30cm, il peut correspondre à l'horizon travaillé uniquement lors du labour et qui se compacte progressivement au-dessus de la semelle de labour (section 2.3.1.) jusqu'au prochain labour. La parcelle était un précédent de maïs couvert par une culture de couverture, le labour précédant les mesures a probablement été réalisé au printemps 2025. Cela vient corroborer la lecture des données de densité apparente (Figure 15) et la chute de K_s mesurée par Porchet dans l'horizon profond de la culture, tout en fournissant un troisième indicateur indépendant convergeant vers la même hypothèse.

5.2.5. Justification du choix de la méthode Porchet pour la seconde expérience

Plusieurs éléments plaident pour retenir Porchet dans la suite du travail. Sur le plan statistique, aucun effet significatif de la méthode n'a été détecté à l'échelle globale, ce qui autorise à considérer les deux techniques comme équivalentes. Sur le plan opérationnel (Tableau 5), Porchet permet de mesurer plusieurs profondeurs dans un même trou sans matériel supplémentaire, alors que l'ISA nécessite un forage additionnel qui peut introduire un risque d'écoulement préférentiel artificiel mal caractérisé. Le biais de Porchet, quant à lui, est documenté et quantifié dans la littérature (facteur 2 à 5 ; section 2.4.3), systématique dans son sens (sous-estimation) et cohérent avec les résultats obtenus ici. Il conviendra néanmoins de garder à l'esprit que les valeurs de Ks obtenues par Porchet doivent être interprétées de façon relative, entre systèmes, plutôt que comme des estimations absolues de la conductivité hydraulique fonctionnelle du sol.

5.3. Expérience n°2 : effet des systèmes de culture sur Ks mesuré par Porchet

5.3.1. Modèle mixte global sur l'ensemble des données de Log₁₀ Ks

Tableau 6 : Modèle linéaire à effets mixtes ajusté sur le Log₁₀ Ks (méthode Porchet) : composantes de la variance et tests des effets fixes (n = 96).

Modèle linéaire mixte – Log ₁₀ (Ks) – Effets fixes : Profondeur, Système de culture, Profondeur×Système – Effets aléatoires : Bloc, Trou – n=96			
Statistiques du modèle	R ² marginal	R ² conditionnel	
Moyenne de réponse	—	0,793	
Composantes de la variance (REML)			
Source	Variance	% du total	Écart-type
Bloc	0,000	0,0	—
Trou	0,180	63,0	0,424
Résidu	0,105	37,0	0,325
Total	0,285	100,0	—
Tests des effets fixes (F de Satterthwaite)			
Source	F	p	Signif.
Profondeur (cm)	23,22	<0,0001	***
Système de culture	0,46	0,714	NS
Profondeur × Système	3,54	0,022	*
*** p<0,001 ** p<0,01 * p<0,05 NS : non significatif			

Le modèle linéaire à effets mixtes ajusté sur le logarithme décimal de K_s présente un bon ajustement, avec un coefficient de détermination conditionnel de 0,79 et une racine de l'erreur quadratique moyenne de 0,32 pour une réponse moyenne de 2,01 (Tableau 6). La décomposition des effets aléatoires montre que la variabilité entre les trous de mesure représente 63 % de la variance structurée du modèle, tandis que la composante associée au bloc est estimée négative et donc considérée comme nulle. Cette prépondérance du terme « trou » traduit une hétérogénéité spatiale marquée à l'échelle du point de mesure, au sein d'un même système et d'un même bloc, et rappelle le caractère intrinsèquement variable du K_s déjà observé lors de la première expérience.

L'analyse des effets fixes révèle un effet très hautement significatif de la profondeur sur le $\text{Log}_{10} K_s$ ($F = 23,22$; $p < 0,0001$). En revanche, le système de culture considéré seul n'exerce aucun effet significatif ($F = 0,46$; $p = 0,71$), indiquant qu'aucun système ne se démarque des autres lorsque les deux profondeurs sont confondues. L'interaction entre la profondeur et le système est en revanche significative ($F = 3,54$; $p = 0,022$) : l'écart de conductivité entre la surface et l'horizon plus profond dépend du système considéré. L'examen des moyennes ajustées montre que ce contraste entre horizons est le plus marqué dans le système conventionnel et pratiquement absent dans le système orienté vers la conservation du sol, tendance précisée dans la section suivante.

Ce résultat justifie de poursuivre l'analyse non pas sur l'effet moyen du système, non significatif, mais sur la manière dont chaque système structure la conductivité selon la profondeur.

5.3.2. Effet du système et de la profondeur sur Ks

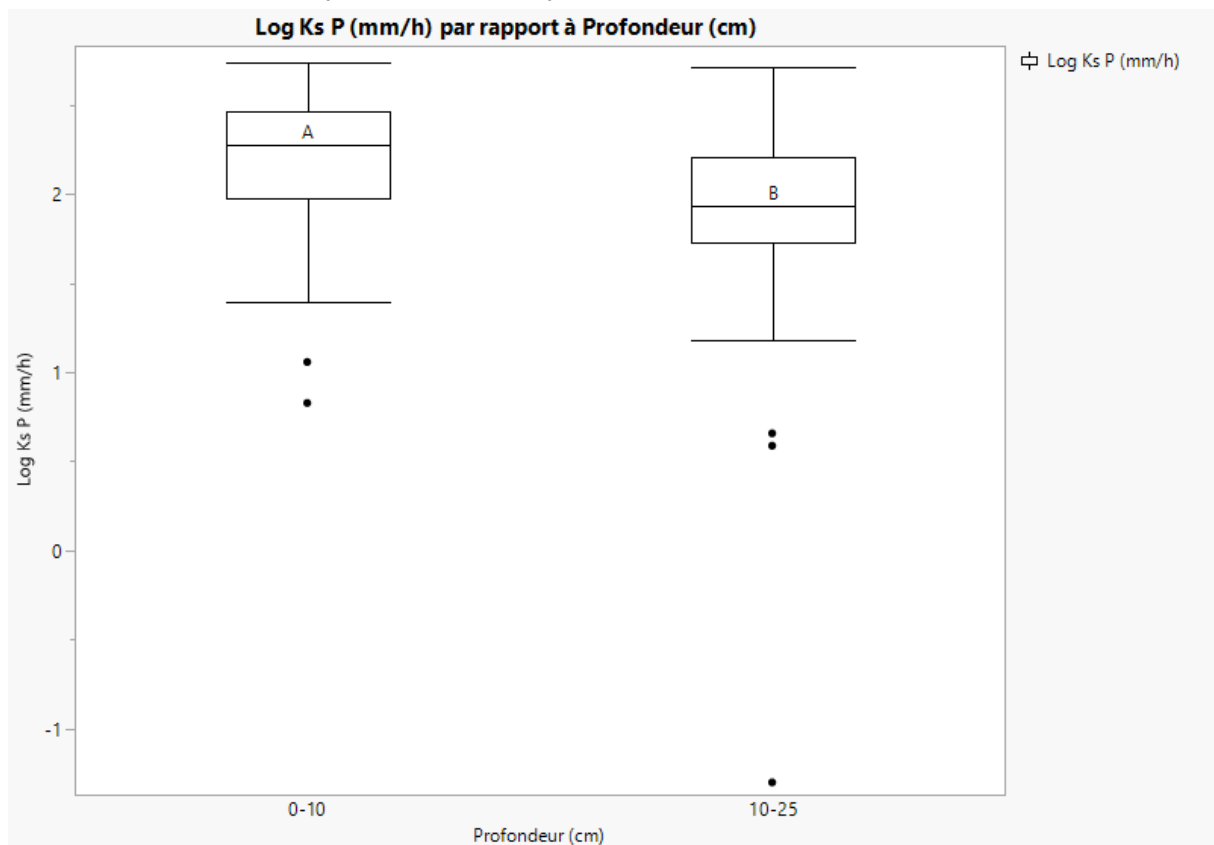


Figure 19 : Distribution du Log_{10} Ks (Porchet) par profondeur, tous systèmes confondus. Les lettres indiquent les groupes du test de Tukey ($\alpha = 0,05$).

L'effet de la profondeur se manifeste d'abord de manière globale (Figure 19) : la médiane du Log_{10} Ks passe d'environ 2,3 dans l'horizon 0-10 cm à environ 2,0 dans l'horizon 10-25 cm, les deux horizons se distinguant significativement. Cette diminution générale de la conductivité avec la profondeur s'accompagne, dans les deux horizons, de quelques valeurs basses isolées situées sous les moustaches inférieures.

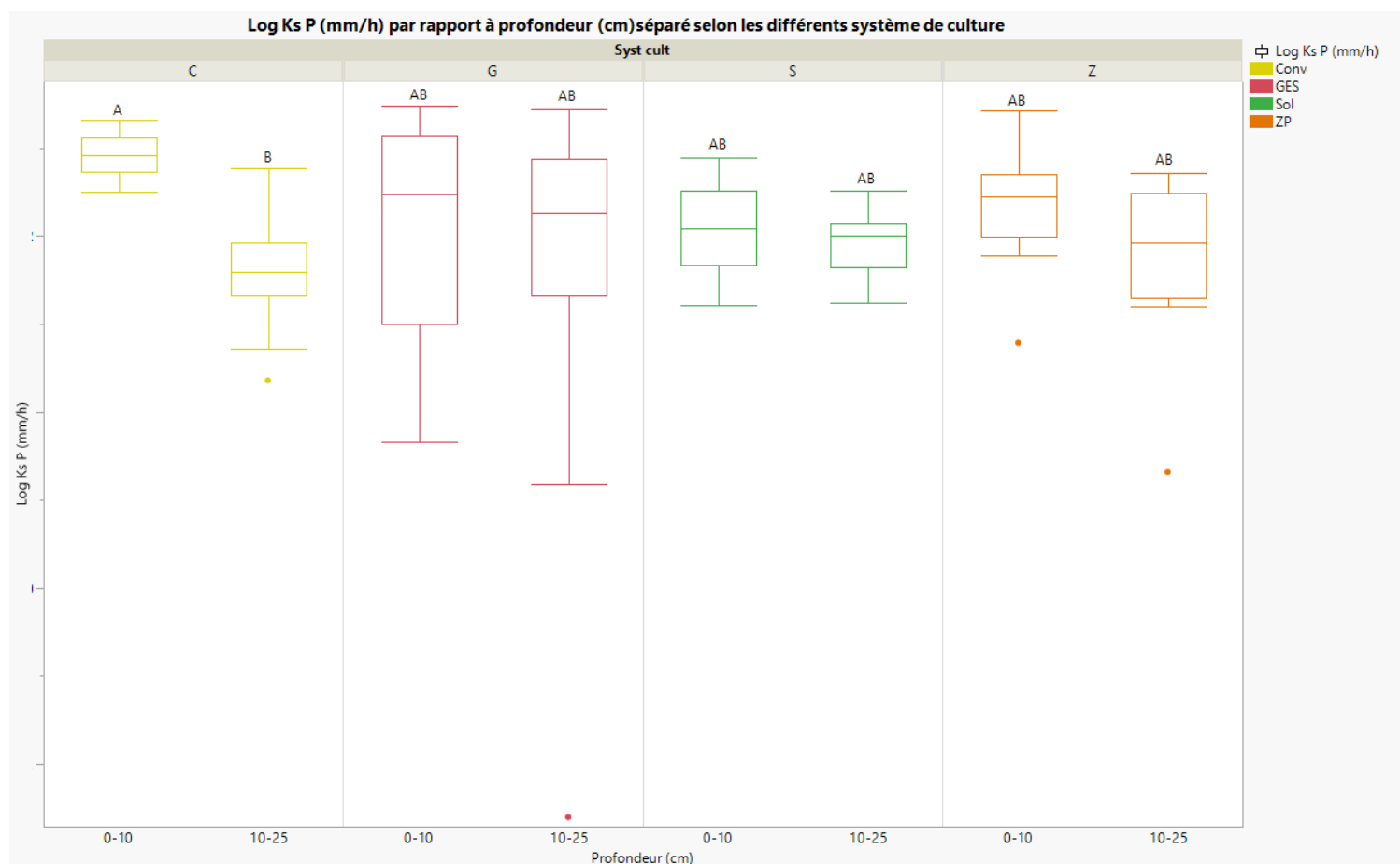


Figure 20 : Distribution du $\text{Log}_{10} K_s$ (Porchet) par profondeur et par système de culture.

La décomposition par système de culture nuance ce constat et illustre l'interaction significative entre la profondeur et le système (Figure 20). Le système conventionnel se distingue par la diminution la plus prononcée entre les deux horizons, les deux boîtes étant nettement disjointes et la couche de surface présentant à la fois les valeurs les plus élevées et la dispersion la plus faible. À l'inverse, les systèmes de conservation du sol et zérophyto affichent des distributions beaucoup plus proches entre les deux profondeurs, la médiane variant peu d'un horizon à l'autre. Le système GES occupe une position intermédiaire, caractérisé par une forte dispersion dans les deux horizons et par la présence de la valeur la plus basse de l'ensemble du jeu de données, localisée dans la couche 10-25 cm ; le système zérophyto présente également une observation basse marquée dans ce même horizon.

Cette interaction se traduit par un effet du système qui ne s'exprime qu'en surface. Dans l'horizon 0-10 cm, le modèle met en évidence un effet global du système de culture ($F = 3,07$; $p = 0,038$). Le système conventionnel présente la moyenne des moindres carrés la plus élevée ($\text{Log}_{10} K_s = 2,46$), devant le zérophyto (2,17), la conservation du sol et le système GES (2,03 chacun). Les comparaisons deux à deux de Tukey n'isolent toutefois aucune paire au seuil strict de 5 % ; les deux écarts impliquant le conventionnel sont néanmoins à la limite de la significativité (Conv-GES : $p = 0,053$; Conv-Sol : $p = 0,059$), ce qui invite à considérer le conventionnel comme tendanciellement plus conducteur en surface, même si cette différence n'est pas formellement confirmée. Le resserrement de la distribution autour de la moyenne

du conventionnel appuie cette lecture. Les tableaux résumant les statistiques sont disponibles dans l'annexe 5.

Dans l'horizon 10-25 cm, en revanche, aucun effet du système n'est décelé ($F = 0,23$; $p = 0,875$) : les moyennes ajustées des quatre systèmes se resserrent entre 1,77 et 1,97 et toutes les comparaisons de paires sont largement non significatives ($p > 0,87$). On observe donc une homogénéisation du K_s en profondeur, indépendamment du système agricole.

Ces résultats montrent que la différenciation induite par les pratiques culturales se concentre dans l'horizon travaillé de surface et s'estompe dans l'horizon plus profond. Dans les deux modèles par profondeur, la composante de variance associée au bloc est estimée nulle, ce qui conforte l'hypothèse selon laquelle les blocs constituent des répétitions équivalentes des systèmes de culture.

5.3.3. Propriétés du sol mesurées sur les parcelles de mesure et relations avec K_s

Tableau 7 - Moyennes des indicateurs de qualité du sol par système de culture (essai SYCI)

Variable	Conv (SdC1)	Sol (SdC2)	GES (SdC3)	ZP (SdC4)	F	Prob > F
<i>Variables mesurées une fois par parcelle (0-25 cm ; n = 3 parcelles par système)</i>						
Argile (%)	20,4 a	19,9 a	19,4 a	17,3 a	2,81	0,108
Limon (%)	75,5 b	76,3 ab	76,5 ab	78,8 a	4,20	0,046
Sable (%)	4,1 a	3,8 a	4,1 a	3,9 a	0,24	0,86
Corg (%)	0,92 a	1,07 a	1,03 a	1,14 a	1,59	0,27
Rapport C/argile	0,045 a	0,054 a	0,053 a	0,067 a	2,28	0,16
<i>Pénétrométrie : mesurée à chaque point de mesure (n = 12 par système et par profondeur ; Tukey sur les 8 combinaisons système x profondeur)</i>						
Pénétrométrie (MPa) 0-10 cm	0,63 cd	0,59 cd	0,63 d	0,69 cd	-	-
Pénétrométrie (MPa) 10-25 cm	1,25 ab	0,84 cd	0,96 bc	1,37 a	-	-
<i>Densité apparente : une mesure par parcelle et par profondeur (n = 3 par système et par profondeur)</i>						
Densité apparente 0-10 cm	1,35 a	1,34 a	1,27 a	1,36 a	1,21	0,3655
Densité apparente 10-25 cm	1,51 a	1,48 ab	1,31 b	1,38 ab	4,61	0,0373
<i>Conductivité hydraulique : modèles ajustés séparément par profondeur (section 5.3.2)</i>						
Log10 K_s (Porchet) 0-10 cm	2,46 a	2,03 a	2,03 a	2,17 a	3,07	0,0382
Log10 K_s (Porchet) 10-25 cm	1,80 a	1,97 a	1,77 a	1,88 a	0,23	0,8750
<i>Indicateurs disponibles uniquement à l'échelle du système (lettres et moyennes reprises des figures et données du CRA-W)</i>						
Score VESS 0-10 cm	1,50 ab	1,58 b	1,28 a	1,56 ab	-	-
Score VESS 10-25 cm	4,00 a	3,00 a	3,83 a	3,17 a	-	-
Indice Wend (QST)	0,02 a	0,39 b	0,34 b	0,44 c	-	-
Vers de terre (ind/m ²)	132 a	150 a	204 ab	260 b	-	-

Note - Deux moyennes d'une même ligne ne partageant aucune lettre diffèrent significativement (Tukey HSD, $\alpha = 0,05$). Chaque bloc de lignes repose sur son unité expérimentale propre, précisée dans l'intitulé : la parcelle pour la texture, le carbone et la densité, le point de mesure pour la pénétrométrie et K_s .

Texture et carbone : valeurs 0-25 cm, moyennes pondérées des horizons 0-10 et 10-25 cm lorsque l'analyse a été faite par horizon.

Avant d'examiner les liens entre Ks et les autres indicateurs, il est nécessaire de caractériser l'état physico-chimique des quatre systèmes. Le Tableau 7 rassemble l'ensemble des variables disponibles sur l'essai SYCI, en distinguant celles qui ont été mesurées sur les parcelles où Ks a été déterminée de celles qui ne sont disponibles qu'à l'échelle du système, traitées en section 5.3.4.

Une précision méthodologique s'impose au préalable, car elle commande la lecture de tout ce qui suit. Les variables rassemblées dans ce tableau n'ont pas la même unité expérimentale, étant donné les différentes campagnes dont elles sont issues. La pénétrométrie et Ks ont été acquises à chacun des points de mesure, soit douze valeurs indépendantes par système et par profondeur. La densité apparente ne fournit qu'une valeur composite par parcelle et par horizon, soit trois valeurs par système et par profondeur ; la texture et le carbone organique, une seule valeur composite par parcelle, soit trois valeurs par système. Les tests présentés ici ont donc été conduits sur ces effectifs réels : traiter ces valeurs de parcelle comme si elles étaient propres à chaque point de mesure reviendrait à répéter artificiellement la même observation et à surestimer fortement la significativité des écarts. Il faut ajouter qu'avec trois répétitions par système, la puissance de ces tests est faible : seuls des écarts de grande amplitude peuvent y être détectés, et une absence de différence significative doit s'y lire comme une absence de preuve plutôt que comme une preuve d'équivalence.

Les quatre systèmes sont établis sur un même matériau limoneux : la fraction limoneuse domine largement (75,5 à 78,8 %), devant l'argile (17,3 à 20,4 %) et le sable (3,8 à 4,1 %). Les écarts observés entre systèmes ne peuvent pas être attribués aux conduites culturales : la composition granulométrique est une propriété héritée du matériau parental, que six années de culture ne modifient pas. Ces écarts renseignent en revanche sur l'hétérogénéité pédologique de fond du dispositif, telle que la randomisation en blocs l'a répartie entre les systèmes. Seul le limon présente un contraste statistiquement établi ($F = 4,20$; $p = 0,046$), imputable à la seule opposition entre les parcelles du conventionnel et celles du zérophyto ($p = 0,04$) ; l'argile ($F = 2,81$; $p = 0,108$) et le sable ($F = 0,24$; $p = 0,86$) ne se distinguent pas du bruit d'échantillonnage. Cette hétérogénéité de fond reste modérée, mais elle mérite d'être gardée à l'esprit : les parcelles du zérophyto, les plus limoneuses et les moins argileuses, ne partent pas exactement du même matériau que celles du conventionnel.

La teneur en carbone organique s'échelonne de 0,92 % sous le conventionnel à 1,14 % sous le zérophyto, en passant par 1,03 % sous le système GES et 1,07 % sous le système de conservation du sol. Contrairement à la texture, le carbone organique est susceptible de répondre aux pratiques, et l'ordre observé est cohérent avec le précédent en prairie temporaire du zérophyto ; l'écart n'atteint toutefois pas le seuil de signification ($F = 1,59$; $p = 0,27$), pas davantage que celui du rapport carbone sur argile ($F = 2,28$; $p = 0,16$), et ne peut donc pas être établi sur ces données. Ce dernier rapport n'apporte du reste pas d'information indépendante de ses deux composantes : carbone et argile sont ici fortement corrélés négativement (ρ de Spearman = $-0,66$; $p < 0,0001$), de sorte que le zérophyto cumule mécaniquement le carbone le plus élevé et l'argile la plus faible.

Ce premier constat oriente la suite de l'analyse : à l'échelle des trois répétitions disponibles, les quatre systèmes ne se distinguent pas par leur matrice. Ils constituent un ensemble physico-chimiquement homogène, et non quatre états contrastés dont on pourrait attendre qu'ils se traduisent mécaniquement en écarts de conductivité hydraulique.

Les deux variables décrivant l'état de compaction confirment cette homogénéité en surface et la nuancent en profondeur. Dans l'horizon 0-10 cm, aucun système ne se distingue des autres, ni pour la pénétrométrie (0,59 à 0,69 MPa ; toutes les comparaisons $p \geq 0,99$) ni pour la densité apparente (1,27 à 1,36 g/cm³ ; $F = 1,21$; $p = 0,37$) : l'horizon travaillé est peu contraignant et uniforme entre systèmes. Dans l'horizon 10-25 cm, les deux variables augmentent et les systèmes se séparent. La résistance à la pénétration y est significativement plus faible sous le système de conservation du sol (0,84 MPa) que sous le conventionnel (1,25 MPa ; $p = 0,028$) et sous le zérophyto (1,37 MPa ; $p = 0,0018$), le zérophyto se distinguant en outre du système GES (0,96 MPa ; $p = 0,031$). La densité apparente désigne pour sa part le système GES comme le moins compacté (1,31 g/cm³), significativement en deçà du conventionnel (1,51 g/cm³ ; $p = 0,046$) ; cette dernière valeur s'approche du seuil critique de 1,55 g/cm³ proposé pour les sols limoneux par Reichert et al. (2009) sans l'atteindre. Les deux indicateurs ne désignent donc pas le même système comme le plus favorable, ce qui rappelle qu'ils ne mesurent pas la même chose : la densité apparente intègre le volume poral total sur tout l'horizon, tandis que la résistance à la pénétration traduit un état mécanique ponctuel, sensible entre autres à la teneur en eau et à la présence d'agrégats grossiers.

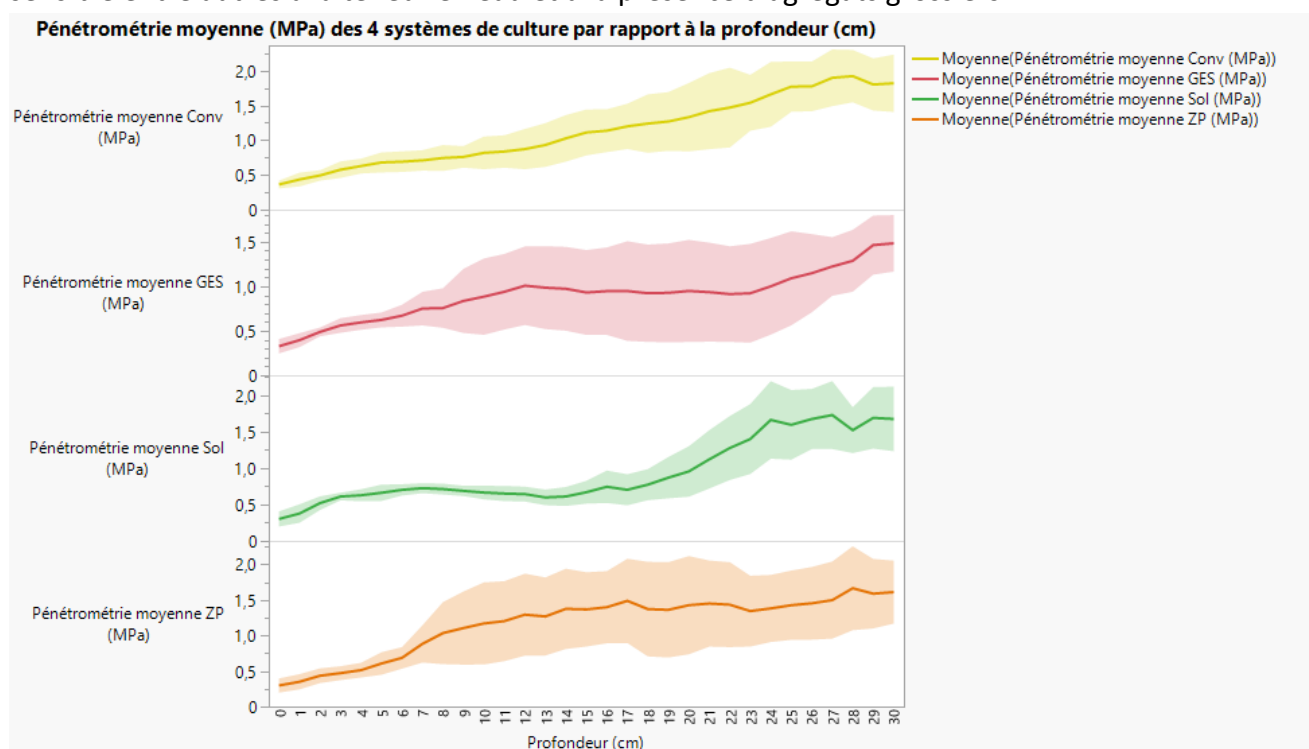


Figure 21 : Profils moyens de résistance à la pénétration (MPa) en fonction de la profondeur (0-30 cm) pour les quatre systèmes de culture. La zone colorée représente l'intervalle de confiance autour de la moyenne.

L'évolution entre les deux horizons mérite enfin d'être lue système par système. La densité apparente augmente significativement avec la profondeur lorsque l'on considère les douze parcelles appariées ($t = 3,03$; $p = 0,011$), sans que l'ampleur de cette augmentation puisse être attribuée à un système en particulier compte tenu du faible effectif. La pénétrométrie, mesurée sur un effectif bien supérieur, permet en revanche cette lecture : la rupture entre les deux horizons est significative sous le conventionnel ($p < 0,0001$), le zérophyto ($p < 0,0001$) et le système GES ($p = 0,028$), mais pas sous le système de conservation du sol ($p = 0,226$), dont l'horizon 10-25 cm reste statistiquement au niveau des horizons de surface. Ce système est ainsi le seul à ne pas présenter de discontinuité mécanique entre les deux horizons échantillonnés.

Les profils continus de résistance à la pénétration (Figure 21) précisent cette évolution verticale sur l'ensemble des trente premiers centimètres et montrent ce que les moyennes par tranche ne peuvent restituer : la forme des profils. Tous les systèmes partent d'une résistance très faible en surface (0,30 à 0,40 MPa) et voient celle-ci croître avec la profondeur, mais selon des modalités contrastées. Le conventionnel présente une augmentation régulière et continue sur tout le profil et atteint les valeurs les plus élevées à 30 cm (environ 1,9 MPa), avec un intervalle de confiance étroit qui traduit une grande homogénéité entre points de mesure. Le zérophyto et le système GES se caractérisent au contraire par une augmentation précoce, dès 6 à 12 cm, suivie d'un long palier compris entre 1,0 et 1,5 MPa, la reprise de croissance n'intervenant qu'au-delà de 22 à 25 cm. Le système de conservation du sol conserve la résistance la plus faible du dispositif jusque vers 20 cm (environ 0,7 MPa) avant d'augmenter à son tour. La différenciation entre systèmes porte ainsi moins sur le niveau de compaction atteint en fond de profil que sur la profondeur à laquelle cette compaction s'installe.

Corrélations entre Ks et les propriétés mesurées sur les mêmes parcelles

La pénétrométrie est la seule variable du Tableau 7 à avoir été acquise en chacun des points où Ks a été mesurée ; elle autorise donc un appariement direct avec la conductivité. La densité apparente, la texture et le carbone organique proviennent d'une mesure unique par parcelle, si bien que la même valeur se trouve répétée pour les quatre points d'une sous-parcelle, et pour les deux profondeurs dans le cas de la texture et du carbone. Les corrélations qui les impliquent reposent donc sur un nombre d'unités indépendantes bien inférieur à l'effectif nominal ; elles sont pour cette raison systématiquement doublées d'un calcul mené à l'échelle de la parcelle, seul niveau auquel ces variables constituent des observations indépendantes.

Ces relations ont été quantifiées à l'aide de corrélations de rang de Spearman, cohérentes avec l'approche retenue pour la première expérience et robustes aux valeurs basses isolées mises en évidence en section 5.3.2. Compte tenu du comportement contrasté de Ks entre les deux horizons, les corrélations ont été calculées séparément pour les profondeurs 0-10 cm et 10-25 cm, puis à l'échelle globale, afin de distinguer les liaisons réelles à profondeur constante d'une corrélation apparente induite par le seul gradient vertical (Tableau 8).

Tableau 8 : Coefficients de corrélation de rang de Spearman (ρ) entre le Log_{10} Ks (Porchet) et les propriétés du sol, par profondeur et à l'échelle globale. *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; ns : non significatif.

Relation testée	Global	0-10 cm	10-25 cm
Log_{10} Ks vs pénétrométrie	-0,30 **	0,15 ns	-0,27 ns
Log_{10} Ks vs densité apparente	-0,21 *	0,05 ns	-0,24 ns
Log_{10} Ks vs carbone organique	-0,06 ns	-0,33 *	0,19 ns
Log_{10} Ks vs argile	0,02 ns	0,04 ns	0,03 ns
Log_{10} Ks vs C/argile	-0,05 ns	-0,20 ns	0,07 ns
Densité apparente vs pénétrométrie	0,33 ***	-0,30 *	0,24 ns

À l'échelle globale, la Log_{10} Ks est faiblement mais significativement corrélée, avec le signe attendu, à la pénétrométrie ($\rho = -0,30$; $p = 0,003$) et à la densité apparente ($\rho = -0,21$; $p = 0,038$), tandis que densité et pénétrométrie sont elles-mêmes positivement liées ($\rho = 0,33$; $p < 0,001$). Ces corrélations s'effacent toutefois dès lors que l'on raisonne à profondeur constante. Dans l'horizon de surface, aucune relation n'apparaît entre la Log_{10} Ks et les deux variables de compaction (pénétrométrie $\rho = 0,15$; densité $\rho = 0,05$), les coefficients étant même de signe contraire à l'attendu physique. Dans l'horizon 10-25 cm, les deux relations retrouvent le signe attendu et approchent le seuil de signification sans l'atteindre (pénétrométrie $\rho = -0,27$; $p = 0,066$; densité $\rho = -0,24$; $p = 0,098$).

La texture et le statut organique sont tout aussi peu informatifs : ni la teneur en argile ni le rapport carbone sur argile ne présentent de liaison avec la conductivité hydraulique, à quelque profondeur que ce soit. Une seule valeur se détache, la corrélation négative entre le carbone organique et la Log_{10} Ks en surface ($\rho = -0,33$; $p = 0,024$). Elle ne résiste toutefois pas au changement d'échelle. Recalculée sur les douze parcelles, seules unités auxquelles le carbone a réellement été mesuré, la liaison n'est plus significative ($\rho = -0,44$; $p = 0,152$). Les deux coefficients sont exacts et ne se contredisent pas : ils ne portent simplement pas sur les mêmes observations. Le premier est calculé sur les quarante-huit points de mesure de surface, alors que ces points ne fournissent que douze valeurs de carbone distinctes, chacune répétée quatre fois ; sa valeur de p est donc calculée sur un effectif artificiellement gonflé et n'a pas de sens. Le second porte sur les douze moyennes de parcelle, qui sont indépendantes : le coefficient γ est même plus élevé en valeur absolue, mais l'effectif réel est trop faible pour que la relation puisse être établie. C'est ce second calcul qui fait foi, et la conclusion est qu'aucune liaison entre carbone organique et conductivité ne peut être démontrée ici. Le même raisonnement vaut pour toutes les relations impliquant une variable de niveau parcelle ($p \geq 0,15$ dans les deux horizons).

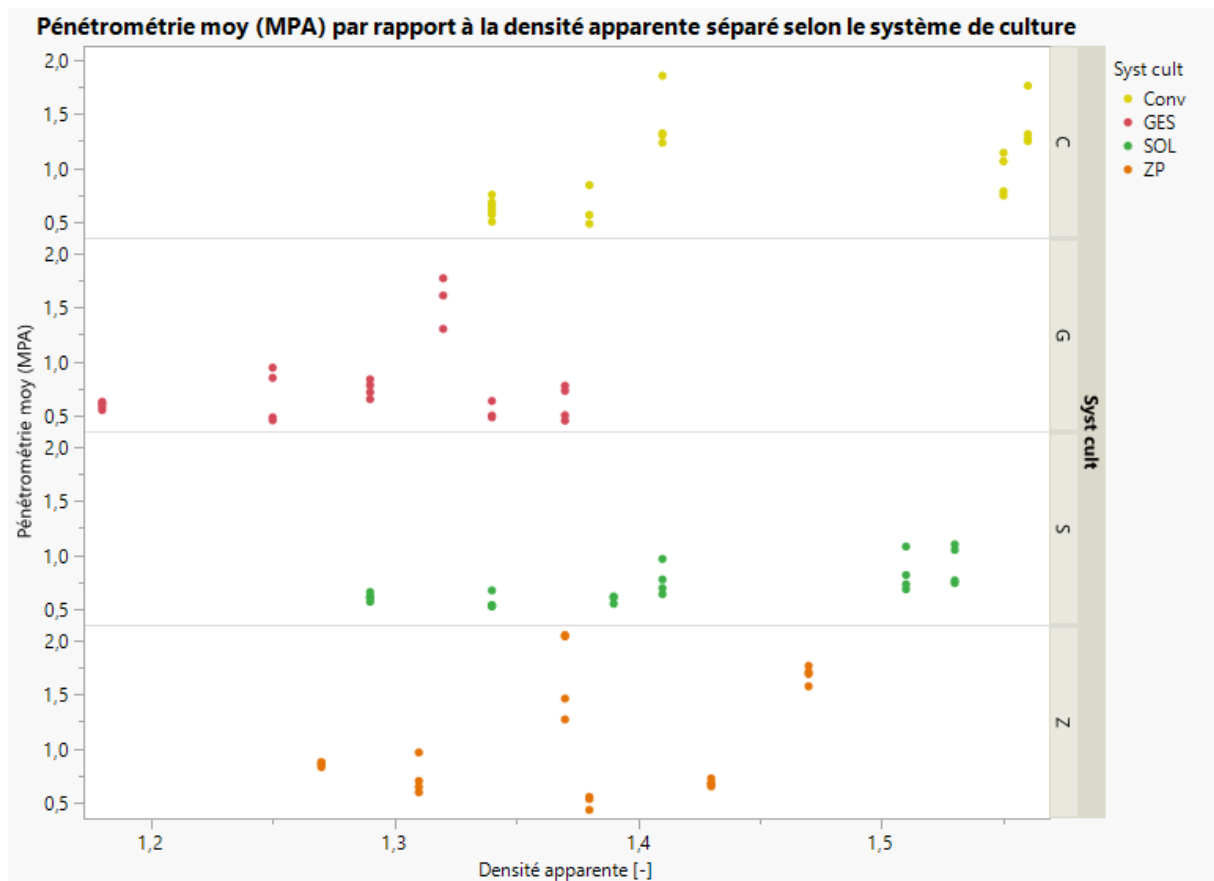


Figure 22 : Valeurs de pénétrométrie selon la densité apparente dans les différents systèmes de culture

La Figure 22 rend cette structure directement visible. Pour chaque système, les points s'organisent en colonnes verticales : chaque colonne correspond à l'unique valeur de densité apparente d'une parcelle et d'un horizon, autour de laquelle se répartissent les quatre valeurs de pénétrométrie mesurées dans cette parcelle. La dispersion verticale au sein d'une colonne, souvent supérieure à 0,5 MPa, traduit la variabilité entre points d'une même parcelle ; l'écart horizontal entre colonnes traduit, lui, la variabilité entre parcelles et entre horizons. Seule cette seconde composante est réellement informative pour la densité, ce qui explique que la liaison positive entre densité et pénétrométrie, nette à l'échelle globale ($p = 0,33$), ne se retrouve pas à l'intérieur d'un horizon donné. En surface, elle s'inverse même ($p = -0,30$; $p = 0,040$), à l'opposé de la liaison observée globalement et lors de la première expérience. Cette inversion repose sur trois valeurs de densité par système et n'appelle pas d'interprétation physique : elle illustre surtout la fragilité des corrélations construites sur des variables de niveau parcelle et invite à ne pas surinterpréter les relations établies dans l'horizon travaillé.

Deux points méritent enfin d'être soulignés. D'une part, les corrélations globales apparemment significatives sont pour l'essentiel un effet de profondeur : K_s diminuant avec la profondeur alors que la densité et la pénétrométrie augmentent, comme le montrent respectivement la Figure 19 et le Tableau 7, la mise en commun des deux horizons crée une liaison qui ne reflète aucune relation à profondeur fixée. D'autre part, à profondeur constante, aucune des propriétés mesurées sur les parcelles de mesure ne rend compte de la variabilité de K_s . Ce résultat prend son sens à la lumière du constat établi plus haut : les quatre systèmes

ne se distinguent pas significativement par leur texture, leur statut organique ni leur état de compaction de surface, et la gamme de variation offerte à ces corrélations est donc étroite.

5.3.4. Mise en relation avec les indicateurs disponibles à l'échelle du système

Les trois derniers indicateurs du Tableau 7 (le score structural VESS, l'indice de stabilité Wend issu du QuantiSlake Test et l'abondance des vers de terre) ont été acquis par le CRA-W sur des plateaux ou des parcelles distinctes de ceux utilisés pour les mesures de Ks (section 4.4.5), et à des dates différentes, principalement en automne 2025 alors que les mesures de Ks ont été réalisées entre mi-mars et mi-avril 2026. Aucun appariement point à point n'est donc possible et aucune corrélation ne peut être calculée : la mise en relation s'opère ici à l'échelle du système, en confrontant la hiérarchie établie pour chacun de ces indicateurs à celle observée pour Ks en section 5.3.2. Compte tenu de la nature ordinale du score VESS, du caractère discret des dénombrements de vers de terre et du faible nombre de répétitions, les groupes matérialisés par des lettres sur les figures sont interprétés comme des tendances plutôt que comme des différences strictement établies.

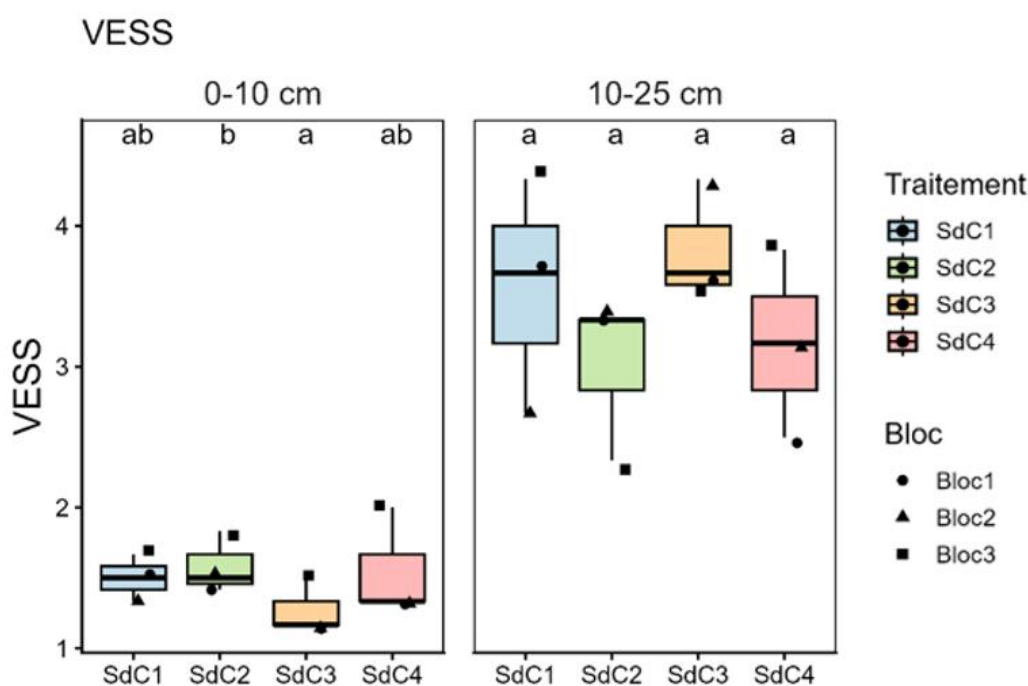


Figure 23 : Score structural VESS par système de culture et par profondeur. SdC1 = Conv ; SdC2 = Sol ; SdC3 = GES ; SdC4 = Zérophyto. Un score faible traduit une structure favorable. Lettres : groupes de Tukey. Source CRA-W

L'évaluation visuelle de la structure (VESS, Figure 23) dessine un signal contrasté selon la profondeur. En surface (0-10 cm), tous les systèmes présentent une bonne structure, avec des scores compris entre 1,28 et 1,58 ; le système GES y apparaît le plus favorable et le système de conservation du sol le moins, ces deux systèmes étant les seuls à se distinguer. Dans l'horizon 10-25 cm, les scores se dégradent nettement, entre 3,00 et 4,00, mais aucun système ne se démarque des autres. L'horizon 25-35 cm, également évalué, n'est pas repris ici puisqu'il n'est pas couvert par les mesures de Ks.

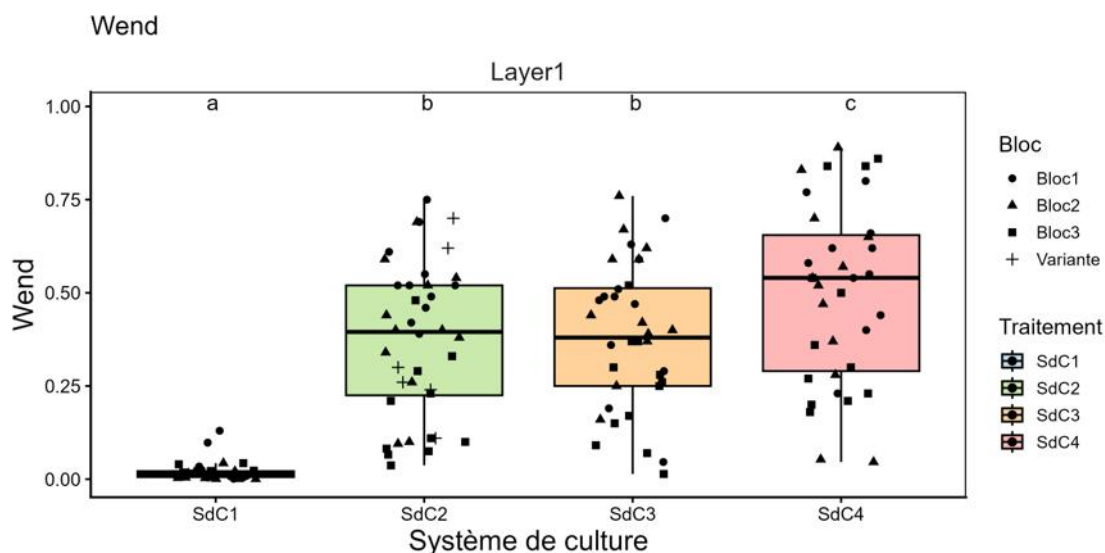


Figure 24 : Indice de stabilité structurale Wend (QuantiSlake Test) par système de culture. SdC1 = Conv ; SdC2 = Sol ; SdC3 = GES ; SdC4 = Zérophyto. Lettres : groupes de Tukey. Source CRA-W

La stabilité structurale mesurée par l'indice Wend (Figure 24) fait au contraire apparaître un gradient net et fortement différencié. Le conventionnel se singularise par une valeur très basse, proche de zéro (0,02), et par une dispersion quasi nulle autour de cette valeur : ses agrégats s'effondrent presque intégralement au contact de l'eau. Les systèmes de conservation du sol et GES occupent un niveau intermédiaire comparable (0,39 et 0,34), tandis que le zérophyto affiche la stabilité la plus élevée (0,44) et se détache à son tour des deux précédents. C'est sur cet indicateur que la différenciation entre systèmes est la plus marquée : le test de Tukey y sépare trois groupes distincts, le conventionnel seul (groupe a), les systèmes de conservation du sol et GES réunis (groupe b) et le zérophyto (groupe c). Le prélèvement ayant été réalisé sur les cinq premiers centimètres, cet indicateur se rapporte à l'horizon de surface et se compare donc aux mesures de Ks en 0-10 cm.

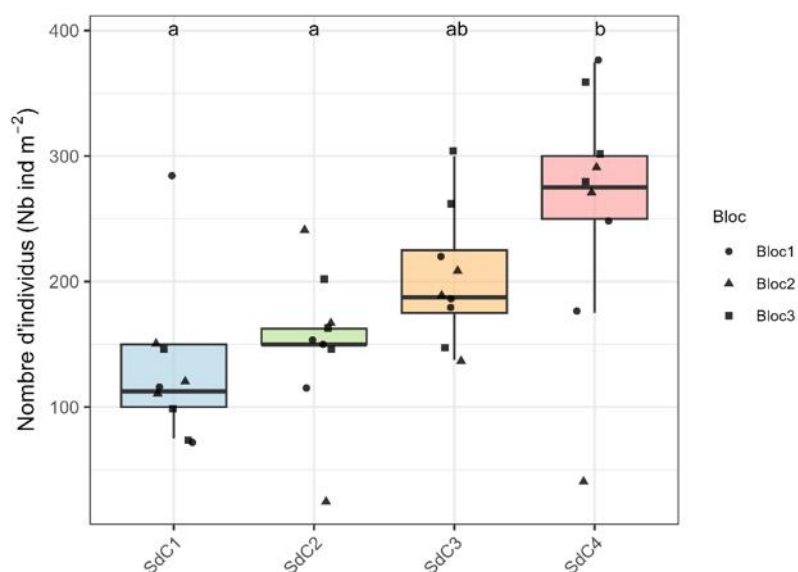


Figure 25 : Abondance des vers de terre (nombre d'individus par m²) par système de culture. SdC1 = Conv ; SdC2 = Sol ; SdC3 = GES ; SdC4 = Zérophyto. Lettres : groupes de Tukey. Source CRA-W

L'abondance des vers de terre (Figure 25) va dans le même sens. Le conventionnel et le système de conservation du sol présentent les densités les plus faibles (132 et 150 ind/m²), le système GES une valeur intermédiaire (204 ind/m²) et le zérophyto la densité la plus élevée, avec près de 260 individus par m². Seuls les deux extrêmes de ce gradient se distinguent statistiquement, le système GES ne se différenciant d'aucun des autres. Le précédent en prairie temporaire du zérophyto, deux années sans travail du sol et sous couvert permanent, constitue l'explication la plus immédiate de sa position en tête sur ces deux indicateurs, ce qui rappelle que les écarts observés ne tiennent pas au seul système de culture mais aussi à la position de chaque système dans sa rotation au moment des mesures.

La confrontation de ces indicateurs avec Ks fait apparaître une absence de correspondance. La stabilité structurale et l'activité lombricienne dessinent une hiérarchie nette et convergente, avec un zérophyto en tête et un conventionnel très nettement en retrait. Or l'ordre des moyennes ajustées de Ks en surface est différent, voire opposé, puisque le conventionnel y affiche la valeur la plus élevée ($\log_{10} Ks = 2,46$), devant le zérophyto (2,17), la conservation du sol et le système GES (2,03 chacun). Cette opposition doit être formulée avec prudence : l'effet du système sur Ks de surface n'étant établi par aucune comparaison de paires (section 5.3.2), il s'agit de la confrontation d'un classement solidement différencié, celui du Wend et des vers de terre, avec un classement qui n'est lui-même pas statistiquement fondé. On ne peut donc pas conclure que Ks classe les systèmes à l'inverse des indicateurs biologiques, mais seulement qu'elle ne reproduit pas leur hiérarchie et n'en fournit aucune confirmation. Le VESS, quant à lui, ne dessine aucune hiérarchie stable sur les horizons mesurés et ne se rapproche pas davantage du classement issu de la conductivité. Aucun des indicateurs disponibles à l'échelle du système ne permet ainsi de rendre compte des variations de Ks observées ; ce découplage apparent est discuté en section 5.4.2.

5.4. Discussion globale

Cette discussion réunit les enseignements des deux expériences. Elle interprète d'abord l'effet des systèmes de culture sur K_s et l'absence de correspondance observée avec les autres indicateurs de santé du sol, puis met en regard les deux campagnes pour comprendre pourquoi les relations entre K_s et propriétés physiques, nettes en première expérience, s'effacent en seconde. Elle revient ensuite sur les deux sous-objectifs du travail avant d'exposer les limites et les perspectives.

5.4.1. Effet des systèmes de culture sur la conductivité hydraulique

Le principal résultat de la seconde expérience est que K_s mesurée par Porchet ne discrimine pas les quatre systèmes de culture. Aucun effet du système n'apparaît en profondeur, et seule une tendance, à la limite de la significativité, place le conventionnel en tête dans l'horizon de surface.

Deux lectures de ce résultat doivent être distinguées. La première est que les systèmes ne diffèrent réellement pas, ce que la section 5.3.3 rend plausible : sur les variables de matrice et sur l'état de compaction de surface, les quatre systèmes forment un ensemble homogène, et il serait surprenant que la conductivité y trouve un contraste que ni la densité, ni la pénétrométrie, ni le carbone organique ne révèlent. La seconde est que des différences existent mais restent indétectables avec le dispositif employé : quatre points par parcelle, trois blocs, et une variance largement dominée par le terme « trou » constituent une configuration peu puissante face à une grandeur aussi variable que K_s . Les données disponibles ne permettent pas de trancher entre ces deux lectures, et la seconde suffit à expliquer l'essentiel des résultats obtenus.

La tendance observée en surface mérite néanmoins d'être commentée, car son sens n'est pas celui qu'on attendrait. L'état de l'art (section 2.3.1) et la première expérience conduisent à une hypothèse cohérente avec cette observation : le labour crée dans l'horizon travaillé une macroporosité mécanique très conductrice, mais transitoire et instable, qui peut gonfler temporairement K_s de surface. Ce mécanisme est compatible avec ce qui a été observé sur la parcelle cultivée conventionnelle de la première campagne, où K_s était élevée et homogène en surface puis chutait fortement en profondeur, ainsi qu'avec l'interaction profondeur $\times$ système de la seconde campagne, le conventionnel y accusant la baisse la plus forte entre 0-10 et 10-25 cm tandis que les systèmes de conservation présentent un profil plus homogène. Il ne s'agit toutefois que d'une interprétation a posteriori : aucune donnée de ce travail ne caractérise directement la macroporosité, et la date du dernier travail du sol de chaque système n'a pas été intégrée à l'analyse. Une explication alternative, au moins aussi vraisemblable, tient au précédent cultural, qui diffère entre systèmes : le zérophyto sort d'une prairie temporaire de deux ans, le conventionnel d'une pomme de terre, le système GES d'un maïs et le système de conservation du sol d'une betterave. L'effet mesuré ici est donc celui

d'un système à un moment précis de sa rotation, et non celui du système considéré indépendamment de son précédent.

En profondeur, l'homogénéisation de Ks entre systèmes indique que les pratiques culturales ne parviennent pas, à l'horizon 10-25 cm et à ce stade de l'essai, à imprimer des différences détectables par cette mesure. Ce constat rejoint l'inertie documentée en section 2.3.4, selon laquelle les effets des rotations sur les propriétés hydrauliques demandent souvent plus d'un cycle complet pour s'exprimer.

5.4.2. Un découplage entre Ks et les indicateurs biologiques et de stabilité

La mise en perspective avec les autres indicateurs (section 5.3.4) fait apparaître une absence de correspondance frappante. La stabilité structurale (Wend) et l'abondance des vers de terre séparent nettement les systèmes, avec un zérophyto en tête et un conventionnel en net retrait, ses agrégats s'effondrant presque entièrement au contact de l'eau. Ks, elle, ne restitue pas ce gradient et ne met en évidence aucune différence significative entre systèmes.

Avant d'y voir un découplage de nature physique, il faut rappeler que ce constat repose en partie sur une absence de résultat. Les indicateurs du CRA-W reposent sur des effectifs plus élevés et sur des grandeurs beaucoup moins variables que Ks, il est donc attendu qu'ils détectent des écarts là où la mesure d'infiltration n'en détecte pas, sans qu'il soit nécessaire d'invoquer une différence de nature entre ce qu'ils mesurent. À cela s'ajoute que ces indicateurs proviennent de parcelles distinctes et de campagnes antérieures aux mesures de Ks, ce qui rend toute comparaison indirecte.

Cela dit, l'hypothèse d'une divergence de nature reste la plus cohérente avec l'ensemble des résultats. Ks mesurée par Porchet dans l'horizon travaillé pourrait être largement gouvernée par la macroporosité issue du travail du sol, dont rien n'indique qu'elle soit liée à la qualité biologique du sol ; cela expliquerait qu'un système médiocre sur le plan de la stabilité et de l'activité lombricienne puisse afficher Ks de surface la plus élevée. À l'inverse, l'indice Wend et l'abondance des vers de terre intègrent la structuration biologique et la cohésion des agrégats, dimensions sur lesquelles les systèmes économes en intrants et la couverture pérenne prennent l'avantage, sans que ce gain se traduise, à ce stade, par une conductivité mesurablement supérieure. La première expérience fournit un argument supplémentaire en ce sens : en lissant les parois du trou, la méthode Porchet tend à détruire une partie de la continuité macroporale et à se rapprocher d'un flux matriciel, ce qui la rendrait peu sensible à la macroporosité biologique que ces indicateurs suggèrent. Cette explication demeure une hypothèse : elle ne pourrait être testée qu'en mesurant conjointement, sur les mêmes points, la conductivité et une caractérisation directe du réseau poral.

5.4.3. Pourquoi les corrélations Ks–propriétés physiques s'effacent en seconde expérience

La comparaison des deux campagnes est ici particulièrement instructive. En première expérience, Ks mesurée par Porchet était significativement corrélée, au sein des horizons, à la densité apparente et à la pénétrométrie (jusqu'à $\rho = -0,61$), ce qui avait fondé le choix de cette méthode pour détecter des différences de compaction. En seconde expérience, ces corrélations à profondeur constante disparaissent : seules subsistent des liaisons globales, faibles, qui ne sont qu'un artefact du gradient de profondeur.

L'explication la plus vraisemblable tient à l'amplitude du contraste physique échantillonné. La première campagne opposait deux occupations très différentes, une prairie permanente et une parcelle cultivée porteuse d'une semelle de labour, couvrant un large éventail d'états de compaction sur lequel une corrélation peut s'exprimer. La seconde campagne compare en revanche quatre systèmes sur un même sol, tous en froment d'hiver, dont les différences physiques restent ténues. Cette restriction de la gamme de variation atténue mécaniquement les corrélations : lorsque les états de compaction sont proches, la forte variabilité spatiale de Ks, dont le terme « trou » représente à lui seul 63 % de la variance structurée du modèle global, noie les faibles écarts systématiques. S'y ajoute une différence de qualité d'appariement entre les deux campagnes : en première expérience, densité et pénétrométrie étaient mesurées dans chaque sous-parcelle de mesure, alors qu'en seconde expérience la densité provient d'une valeur unique par parcelle, ce qui réduit fortement l'information disponible pour la corrélation. Ks semble donc capable de rendre compte de la compaction lorsque le contraste est fort, mais manquer de résolution pour hiérarchiser des systèmes voisins.

5.4.4. Retour sur les sous-objectifs : la méthode Porchet et Ks comme indicateur

Sur le plan méthodologique (premier sous-objectif), la première campagne montre que Porchet et l'ISA fournissent des valeurs équivalentes en tendance centrale, mais qu'elles divergent là où le profil est verticalement hétérogène. Les biais documentés en 2.4.3 et 2.4.4 offrent une explication plausible de cette divergence, chaque méthode étant affectée dans un sens opposé, sans que le dispositif mis en œuvre permette de le vérifier directement. Le choix de Porchet pour la seconde expérience se justifie par sa simplicité opératoire, la possibilité de mesurer plusieurs profondeurs dans un même trou, et un biais dont le sens est documenté et donc plus facilement interprétable. Il demeure que les valeurs obtenues doivent être lues en relatif, entre systèmes, et non comme des estimations absolues de la conductivité fonctionnelle.

Sur le plan agronomique (second sous-objectif), le bilan est plus nuancé. Pris isolément, Ks mesurée par Porchet ne s'est pas révélée capable de comparer des systèmes de culture proches : elle ne les discrimine pas en profondeur et, en surface, l'ordre observé ne recoupe

pas celui des indicateurs de stabilité et d'activité biologique. Ce constat, obtenu sur un seul essai, une seule date et douze points par système, ne peut être généralisé au-delà du contexte étudié. En revanche, replacée dans un faisceau d'indicateurs, la mesure apporte une information complémentaire sur la conductivité effective de l'horizon travaillé, que les indicateurs de structure et de stabilité ne fournissent pas. Ks conserve donc son intérêt comme indicateur de santé physique des sols, mais son interprétation gagne à être croisée avec des indicateurs de structuration biologique et de stabilité, qui captent des dimensions que la mesure d'infiltration seule ne restitue pas.

5.4.5. Limites de l'étude

Plusieurs limites doivent être gardées à l'esprit dans l'interprétation de ces résultats.

La première tient à l'unité expérimentale. Sur l'essai SYCI, la conductivité et la pénétrométrie ont été acquises en chaque point de mesure, alors que la texture, le carbone organique et la densité apparente ne sont disponibles qu'en une valeur composite par parcelle. Les corrélations impliquant ces dernières reposent donc, en réalité, sur douze observations indépendantes seulement, et les tests correspondants sont peu puissants : une absence de différence significative doit s'y lire comme une absence de preuve et non comme une preuve d'équivalence.

La deuxième tient à la puissance du dispositif face à la variabilité de Ks. Avec trois blocs et quatre points par parcelle, et une variance largement dominée par le terme « trou », le dispositif ne permet de détecter que des écarts de grande amplitude. Il ne peut donc pas être exclu que des différences réelles entre systèmes soient restées indétectables.

La troisième est temporelle. Les mesures correspondent à une seule campagne, réalisée entre la mi-mars et la mi-avril, alors que Ks est une grandeur dynamique qui évolue au cours de la saison (section 2.1.4). Elles caractérisent donc l'état du sol à une date donnée, et non un état moyen du système. S'y ajoute le fait que le précédent cultural diffère entre les systèmes : l'effet mesuré est celui d'un système à un moment précis de sa rotation, et non celui du système indépendamment de son précédent.

La quatrième est méthodologique. Les valeurs de Ks obtenues par Porchet sont affectées par le lissage des parois du trou de tarière et reposent sur une valeur de α issue de la littérature plutôt que déterminée sur site ; elles doivent être interprétées de façon relative, entre systèmes, et non comme des estimations absolues de la conductivité fonctionnelle du sol. De la même manière, la densité apparente déterminée par prélèvement à la tarière ne fournit que des valeurs relatives (section 4.4.4). Une anomalie subsiste par ailleurs sur la pénétrométrie du système de conservation du sol, dont la moyenne 10-25 cm diffère selon qu'elle est calculée sur les profils continus (0,95 MPa) ou sur le fichier agrégé (0,84 MPa) ; le résultat de comparaison multiple qui distingue ce système en profondeur repose sur cette seconde valeur et doit donc être considéré avec prudence.

La cinquième tient à la comparaison avec les indicateurs du CRA-W. Le VESS, l'indice Wend et l'abondance des vers de terre proviennent de parcelles distinctes de celles où K_s a été mesurée et de campagnes antérieures ; la mise en relation ne peut donc s'opérer qu'à l'échelle du système, sans appariement point à point.

Enfin, aucune donnée de ce travail ne caractérise directement le réseau poral. L'hypothèse d'une macroporosité mécanique transitoire, avancée pour expliquer la tendance observée en surface sous le conventionnel, reste par conséquent une interprétation a posteriori et non un résultat établi.

5.4.6. Perspectives

Ces limites dessinent en creux plusieurs pistes. Un renforcement de l'effort d'échantillonnage, avec davantage de points par parcelle, permettrait de mieux maîtriser la variabilité spatiale et d'améliorer la puissance des comparaisons entre systèmes ; à budget de mesures constant, la question du meilleur compromis entre nombre de points et nombre de profondeurs mériterait d'être posée explicitement. Un suivi pluriannuel et multi-dates aiderait à démêler l'effet durable des systèmes de la macroporosité transitoire du travail du sol, dont on a vu qu'elle brouille probablement le signal en surface, et permettrait d'affranchir la comparaison de l'effet du précédent cultural. Le couplage de K_s avec des méthodes moins destructrices de la macroporosité continue, tel l'infiltromètre à disque sous tension, ou avec une caractérisation directe du réseau poral par imagerie, permettrait de distinguer la macroporosité mécanique de la macroporosité biologique et, ainsi, de tester directement l'hypothèse avancée en section 5.4.2. Enfin, une acquisition des variables de matrice à la même échelle que K_s , c'est-à-dire en chaque point de mesure plutôt qu'en composite par parcelle, lèverait la principale contrainte statistique rencontrée dans ce travail.

6. Conclusion

Ce mémoire visait à préciser le potentiel et les limites de la conductivité à saturation comme indicateur de santé des sols, en articulant une réflexion méthodologique sur sa mesure et une analyse de sa sensibilité à différents systèmes de culture. La démarche a reposé sur deux campagnes de terrain complémentaires : une première, à vocation méthodologique, opposant une prairie permanente et une parcelle cultivée conventionnelle à la Ferme de Marbaix, et une seconde, à vocation agronomique, conduite sur l'essai de longue durée SYCI du CRA-W à Gembloux.

Sur le plan méthodologique, la comparaison entre la méthode Porchet et l'ISA a montré que les deux techniques fournissent des valeurs de K_s équivalentes en tendance centrale, mais qu'elles divergent là où le profil est verticalement hétérogène. Avec le biais de lissage des parois du trou, Porchet se rapproche d'un écoulement dominé par la matrice et se corrèle aux indicateurs de compaction que sont la densité apparente et la pénétrométrie, jusqu'à révéler la semelle de labour de la parcelle cultivée. L'ISA, mesure de surface, reflète au contraire un flux porté par la macroporosité, largement découplé des propriétés moyennes de la matrice. Les deux méthodes portent ainsi des biais de sens opposé, et le choix de Porchet pour la suite du travail s'est justifié par sa simplicité opératoire et par un biais systématique et documenté, étant entendu que ses valeurs doivent s'interpréter de façon relative plutôt qu'absolue.

Sur le plan agronomique, le résultat central est que K_s mesuré par Porchet ne discrimine pas les quatre systèmes de culture. Aucun effet du système n'apparaît en profondeur, et seule une tendance, à la limite de la significativité, place le système conventionnel en tête dans l'horizon de surface, un constat qui s'explique par la macroporosité de labour, transitoire et très conductrice, propre à l'horizon travaillé. Dans le même temps, les indicateurs biologiques et de stabilité structurale, notamment l'indice Wend et l'abondance des vers de terre, séparent nettement les systèmes, le zérophyto se détachant et le conventionnel demeurant en retrait. Ce découplage indique que K_s et ces indicateurs ne renseignent pas les mêmes propriétés du sol. Il se double d'un enseignement métrologique : les corrélations entre K_s et propriétés physiques, nettes lorsque le contraste était fort en première expérience, s'effacent entre des systèmes aux états physiques proches, la forte variabilité spatiale du K_s noyant alors les faibles écarts.

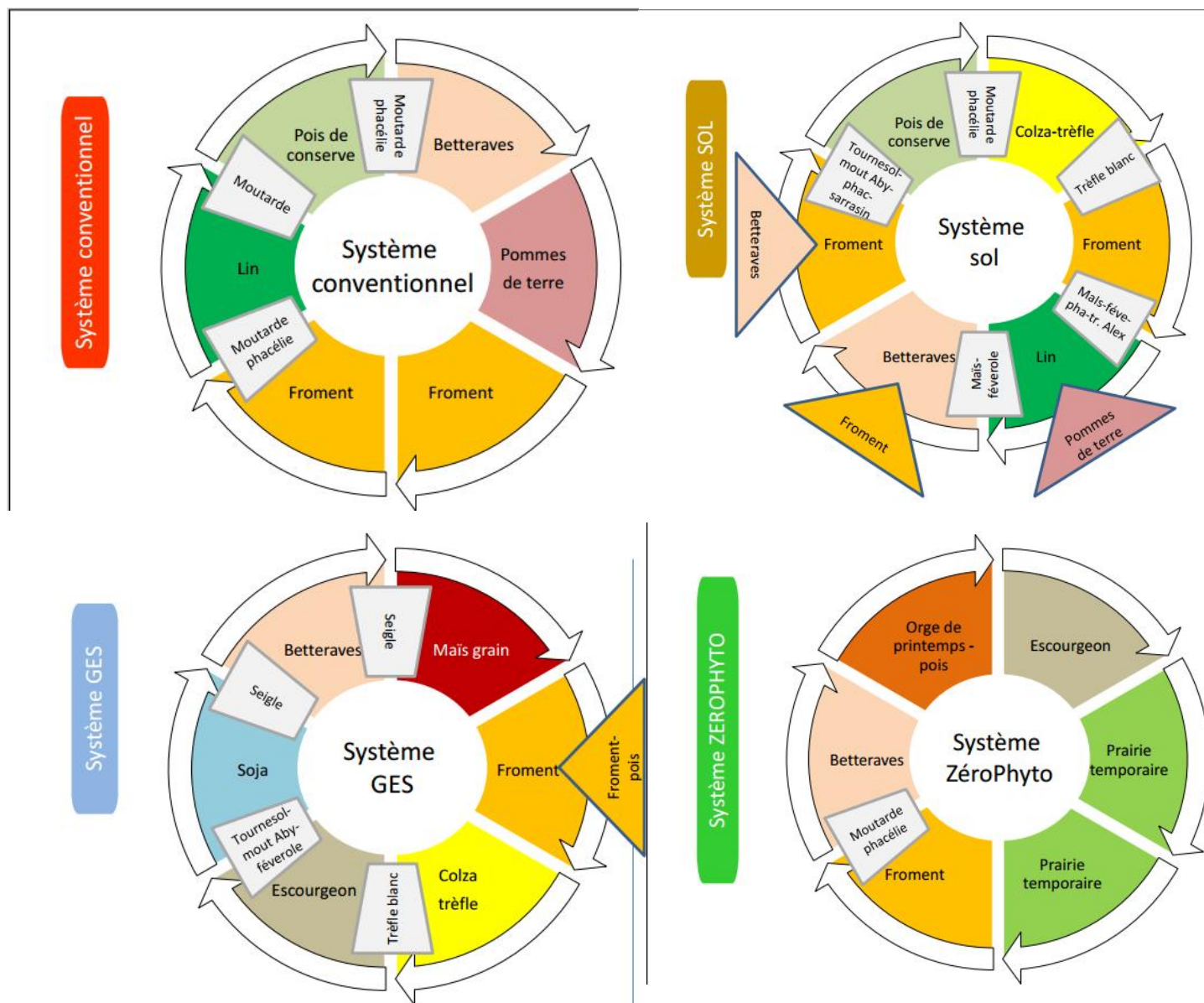
Au terme de ce travail, K_s apparaît comme un indicateur réellement intégrateur de la texture et de la structure, capable de traduire des contrastes physiques marqués tels qu'une compaction ou une semelle de labour, ce qui confirme son intérêt pour l'évaluation de la santé physique des sols. Mais sa forte variabilité spatiale, sa dépendance à la manière dont chaque méthode interagit avec la macroporosité, et sa sensibilité à l'état transitoire de l'horizon travaillé en limitent la résolution dès qu'il s'agit de hiérarchiser des systèmes aux différences ténues. Pris isolément, et particulièrement lorsqu'il est mesuré par Porchet, K_s demeure un

indicateur exigeant et dépendant de la méthode ; son interprétation gagne à s'inscrire dans un faisceau d'indicateurs croisant l'infiltration, l'état de la matrice, la structuration biologique et la stabilité des agrégats.

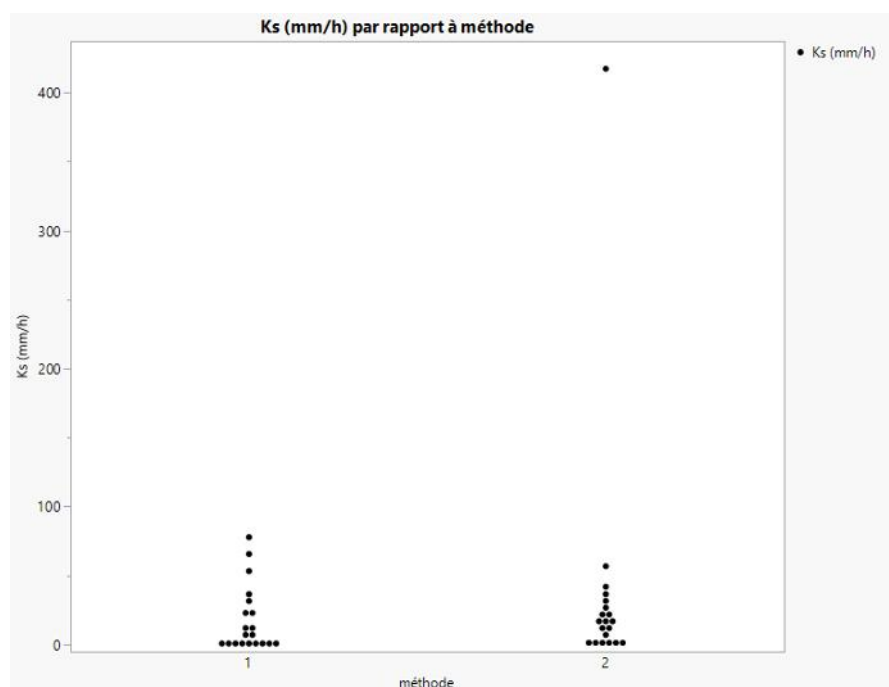
Ces conclusions ouvrent plusieurs pistes. Un effort d'échantillonnage renforcé permettrait de mieux maîtriser la variabilité spatiale du K_s , tandis qu'un suivi pluriannuel et multi-dates aiderait à distinguer l'effet durable des systèmes de la macroporosité éphémère du travail du sol. Le couplage du K_s avec des méthodes moins destructrices de la continuité macroporale, tel l'infiltromètre à disque sous tension, ou avec une caractérisation directe du réseau poral, permettrait enfin de séparer la macroporosité mécanique de la macroporosité biologique et, ainsi, de rapprocher la mesure de la conductivité des dimensions de la santé du sol que les indicateurs biologiques révèlent.

Annexes

Annexe 1 : Schéma rotation des différents systèmes SYCI. Partager par Briec Hardy (CRA-W)



Annexe 2 : Graphique de la distribution des valeurs de Ks mesurées dans la parcelle cultivée pour les mesures réalisées à la ferme de Marbaix. Ce graphique met en évidence la valeur du point CG4 0-15 cm comme extrême par rapport au reste des mesures.



Annexe 3 : Sorties détaillées des modèles mixtes sur Log10(Ks) — expérience 1

Modèles mixtes ajustés séparément pour la prairie et la culture. Effets fixes : profondeur (0-15 / 15-30 cm), méthode (Porchet / ISA) et leur interaction. Effets aléatoires : identifiant et trou. Estimation par maximum de vraisemblance restreint (REML), degrés de liberté du dénominateur approximatés par la méthode de Satterthwaite.

Tableau A.1. Qualité d'ajustement des deux modèles

Statistique	Prairie	Culture
R ²	-0,003	0,71
R ² ajusté	-0,087	0,689
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,827	0,694
Moyenne de la réponse Log10(Ks)	0,896	0,608
-2 log-vraisemblance des résidus	99,87	99,39
Nombre d'observations	40	39

Le R^2 très légèrement négatif obtenu en prairie traduit une part de variance attribuable aux effets fixes nulle, ou du moins indiscernable de zéro. La différence d'observation vient de la valeur extrême écartée.

Tableau A.2. Tests des effets fixes

Couvert	Source	DL dén.	Rapport F	Prob. > F
Prairie	Profondeur	18	7,77	0,012 *
Prairie	Méthode	9	0,39	0,55
Prairie	Profondeur × méthode	18	0,06	0,80
Culture	Profondeur	17,7	28,26	< 0,0001 *
Culture	Méthode	9,1	2,10	0,18
Culture	Profondeur × méthode	17,7	10,54	0,005 *

* effet significatif au seuil $\alpha = 0,05$. DL dén. : degrés de liberté du dénominateur (approximation de Satterthwaite).

Tableau A.3. Estimations des coefficients des effets fixes

Couvert	Terme	Estimation	Erreur standard	DL dén.	t	Prob. > t
Prairie	Constante	0,896	0,163	9	5,49	0,0004 *
Prairie	Profondeur [0-15]	-0,364	0,131	18	-2,79	0,0122 *
Prairie	Méthode [1]	-0,055	0,087	9	-0,63	0,5454
Prairie	Profondeur [0-15] × Méthode [1]	0,033	0,131	18	0,25	0,8019
Culture	Constante	0,624	0,157	9,2	3,98	0,0030 *
Culture	Profondeur [0-15]	0,596	0,112	17,7	5,32	< 0,0001 *
Culture	Méthode [1]	-0,212	0,147	9,1	-1,45	0,1813
Culture	Profondeur [0-15] × Méthode [1]	0,364	0,112	17,7	3,25	0,0046 *

Codage des effets en écarts à la moyenne : l'écart entre les deux horizons vaut deux fois l'estimation. Il est de -0,73 unité log₁₀ en prairie (Ks environ 5 fois plus faible en 0-15 cm qu'en 15-30 cm) et de +1,19 unité log₁₀ en culture (Ks environ 16 fois plus élevée en surface).

Tableau A.4. Composantes de la variance (REML)

Couvert	Effet aléatoire	Composante	Erreur standard	IC à 95 %	p (Wald)	% du total
Prairie	Identifiant	0,190	0,130	-0,065 ; 0,446	0,1443	21,77
Prairie	Trou	-0,191	0,134	-0,454 ; 0,073	0,1562	0,00
Prairie	Résidu	0,684	0,228	0,390 ; 1,495	—	78,23
Prairie	Total	0,874	0,262	0,524 ; 1,745	—	100,00
Culture	Trou	0,179	0,218	-0,248 ; 0,605	0,4115	25,84
Culture	Identifiant	0,031	0,151	-0,265 ; 0,326	0,8391	4,43
Culture	Résidu	0,482	0,164	0,272 ; 1,077	—	69,73
Culture	Total	0,691	0,173	0,447 ; 1,209	—	100,00

Le total ne retient que les composantes positives. En prairie, la composante associée au trou est estimée négative (total incluant les estimations négatives : 0,683), ce qui indique une variabilité entre trous non distinguable de la variabilité résiduelle.

Annexe 4 : Preuves pour la similarité de résultat entre la pénétrométrie moyenne et élargie

En réalisant un modèle à effet mixte, il est possible de comparer le résultat selon chaque pénétrométrie : la comparaison directe des coefficients estimés montre qu'ils sont remarquablement proches. La constante vaut 2,136 pour la pénétrométrie moyenne élargie contre 1,977 pour la moyenne classique, l'effet de la parcelle Culture est de 0,118 contre 0,060, l'effet de la profondeur 0-15 cm est de moins 0,534 contre moins 0,660, et l'interaction Parcelles×Profondeur est de moins 0,311 contre moins 0,463. Ces écarts restent faibles au regard des erreurs standards associées, de l'ordre de 0,02 à 0,10 selon les termes.

La qualité d'ajustement est également très comparable, avec un R^2 de 0,96 pour la version élargie contre 0,93 pour la version classique, et les mêmes effets fixes ressortent significatifs dans les deux cas, à savoir la profondeur et l'interaction Parcelles×Profondeur, tandis que l'effet Parcelle seul reste non significatif dans les deux modèles.

Enfin, la décomposition de la variance suit la même hiérarchie dans les deux modèles, l'effet aléatoire "identifiant" expliquant la majorité de la variance totale, contre une part résiduelle plus faible

Annexe 5 : Modèles mixtes du Log10(Ks) par horizon — essai SYCI

Modèles mixtes ajustés séparément sur chaque horizon : effet fixe du système de culture, effet aléatoire du bloc, estimation par maximum de vraisemblance restreint (REML).

Comparaisons multiples par la méthode HSD de Tukey-Kramer. Systèmes : C = conventionnel, S = conservation du sol, G = bas GES, Z = zérophyto. Douze mesures par système et par horizon (3 blocs × 4 trous).

Tableau A.5. Qualité d'ajustement des deux modèles

Statistique	Horizon 0-10 cm	Horizon 10-25 cm
R ²	-0,909	-0,119
R ² ajusté	-1,040	-0,195
Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)	0,400	0,643
Moyenne de la réponse Log10(Ks)	2,173	1,853
-2 log-vraisemblance des résidus	50,23	96,31
Nombre d'observations	48	48

Les valeurs de R² sont négatives parce que la composante de variance associée au bloc est elle-même estimée négative (tableau A.6) : la part de variance attribuable à la structure du modèle est nulle, ou du moins indiscernable de zéro. Ces valeurs ne doivent pas être interprétées comme des coefficients de détermination usuels.

Tableau A.6. Composantes de la variance (REML)

Horizon	Effet aléatoire	Composante	Erreur standard	IC à 95 %	p (Wald)	% du total
0-10 cm	Bloc	-0,010	0,002	-0,014 ; -0,005	< 0,0001	0,00
0-10 cm	Résidu	0,160	0,035	0,109 ; 0,258	—	100,00
0-10 cm	Total	0,160	0,035	0,109 ; 0,258	—	100,00
10-25 cm	Bloc	-0,018	0,010	-0,037 ; 0,001	0,0679	0,00
10-25 cm	Résidu	0,413	0,090	0,281 ; 0,667	—	100,00
10-25 cm	Total	0,413	0,090	0,281 ; 0,667	—	100,00

Le total ne retient que les composantes positives (totaux incluant les estimations négatives : 0,150 en 0-10 cm et 0,395 en 10-25 cm). La composante du bloc est estimée négative aux deux profondeurs, ce qui indique une variabilité entre blocs non distinguable de la variabilité résiduelle.

Tableau A.7. Test de l'effet fixe du système de culture

Horizon	Source	DL num.	DL dén.	Rapport F	Prob. > F
0-10 cm	Système de culture	3	42	3,066	0,0382 *
10-25 cm	Système de culture	3	42	0,230	0,8750

* effet significatif au seuil $\alpha = 0,05$. DL dén. : degrés de liberté du dénominateur (approximation de Satterthwaite).

Tableau A.8. Moyennes des moindres carrés du Log10(Ks) par système de culture

Horizon	Système	Estimation	Erreur standard	DL	IC à 95 %
0-10 cm	C — conventionnel	2,458	0,101	42,9	2,255 ; 2,661
0-10 cm	S — conservation du sol	2,033	0,101	42,9	1,830 ; 2,235
0-10 cm	G — bas GES	2,026	0,101	42,9	1,824 ; 2,229
0-10 cm	Z — zérophyto	2,173	0,101	42,9	1,970 ; 2,376
10-25 cm	C — conventionnel	1,795	0,169	41,8	1,455 ; 2,136
10-25 cm	S — conservation du sol	1,966	0,169	41,8	1,625 ; 2,306
10-25 cm	G — bas GES	1,770	0,169	41,8	1,430 ; 2,111
10-25 cm	Z — zérophyto	1,882	0,169	41,8	1,542 ; 2,223

Tableau A.9. Comparaisons par paire (HSD de Tukey-Kramer)

Horizon	Paire	Différence	Erreur standard	t	Prob. > t	IC à 95 %
0-10 cm	C - G	0,432	0,163	2,65	0,0535	-0,005 ; 0,868
0-10 cm	C - S	0,425	0,163	2,61	0,0585	-0,011 ; 0,862
0-10 cm	C - Z	0,285	0,163	1,75	0,3135	-0,152 ; 0,721

Horizon	Paire	Différence	Erreur standard	t	Prob. > t	IC à 95 %
0-10 cm	G - S	-0,006	0,163	-0,04	1,0000	-0,443 ; 0,430
0-10 cm	G - Z	-0,147	0,163	-0,90	0,8049	-0,583 ; 0,290
0-10 cm	S - Z	-0,141	0,163	-0,86	0,8247	-0,577 ; 0,296
10-25 cm	C - G	0,025	0,262	0,10	0,9997	-0,677 ; 0,727
10-25 cm	C - S	-0,170	0,262	-0,65	0,9152	-0,872 ; 0,531
10-25 cm	C - Z	-0,087	0,262	-0,33	0,9873	-0,789 ; 0,615
10-25 cm	G - S	-0,195	0,262	-0,75	0,8782	-0,897 ; 0,506
10-25 cm	G - Z	-0,112	0,262	-0,43	0,9735	-0,814 ; 0,590
10-25 cm	S - Z	0,083	0,262	0,32	0,9887	-0,618 ; 0,785

Quantile de Tukey = 2,675 ; degrés de liberté ajustés = 42,0. Aucune différence n'est significative au seuil $\alpha = 0,05$: tous les intervalles de confiance contiennent zéro. Les deux écarts impliquant le conventionnel en 0-10 cm sont toutefois proches du seuil.

Bibliographie

- Adhikari, K., & Hartemink, A. E. (2016). Linking soils to ecosystem services — A global review. *Geoderma*, 262, 101-111. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>
- Alaoui, A., Lipiec, J., & Gerke, H. H. (2011). A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation : A hydrodynamic perspective. *Soil and Tillage Research*, 115-116, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.06.002>
- Alaoui, A., Rogger, M., Peth, S., & Blöschl, G. (2018). Does soil compaction increase floods? A review. *Journal of Hydrology*, 557, 631-642. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.052>
- Angulo-Jaramillo, R., Bagarello, V., Iovino, M., & Lassabatere, L. (2016). *Infiltration Measurements for Soil Hydraulic Characterization*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-31788-5>
- Basche, A. D., & DeLonge, M. S. (2019). Comparing infiltration rates in soils managed with conventional and alternative farming methods : A meta-analysis. *PLOS ONE*, 14(9), e0215702. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215702>
- Ball, B. C., Batey, T., & Munkholm, L. J. (2007). Field assessment of soil structural quality – a development of the Peerkamp test. *Soil Use and Management*, 23(4), 329-337. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2007.00102.x>
- Blanco-Canqui, H., & Ruis, S. J. (2020). Cover crop impacts on soil physical properties : A review. *Soil Science Society of America Journal*, 84(5), 1527-1576. <https://doi.org/10.1002/saj2.20129>
- Bormann, H., & Klaassen, K. (2008). Seasonal and land use dependent variability of soil hydraulic and soil hydrological properties of two Northern German soils. *Geoderma, Modelling Pedogenesis*, 145(3), 295-302. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.03.017>
- Bottinelli, N., Henry-des-Tureaux, T., Hallaire, V., Mathieu, J., Benard, Y., Duc Tran, T., & Jouquet, P. (2010). Earthworms accelerate soil porosity turnover under watering conditions. *Geoderma*, 156(1), 43-47. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.01.006>
- Bouwer, H. (1966). Rapid field measurement of air entry value and hydraulic conductivity of soil as significant parameters in flow system analysis. *Water Resources Research*, 2(4), 729-738. <https://doi.org/10.1029/WR002i004p00729>
- Capowiez, Y., et al. (2012). Role of earthworms in regenerating soil structure after compaction in reduced tillage systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 55, 93-103. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.06.013>
- Chen, G., & Weil, R. R. (2010). Penetration of cover crop roots through compacted soils. *Plant and Soil*, 331(1), 31-43. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0223-7>
- Chiffres clés de l'agriculture belge | Statbel. Consulté 1 juin 2026, à l'adresse <https://statbel.fgov.be/fr/propos-de-statbel/que-faisons-nous/visualisations/chiffres-cles-de-lagriculture-belge>

Dominati, E., Patterson, M., & Mackay, A. (2010). A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics*, 69(9), 1858-1868. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.05.002>

Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. In J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, & B. A. Stewart (Éds.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment* (SSSA Special Publication 35, p. 1-21). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1>

Elrick, D. E., & Reynolds, W. D. (1992). Methods for Analyzing Constant-Head Well Permeameter Data. *Soil Science Society of America Journal*, 56(1), 320-323. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600010052x>

European Commission. (2021). EU Soil Strategy for 2030 Reaping the Benefits of Healthy Soils for People, Food, Nature and Climate (2021). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021DC0699>

Evrard, O., Biélers, C. L., Vandaele, K., & van Wesemael, B. (2007). Spatial and temporal variation of muddy floods in central Belgium, off-site impacts and potential control measures. *CATENA*, 70(3), 443-454. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.11.011>

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2015). Status of the World's Soil Resources.

Guimarães, R. M. L., Ball, B. C., & Tormena, C. A. (2011). Improvements in the visual evaluation of soil structure. *Soil Use and Management*, 27(3), 395-403. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00354.x>

Hardie, M. A., Cotching, W. E., Doyle, R. B., Holz, G., Lisson, S., & Mattern, K. (2011). Effect of antecedent soil moisture on preferential flow in a texture-contrast soil. *Journal of Hydrology*, 398(3), 191-201. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.12.008>

Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations*. Academic Press.

Institut Royal Météorologique de Belgique. (2020). *Rapport climatique 2020 : du global au local*. IRM. <https://www.meteo.be/fr/climat/changement-climatique-en-belgique/les-rapports-climatiques>

Jarvis, N. J. (2007). A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores : Principles, controlling factors and consequences for water quality. *European Journal of Soil Science*, 58(3), 523-546. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2007.00915.x>

Jarvis, N., Koestel, J., Messing, I., Moeys, J., & Lindahl, A. (2013). Influence of soil, land use and climatic factors on the hydraulic conductivity of soil. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(12), 5185-5195. <https://doi.org/10.5194/hess-17-5185-2013>

Jury, W. A., & Horton, R. (2004). *Soil Physics* (6^e éd.). John Wiley & Sons.

Keesstra, S. D., Bouma, J., Wallinga, J., Tittonell, P., Smith, P., Cerdà, A., Montanarella, L., Quinton, J. N., Pachepsky, Y., van der Putten, W. H., Bardgett, R. D., Moolenaar, S., Mol, G., Jansen, B., & Fresco, L. O. (2016). The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *SOIL*, 2(2), 111-128. <https://doi.org/10.5194/soil-2-111-2016>

- Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R., & Or, D. (2019). Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*, 194, 104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
- King, A. E., & Blesh, J. (2018). Crop rotations for increased soil carbon : Perenniality as a guiding principle. *Ecological Applications*, 28(1), 249-261. <https://doi.org/10.1002/eap.1648>
- Lassabatère, L., Angulo-Jaramillo, R., Soria Ugalde, J. M., Cuenca, R., Braud, I., & Haverkamp, R. (2006). Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments—BEST. *Soil Science Society of America Journal*, 70(2), 521-532. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0026>
- Le Bissonnais, Y. (1996). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility : I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47(4), 425-437. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01843.x>
- Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I., & Rillig, M. C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(10), 544-553. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0080-8>
- Lipiec, J., & Hatano, R. (2003). Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, Quantifying agricultural management effects on soil properties and processes, 116(1), 107-136. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00097-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00097-1)
- Mallants, D., Mohanty, B. P., Jacques, D., & Feyen, J. (1996). Spatial variability of hydraulic properties in a multi-layered soil profile. *Soil Science*, 161(3), 167-181. <https://doi.org/10.1097/00010694-199603000-00003>
- Millennium Ecosystem Assessment (Éd.). (2005). *Ecosystems and human well-being : Synthesis*. Island Press.
- Minasny, B., & McBratney, A. B. (2018). Limited effect of organic matter on soil available water capacity. <https://doi.org/10.1111/ejss.12475>
- Mondal, S., & Chakraborty, D. (2022). Global meta-analysis suggests that no-tillage favourably changes soil structure and porosity. *Geoderma*, 405, 115443. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115443>
- Novák, V., Kňava, K., & Šimůnek, J. (2011). Determining the influence of stones on hydraulic conductivity of saturated soils using numerical method. *Geoderma*, 161(3), 177-181. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.016>
- Or, D., Keller, T., & Schlesinger, W. H. (2021). Natural and managed soil structure : On the fragile scaffolding for soil functioning. *Soil and Tillage Research*, 208, 104912. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104912>
- Orgiazzi, A., Ballabio, C., Panagos, P., Jones, A., & Fernández-Ugalde, O. (2018). LUCAS Soil, the largest expandable soil dataset for Europe : A review. *European Journal of Soil Science*, 69(1), 140-153. <https://doi.org/10.1111/ejss.12499>
- Panagos, P., Ballabio, C., Poesen, J., Lugato, E., Scarpa, S., Montanarella, L., & Borrelli, P. (2020). A Soil Erosion Indicator for Supporting Agricultural, Environmental and Climate Policies in the European Union. *Remote Sensing*, 12(9), 1365. <https://doi.org/10.3390/rs12091365>

- Porchet, M., & Laferrère, H. (1935). Détermination des caractéristiques hydrodynamiques des sols en place. *Annales du Ministère de l'Agriculture (France)*, 64, 5-68.
- Reichert, J. M., Suzuki, L. E. A. S., Reinert, D. J., Horn, R., & Håkansson, I. (2009). Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil and Tillage Research*, 102(2), 242-254. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002>
- Reynolds, W. D., Bowman, B. T., Brunke, R. R., Drury, C. F., & Tan, C. S. (2000). Comparison of Tension Infiltrometer, Pressure Infiltrometer, and Soil Core Estimates of Saturated Hydraulic Conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 64(2), 478-484. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.642478x>
- Reynolds, W. D., Bowman, B. T., Drury, C. F., Tan, C. S., & Lu, X. (2002). Indicators of good soil physical quality : Density and storage parameters. *Geoderma*, 110(1), 131-146. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00228-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00228-8)
- Reynolds, W. D., Drury, C. F., Tan, C. S., Fox, C. A., & Yang, X. M. (2009). Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152(3), 252-263. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009>
- Reynolds, W. D., & Elrick, D. E. (1985). In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α -parameter using the Guelph permeameter. *Soil Science*, 140(4), 292-302. <https://doi.org/10.1097/00010694-198510000-00008>
- Reynolds, W. D., & Elrick, D. E. (1990). Pondered Infiltration From a Single Ring : I. Analysis of Steady Flow. *Soil Science Society of America Journal*, 54(5), 1233-1241. <https://doi.org/10.2136/sssaj1990.03615995005400050006x>
- Ritter, A., Hupet, F., Muñoz-Carpena, R., Lambot, S., & Vanclooster, M. (2003). Using inverse methods for estimating soil hydraulic properties from field data as an alternative to direct methods. *Agricultural Water Management*, 59(2), 77-96. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00160-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00160-9)
- Schjønning, P., & Rasmussen, K. J. (2000). Soil strength and soil pore characteristics for direct drilled and ploughed soils. *Soil and Tillage Research*, 57(1), 69-82. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00149-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00149-5)
- Schjønning, P., van den Akker, J. J. H., Keller, T., Greve, M. H., Lamandé, M., Simojoki, A., Stettler, M., Arvidsson, J., & Breuning-Madsen, H. (2015). Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) analysis and risk assessment for soil compaction — A European perspective. In D. L. Sparks (Éd.), *Advances in Agronomy* (Vol. 133, p. 183-237). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.06.001>
- Spurgeon, D. J., Keith, A. M., Schmidt, O., Lammertsma, D. R., & Faber, J. H. (2013). Land-use and land-management change : Relationships with earthworm and fungi communities and soil structural properties. *BMC Ecology*, 13, 46. <https://doi.org/10.1186/1472-6785-13-46>
- Sobieraj, J. A., Elsenbeer, H., & Cameron, G. (2004). Scale dependency in spatial patterns of saturated hydraulic conductivity. *CATENA*, 55(1), 49-77. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(03\)00090-0](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(03)00090-0)

- Strudley, M. W., Green, T. R., & Ascough, J. C. (2008). Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil and Tillage Research*, 99(1), 4-48. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.01.007>
- Tóth, B., Weynants, M., Nemes, A., Makó, A., Bilas, G., & Tóth, G. (2015). New generation of hydraulic pedotransfer functions for Europe. *European Journal of Soil Science*, 66(1), 226-238. <https://doi.org/10.1111/ejss.12192>
- Van den Akker, J., & Schjønning, P. (2004). Subsoil compaction and ways to prevent it. In *Managing soil quality; challenges in modern agriculture* (p. 163-184). <https://doi.org/10.1079/9780851996714.0163>
- Vanwindekens, F. M., & Hardy, B. F. (2023). The QuantiSlakeTest, measuring soil structural stability by dynamic weighing of undisturbed samples immersed in water. *SOIL*, 9(2), 573-591. <https://doi.org/10.5194/soil-9-573-2023>
- Warrick, A. W., & Nielsen, D. R. (1980). Spatial variability of soil physical properties in the field. In D. Hillel (Éd.), *Applications of Soil Physics* (p. 319-344). Academic Press.
- Watson, K. W., & Luxmoore, R. J. (1986). Estimating Macroporosity in a Forest Watershed by use of a Tension Infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 50(3), 578-582. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000030007x>
- Weynants, M., Vereecken, H., & Javaux, M. (2009). Revisiting Vereecken Pedotransfer Functions : Introducing a Closed-Form Hydraulic Model. *Vadose Zone Journal*, 8(1), 86-95. <https://doi.org/10.2136/vzj2008.0062>
- Weynants, M., Montanarella, L., Tóth, G., Arnoldussen, A., Anaya Romero, M., Bilas, G., Børresen, T., Cornelis, W., Daroussin, J., Gonçalves, M., Hannam, J., Haugen, L. E., Hennings, V., Houšková, B., Iovino, M., Javaux, M., Keay, C. A., Kätterer, T., Kværnø, S., ... Wösten, H. (2013). *European HYdropedological Data Inventory (EU-HYDI)* (Report EUR 26053 EN). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2788/5936>
- Williams, S. M., & Weil, R. R. (2004). Crop Cover Root Channels May Alleviate Soil Compaction Effects on Soybean Crop. *Soil Science Society of America Journal*, 68(4), 1403-1409. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.1403>
- Wooding, R. A. (1968). Steady Infiltration from a Shallow Circular Pond. *Water Resources Research*, 4(6), 1259-1273. <https://doi.org/10.1029/WR004i006p01259>
- Yan, F., & Arthur, E. (2025). Cover crops alter soil physicochemical properties : A global meta-analysis. *Geoderma*, 460, 117436. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117436>

La conductivité hydraulique à saturation : comparaison de méthodes de mesure et utilisation comme indicateur physique de la santé du sol

Hugo Taburiaux

La conductivité hydraulique à saturation (K_s) contrôle la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol et conditionne, à ce titre, le ruissellement et l'érosion, deux enjeux amplifiés par l'intensification agricole et le changement climatique. Bien qu'elle soit un candidat naturel parmi les indicateurs de santé physique des sols, sa mesure sur le terrain reste délicate : les nombreuses méthodes disponibles ne sollicitent pas le sol de la même manière et peuvent fournir des valeurs sensiblement différentes.

Ce mémoire aborde la détermination de K_s sous un double angle. Il compare d'abord deux méthodes de mesure courantes, l'essai Porchet et l'infiltromètre à simple anneau (ISA), afin d'évaluer leur concordance sur des sols à usages contrastés. Il explore ensuite le potentiel de K_s comme indicateur de santé du sol, en étudiant sa sensibilité à des systèmes de culture contrastés et sa mise en relation avec d'autres indicateurs physiques et biologiques.

La démarche s'appuie sur deux campagnes de terrain. La première, à vocation méthodologique, oppose une prairie permanente et une parcelle cultivée à la ferme de Marbaix. La seconde, à vocation agronomique, est conduite sur l'essai de longue durée SYCI du CRA-W à Gembloux, qui compare quatre systèmes de culture.

Porchet et ISA fournissent des valeurs équivalentes en tendance centrale, mais divergent dès que le profil est verticalement hétérogène : Porchet, plus proche d'un écoulement matriciel, se corrèle aux indicateurs de compaction, tandis que l'ISA reflète un flux porté par la macroporosité de surface, largement découplé de l'état moyen de la matrice. Sur l'essai SYCI, K_s mesuré par Porchet ne discrimine pas les quatre systèmes de culture, hormis une tendance non significative en surface. À l'inverse, des indicateurs biologiques et structuraux comme l'indice de stabilité Wend et l'abondance des vers de terre séparent nettement les systèmes.

K_s apparaît ainsi comme un indicateur intégrateur, capable de révéler des contrastes physiques marqués, mais dont la forte variabilité spatiale et la dépendance à la méthode limitent la résolution face à des systèmes aux différences ténues. Son interprétation gagne à s'inscrire dans un faisceau croisant infiltration, état de la matrice et indicateurs biologiques.