



Propriétés physiques des sols : recherche sur l'état de la technique des méthodes de détermination et des appareils.

Rapport du CCSols n°1

Lena Weiss, Selina Lutz
Thomas Keller, Peter Weisskopf

Agroscope, Zürich
Agroécologie et environnement
Groupe de recherche «Qualité et utilisation du sol»

Version finale, janvier 2021

Impressum

Auteurs : Lena Weiss, Selina Lutz, Dr. Thomas Keller et Dr. Peter Weisskopf, Agroscope, Groupe de recherche Qualité et utilisation du sol

Date de parution : 2021

Éditeur : Centre de compétences sur les sols (CCSols), ccsols.ch.

Le CCSols travaille sur mandat de trois offices fédéraux : l'OFEV (Office fédéral de l'environnement), l'OFAG (Office fédéral de l'agriculture) et l'ARE (Office fédéral du développement territorial), et est rattaché à la Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires (HAFL) de la Haute école spécialisée bernoise (BFH) de Zollikofen.

Direction du projet : Sandra Racine et Dr. Armin Keller, CCSols

Expert externe : Dr Markus Berli, Associate Research Professor am Desert Research Institute à Las Vegas

Mise en page : Magma Branding, Sandrainstrasse 3, 3007 Berne, magma-branding.ch

Traduction : André Carruzzo et Emilie Carrera

Citation recommandée : Weiss L., S. Lutz, T. Keller et P. Weisskopf (2021): Propriétés physiques des sols : recherche sur l'état de la technique des méthodes de détermination et des appareils. Groupe de recherche Qualité et utilisation du sol CCSols, Rapport n° 1 BFH-HAFL, CH-3052 Zollikofen-Berne, disponible sous www.ccsols.ch

Remarque : Le présent rapport a été rédigé sur mandat du CCSols. Les auteurs sont seuls responsables du contenu.

Copyright : Conformément au symbole de licence ci-dessous, la reproduction non commerciale du rapport est souhaitée, mais avec indication de la source et envoi d'un exemplaire justificatif à l'éditeur. Le partage est soumis aux mêmes conditions de licence.



Table des matières

1. Introduction et contexte	5
2. Méthodologie de la recherche	7
2.1. Structure du tableau Excel	7
3. Résultats	9
3.1. Masse volumique apparente	9
3.1.1. Degré de compaction (degree of compactness)	14
3.2. Masse volumique réelle	14
3.3. Pierrosité	16
3.4. Espace poral du sol : volume total des pores et distribution de la taille des pores	17
3.5. Conductivité à l'air	23
3.6. Conductivité hydraulique à saturation	24
3.7. Taux d'infiltration de l'eau	27
3.8. Force de succion	31
3.9. Teneur en eau	34
3.10. Réserve utile	37
3.11. Niveau de la nappe	37
3.12. Potentiel d'oxydoréduction (potentiel redox)	38
3.13. Résistance à la pénétration	39
3.14. Comportement de retrait du sol	40
3.15. Stabilité des agrégats	42
3.16. Évaluation visuelle de la structure	44
4. Discussion et conclusion	47
4.1. Masse volumique apparente	47
4.1.1. Degré de compaction (degree of compactness)	49
4.2. Masse volumique réelle	49
4.3. Pierrosité	50
4.4. Espace poral du sol : volume total des pores et distribution de la taille des pores	51
4.5. Conductivité à l'air	53
4.6. Conductivité hydraulique à saturation	54
4.7. Taux d'infiltration de l'eau	56
4.8. Force de succion	57
4.9. Teneur en eau	58
4.10. Réserve utile	59
4.11. Niveau de la nappe	59
4.12. Potentiel d'oxydoréduction (potentiel redox)	60
4.13. Résistance à la pénétration	61
4.14. Comportement de retrait du sol	62
4.15. Stabilité des agrégats	63
4.16. Évaluation visuelle de la structure	64
4.17. Aperçu des méthodes de mesure recommandées	65
4.18. Remarques finales	66
7. Bibliographie	72
8. Annexe	82
8.1. Tableau d'évaluation des méthodes de détermination	82
8.2. Exemple de succession d'opérations en laboratoire sur des échantillons en cylindres de sol non perturbé	86

Avant-propos



Pour garantir une utilisation durable du sol en Suisse, il est impérativement nécessaire de relever les propriétés et la qualité des sols dans leur profondeur à l'aide de cartographies des sols. Dans ce contexte, il convient d'étudier quelles options pourraient permettre à l'avenir de réaliser une cartographie selon les techniques les plus récentes, et de déterminer les besoins en données pédologiques ainsi que les coûts qui en résultent pour le relevé. Des méthodes de détermination efficaces et économiquement avantageuses des propriétés chimiques, physiques et biologiques des sols revêtent à cet égard une grande importance pour une protection efficace de ceux-ci.

Jusqu'ici, l'objectif premier des cartographies des sols était de pouvoir estimer leur aptitude à la production agricole. À l'avenir, il s'agira également d'accorder une plus grande attention aux besoins croissants des autres utilisateurs d'informations pédologiques. Parmi ceux-ci figurent notamment les domaines de l'aménagement du territoire, du climat, de la protection contre les crues, de la protection du sol et de la nature, de la sylviculture et de la biodiversité. Cette situation entraîne de nouvelles exigences quant aux propriétés pédologiques à relever dans une cartographie des sols.

Cependant, le besoin plus important en informations pédologiques se heurte en général aux coûts relativement élevés des travaux sur le terrain et des analyses des propriétés des sols. C'est pourquoi le développement de méthodes de mesure plus économiques, aussi bien utilisables sur le terrain qu'en laboratoire, joue un rôle déterminant. En ce sens, l'étude du groupe de recherche « Qualité et utilisation du sol » de l'Agroscope sur l'état actuel de la technique des méthodes de détermination des propriétés physiques des sols représente une base importante. Ce rapport s'adresse en premier lieu aux services et laboratoires cantonaux, mais peut aussi se révéler utile pour les hautes écoles, les instituts de recherche et les bureaux d'ingénieurs.

Je remercie les auteurs pour ce travail réussi et espère qu'il aidera à développer le relevé des données pédologiques.

Dr. Armin Keller
Directeur du CCSols

1. Introduction et contexte

Le Centre de compétences sur les sols (CCSols), qui est rattaché à la Haute école spécialisée bernoise (BFH), a principalement pour objectif d'harmoniser les méthodes de relevé et d'analyse de diverses propriétés pédologiques. C'est une condition nécessaire pour pouvoir réaliser des cartographies uniformes sur l'ensemble du territoire, et relever en même temps les caractéristiques ainsi que la qualité du sol.

Dans ce contexte, il s'agit d'établir quelles sont les méthodes de détermination disponibles pour la réalisation d'une cartographie à l'échelle du territoire et quels sont les coûts et le temps de travail occasionnés par ces relevés pédologiques. Toutes les étapes sont étudiées, depuis le prélèvement, la préparation des échantillons et une éventuelle extraction, jusqu'à la mesure proprement dite. Les propriétés pédologiques à déterminer sont subdivisées en paramètres chimiques, biologiques et physiques. Une liste des propriétés à étudier a été établie au préalable par le CCSols sur la base d'une analyse des besoins. Le groupe de recherche «Qualité et utilisation du sol» de l'Agroscope a été chargé de rechercher des méthodes possibles et appropriées ainsi que des solutions techniques pour tous les paramètres physiques du sol figurant sur la liste (tableau 1). Un tableau Excel a été établi afin de donner une meilleure vue d'ensemble des méthodes disponibles et de l'état de la technique. Par la même occasion, une procédure d'évaluation du temps de travail et des coûts des méthodes de détermination a été élaborée de manière à pouvoir planifier efficacement l'utilisation pertinente de ces méthodes de physique des sols dans la cartographie à grande échelle.

Lors de la détermination de propriétés physiques des sols, le résultat peut être influencé non seulement par la méthode de mesure, mais aussi par le prélèvement et la préparation des échantillons, qui jouent en l'occurrence un rôle décisif. Les caractéristiques physiques sont souvent des grandeurs dynamiques, c'est-à-dire qui se modifient considérablement au cours d'une année. C'est pourquoi la date du prélèvement ou de la mesure sur le terrain doit être soigneusement choisie.

Le besoin en informations pédologiques plus vastes se heurte aux coûts considérables des analyses en laboratoire des propriétés des sols. Les fonctions de pédotransfert, qui permettent d'évaluer certaines propriétés des sols à l'aide de fonctions et de modèles empiriques basés sur des données pédologiques facilement disponibles (p. ex. la texture), représentent à cet égard une alternative avantageuse. La majorité d'entre elles sont soit encore en phase de développement, soit leur validité n'a pas encore été attestée pour les conditions suisses. C'est pourquoi le présent travail se concentre sur les méthodes de mesure directes des propriétés physiques des sols.

Propriétés physiques des sols

1. Propriétés prioritaires

(au sens d'un grand nombre de mesures sur des profils et des sondages ou pour des profils de référence)

- _ Masse volumique apparente
- _ Porosité totale et distribution de la taille des pores

Profils de référence

- _ Force de succion (rétention de l'eau),
- _ Réserve utile, teneur en eau et niveau de la nappe
- _ (y compris comparaison de sondes de mesure d'humidité du sol)
- _ Conductivité hydraulique (à saturation)
- _ Taux d'infiltration de l'eau (mesuré à la surface du sol et/ou dans un trou de sondage)
- _ Pierrosité

2. Propriétés optionnelles (à discuter)

- _ Conductivité à l'air
- _ Potentiel d'oxydoréduction
- _ Évaluation de la structure
- _ Stabilité à la percolation
- _ Résistance à la pénétration (pénétromètres)
- _ Degré de compaction (Degree of compactness D)
- _ Autres ?

Tableau 1: Liste des propriétés pédologiques à étudier selon le cahier des charges du 19.12.2019 du CCSols. Au cours de ce mandat, les questions ont été légèrement adaptées ; p. ex., les paramètres de la masse volumique réelle et de la stabilité des agrégats ont été intégrés dans la recherche.

2. Méthodologie de la recherche

Dans une première étape, différentes méthodes de détermination de paramètres physiques des sols ont été sélectionnées dans diverses sources. Toutes les méthodes sont énumérées dans un tableau Excel et décrites au chapitre 3. Au total, 77 méthodes ont été recherchées, répertoriées et décrites. Au moins une méthode est présentée pour chaque paramètre prédéfini de la liste du CCSols. Les sources et outils suivants ont été utilisés à cet effet :

- Peer reviewed papers (Web of Science, Google Scholar)
- Conférences, posters et résumés de conférences scientifiques
- Recueil de méthodes d'institutions (VDLUFA, méthodes de référence et de recherche d'Agroscope)
- Guides méthodologiques et manuels («Waldböden der Schweiz», «Bodenkunde und Standortlehre», «The nature and properties of soils», «Bodenkundliches Praktikum»)
- Différentes formes de littérature grise (diverses ressources sur Internet, descriptifs internes de méthodes d'Agroscope)
- Banques de données de normes

Dans une deuxième étape, des offres portant sur des appareils et équipements ont été demandées à différents fabricants et entreprises afin de pouvoir évaluer et comparer les coûts des appareils requis par les méthodes respectives. Un prix indicatif de ces appareils est mentionné dans le tableau. Ces prix varient souvent selon la grandeur ou la capacité de l'appareil. En outre, comme les entreprises ne se trouvent pas toujours en Suisse, il faut s'attendre le cas échéant à des coûts supplémentaires pour le transport, l'importation et les droits de douane.

Dans une troisième étape, les différentes méthodes trouvées pour la détermination d'un paramètre physique du sol ont été comparées entre elles afin d'en établir les avantages et inconvénients (chapitre 4). Enfin, une recommandation quant à la méthode paraissant la plus appropriée pour une utilisation dans le cadre d'une cartographie nationale des sols a été formulée, et ce dans la mesure du possible pour chaque propriété pédologique. Pour faciliter la comparaison, un graphique présentant les évaluations des méthodes selon différents critères a été réalisé pour quelques paramètres. Les critères d'évaluation sont tirés du tableau Excel, qui est expliqué plus en détail au prochain sous-chapitre.

2.1. Structure du tableau Excel

Le tableau Excel contient les «données brutes» du présent travail. Toutes les méthodes évaluées y sont énumérées. Les méthodes sont décrites au chapitre 3, puis discutées et évaluées au chapitre 4 sous l'angle de leurs avantages et inconvénients. Les méthodes recommandées sont indiquées en caractères gras dans le tableau Excel. Voici quelques précisions sur la structure de ce tableau:

Paramètre : indique de quel paramètre il s'agit. L'ordre de classement dans le tableau Excel correspond à celui du rapport.

Méthode : dans cette colonne figure le nom de la méthode. Lorsqu'un nom spécifique a déjà été utilisé dans la littérature, celui-ci a été repris. Sinon, un nom a été défini en veillant à ce qu'il soit le plus pertinent et clair possible. Le nom utilisé dans le présent rapport est identique à celui figurant dans le tableau Excel. Il est souligné lors de sa première occurrence dans la description de la méthode. Chaque fois que cela était possible, la référence ou le numéro d'identification ont aussi été indiqués dans le tableau. Celui-ci précise également s'il s'agit d'une méthode de terrain ou de laboratoire.

Instrument de mesure : Indication de l'instrument de mesure (principal) utilisé pour la méthode. Lorsque cela était possible, le nom d'un fabricant et un prix indicatif obtenu lors d'une demande d'offre sont également mentionnés. S'il existe des données sur la précision de mesure, cette dernière est également indiquée ici.

Infrastructure : En plus de l'instrument de mesure proprement dit, d'autres appareils et ustensiles sont souvent utilisés (p. ex. pour la préparation des échantillons). C'est pourquoi une distinction est faite dans le tableau entre instrument de mesure et infrastructure. Dans la section infrastructure sont mentionnés des appareils supplémentaires nécessaires à la réalisation de la méthode, qui font souvent partie de l'équipement de base d'un laboratoire. Ici aussi, un prix indicatif a été parfois demandé aux fabricants.

Logiciel / format des données : lorsqu'un logiciel est nécessaire pour l'instrument de mesure principal, son nom et le format de données utilisé sont indiqués ici. Cependant, beaucoup d'appareils n'ont pas de logiciel spécifique et les résultats doivent être lus et notés manuellement.

Prélèvement des échantillons : suivant la méthode et la propriété physique étudiée, d'autres types d'échantillons de sol peuvent s'avérer nécessaires, ceci est précisé ici. Une distinction entre échantillon de sol perturbé et non perturbé a été faite en priorité. Le tableau indique également le nombre minimum d'échantillons par horizon jugé en général nécessaire pour obtenir une moyenne pertinente du paramètre mesuré.

Préparation de l'échantillon : si l'échantillon doit être préparé avant la mesure (séchage / tamisage), cette étape est expliquée ici. Les autres étapes de préparation nécessaires le cas échéant (p. ex. saturation de l'échantillon) sont également indiquées.

Temps de travail : une distinction est faite entre temps de travail effectif et temps d'attente. Il peut y avoir un temps d'attente, par exemple, lorsqu'un échantillon doit être saturé. Pendant cette période, seuls des contrôles occasionnels sont nécessaires sans travail de longue durée. Pour les aperçus graphiques dans la partie «Discussion», le temps de travail a toujours été évalué en tant que comparaison relative entre les méthodes.

Paramètres supplémentaires : si une méthode offre en plus la possibilité de mesurer d'autres propriétés physiques des sols, celles-ci sont mentionnées sous ce point. Il est en effet souvent possible de déterminer différents paramètres sur un même échantillon de sol. Une proposition de succession de mesures possible de différents paramètres physiques du sol avec différentes méthodes de laboratoire sur un seul et même échantillon est présentée à l'annexe 8.2.

3. Résultats

Les sous-chapitres suivants sont consacrés à la présentation individuelle de chaque paramètre du sol. Ils commencent toujours par une explication du paramètre, suivie de la description des différentes méthodes de mesure. Les comparaisons des méthodes et les recommandations correspondantes figurent au chapitre 4. On trouvera dans l'annexe (chapitre 8) le tableau récapitulatif de toutes les méthodes décrites.

3.1. Masse volumique apparente

Explication terminologique

La masse volumique apparente désigne la masse volumique d'un sol à l'état naturel. Elle est définie comme le rapport entre la masse de sol sec et le volume de sol (Weil et Brady, 2017 ; Stations fédérales de recherches agronomiques, 1996 ; Blume, Stahr et Leinweber, 2011). Le volume du sol comprend les constituants solides et les pores (Weil et Brady, 2017). En principe, la masse volumique apparente est directement mesurée sur des échantillons de sol, et formée en tant que quotient du poids sec d'un échantillon et de son volume (masse volumique apparente (g/cm³) = poids sec (g) / volume (cm³)). Suivant la granulométrie, la teneur en matière organique et l'état de la structure, les sols minéraux atteignent typiquement des masses volumiques apparentes de 0,9 g/cm³ à 1,9 g/cm³ et les sols organiques des valeurs de 0,1 g/cm³ à 0,9 g/cm³ (Weil et Brady, 2017). La masse volumique apparente est également qualifiée de densité apparente. En anglais, elle est désignée par le terme « bulk density ».

En plus de la masse volumique apparente, les régions germanophones utilisent également les paramètres de la masse volumique apparente effective (équation 1) et de la masse volumique apparente de la terre fine (équation 2). La conversion de la masse volumique apparente en masse volumique apparente effective s'effectue sur la base de la teneur en argile (Buchter et al., 2004; Weil et Brady, 2017), et vise à permettre une comparaison de la masse volumique apparente entre différentes granulométries. Dans le cas de la masse volumique apparente de la terre fine, la pierrosité (fraction >2 mm) n'est pas prise en compte, contrairement à la masse volumique apparente de l'échantillon complet. Pour la détermination de réserves, p. ex. en carbone organique lié, il faudrait toujours se baser sur la masse volumique apparente de la terre fine (Buchter et al., 2004; Weil et Brady, 2017). Dans le système de référence gravimétrique, on utilise souvent aussi la notion de « volume spécifique », qui est exprimé, à l'inverse de la masse volumique apparente, en cm³/g.

(1)

masse volumique apparente effective = (poids sec / volume) + 0.009 x teneur en argile (%)

(2)

Masse volumique
apparente
de la terre fine =
$$\frac{\text{(poids sec - poids du squelette)}}{\text{(volume de l'échantillon de sol - volume du squelette)}}$$

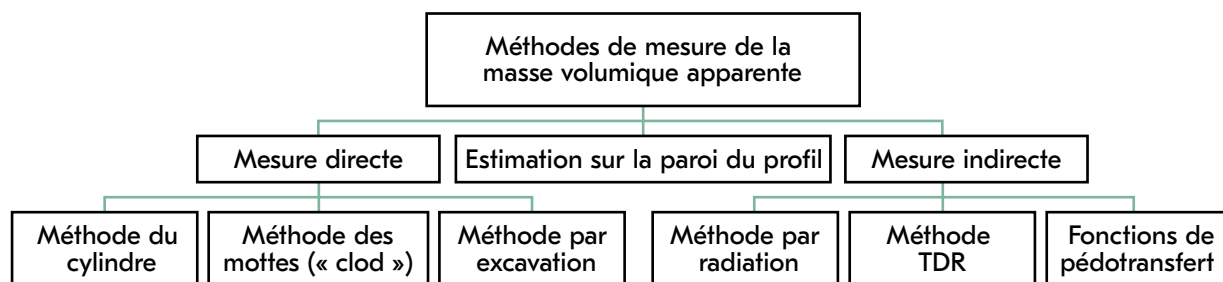


Figure 1: Aperçu des différentes méthodes de détermination de la masse volumique apparente. Graphique adapté et modifié d'après Al-Shammary et al., 2018.

La masse volumique apparente peut être mesurée selon différentes procédures, qui peuvent être classées en méthodes directes et indirectes (figure 1). Elle peut aussi être estimée directement sur la paroi du profil. En général, la principale difficulté est de parvenir à déterminer précisément le volume de l'échantillon de sol (et du squelette pour la masse volumique apparente de la terre fine).

Évaluation sur la paroi du profil

L'estimation sur la paroi du profil consiste à évaluer la masse volumique apparente directement sur le terrain par la résistance à la pénétration. Pour cela, un couteau est enfoncé dans la paroi du profil afin d'évaluer la résistance. Cette méthode ne donne toutefois qu'une estimation grossière de la masse volumique apparente (Blume, Stahr et Leinweber, 2011; Walthert et al., 2004). La masse volumique apparente peut aussi être évaluée par des mesures de la résistance à la pénétration avec un pénétromètre (point 3.13). Mais il faut tenir compte du fait que la résistance à la pénétration est fortement influencée par la teneur en eau et que par conséquent, de nombreuses informations complémentaires sont nécessaires pour la convertir en masse volumique apparente.

Mesures directes

Les mesures directes sont faciles à mettre en œuvre et c'est pour cette raison que celles-ci sont souvent utilisées par les pédologues. Les différentes méthodes directes se distinguent avant tout par le mode de mesure du volume et par le prélèvement de l'échantillon (Al-Shammary et al., 2018). Toutes les méthodes de mesure directes offrent la possibilité de déterminer en même temps la teneur en eau gravimétrique (aussi appelée teneur en eau pondérale ou massique) par pesée avant et après séchage. Le principe de la méthode du cylindre (ISO 11272:2017) est le plus couramment utilisé. Il est aussi à la base de la méthode de référence des stations fédérales de recherches agronomiques (PYZYL-F) (Stations fédérales de recherches agronomiques, 1996 ; Al-Shammary et al., 2018 ; Buchter et Häusler, 2009 ; Schwab et Gubler 2016 ; VDLUFA, 2016 ; Tian et al., 2018). Le nom donné à cette procédure varie selon le pays et l'institution. La méthode consiste à prélever un échantillon de sol non perturbé d'un volume connu, en général à l'aide d'un cylindre métallique enfoncé dans le sol (figures 2, 3 & 4). Après préparation au volume standard conformément à la méthode de référence PYZYL-PA (Stations fédérales de recherches agronomiques,



Figure 2: Enfoncement dans le sol de la sonde à percussion munie d'un cylindre pour le prélèvement d'un échantillon de sol non perturbé. Source: avec l'aimable autorisation du groupe de recherche Utilisation et protection des sols de la BFH-HAFL.



Figure 3: Échantillon en cylindre de sol non perturbé devant encore être préparé au volume normé défini. Source: avec l'aimable autorisation de Bářková, K., Matula, S. und Mihálíková, M., Faculty of Agrobiology, Food and Natural Resources Czech University of Life Sciences Prague.



Figure 4: Un échantillon en cylindre préparé exactement au volume normé à l'aide d'un couteau. Source: avec l'aimable autorisation de Bářková, K., Matula, S. und Mihálíková, M., Faculty of Agrobiology, Food and Natural Resources Czech University of Life Sciences Prague.

1996) (figure 4) l'échantillon est séché à 105°C pendant au moins 24 heures, puis pesé. Plus le volume de l'échantillon est grand, plus la méthode est représentative. La précision dépend aussi beaucoup du prélèvement et de la préparation de l'échantillon (Al-Shammary et al., 2018; Buchter et Häusler, 2015; Tian et al., 2018). Pour obtenir une moyenne fiable, il faudrait prélever de 3 à 5 échantillons par horizon. La dynamique saisonnière doit aussi être prise en considération pour l'échantillonnage. En outre, pour obtenir des échantillons de haute qualité, le prélèvement doit toujours être effectué dans des conditions d'humidité du sol favorables (dans la zone de la capacité au champ).

Une autre méthode directe mentionnée dans les normes ISO (2017) et ASTM (2015) est la méthode des mottes («Clod-Méthode») (Al-Shammary et al., 2018 ; Department of sustainable natural resources New South Wales Government, 2020). Ici, on ne prélève pas des échantillons d'un volume prédéfini, mais le volume est déterminé selon le principe de la poussée d'Archimède (autre appellation : «méthode du pesage sous immersion»). Au moins trois mottes de terre sont prélevées dans chaque horizon, puis elles sont pesées et enveloppées au laboratoire avec un matériel hydrofuge (p. ex., paraffine). Pour cela, les échantillons doivent être immergés pendant environ 24 heures dans un bain de paraffine.

Une autre solution consiste à emballer les échantillons dans un petit sachet plastique fermé sous vide d'air (fig./vidéo 5). L'échantillon est ensuite plongé dans un liquide de densité connue (généralement de l'eau), et la masse repoussée pesée à l'aide d'une balance. Il est ainsi possible de calculer le volume de l'échantillon. S'il s'agit de sols riches en argile, après la mesure du volume, les mottes doivent être séchées pendant au moins 48 heures jusqu'à atteindre un poids constant afin de pouvoir déterminer la matière sèche. Les mottes de terre utilisées pour le pesage sous immersion doivent être suffisamment stables, ce qui limite leur grandeur, et par conséquent la précision de la méthode. C'est pourquoi cette procédure de détermination de la masse volumique apparente ne convient que pour les sols à structure stable. Les valeurs mesurées sont généralement plus élevées qu'avec les autres méthodes de mesure directe (Al-Shammary et al., 2018; Department of sustainable natural resources New South Wales Government, 2020).

Lorsqu'il n'est pas possible d'utiliser la méthode du cylindre ni celle des mottes, on peut recourir à la méthode par excavation ou densitomètre (DIN 18125-2 (densitomètre) / ISO 11272:2017; Al-Shammary et al., 2018; Buchter et Häusler, 2009; VDLUFA, 2016). C'est une méthode particulièrement indiquée pour les sols très pierreux : une fosse aux

5: Vidéo de présentation de la méthode de la poche plastique (variante du pesage sous immersion)

Cette vidéo d'Agroscope montre notamment comment appliquer correctement la variante du pesage sous immersion (« Méthode de la poche plastique ») pour déterminer la masse volumique apparente d'un échantillon de sol.



Photo/vidéo : Groupe de recherche
Qualité et utilisation du sol,
Agroscope

youtube.com/watch?v=PV77qMfdbK4



côtés clairement délimités est creusée dans le sol. Les matériaux terreux excavés sont séchés au laboratoire à 105°C pendant au moins 24 heures, puis pesés afin de déterminer le poids sec. Pour calculer le volume de la fosse excavée, trois méthodes différentes peuvent en principe être utilisées :

- i) Densitomètre
- ii) La fosse est remplie de sable et on mesure le volume de sable utilisé.
- iii) La fosse est tapissée d'un matériau imperméable (p. ex. sac en plastique mince et souple d'une grandeur adéquate) et remplie d'eau jusqu'au niveau du sol environnant. La quantité d'eau utilisée est mesurée et le volume de la fosse calculé à partir de cette mesure.

Dans toutes les méthodes de détermination directe de la masse volumique apparente évoquées, la précision (au minimum 0,01g) et l'étalonnage de la balance sont d'une importance capitale pour la détermination correcte du poids sec. La balance est particulièrement importante dans la méthode des mottes, car elle sert aussi à mesurer le volume. Les résultats des méthodes utilisées sont d'autant plus représentatifs que le volume de l'échantillon évalué est grand et les répétitions nombreuses.

Mesures indirectes

Outre les méthodes directes, il existe également des méthodes indirectes qui permettent de déterminer la masse volumique apparente sans prélèvement d'échantillons de sol. Leur avantage est que le sol reste intact et que plusieurs mesures peuvent être effectuées au même endroit.

Une possibilité de mesure indirecte de la masse volumique apparente est la méthode par radiation (Al-Shammary et al., 2018). Elle permet de mesurer la masse volumique apparente du sol à partir de l'atténuation de rayons gamma émis par une source de rayonnement lors de leur passage à travers un sol («transmission»). L'atténuation du rayonnement gamma par la matrice du sol traversée est décrite par la loi de Beer-Lambert. C'est une méthode rapide et exacte, mais sa précision diminue avec

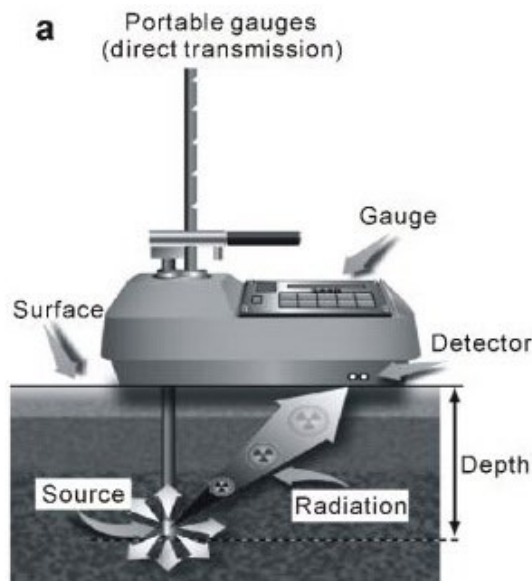


Figure 6a : Cette illustration montre un instrument de mesurage nucléaire qui mesure la transmission directe du rayonnement gamma émis. Illustration tirée de Al-Shammary et al., 2018.

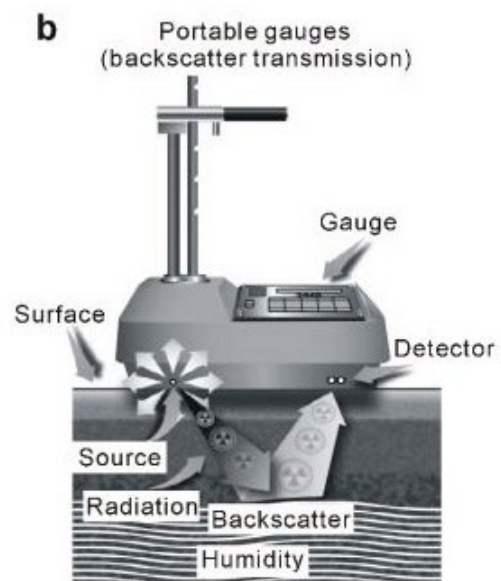


Figure 6b : Cette illustration présente un instrument de mesurage équipé d'une source de rayonnement nucléaire qui mesure la réflexion du rayonnement émis. Les deux techniques (fig. 6a et 6b) peuvent être utilisées pour déterminer la masse volumique apparente d'un sol. Illustration tirée de Al-Shammary et al., 2018.

l'augmentation de l'épaisseur du sol. C'est pourquoi elle ne devrait être utilisée que pour des couches de sol d'une épaisseur maximale de 30 cm. La «zone d'influence» de la source de rayonnement n'est pas bien définie, de sorte que l'appareil ne mesure pas toujours jusqu'à la même profondeur. C'est pourquoi la masse volumique apparente mesurée ne peut pas toujours être clairement attribuée à une profondeur de sol donnée. Cette méthode requiert un instrument équipé d'une source de rayonnement nucléaire qui mesure soit le rayonnement direct (figure 6a) soit la réflexion indirecte (figure 6b). Ces appareils sont coûteux et demandent une grande expérience de la part de l'utilisateur. En outre, des règles de sécurité renforcées doivent être respectées à cause de la source de rayonnement.

Une autre possibilité de déterminer indirectement la masse volumique apparente in situ est la méthode appelée thermo time-domain reflectometry (Thermo-TDR) (Tian et al., 2018). Elle permet de mesurer la masse volumique apparente de manière automatisée et continue directement dans le sol. Les mesures sont effectuées à l'aide de sondes thermo-TDR. Il s'agit de sondes TDR (cf. point 3.9), combinées à un capteur d'impulsions

thermiques. Elles permettent ainsi de mesurer des propriétés thermiques du sol telles que la capacité thermique (C) ou la conductivité thermique (λ). La masse volumique apparente du sol étudié est ensuite déterminée à partir de ces propriétés sur la base de la teneur en eau mesurée et de modèles (cf. Tian et al., 2018). En principe, deux différentes procédures d'évaluation peuvent être utilisées : (1) L'une consiste à déterminer la masse volumique apparente sur la base de la capacité thermique du sol («C-based») ; des erreurs relativement importantes peuvent toutefois apparaître ($R^2 = 0.32$ RMSE = 0.178 Mg m^{-3}).

(2) Une nouvelle procédure permet de déterminer la masse volumique apparente à partir de la conductivité thermique (« λ -based»). Mais elle nécessite de connaître en plus la granulométrie du sol. Cette approche est plus précise ($R^2 = 0.70$ RMSE = 0.103 Mg m^{-3}) que la méthode C-based, car elle est moins sensible à la teneur en eau. Les deux méthodes requièrent néanmoins une mesure précise de la teneur en eau (Tian et al., 2018).

3.1.1. Degré de compaction (degree of compactness)

Explication terminologique

Dans ce paramètre, la masse volumique apparente est mise en relation avec une masse volumique de référence. La masse volumique apparente (point 3.1) dépend notamment de la texture du sol, raison pour laquelle la comparaison entre compaction et masse volumique apparente n'est possible qu'entre sols de même texture. Dans le calcul de la masse volumique apparente effective, une correction est au moins faite pour la teneur en argile. C'est pour résoudre le problème de la comparabilité que l'on a introduit le paramètre du «degré de compaction» (degree of compactness), souvent abrégé DC (Buchter et al., 2004; Håkansson, 1990). Le degré de compaction est défini dans l'équation 3 et exprimé en pour cent (Håkansson, 1990). La façon de déterminer la masse volumique de référence varie toutefois selon la méthode (cf. section suivante).

$$(3) \quad DC = \frac{\text{Masse volumique}}{\text{Masse volumique de référence}} \times 100$$

Détermination du degré de compaction («degree of compactness»)

Håkansson (1990) détermine la masse volumique de référence comme la masse volumique apparente après application d'une pression de 200 kPa pendant une semaine. Pour cela, un (très gros) échan-

fillon de sol est placé dans une grande cellule œdométrique selon DIN 18135 dans des conditions drainées et soumis à une pression uniaxiale (Buchter et al., 2004 ; Naderi- Boldaji et al., 2016 ; Reichert et al., 2009 ; Håkansson 1990). Une pression de 200 kPa correspond à la pression typique d'un véhicule agricole (Naderi-Boldaji et al., 2016). La masse volumique apparente de l'échantillon de sol après pression sert de masse volumique de référence pour le calcul du degré de compaction («degree of compactness»). La masse volumique de référence selon Håkansson peut aussi être déterminée sur de plus petits échantillons ou à d'autres niveaux de pression (1990) (Reichert et al., 2009; NaderiBoldaji et al., 2016).

La masse volumique de référence peut également être déterminée par un essai Proctor. La masse volumique Proctor correspond à la masse volumique apparente maximale atteignable à une teneur en eau «optimale» (teneur en eau optimale = teneur en eau à une masse volumique proctor maximale). Elle sert de masse volumique de référence pour déterminer le degré de compaction (Naderi-Boldaji et al., 2016). Cette méthode fait appel à un appareil Proctor selon DIN 18127. Un échantillon de sol perturbé est compacté par un nombre fixe de coups appliqués avec une dame tombant d'une hauteur déterminée. La force exercée sur l'échantillon de sol peut varier selon l'essai, il existe différentes normes pour sa réalisation. L'essai Proctor est effectué à différents teneurs en eau, ce qui permet de déterminer la densité Proctor.

3.2. Masse volumique réelle

Explication terminologique

La masse volumique réelle est la masse volumique de la matière solide sèche du sol. Ici, contrairement à la masse volumique apparente, l'espace poral n'est pas pris en compte. La masse volumique réelle est exprimée habituellement en g/cm³ (Stations fédérales de recherches agronomiques, 1996 ; VDLUFA, 2016).

Mesure de la masse volumique réelle

Selon la méthode de référence PY-DR des stations fédérales de recherches agronomiques, la masse volumique réelle est mesurée sur des échantillons de sol à la structure perturbée (Stations fédérales de recherches agronomiques, 1996). Le volume de matière solide d'un échantillon de sol est calculé par gravimétrie selon le principe du déplacement d'un volume d'eau équivalent dans un pycnomètre



Figure 7: Pycnomètre à eau, disponible dans le commerce, utilisé pour la détermination de la masse volumique de corps solides. Il n'est pas nécessaire de disposer d'échantillons de sol non perturbés. Source de l'illustration : Wikimedia Commons.

à eau (figure 7). Ce volume, combiné avec le poids de la matière sèche, permet de calculer la masse volumique réelle du sol. Pour déterminer le volume de matière solide, une quantité représentative de l'échantillon de sol séché est pesée dans un pycnomètre à eau, recouverte d'eau déminéralisée et laissée reposer toute la nuit. Le jour suivant, l'échantillon est bouilli pour dégazer l'eau. Le pycnomètre à eau est ensuite complètement rempli d'eau déminéralisée et placé dans un bain-marie pour thermostatiser l'échantillon à 20 °C. Une fois cette température atteinte, on procède au pesage. La masse volumique réelle peut ensuite être calculée à partir de la pesée, de la densité de l'eau à 20 °C, du poids de la matière sèche et de la valeur-eau du pycnomètre déterminée au préalable (Stations fédérales de recherches agronomiques, 1996 ; VDLUFA, 2016).

La masse volumique réelle peut aussi être déterminée par la méthode volumétrique au moyen de xylène (VDLUFA, 2016) : une certaine quantité de sol séché est pesée dans un ballon gradué calibré. Du xylène est versé sur l'échantillon avec une burette de même volume que le ballon gradué. Les bulles d'air sont éliminées de l'échantillon de sol par agitation. Ensuite, le ballon gradué est rempli de xylène jusqu'au repère avec la burette. Le volume de matière solide correspond à la différence entre



Figure 8: Pycnomètre à air servant à déterminer la matière solide d'un échantillon de sol. Des échantillons de sol structurellement non perturbés sont nécessaires. Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de UGT GmbH.

le volume du ballon gradué et le volume de xylène utilisé, qui peut être lu sur la burette. La masse volumique réelle est calculée comme quotient de la masse de sol et du volume de matière solide (VDLUFA, 2016).

La masse volumique réelle peut également être calculée à partir du volume de matière solide mesuré au moyen d'un pycnomètre à air (point 3.4.) (figure 8). Cette méthode requiert des échantillons de sol structurellement non perturbés. Ceux-ci sont introduits à l'état sec dans l'appareil, qui mesure ensuite le volume de la matière solide. La masse de l'échantillon de sol est déterminée par pesée, et la masse volumique réelle peut ensuite être calculée en faisant le quotient de la masse et du volume (Stations fédérales de recherches agronomiques, 1996).

3.3. Pierrosité

Explication terminologique

La pierrosité désigne toutes les fractions minérales du sol («gravier et pierres») dont le diamètre est >2 mm («squelette»). Elle est exprimée soit de manière gravimétrique, soit de manière volumétrique. L'expression en pour cent de volume de pierres d'un échantillon de sol est la plus courante (Walther et al., 2004; Blume, Stahr et Leinweber, 2011; Buchter et al., 2004; Schwab et Gubler, 2016). La pierrosité est mesurée de préférence sur un échantillon en cylindre (assez grand) de sol non perturbé. Elle peut également être déterminée par une évaluation visuelle du profil. Celle-ci s'effectue sur la paroi du profil et consiste à déduire la pierrosité du sol à partir d'une estimation visuelle. On peut s'aider pour cela de différentes tables de comparaison (figure 9) (Walther et al., 2004).

Masse du squelette

Le squelette du sol étant défini comme la fraction >2 mm, il est logique de déterminer sa masse par tamisage et pesée de l'échantillon de sol. Le tamisage se fait soit à sec, soit par voie humide (Schwab et Gubler, 2016).

Pour le tamisage à sec, l'échantillon de sol est d'abord séché, puis la fraction >2 mm est séparée à l'aide d'un tamis composé de mailles de 2 mm et débarrassée des restes de terre et des débris végétaux. Il peut s'avérer préalablement nécessaire de réduire les agrégats à l'aide d'un concasseur à mâchoires. Ensuite, la fraction >2mm est pesée pour déterminer la masse du squelette (Schwab et Gubler, 2016; Blume, Stahr et Leinweber, 2011).

Pour le tamisage par voie humide, l'échantillon est placé dans un bain d'eau, puis la fraction >2 mm est récupérée par lavage sur un tamis composé de mailles de 2mm. La fraction retenue sur le tamis est ensuite débarrassée des débris végétaux, séchée à 105°C jusqu'à atteindre un poids constant et pesée pour déterminer la masse du squelette (Schwab et Gubler, 2016).

Tableau servant à l'estimation visuelle de la pierrosité

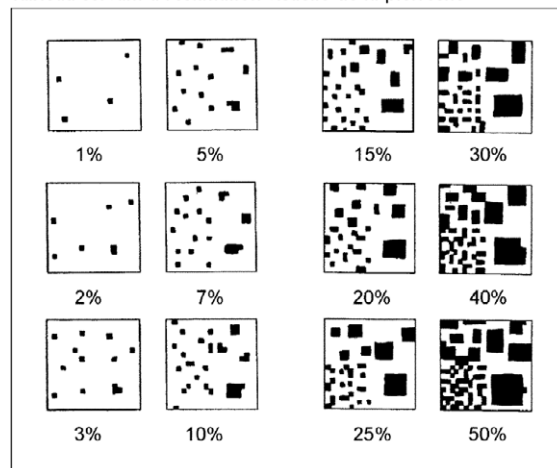


Figure 9 : Tableau servant à l'estimation visuelle de la pierrosité en volume selon la classification suisse KLABS. Source de l'image : KLABS 2010, v.3, annexe 3.7.2

Volume du squelette

Le volume du squelette peut être déterminé soit par calcul en tant que quotient de la masse et de la masse volumique (équation 4), soit par la méthode du pesage sous immersion (Schwab et Gubler, 2016 ; Buchter et al., 2004). Pour la variante calculée, il faut, en plus, déterminer la masse volumique du squelette ou se baser sur une valeur estimée (Schwab et Gubler, 2016). La méthode de pesée par immersion consiste à immerger la fraction du squelette dans un liquide de volume connu et à mesurer la différence de volume. On peut utiliser pour cela des cylindres gradués remplis d'eau sur lesquels la variation de volume peut être directement lue.

$$(4) \quad \text{Volume du squelette} = \frac{\text{masse du squelette}}{\text{masse volumique du squelette}}$$

3.4. Espace poral du sol : volume total des pores et distribution de la taille des pores

Explication terminologique

L'espace poral désigne l'ensemble des espaces interstitiels remplis d'air ou d'eau dans le sol. Le fait que les pores soient remplis d'air ou d'eau dépend de leur diamètre ainsi que du régime hydrique du site (Blume, Stahr et Leinweber, 2011 ; Isler, Luzius et Buchter, 2001). Les pores grossiers se vident très rapidement sous l'effet de la gravité et sont ensuite remplis d'air. Par contre, les pores les plus fins (ayant le plus petit diamètre) contiennent beaucoup plus souvent de l'eau que de l'air. L'eau contenue dans les pores fins est également appelée «eau morte», car elle ne peut pas être absorbée par les racines des plantes (Blume, Stahr et Leinweber, 2011). La distribution du volume des pores en différentes tailles ou classes de pores est un critère important pour déterminer l'aptitude d'un sol à la croissance des végétaux. Le volume de pores peut être exprimé soit en tant que volume total, soit en tant que distribution en différentes classes de pores (tableau 2) (Isler, Luzius et Buchter, 2001; Stations fédérales de recherches agronomiques, 1996). La distribution du volume des pores est mesurée sur des échantillons en cylindres de sol non perturbé et est généralement exprimée en pour cent du volume total (Blume, Stahr et Leinweber, 2011).

Mesure du volume poral de différentes classes de pores

La distribution de la taille des pores est décrite au moyen d'une courbe de désorption (Stations fédérales de recherches agronomiques, 1996). La force de succion exercée sur la phase aqueuse de l'échantillon en cylindre de sol est augmentée par palier afin de lui faire perdre progressivement son eau. Lorsque l'échantillon est en équilibre avec la force de succion appliquée, la modification de la teneur en eau est relevée par gravimétrie. Les différences entre les pesées et le poids sec correspondent aux teneurs en eau aux forces de succion déterminées. Si le volume de l'échantillon est connu, les teneurs en eau gravimétriques peuvent être converties en teneurs volumétriques ou en parts de volumes de pores. Comme la force de succion est inversement proportionnelle au diamètre des pores, il est possible de calculer les volumes des différentes classes de pores. Pour ce calcul, on postule de manière idéalisée que les pores sont tubulaires (Isler, Luzius et Buchter, 2001 ; Stations fédérales de recherches agronomiques, 1996). La principale difficulté réside dans l'application de forces de succion bien définies à l'échantillon de sol (Blume, Stahr et Leinweber, 2011).

Classe de pores	Potentiel matriciel (hPa)	Potentiel matriciel (valeur pF)	Diamètre équivalent des pores (µm)
Pores grossiers supérieurs	< 30 hPa	< pF 1.5	> 100 µm
Pores grossiers médians	30 – 60 hPa	pF 1.5 – pF 1.8	100 – 50 µm
Pores grossiers inférieurs	60 – 100 hPa	pF 1.8 – pF 2.0	50 – 30 µm
Pores moyens supérieurs	100 – 1'000 hPa	pF 2.0 – pF 3.0	30 – 3 µm
Pores moyens médians	1'000 – 5'000 hPa	pF 3.0 – pF 3.7	3 – 0.6 µm
Pores moyens inférieurs	5'000 – 15'000 hPa	pF 3.7 – pF 4.2	0.6 – 0.2 µm
Pores fins	> 15'000 hPa	> pF 4.2	< 0.2 µm

Tableau 2: Subdivision de l'espace poral en différentes classes de pores avec les plages de force de succion et les diamètres équivalents correspondants. La subdivision de même que la dénomination des classes de pores peuvent varier selon les pays, les domaines d'utilisation et les buts de l'étude. Tableau tiré des méthodes de référence suisses des stations fédérales de recherches agronomiques 1996, volume 2, PYZYL-P.



Figure 10 : Boîte à sable («sandbox») disponible dans le commerce en tant qu'appareil à dépression pour déterminer le volume des pores grossiers d'un échantillon de sol. Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de Royal Eijkelkamp.

Chaque classe de pores est caractérisée par une plage de potentiel matriciel et la plage correspondante de diamètre équivalent des pores (tableau 2). Les diamètres équivalents ne reflètent pas les conditions réelles dans le sol ; l'espace poral, de forme complexe, est idéalement représenté comme un faisceau de capillaires. C'est pourquoi les diamètres équivalents attribués aux différentes classes ne représentent que des approximations des diamètres de pores effectivement présents dans le sol (Stahr et al., 2012).

Le choix des classes de pores à déterminer dépend de l'objectif de l'étude. La courbe de désorption est établie à partir d'échantillons en cylindres non perturbés. Il faut prélever au moins cinq échantillons par horizon dans des conditions d'humidité du sol favorables (capacité au champ). Plus les échantillons sont petits, plus l'état d'équilibre à une force de succion donnée est vite atteint ; cependant, les petits échantillons donnent une image moins représentative de la structure du sol (Stations fédérales de recherches agronomiques, 1996). Les analyses réalisées dans un domaine de pF bas (<300 hPa, correspondant à pF<2,5) sont généralement effectuées avec un appareil à dépression selon DIN EN ISO 11274:201804. Pour les analyses réalisées dans un domaine de pF plus élevé (>300 hPa, correspondant à pF>2,5), il faut recourir à un appareil-



Figure 11 : Vue intérieure d'une boîte à sable avec des échantillons en cylindres de sol structurellement non perturbé. Dans un premier temps, les échantillons sont saturés en eau. Ils sont ensuite soumis à des forces de succion croissantes, et dès qu'un équilibre s'est établi à une force de succion donnée, ils sont pesés. Avec le poids sec et la densité connue de l'eau, qui dépend de la température, il est possible de calculer le volume de classes de pores déterminées. La boîte à sable convient pour le domaine des pores grossiers. Source de l'illustration : Avec l'aimable autorisation du groupe de recherche Utilisation et protection des sols de la BFH-HAFL.

lage en surpression tel que développé par Richards (1949) (Blume, Stahr et Leinweber, 2011 ; Isler, Luzius et Buchter, 2001 ; Stations fédérales de recherches agronomiques, 1996). Certains laboratoires réalisent des analyses à partir de 100 hPa et également en surpression (Isler, Luzius et Buchter, 2001). Mais cela peut entraîner des imprécisions, surtout dans le domaine des pores grossiers. Dans tous les cas, il est important que l'échantillon soit complètement saturé d'eau avant la mesure.

La méthode de référence PYZYL-P des stations fédérales de recherches agronomiques recommande l'utilisation d'un bac à dépression avec fond de sable (appelé «boîte à sable», «sandbox», «table à succion» ou encore «plaque de succion»), pour les mesures dans le domaine des pores grossiers (figures 10 et 11), et d'une enceinte pressurisée (marmite à pression) comme appareil à surpression pour les mesures dans les plages de pF plus élevées (figure 12). Pour la mesure au moyen de la boîte à sable avec colonne d'eau suspendue, l'échantillon en cylindre de sol non perturbé, préparé et saturé d'eau, est placé sur le fond de sable (figure 11).

Il faut éviter toute inclusion d'air à la zone de contact entre l'échantillon de sol et la surface de la boîte à sable. Pendant le processus de désorption, l'échantillon n'est plus manipulé, et le couvercle du bac est



Figure 12 : Marmite à pression du commerce utilisée comme appareil de surpression pour déterminer le volume des pores dans les plages de pF élevées, c'est-à-dire pour les pores moyens et fins.
Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de UGT GmbH.

maintenu fermé afin d'éviter les déperditions d'eau par évaporation (figure 10). La désorption dure jusqu'à ce que le poids constant soit atteint, soit en général de 2 à 4 jours dans le domaine des pores grossiers. La durée de désorption dépend, entre autres, de la taille de l'échantillon, de la nature du sol et de l'état de la structure. Après chaque étape de désorption, l'échantillon est pesé afin de déterminer la perte en eau par gravimétrie. Il faut faire attention à ce qu'aucune particule de terre ne reste collée à la surface du bac ou ne se perde d'une autre manière, sinon le résultat de la mesure pourrait être fortement faussé. La perte en eau gravimétrique permet de calculer le volume de pores de la classe correspondante. On peut ensuite procéder à la mesure au prochain palier supérieur de désorption. Les mesures avec une marmite à pression s'effectuent selon une procédure analogue à la table à

succion. Les échantillons sont placés dans la marmite à pression sur une plaque de céramique poreuse qui a été préalablement saturée d'eau (figure 12). Ici aussi, l'échantillon est pesé après chaque palier de désorption de manière à pouvoir déterminer le volume des pores vidés de leur eau. Les résultats peuvent être représentés soit sous forme numérique en tant que volumes de différentes classes de pores, soit sous forme graphique en tant que courbe de désorption. Selon le palier de pression, la désorption jusqu'à poids constant dans la marmite à pression demande au minimum cinq jours (pores moyens supérieurs), mais peut parfois durer plusieurs semaines (pores fins). Comme la durée de la désorption dépend également de la grandeur de l'échantillon, pour les analyses à des tensions superficielles élevées (à partir de 15'000 hPa), les échantillons en cylindres sont transférés dans des anneaux moins hauts afin

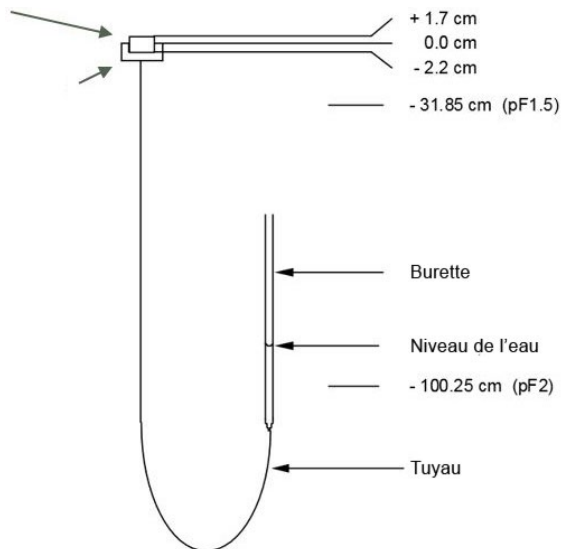


Figure 13 : Schéma du dispositif d'essai pour la mesure de la désorption avec la méthode VHW et un échantillon de sol de 3,9 cm de hauteur. 0 cm correspond au bord supérieur du support en plexiglas. Le milieu de l'échantillon de sol se situe 0,25 cm plus bas. Illustration reprise et adaptée d'après Isler, Luzius et Buchter, 2001 ; service de la protection des sols du canton de Zurich.

de diminuer leur taille. Le reste de l'échantillon est conservé pour pouvoir déterminer la masse volumique apparente ainsi que d'autres paramètres (Stations fédérales de recherches agronomiques, 1996).

Un facteur qui peut poser problème lors de la mesure de la désorption au moyen de boîtes à sables et de marmites à pression est la teneur initiale en eau des échantillons. Comme l'échantillon n'est pas saturé et mesuré à l'endroit de son prélèvement, des pertes en eau peuvent survenir lors du transport et fausser ainsi les résultats. Bien que cette erreur, qui peut varier selon le laboratoire et la manipulation, ne soit pas forcément significative, elle peut constituer un paramètre inconnu et difficile à contrôler. C'est pourquoi il est recommandé avec la boîte à sable de contrôler la force de succion directement dans l'échantillon au moyen d'un tensiomètre, afin de détecter d'éventuelles erreurs (Buchter et Häusler, 2009).

Le volume des pores grossiers peut aussi être déterminé par la méthode volumétrique avec colonne d'eau suspendue (méthode VHW, pour volumetrische Methode mit hängender Wassersäule)

(Isler, Luzius et Buchter, 2001). Cette méthode utilise le même principe que la boîte à sable avec colonne d'eau suspendue. Un unique échantillon de sol est placé sur une plaque de céramique poreuse de même diamètre installée dans un support en plexiglas. L'ensemble est rendu étanche par un joint torique et recouvert d'un couvercle de verre afin d'éviter les pertes par évaporation. Sous l'appareil se trouvent deux sorties, l'une pour l'évacuation de l'air et la saturation, l'autre pour la désorption de la plaque de céramique poreuse et de l'échantillon de sol. L'échantillon est d'abord saturé en amenant le niveau d'eau dans la burette à la hauteur du centre de l'échantillon, autrement dit du bord supérieur du support en plexiglas (figure 13). La force de succion agissant dans l'échantillon est graduellement augmentée par abaissement de la burette, afin d'éliminer par étapes l'eau contenue dans l'échantillon. L'abaissement de la burette à 31,6 cm sous le bord supérieur du support en plexiglas correspond à un pF de 1,5. Pour la mesure à un pF 2, la burette est abaissée à 100 cm (Isler, Luzius et Buchter, 2001). L'erreur de lecture sur la burette est d'environ $\pm 0,1$ ml. L'erreur totale de la méthode est de 0,3 % pour un échantillon d'un volume de 100 cm^3 (Isler, Luzius et Buchter, 2001). L'avantage de cette méthode est que la saturation et l'élimination de l'eau de l'échantillon s'effectuent au même endroit, ce qui permet de minimiser les pertes d'eau involontaires. Le volume de l'eau évacuée n'est pas déterminé par gravimétrie, mais lu directement sur la burette. D'autre part, la construction en plexiglas permet de détecter les erreurs dues à la formation de bulles d'air. Il est ainsi possible de surveiller la mesure de chaque échantillon et de corriger les erreurs détectées (Isler, Luzius et Buchter, 2001 ; Buchter et Häusler, 2009).

Pour la mesure des pores grossiers dans la plage de force de succion de 0 à 820 hPa, on peut également utiliser L'HYPROP® 2 (Hydraulic Property Analyser) de Meter Group (UMS, 2015). Cet appareil comprend un système de mesure et d'évaluation entièrement automatique, basé sur la méthode d'évaporation de Schindler (1980). Il fonctionne avec des échantillons de sol non perturbés de 100 ou 250 ml préalablement saturés en eau, qui sont analysés individuellement (figure 14). L'HYPROP® 2 mesure automatiquement la force de succion à



Figure 14 : Dispositif Hyprop 2 pour la mesure du volume de pores dans la plage de force de succion de 0–820 hPa (toute la plage des pores grossiers jusqu'aux pores moyens supérieurs). L'Hyprop 2 permet de mesurer simultanément la courbe de désorption dans la plage de force de succion indiquée ainsi que la conductivité hydraulique non saturée sur des échantillons de sol structurellement non perturbés.

Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de METER Group.

l'aide de deux cellules tensiométriques situées à des hauteurs différentes ; les mesures permettent de calculer la courbe de désorption et la conductivité hydraulique non saturée (Schindler, Doerner et Müller, 2015 ; UMS, 2015).

Les données sont évaluées avec les logiciels HYPROPVIEW et HYPROP-FIT, qui peuvent être téléchargés en ligne. Une mesure avec l'HYPROP® 2 dure entre deux et dix jours suivant la nature du sol, mais elle demande très peu de travail de la part du laborantin, car la mesure et l'évaluation sont automatisées (Schindler, Doerner et Müller, 2015 ; UMS, 2015).

En plus de la méthode de la marmite à pression, les mesures dans les domaines de pF très élevés (4,2–7) peuvent aussi être effectuées en utilisant le principe de la compensation de la tension de vapeur («Dampfspannungsausgleich») avec différentes solutions salines (Blume, Stahr et Leinweber, 2011). Cette méthode a initialement été développée par Mitscherlich (1954). Les échantillons déshydratés à de faibles forces de succion sont broyés et étalés dans des boîtes de Pétri. Pour les zones de pF correspondant aux pores fins, il n'est donc plus nécessaire de disposer d'un échantillon de sol non perturbé. Ensuite, les échantillons sont placés dans un dessiccateur et mis en équilibre avec des solutions salines sursaturées de tensions de vapeur définies (comme pour la mesure de l'hygroscopicité). On utilise par exemple

une solution de $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ pour un pF 4,7 ; de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ pour un pF 5,5 ; de $\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ pour un pF 6,0 et de CH_3COOK pour un pF 6,3.

Lors de la déshydratation par étapes de l'échantillon de sol avec différentes solutions salines, le poids constant s'établit chaque fois après environ sept jours. Une fois les mesures terminées, les échantillons sont séchés et pesés afin de mesurer la teneur en eau par gravimétrie (Blume, Stahr et Leinweber, 2011).

Dans la plage de force de succion élevée, le volume des pores peut aussi être déterminé par la méthode du point de rosée. Celle-ci fait appel à un potentiomètre de point de rosée. Il s'agit d'un appareil qui mesure l'humidité relative de l'air au-dessus d'un échantillon de sol selon la méthode du point de rosée. Le principe consiste à refroidir par exemple un miroir placé au-dessus de l'échantillon jusqu'à la formation de rosée. La température du miroir de même que celle de l'échantillon sont mesurées (Campbell, Smith et Teare, 2017). Bien que faisant appel à une technique complexe, les potentiomètres de point de rosée sont faciles à utiliser : il suffit de mettre un petit volume de sol dans un récipient et d'introduire ce dernier dans l'appareil — la mesure se fait de manière entièrement automatique. Comme exemple de potentiomètre de point de rosée, on peut mentionner le WP4C Dew-Point-Meter de Meter Group, qui couvre les plages de mesure de



Figure 15 : Le WP4C-Dew Point Meter permet de déterminer les pores fins dans la plage de mesure de pF 3,5 – 6,2. Il n'est pas nécessaire de disposer d'échantillons de sol non perturbés.
Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de METER Group.

pF 3,5 – 6,2 (Meter, 2020) (figure 15). Outre les méthodes susmentionnées, il existe également des méthodes d'imagerie, comme la tomodynamométrie, qui permettent de déterminer la structure et l'interconnexion des pores (voir à ce sujet le tableau 1 de Helliwell et al, 2013). Elles ont l'avantage de permettre de caractériser non seulement la taille des pores, mais aussi leur forme, leur distribution et leur interconnexion (Helliwell et al., 2013). Ces méthodes n'entrent toutefois pas dans le champ de ce travail et ne seront donc pas expliquées plus en détail.

Mesure du volume total des pores

Souvent, le volume total des pores est déterminé indépendamment de la courbe de désorption pour vérifier la mesure de la distribution de la taille des pores. Cela peut se faire soit par calcul, soit par mesure au moyen d'un pycnomètre à air (DIN 19683 ; méthode de référence PYZYL-V des stations fédérales de recherches agronomiques) (figure 16). Le pycnomètre à air permet de déterminer le volume de solide et de liquide de l'échantillon selon le principe de la loi de Boyle-Mariotte. Le volume peut être lu directement sur l'échelle de



Figure 16 : Pycnomètre à air, disponible dans le commerce, permettant de déterminer le volume solide et liquide d'un échantillon de sol. En utilisant des échantillons de sol séchés et non perturbés dont on connaît le volume total, on peut calculer le volume total des pores.
Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de Royal Eijkkelkamp.

l'appareil. Si l'on mesure dans le pycnomètre le volume de matière solide d'un échantillon de sol séché et que l'on connaît le volume total de l'échantillon, on peut calculer le volume total des pores (Stations fédérales de recherches agronomiques, 1996 ; VDLUFA, 2016 ; Buchter et al.).

Une autre possibilité consiste à calculer le volume total des pores à partir de la masse volumique réelle et de la masse volumique apparente (équation 5) (Blume, Stahr et Leinweber, 2011 ; VDLUFA, 2016 ; Buchter et al., 2004). La masse volumique réelle est déterminée avec un pycnomètre à eau selon la méthode de référence PY-DR des stations fédérales de recherches agronomiques (figure 7, point 3.2.). Les méthodes de mesure de la masse volumique apparente sont décrites au chapitre 3.1.

Le volume total des pores peut en outre être estimé au moyen de différentes fonctions de pédotransfert sur la base de la granulométrie, de la teneur en matière organique et de la masse volumique apparente (cf. notamment Blume, Stahr et Leinweber, 2011, point 3.6.2.2).

(5)

$$\text{Volume total des pores} = (1 - (\text{masse volumique apparente} / \text{masse volumique réelle})) \times \text{volume de l'échantillon}$$

3.5. Conductivité à l'air

Explication terminologique

La conductivité à l'air, par analogie avec la conductivité hydraulique saturée, est définie comme le volume d'air qui, après application d'une pression donnée, s'écoule par unité de temps à travers une colonne de sol de longueur et de section connues. Elle est en général exprimée en longueur par unité de temps (par ex. cm/s) (VDLUFA, 2016 ; DIN 19682-9). Également appelée perméabilité à l'air, la conductivité à l'air décrit la perméabilité de la structure du sol à des gaz sous l'effet d'un gradient de pression. Elle se distingue en cela de la diffusion gazeuse, qui décrit les échanges gazeux se produisant dans le sol sous l'effet de gradients de concentration (p. ex. ΔO_2 concentration). La conductivité à l'air dépend de la texture et de la structure du sol ainsi que de sa teneur en eau. C'est pourquoi elle peut varier très fortement dans l'espace (tant horizontalement que verticalement) et dans le temps (DIN 19682-9 ; Ball et Schjønning, 2002). Seul l'espace poral sans eau est utilisable pour la conductivité à l'air, raison pour laquelle les valeurs de cette dernière ne sont comparables qu'à des forces de succion identiques. Il est recommandé de mesurer la conductivité à l'air à une force de succion définie (VDLUFA, 2016 ; DIN 19682-9 ; Ball et Schjønning, 2002).

Mesure de la conductivité à l'air

La conductivité à l'air peut être mesurée par différents appareils soit sur le terrain, soit en laboratoire ; certains sont utilisables à la fois sur le terrain et en laboratoire. Les appareils se distinguent par leur mode de production et de mesure du flux d'air (VDLUFA, 2016). Dans la norme industrielle allemande DIN 19682-9, la mesure est décrite par le principe du gazomètre. Dans les appareils de mesure fonctionnant selon ce principe, la partie supérieure du gazomètre produit par son propre poids une pression qui provoque l'écoulement d'air dans le volume de sol (VDLUFA, 2016). L'air contenu dans le gazomètre s'écoule vers le cylindre de mesure par un raccord de tuyau. Le cylindre est enfoncé dans le sol et enveloppe latéralement le volume de sol à décrire. L'appareil mesure ensuite la durée d'écoulement (en s) et l'abaissement de la partie supérieure du gazomètre (en cm) pour déterminer le volume d'air écoulé par unité de temps. À partir de ces don-

nées, il est possible de calculer la différence de pression survenue et par conséquent la conductivité à l'air k_L , au moyen de l'équation de Darcy (équation 6), V étant le volume d'air écoulé, l la longueur de la colonne de sol, A la section transversale de la colonne de sol, p la différence de pression et t la durée (DIN 19682-9 ; VDLUFA, 2016). Le dispositif peut également être équipé d'un manomètre et d'un débitmètre qui permettent de rationaliser la mesure, car la pression et le volume d'air écoulé sont ainsi directement mesurés et lus et n'ont plus besoin d'être calculés (Ball et Schjønning, 2002). Dans la plupart des appareils de mesure fonctionnant selon le principe du gazomètre, la valeur de la conductivité à l'air est calculée par l'appareil et peut être lue directement (DIN 19682-9 ; VDLUFA, 2016).

$$(6) \quad k_L = \frac{V \times l}{A \times p \times t}$$

Un autre principe utilisé pour mesurer la conductivité à l'air est celui de la pression différentielle. Un appareil crée une différence de pression constante au moyen d'une pompe ou d'une bouteille de gaz et mesure le flux d'air qui en résulte (VDLUFA, 2016 ; Ball et Schjønning, 2002). Le flux d'air généré est dirigé par un capillaire vers la surface du sol où une pression est créée et maintenue constante par le renouvellement de l'air s'écoulant à travers le sol. Il faut pour cela un débit volumique qui modifie la différence de pression aux deux extrémités du capillaire. À partir de cette pression différentielle, il est possible de calculer le volume d'air qui s'écoule à travers le sol (VDLUFA, 2016). Ces appareils peuvent aussi être équipés de débitmètres mesurant la conductivité à l'air. Le PL-300 de Umwelt-Geräte-Technik GmbH (UGT), utilisable aussi bien sur le terrain qu'en laboratoire, est un exemple d'appareil fonctionnant selon ce principe (figure 17). Pour l'utilisation en laboratoire, des échantillons en cylindres de sol non perturbé sont nécessaires (VDLUFA, 2016 ; Umwelt-Geräte-Technik GmbH, 2019).

La conductivité à l'air près de la surface du sol peut en outre être mesurée par une méthode acoustique. Celle-ci consiste à mesurer la propagation

d'un signal acoustique sur et dans le sol au moyen de microphones. À partir de la différence des spectres acoustiques des microphones, il est possible de déduire la porosité de l'espace poral rempli d'air ainsi que la conductivité effective de l'air. Cette méthode n'est toutefois applicable qu'à proximité de la surface du sol. Elle a été utilisée avec succès pour l'observation de la compaction du sol (Ball et Schjønning, 2002).

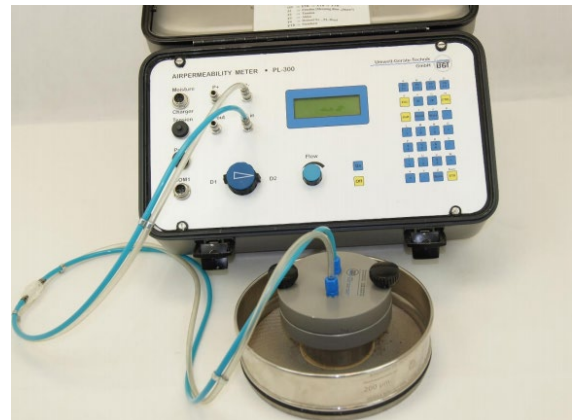


Figure 17 : Débitmètre PL-300 permettant de déterminer les conditions de conductivité à l'air dans un échantillon de sol non perturbé.

Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de UGT GmbH.

3.6. Conductivité hydraulique à saturation

Explication terminologique

La conductivité hydraulique à saturation (k_{sat}) est une mesure de la perméabilité à l'eau d'une matrice de sol saturée en eau. Elle est calculée à l'aide de l'équation de Darcy (1856) (équation 7) dans laquelle Q est la quantité d'eau, F la surface de la section transversale de l'échantillon de sol, i le gradient hydraulique et k_f le coefficient spécifique à la structure (« coefficient de perméabilité »). La conductivité hydraulique à saturation est exprimée en longueur par temps (cm/s ou cm/d) (Buchter et al., 1998 ; Stations fédérales de recherches agronomiques, 1996).

$$(7) \quad Q = k_f \times F \times i$$

La conductivité hydraulique dépend, entre autres, de la structure et de la texture du sol ainsi que des propriétés physiques de l'eau (densité et viscosité) (Zhang et al., 2019). Elle est déterminée par la distribution de la taille des pores et par la tortuosité et la continuité de ces derniers. Par conséquent, la conduc-

tivité peut varier considérablement dans l'espace et dans le temps sur un même site. Cette grande variabilité rend plus difficile la détermination de valeurs de mesure représentatives (Buchter et al., 1998).

Ce paramètre pédohydrologique peut être mesuré aussi bien sur le terrain qu'en laboratoire. Sur le terrain, on parle toutefois de conductivité hydraulique à saturation in situ (k_f). La valeur in situ se distingue de la valeur de laboratoire par le fait qu'au-dessus du niveau de la nappe, la saturation complète de l'espace interstitiel n'est presque jamais atteinte en raison des inclusions d'air (Durner, 2003). C'est pourquoi les méthodes de détermination de la conductivité hydraulique à saturation in situ dans la zone au-dessus du niveau de la nappe phréatique (par ex. infiltromètres à anneaux ou perméamètres de Guelph) ne sont pas décrites dans ce chapitre. Ces méthodes sont cependant très importantes pour la détermination du taux d'infiltration de l'eau dans un sol (chapitre 3.7). La saturation complète des échantillons pose aussi un problème en laboratoire et peut expliquer la grande variabilité des résultats mesurés.

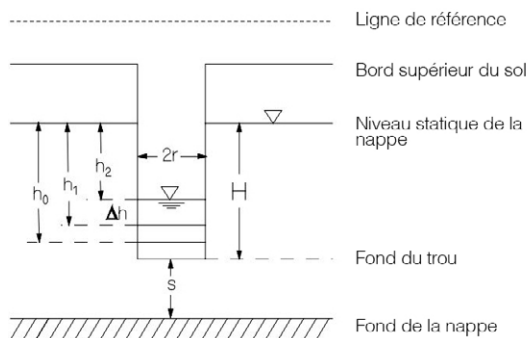


Figure 18 : Représentation schématique de la méthode du trou à la tarière H = profondeur du trou sous le niveau statique de la nappe ; h_0 = profondeur de l'abaissement maximal de l'eau ; h_1 , h_2 = profondeurs à deux moments pendant la remontée ; s = distance entre le fond du trou et le fond de la nappe ; r = rayon du trou. Illustration tirée de Durner, 2003.

Méthodes de terrain

Les mesures de la conductivité hydraulique à saturation in situ sont effectuées de préférence sous le niveau de la nappe. Il existe pour cela des méthodes basées sur un trou à la tarière et des méthodes piézométriques (Durner, 2003).

Le principe de base de la méthode du trou à la tarière sous le niveau de la nappe phréatique consiste à déterminer, dans des conditions définies, la remontée du niveau de la nappe dans un trou dont l'eau a été pompée (Durner, 2003). On part du principe qu'il s'agit de sols relativement homogènes et isotropes. Une condition indispensable à sa réalisation est la présence d'une nappe de fond ou perchée libre située à un niveau élevé. Plus la structure du sol est irrégulière, plus les répétitions devront être nombreuses. Par conséquent, les emplacements étudiés doivent être soigneusement choisis (DIN 19682-8, 2012). Le trou, qui doit atteindre la zone en dessous du niveau de la nappe, est creusé dans la couche de sol étudiée au moyen d'un outil de sondage approprié (p. ex. tarière à ailettes), en veillant à perturber le moins possible le sol. Dans les terrains instables, la paroi du trou peut être renforcée par un tube filtrant à paroi mince. Lorsque l'eau a atteint son niveau statique (après environ 24 h), il faut déterminer la hauteur de la colonne d'eau H , le rayon du trou r et la distance entre le fond du trou et le fond de la nappe s (figure 18) (Durner, 2003). Le fond de la nappe peut être déterminé par sondage ou par l'analyse d'une cartographie pédologique, s'il en existe dans une résolution suffisante. Avant

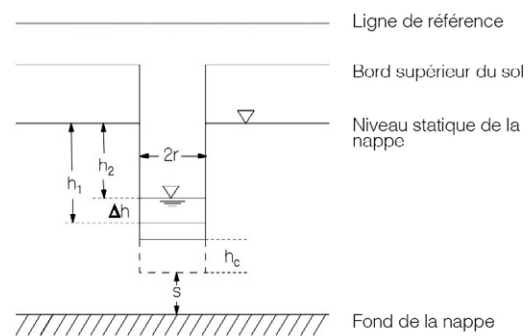


Figure 19 : Représentation schématique de la méthode piézométrique. h_c = profondeur de la partie du trou non fermée par le tube, h_1 , h_2 = profondeurs à deux moments pendant la remontée ; s = distance entre le fond du trou et le fond de la nappe ; r = rayon du trou. Illustration tirée de Durner, 2003.

de commencer la mesure, l'eau est retirée le plus rapidement possible du trou de sondage (par exemple avec un instrument à puiser ou une pompe à main), puis la vitesse de la montée de l'eau est mesurée au moyen d'un flotteur ou d'un indicateur électrique (DIN 19682-8, 2012). Il faut effectuer trois à six mesures individuelles jusqu'à ce que le niveau d'eau atteigne $h = 0,25 h_0$ (figure 18). La conductivité hydraulique à saturation in situ peut ensuite être calculée à l'aide d'équations empiriques. La distance entre le fond du trou et le fond de la nappe revêt une importance déterminante pour le choix de l'équation. Les équations peuvent être reprises de la norme DIN 19682-8 (2012). Des erreurs et des écarts de mesures peuvent être occasionnés par le colmatage des parois, un diamètre irrégulier du trou ou des erreurs de mesure de la profondeur du sondage. Des écarts de 100% entre les répétitions sont considérés comme normaux (Durner, 2003).

La méthode piézométrique, de manière analogue au trou à la tarière, consiste à déterminer la conductivité hydraulique à saturation in situ à partir de la remontée du niveau de la nappe dans un trou vidé de son eau creusé dans l'aquifère (Durner et al., 2008). Contrairement à la méthode du trou à la tarière, un tube piézométrique ferme les parois du trou sauf dans sa section inférieure (figure 19) (Danladi et al., 2018). L'eau ne peut donc passer que dans cette partie inférieure du trou qui n'est pas fermée par le tube. Le calcul de la conductivité s'effectue également à l'aide d'une équation empirique, qui fait appel en plus à un facteur géométrique C .

Celui-ci dépend de la profondeur du trou creusé sous le niveau de la nappe phréatique H , de son rayon r et de la profondeur de la partie ouverte du trou (zone non fermée par le tube) h_c (figure 19). Pour le calcul de la conductivité hydraulique à saturation in situ, il faut recourir à des valeurs tirées de tableaux pour le facteur géométrique.

La méthode piézométrique est utilisée pour les aquifères fortement stratifiés, car elle permet d'analyser des couches individuelles. En revanche, elle n'est pas adaptée aux terrains pierreux et rocheux en raison des difficultés liées à la pose du tube (Durner et al., 2008). Suivant le rapport entre h_c et r , il est possible de déterminer la conductivité hydraulique horizontale ou verticale. Si la valeur h_c est grande par rapport à r , on mesure principalement la conductivité hydraulique horizontale. Sinon, on détermine la conductivité verticale (Danladi et al., 2018).

Méthodes en laboratoire

En laboratoire, la conductivité hydraulique à saturation est mesurée avec des perméamètres (appareils de mesure de la perméabilité) selon la méthode à charge constante ou à charge variable (dite aussi «décroissante»). Le principe des perméamètres consiste à placer une colonne d'eau sur un échantillon de sol et à mesurer le taux d'infiltration. La conductivité hydraulique à saturation peut ensuite être calculée à partir du taux d'infiltration mesuré (Buchter et al., 1998).

Pour les méthodes en laboratoire, il faut au préalable prélever des échantillons de sol non perturbé à l'aide de cylindres et les préparer au laboratoire. Au moins trois échantillons sont requis, mais de préférence cinq échantillons doivent être réalisés par profondeur et par site. Il faut veiller à ce qu'ils soient prélevés à la capacité au champ et en étant le moins perturbés possible ; ils doivent en outre être transportés avec soin. Au laboratoire, les échantillons sont ramenés à la longueur du cylindre en détachant délicatement les grumeaux (par exemple avec un scalpel). Les échantillons peu perméables devraient être recouverts d'un film de paraffine (d'environ 2 mm d'épaisseur) afin d'empêcher tout écoulement d'eau entre l'échantillon de sol et la paroi du cylindre. Ensuite, les échantillons sont mis en saturation dans un bain d'eau du robinet (Buchter et al. 2000b ; Stations fédérales de recherches agronomiques, 1996).

Dans la méthode à charge constante («méthode stationnaire»), la hauteur de la colonne d'eau, et donc le gradient de pression dans l'échantillon, sont maintenus constants. Le niveau de charge peut être maintenu soit à l'aide d'une bouteille Boyle-Mariotte, soit avec une pompe commandée. Cette méthode est bien adaptée aux échantillons présentant une conductivité hydraulique relativement élevée, comme le gravier, le sable ou l'argile sableuse, car elle permet d'effectuer des mesures à de faibles gradients de charge (Buchter et al., 1998). En connaissant la quantité d'eau écoulée, la hauteur du gradient hydraulique (charge) ainsi que la hauteur et le diamètre du cylindre, on peut calculer la perméabilité à l'eau de l'échantillon de sol non perturbé (Stations fédérales de recherches agronomiques, 1996).

Dans la méthode à charge variable («méthode non stationnaire»), la hauteur de la colonne d'eau, et donc le gradient de charge dans l'échantillon, diminuent pendant la mesure. Ici, la quantité d'eau écoulée est déterminée en mesurant la colonne d'eau au début et à la fin de la mesure. En raison du gradient de charge habituellement plus important au départ, cette approche méthodologique est souvent utilisée pour les échantillons à faible conductivité (Buchter et al., 1998 ; Buchter et Häusler, 2009).

Pour les mesures, on peut utiliser des dispositifs disponibles dans le commerce (par exemple Eijkelkamp ou Soilmoisture) ou confectionnés par soi-même. Ces derniers ont l'avantage de pouvoir être adaptés aux dimensions des cylindres d'échantillonnage employés. Il existe en outre des perméamètres pouvant fonctionner aussi bien selon la méthode à charge constante qu'à charge variable (p. ex. dispositif ItÖ, Chameleon de Soilmoisture, figure 20) (Buchter et al., 1998).

Les problèmes posés par la réalisation des méthodes en laboratoire sont généralement sous-estimés. Les mesures sont sensibles aux erreurs et les résultats difficiles à interpréter en raison de la grande fourchette des valeurs de conductivité hydraulique possibles. Lors du prélèvement, de la préparation et de l'introduction des échantillons dans le dispositif de mesure, des fissures, des zones lissées et des inclusions d'air peuvent se former et fausser ainsi les résultats. Les échantillons comportant des macropores continus (p. ex. liés à l'activité des vers de terre) ou de grosses pierres faussent également les résultats.

tats (Buchter et Häusler, 2009). Il serait donc impératif d'effectuer un calcul des erreurs afin que la conductivité hydraulique à saturation puisse être calculée avec toute la précision voulue. Mais dans la pratique, cela se fait très rarement. On trouvera un exemple de calcul d'erreur dans le rapport de projet de Buchter et al. (1998). Il faudrait aussi évaluer l'état de l'échantillon après la mesure (présence de fissures dans l'enveloppe de paraffine, état de la surface de la section) (Buchter et Häusler, 2009).



Figure 20 : Appareil de mesure simultanée de la conductivité hydraulique à saturation sur cinq cylindres d'échantillons de sol non perturbé. Le même dispositif permet d'utiliser aussi bien la méthode de la «charge variable» que celle de la «charge constante» (en plaçant une hausse sur les cylindres en plastique). Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de Soilmoisture Corp.

3.7. Taux d'infiltration de l'eau

Explication terminologique

Le taux d'infiltration de l'eau désigne la quantité d'eau qui pénètre verticalement dans le sol en un temps et pour une surface donnés (DIN 19682-7, 2015). Il est exprimé en longueur par unité de temps (mm/min ou mm/h) (Lili et al., 2008). Le taux d'infiltration de l'eau dépend de facteurs très divers, et en particulier de la teneur en eau du sol (Fritz et al., 2007). Ce paramètre est en outre influencé par le type d'offre en eau (par ex. l'intensité des précipitations), l'état de la surface du sol et la présence de macropores ou de couches imperméables. Le taux d'infiltration de l'eau est soumis à une dynamique saisonnière (Durner, 2003). Ce paramètre est principalement déterminé sur le terrain, mais il existe également des méthodes en laboratoire. Les explications ci-après se concentrent sur les relevés sur le terrain (mesures à la surface du sol et dans le trou de tarière). Ils ont l'avantage de pouvoir être réalisés sur place dans des conditions non perturbées.

Mesure du taux d'infiltration de l'eau

Le taux d'infiltration de l'eau est déterminé le plus souvent à l'aide d'infiltromètres à anneau unique ou à double anneau (figures 21 et 22). Les deux méthodes se basent sur un principe similaire, les mesures pouvant être effectuées à charge constante («méthode stationnaire») ou variable («méthode non stationnaire») (Lili et al., 2008 ; DIN 19682-7, 2015). Dans la méthode de l'anneau unique, un anneau (p. ex. en acier inoxydable) est placé sur la surface du sol non perturbée, enfoncé de quelques cm dans le sol, et rempli d'eau (figure 21). On fixe le temps d'écoulement pour la mesure et on relève le niveau d'eau atteint (Eijkelkamp Soil et Water, 2018 ; Lili et al., 2008). La mesure est achevée lorsqu'un taux d'infiltration constant est observé et donc que l'infiltration de l'eau n'est plus freinée (DIN 19682-7, 2015 ; Lunzer, 2009). L'un des principaux problèmes avec l'infiltration par un seul anneau est la composante latérale du flux d'eau. Celle-ci a pour consé-



Figure 21 : Infiltrromètre à anneau unique utilisé pour déterminer le taux d'infiltration dans le sol.
Source de l'illustration : Wikimedia Commons.



Figure 22 : Infiltrromètre à double anneau en cours d'utilisation pour déterminer le taux d'infiltration.
Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de Bářková, K., Matula, S. und Miháliková, M., Faculty of Agrobiolgy, Food and Natural Resources, Czech University of Life Sciences Prague.

quence que les valeurs de mesure du taux d'infiltration sont toujours supérieures à celles de la conductivité hydraulique. L'utilisation de la méthode du double anneau, avec un anneau interne et un anneau externe, permet de réduire cet effet (figure 22). L'anneau externe doit être le plus grand possible par rapport à l'anneau interne (Durner, 2003 ; Durner, 2008). La mise en place des deux anneaux et la mesure se font de la même manière qu'avec la méthode de l'anneau unique (Lili et al., 2008). Le taux d'infiltration est calculé sur la base de la perte en eau de l'anneau interne. Les formules peuvent être reprises de la norme DIN 19682-7 (2015). Pour les deux méthodes, les mesures doivent être répétées dans au moins trois à cinq endroits différents, afin de limiter l'influence des inhomogénéités de la végétation et du sol (Blume, Stahr et Leinweber, 2011). Le taux d'infiltration doit être mesuré pour chaque horizon (DIN 19682-7, 2015). La mesure est poursuivie jusqu'à ce que le taux d'infiltration soit constant. En général, ce moment est atteint après 10 à 60 minutes, suivant le niveau de saturation préalable et les propriétés du sol. Dans les sols riches en argile, par contre, cela peut parfois prendre plusieurs heures, voire plusieurs jours (Blume, Stahr et Leinweber, 2011, Durner et al., 2008). L'infiltrromètre à double anneau permet de déterminer de manière simple le taux d'infiltration ; mais cette méthode pose quelques problèmes. Ainsi, elle ne peut être utilisée qu'en ter-

rain plat et chaque mesure nécessite de trente à plusieurs centaines de litres d'eau, selon les conditions du sol. En outre, l'état de la structure peut être perturbé par l'installation des anneaux dans le terrain, par le mouillage rapide de la surface du sol et le débit élevé, ce qui rend plus difficile la détermination d'un taux d'infiltration non perturbé (DIN 19682-7, 2015 ; Lili et al., 2008). Une méthode plus simple et plus rapide, qui fait également appel à des infiltrromètres à anneaux, est la technique dite «simplified falling head». Les anneaux sont enfoncés dans le sol, puis remplis avec un petit volume d'eau défini à l'avance. On mesure le temps écoulé entre l'apport d'eau et son infiltration complète. Dès que la surface du sol n'est plus recouverte d'eau, la mesure est achevée. Des informations supplémentaires sur cette méthode sont disponibles dans la publication de Bagarello et al. (2004). Cette méthode ne requiert ni instruments de mesure complexes ni analyses.



Figure 23 : Grand infiltromètre à tension prédéfinie servant à déterminer l'infiltration de l'eau, ici dans un sol d'un site de grandes cultures. En haut à gauche de l'appareil, on peut voir le tube de dépression muni d'une entrée d'air qui est relié au réservoir d'eau.

Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de Bářková, K., Matula, S. und Miháliková, M., Faculty of Agrobiologie, Food and Natural Resources, Czech University of Life Sciences Prague.

Le taux d'infiltration de l'eau peut également être déterminé à l'aide d'un infiltromètre à tension prédéfinie (aussi appelé infiltromètre à membrane) (figure 23). Contrairement à l'infiltromètre à anneau, cette méthode permet de mesurer l'infiltration à une force de succion définie. L'infiltromètre à tension prédéfinie est principalement constitué d'une membrane d'alimentation, d'un réservoir d'eau et d'un tuyau à dépression (latéral). Ce tuyau possède une entrée d'air et est relié au réservoir d'eau (Durner, 2003 ; Lili et al., 2008). La mise en place du dispositif sur le terrain n'est pas compliquée, mais doit être faite avec beaucoup de soin afin d'éviter les erreurs (Weber, 2013). La principale difficulté lors de l'installation est d'aménager une surface plane et d'assurer le bon contact entre l'appareil (la membrane d'alimentation) et la surface du sol. On trouvera des descriptions détaillées sur la mise en place et le fonctionnement de l'appareil dans les publications de Durner et al. (2008) et de Weber (2013). Pendant la mesure, de l'eau est amenée à la surface d'un sol non saturé



Figure 24 : L'infiltromètre à mini-disque pour la détermination du taux d'infiltration est un infiltromètre à tension prédéfinie pratique, qui peut être utilisé par une seule personne.

Source de l'illustration : Avec l'aimable autorisation de Bářková, K., Matula, S. und Miháliková, M., Faculty of Agrobiologie, Food and Natural Resources, Czech University of Life Sciences Prague.

dans les conditions de force de succion souhaitée (Durner, 2003 ; Weber, 2013). Environ deux litres d'eau sont nécessaires pour un relevé. La mesure est poursuivie jusqu'à ce qu'un taux d'infiltration constant soit atteint. Cela peut prendre entre une demi-heure et trois heures, selon l'état de la structure et les conditions du sol (Durner et al., 2008 ; Lili et al., 2008). Dans l'idéal, deux personnes devraient être disponibles pour effectuer les mesures (surtout pour la lecture des niveaux d'eau). Mais une personne peut suffire si la préparation est suffisante. Le relevé du taux d'infiltration de l'eau à l'aide d'un infiltromètre à tension prédéfinie demande beaucoup de temps (Durner et al. 2008 ; Weber, 2013). L'appareil doit être manipulé avec beaucoup de précautions, car la membrane d'alimentation en particulier est très fragile (Durner et al., 2008). On trouve aussi aujourd'hui de plus petits infiltromètres à tension prédéfinie (infiltromètre à mini-disque). De taille réduite, ils sont plus faciles à manipuler et nécessitent moins d'eau (Meter, 2020) (figure 24).



Figure 25 : Perméamètre de Guelph disponible dans le commerce pour mesurer le taux d'infiltration dans le sol. Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de Soilmoisture Corp.

La grandeur du diamètre de ces appareils a toutefois une influence sur la qualité des données. Pour les surfaces étendues (à l'échelle d'un champ), les petits infiltromètres à tension prédéfinie sont moins représentatifs que les infiltromètres de plus grande taille.

Un autre appareil permettant de déterminer le taux d'infiltration est le perméamètre de Guelph (figure 25). Le dispositif, installé dans un trou de tarière, permet de maintenir une surpression constante et de mesurer le taux d'infiltration qui en résulte. L'alimentation en eau est réglée selon le principe de Boyle-Mariotte (Durner, 2003). Dans un premier temps, l'eau forme un bulbe dans le sol, puis, une fois la phase stationnaire atteinte, l'écoulement se fait essentiellement de manière verticale vers le bas. La surface d'infiltration étant très réduite, deux litres d'eau suffisent pour une mesure (Durner, 2007). Le nombre de répétitions dépend de l'hétérogénéité du sol et du type d'utilisation (Eijkelkamp Soil et Water, 2012). En effectuant plusieurs mesures à différentes profondeurs, il est possible de déter-



Figure 26 : Infiltromètre à aspersion de Cornell («Cornell sprinkle infiltrometer») installé dans un champ de maïs. Dans cette méthode, le taux d'infiltration est calculé en tant que différence entre le volume des précipitations et le taux de ruissellement de surface mesuré. Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de Cornell Soil Health Staff.

miner le taux d'infiltration de l'eau différencié en fonction de la profondeur (Durner et al., 2008). Les mesures peuvent être réalisées entre 15 et 75 cm sous la surface du sol (Gosh et al., 2019), voire jusqu'à 315 cm avec des rallonges. Il faut compter entre une demi-heure et deux heures par mesure. L'appareil peut être monté et utilisé par une seule personne (Eijkelkamp Soil et Water, 2012). On trouvera des descriptions détaillées de l'utilisation de l'appareil sur le terrain dans la publication de Lunzer (2009). La mesure du taux d'infiltration de l'eau avec un perméamètre de Guelph a l'avantage d'être simple et rapide, mais elle présente aussi certains problèmes. Par exemple, les parois du trou creusé peuvent être lissées lors du creusement, ce qui peut fausser les valeurs mesurées (Durner, 2007).

Le taux d'infiltration de l'eau peut également être déterminé par des essais d'aspersion (infiltromètres à aspersion – «Sprinkler-Infiltrometer»). Le principe consiste à produire une intensité d'averse connue et à mesurer ensuite le ruissellement de surface. Le taux d'infiltration correspond à la différence

entre la quantité de précipitations produite, et le taux d'écoulement du ruissellement de surface (Lili et al., 2008). L'utilisation de grandes installations d'aspersion pour relever le taux d'infiltration sur une surface entière n'entre pas en ligne de compte en raison du matériel et du temps qui serait nécessaire à leur mise en place. C'est pourquoi il est possible de recourir à de petites installations d'aspersion mobiles qui permettent une détermination rapide et reproductible du taux d'infiltration (Iserloh, 2013). Les infiltromètres à aspersion ont l'avantage d'irriguer le sol de manière naturelle et évitent, ou du moins réduisent, la battance du sol. En outre, le fait que la mesure soit effectuée directement à la surface du sol contribue également à en préserver la structure naturelle (Van Es et Schindelbeck, 2003). Il existe de nombreux systèmes d'aspersion mobiles utilisés dans le monde entier. En raison de la diversité des domaines de recherche, ils présentent de grandes différences dans leur type de construction, l'intensité des

averses, la collecte et l'évaluation des données. Vu la diversité des domaines de recherche et des applications, une standardisation de ces appareils n'est pas en vue (Iserloh, 2013). La littérature mentionne également comme système mobile utilisé pour déterminer le taux d'infiltration l'infiltromètre à aspersion de Cornell («Cornell sprinkle infiltrometer») (figure 26). Le dispositif se compose d'un infiltromètre à aspersion mobile, qui est placé sur un infiltromètre à anneau unique. On trouvera des informations supplémentaires sur cet appareil dans l'article de Van Es et Schindelbeck (2003).

D'autres méthodes sont également utilisées pour déterminer le taux d'infiltration de l'eau (p. ex. la «run off-on-ponding method» ou la «linear source method») (Lili et al., 2008). Elles demandent toutefois beaucoup de temps, sont très complexes et parfois encore en phase de développement, raison pour laquelle elles ne seront pas davantage traitées dans ce travail (Lili et al., 2008).

3.8. Force de succion

Explication terminologique

La force de succion (aussi appelée tension de l'eau du sol) est une mesure de la liaison de l'eau à la matrice du sol. Elle indique l'énergie avec laquelle les forces capillaires agissant dans les pores du sol retiennent l'eau. En physique, la force de succion correspond à une dépression. Elle est maximale lorsque la teneur en eau est faible (ce qui correspond à des sols secs), et diminue avec l'augmentation de l'humidité du sol. La hausse de la force de succion améliore la stabilité de la matrice et, par conséquent, la portance du sol. Ce paramètre est mesuré en unités de pression et exprimé en centimètres de colonne d'eau ou en pascals. La force de succion peut être mesurée en laboratoire ou sur le terrain, de manière directe ou indirecte (DIN EN ISO 11276, 2014 ; Stehrenberger et Huguenin-Landl, 2016).

Mesure directe de la force de succion

La mesure directe de la force de succion est effectuée à l'aide de tensiomètres selon le principe de la tensiométrie, une méthode qui a fait ses preuves (figure 27). Un tensiomètre se compose habituellement d'un tube rempli d'eau et muni à l'une de ses extrémités d'une bougie poreuse (figure 28). L'eau contenue dans la bougie et dans le tube du tensiomètre est en contact avec l'eau présente dans les pores du sol. Elle est reliée à un dispositif de mesure de la pression situé à l'autre extrémité du tensiomètre. Les détails de construction d'un tensiomètre varient selon son usage (sur le terrain ou en laboratoire). Il en existe de différentes longueurs, tailles et conceptions. Suivant l'appareil, la force de succion mesurée est soit lue manuellement, soit mesurée et enregistrée automatiquement (Blume, Stahr et Leinweber, 2011 ; DIN EN ISO 11276, 2014). Les tensiomètres ne fournissent que des mesures ponctuelles de la force de succion. Par conséquent, il faut les installer sur le terrain en plusieurs lignes parallèles



Figure 27 : Tensiomètres installés en permanence dans un champ pour mesurer la force de succion dans le cadre de l'essai à long terme d'Oberacker, dans le canton de Berne.
Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de Lorenz Ramseier, LANAT, service de protection des sols du canton de Berne.

par profondeur (au moins trois tensiomètres par profondeur) ou effectuer plusieurs mesures dans le cas de tensiomètres mobiles. La durée jusqu'à l'égalisation de la pression entre l'eau présente dans la structure du sol et dans le tensiomètre va de quelques minutes à plusieurs jours, selon le sol et le type d'appareil. La précision de mesure est de 2,5 à 5 hPa environ suivant le fabricant et le modèle. Elle est influencée par les fluctuations de la température de l'eau et de l'air (DIN EN ISO 11276, 2014 ; UMEG, 2003). Ces instruments ont l'inconvénient de présenter une plage de mesure limitée (0 – 850 hPa). En outre, l'entretien des tensiomètres installés à demeure dans le sol prend du temps, car il faut rajouter de l'eau pendant les périodes sèches. Ils doivent par ailleurs être régulièrement dégazés, car l'introduction d'air dans le système entraîne des erreurs de mesure (Blume, Stahr et Leinweber, 2011). En cas de risque de gel, les appareils de mesure installés en permanence dans le sol doivent être retirés pendant l'hiver ou remplis d'un liquide antigel. Pendant les périodes de sécheresse estivale prolongées, il peut arriver que les tensiomètres se vident complètement ; dans ce cas, ils ne sont remplis qu'après réhumidification suffisante du sol. Dans les sols secs en permanence, les mesures stationnaires ne sont donc pas possibles. D'autre part, la littérature recommande d'effectuer des calibrages de contrôle annuels (Stehrenberger et Huguenin-Landl, 2016).

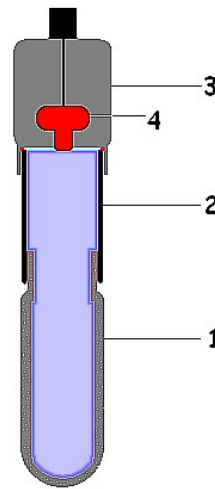


Figure 28 : Constitution d'un tensiomètre :
1) cellule de céramique poreuse,
2) tube transparent rempli d'eau,
3) électronique,
4) capteur de pression.
Source de l'illustration : Wikimedia Commons.

Mesure indirecte de la force de succion

En principe, trois méthodes de mesure indirecte de la force de succion sont disponibles : l'équitensiométrie, la conductivité électrique et la conductivité thermique (Stehrenberger et Huguenin-Landl, 2016). Il existe pour chacune d'elles un grand nombre d'appareils de mesure, de capteurs et de fabricants différents, qui ne pourront toutefois pas être traités dans les paragraphes suivants.

La méthode de mesure de l'équitensiométrie est utilisée à des forces de succion élevées (plus de 500 hPa), lorsque l'emploi de tensiomètres n'est pas ou que partiellement possible. L'équitensiomètre est constitué d'une sonde FDR sur laquelle est collé un corps en céramique poreuse. À une force de succion donnée, une teneur en eau définie s'établit dans la cellule en céramique, qui est ensuite mesurée par la sonde FDR. En connaissant la courbe de désorption de l'appareil, on peut déterminer indirectement le potentiel matriciel à partir de la teneur en eau volumique mesurée dans la céramique de la sonde. Le rapport entre la force de succion et la tension de sortie du capteur est toutefois spécifique à chaque appareil, car le corps en céramique ne peut pas être fabriqué de manière parfaitement identique. En outre, la relation entre le signal de sortie de l'équitensiomètre et la force de succion dans le sol n'est pas linéaire et doit être interpolée. C'est



Figure 29 : Capteur d'humidité du sol watermark disponible dans le commerce, constitué de deux électrodes intégrées dans du gypse et entouré d'une enveloppe perforée. Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de Royal Eijkelkamp.

pourquoi chaque sonde doit être étalonnée individuellement (UMEG, 2003 ; Zuber, 2007). À l'instar des tensiomètres stationnaires, les équitensiomètres doivent être installés sur plusieurs lignes parallèles par profondeur. La précision de mesure est d'environ 50 hPa (UMEG, 2003). Contrairement aux tensiomètres, les équitensiomètres ne nécessitent pas d'entretien ; mais ils requièrent un étalonnage intensif. En outre, leur précision de mesure est faible pour les forces de succion basses et ils ne permettent en principe pas de mesurer les zones saturées en eau. De plus, les appareils de mesure présentent une hystérésis spécifique à la sonde (Stehrenberger et Huguenin-Landl, 2016, UMEG, 2003). Le rapport d'évaluation de Stehrenberger et Huguenin-Landl (2016) mentionne encore comme autres inconvénients de la méthode le manque d'expérience pratique ainsi que les coûts.

La détermination de la conductivité électrique dans le sol se fait à l'aide de blocs de gypse ou de capteurs Watermark (figure 29). La détermination au moyen d'un bloc de gypse consiste à mesurer la résistance électrique entre deux électrodes coulées dans le bloc (Zuber, 2007). Le gypse et l'air étant de mauvais conducteurs, la conductivité mesurée dépend uniquement de la conductivité électrique de l'eau du sol contenue dans les pores du bloc (Blume, Stahr et Leinweber, 2011). Cette eau est en

contact avec l'eau présente dans la structure du sol et est donc à la même force de succion une fois l'équilibre établi. Les forces de succion élevées entraînent des résistances électriques élevées (Blume, Stahr et Leinweber 2011). En raison de leur faible durée de vie, de l'instabilité de la courbe d'étalonnage et de la nécessité d'effectuer un étalonnage individuel, les blocs de gypse sont rarement utilisés pour des études scientifiques (Zuber, 2007), d'autant plus qu'ils présentent une importante hystérésis (Stehrenberger et Huguenin-Landl, 2016, UMEG, 2007). Les capteurs Watermark représentent une amélioration par rapport aux blocs de gypse. De forme tubulaire, ils se composent de deux électrodes entourées d'une matrice granulaire ou à base de gypse (Zuber, 2007) (figure 29). Le capteur Watermark est installé en permanence dans le sol et a une durée de vie moyenne de trois à cinq ans. La plage de mesure s'étend de 30 à 2000 hPa. Les appareils ne nécessitent aucun entretien et sont résistants au gel. Mais ils réagissent plus lentement que les autres instruments de mesure aux variations de l'humidité du sol (Pan et al., 2010 ; UGT, 2020).

Une autre méthode de détermination indirecte de la force de succion fait appel à la conductivité thermique du sol (Stehrenberger (Stehrenberger et Huguenin-Landl, 2016). Elle repose sur un principe similaire à celui utilisé pour la détermination par la conductivité électrique. Les capteurs sont constitués d'une pointe poreuse, habituellement en céramique, dans laquelle est intégré un élément chauffant. Lorsqu'un équilibre s'est établi, l'eau présente dans la pointe en céramique est à la même force de succion que l'eau du sol. Des forces de succion élevées entraînent des conductivités thermiques élevées. La teneur en eau de la pointe en céramique est déterminée à partir de la hausse de température pendant le chauffage de la pointe, respectivement de la capacité thermique. La hausse de température, qui est liée à la conductivité thermique et à la teneur en eau, peut servir de variable proxy pour le potentiel matriciel. Ces appareils ont l'avantage de ne nécessiter aucun entretien et d'être résistants au gel. Ils couvrent en outre une large plage de mesure. Par contre, les capteurs sont peu sensibles et manquent de précision, en particulier pour les forces de succion élevées. De plus, chaque capteur a besoin d'une courbe d'étalonnage distincte, car les propriétés structurales des pointes en céramique diffèrent les unes des autres (Pan et al., 2010).

3.9. Teneur en eau

Explication terminologique

La teneur en eau désigne la masse ou le volume de l'eau présente dans le sol à un moment donné. Elle est principalement influencée par les précipitations, la percolation en profondeur, l'évaporation et la consommation d'eau par les plantes, ce qui explique la variabilité de ce paramètre dans l'espace et dans le temps. La teneur en eau peut être calculée soit par gravimétrie (équation 8), soit par volumétrie (équation 9). Elle est généralement indiquée en pour cent (Fühler et Roth, 2004 ; Stahr et al., 2012). En physique des sols, elle est exprimée de préférence en volume, car cette valeur est plus pertinente du point de vue écologique (par ex. pour le calcul de bilans hydriques). Cependant, il est techniquement plus simple de déterminer la teneur en eau gravimétrique que volumétrique, raison pour laquelle cette méthode de mesure est la plus courante (Fühler et Roth, 2004 ; Stahr et al., 2012). La teneur en eau gravimétrique peut être convertie en teneur volumétrique en la multipliant par la masse volumique apparente (Stahr et al., 2012 ; Blume, Stahr et Leinweber, 2011). La teneur en eau peut soit être mesurée directement en laboratoire ou sur le terrain, soit être déterminée indirectement au moyen de sondes installées dans le sol.

Mesures directes

La teneur en eau peut être déterminée par mesure gravimétrique selon DIN 19683-4. Pour cette méthode, des échantillons structurellement non perturbés sont prélevés sur le terrain à l'aide de cylindres de prélèvement. L'échantillonnage devrait être réalisé dans des conditions d'humidité au champ, c'est-à-dire dans la plage d'humidité favorable au prélèvement d'échantillons non per-

turbés (60–100 hPa). Pour obtenir une valeur représentative, il faudrait prélever au moins trois et de préférence cinq échantillons par horizon. Après le prélèvement, les échantillons en cylindres de sol non perturbé doivent être emballés le plus rapidement possible pour éviter l'évaporation. Au laboratoire, ils sont amenés au volume de référence et pesés à leur état d'humidité au champ. Cette opération doit être effectuée le plus rapidement possible après le prélèvement, afin d'éviter toute perte d'eau par évaporation qui fausserait le résultat. Ensuite, l'échantillon est séché à 105 °C jusqu'à poids constant, puis repesé («matière sèche»). La différence entre les deux pesées donne la masse d'eau, qui servira à calculer la teneur en eau gravimétrique. Le volume de référence de l'échantillon étant connu, on peut également calculer sur cette base la teneur en eau volumétrique. (Stahr et al., 2012 ; Blume, Stahr et Leinweber, 2011 ; Fühler et Roth, 2004 ; Weil et Brady 2017). Il est possible d'analyser selon le même principe un échantillon structurellement perturbé. Mais dans ce cas, la teneur en eau ne peut pas être rapportée au volume du sol et ne peut donc être exprimée que par gravimétrie (Blume, Stahr et Leinweber, 2011).

Une autre méthode de terrain directe, mais peu commune est l'estimation de la teneur en eau grâce à la mesure du carbure (CM) (d'après Sibriski 1935). Cette méthode se base sur le fait que le carbure de calcium, au contact de l'eau, libère de l'acétylène. La quantité d'acétylène peut alors être déterminée par volumétrie gazeuse (VDLUF, 2016 ; Blume, Stahr et Leinweber, 2011). Pour cela, environ 5 à 20 g de sol (selon l'humidité) tirés d'un échan-

(8)

$$\text{Teneur en eau gravimétrique } \theta_m = \frac{\text{Masse d'eau}}{\text{Masse de sol sec}} \times 100 \text{ [\%]}$$

(9)

$$\text{Teneur en eau volumétrique } \theta_v = \frac{\text{Volume d'eau}}{\text{Volume de l'échantillon de sol}} \times 100 \text{ [\%]}$$



Figure 30 : Utilisation d'une sonde TDR sur la paroi d'un profil pour mesurer la teneur en eau volumétrique
Source de l'illustration: CCSols.



Figure 31 : Utilisation d'une sonde TDR depuis la surface du sol pour mesurer la teneur en eau volumétrique
Source de l'illustration: CCSols.



Figure 32 : Sélection de différents modèles de sondes TDR servant à mesurer la teneur en eau volumétrique.
Source de l'illustration: CCSols.

fillon mixte issu de 8 à 10 sondages sont placés avec des billes d'acier et une ampoule de carbure de calcium dans une bouteille sous pression ; celle-ci est fermée hermétiquement avec une tête de manomètre. La bouteille est agitée afin que les billes d'acier fassent éclater l'ampoule de carbure de calcium et que celui-ci se mélange avec le sol. Lorsque la pression cesse d'augmenter (après environ 10 à 20 min.), la pression finale peut être lue sur le manomètre, ce qui permet de déterminer la teneur en eau. Une augmentation de pression de 1 bar correspond à 1 g d'eau (VDLUFA, 2016). Cette méthode ne convient pas pour les sols tourbeux et devient imprécise à des teneurs en eau du sol supérieures à 30 % (VDLUFA, 2016 ; Blume, Stahr et Leinweber, 2011).

Mesures indirectes

Les mesures directes étant destructrices et ne pouvant pas être répétées au même endroit, plusieurs méthodes de substitution indirectes ont été développées (Stahr et al., 2012). Elles ne relèvent pas directement la teneur en eau, mais mesurent des grandeurs dites « proxy », qui sont en étroite corrélation avec la teneur en eau (Fühler et Roth, 2004). De nombreux types de capteurs ont été conçus par différents fabricants pour mesurer la teneur en eau. Tous ne peuvent pas être décrits dans le présent travail. Une grandeur proxy très utilisée est la constante diélectrique du sol. Celle-ci est beaucoup plus élevée dans l'eau que dans les composants du sol « air » et « solide ». Il s'ensuit qu'une augmentation de la teneur en eau entraîne une

nette augmentation de la constante diélectrique (Stahr et al., 2012 ; Blume, Stahr et Leinweber, 2011 ; Fühler und Roth, 2004 ; Gimper, 2010). Celle-ci est mesurée à l'aide de différentes sondes, qui peuvent être utilisées de manière mobile ou installées en permanence dans le sol. Ces sondes permettent de mesurer à long terme la teneur en eau dans le même volume de sol (ou presque) et de suivre ainsi sa variabilité temporelle (Stahr et al., 2012 ; Blume, Stahr et Leinweber, 2011 ; Fühler et Roth, 2004 ; Stehrenberger et Huguenin-Landl, 2016).

La méthode indirecte la plus connue est la mesure dite Time Domain Reflectometry (mesure TDR) (figures 30, 31 et 32). Elle consiste à enfoncez deux tiges de sondes TDR soit horizontalement dans la paroi d'un profil à la profondeur voulue (figure 30), soit verticalement depuis la surface du sol (figure 31). Les sondes sont reliées par un câble coaxial à l'appareil TDR proprement dit (constitué d'un générateur d'impulsions, d'un chronomètre et d'un affichage des mesures). Il mesure le temps de propagation d'une onde électromagnétique le long des tiges de la sonde. Le temps de propagation du signal varie en fonction de la constante diélectrique du sol. Comme cette constante dépend principalement de la teneur en eau, cette dernière peut être déterminée sur la base du temps de propagation à l'aide de formules de conversion établies. Souvent, elle peut être directement lue sur l'appareil (Blume, Stahr et Leinweber, 2011 ; Gimper, 2010).

La mesure FDR (Frequency Domain Reflectometry) fonctionne selon un principe similaire. Cette méthode consiste aussi à déterminer indirectement la teneur en eau à partir de la constante diélectrique du sol (Gimper, 2010). Les sondes FDR produisent un champ électromagnétique oscillant. Le sol entre les sondes agit comme un matériau isolant électrique qui atténue la propagation de ce champ. L'affaiblissement du champ induit une variation d'amplitude qui est mesurée par les sondes. Cette atténuation du champ électromagnétique permet de déterminer la constante diélectrique relative du sol et de déduire sa teneur en eau par des fonctions de régression (UGT-GmbH, 2020).

Outre les sondes TDR et FDR, il existe une méthode dite de mesure de la capacité électrique (Stehrenberger et Huguenin-Landl, 2016). La constante diélectrique du sol est déterminée par la mesure de la capacité électrique d'un condensateur. Ce dernier est constitué de deux électrodes entre lesquelles se trouve le sol en tant que matériau non conducteur. La quantité de charge électrique stockée par le condensateur est proportionnelle à la tension appliquée. Le rapport entre tension et charge est décrit par la capacité. Celle-ci se modifie lorsque la constante diélectrique du sol change. À partir de ce rapport, il est possible de déterminer la constante diélectrique du sol et de calculer ainsi sa teneur en eau (UGT-GmbH, 2020).

D'autres capteurs permettant de déterminer la teneur en eau sur la base de la constante diélectrique du sol ont été développés par la société UGT GmbH. Les capteurs UMP associent en quelque sorte les mesures TDR et FDR (figure 33). Ils émettent un signal continu (comme les capteurs FDR) et mesurent le décalage temporel par rapport au signal d'origine (comme les sondes TDR). La constante diélectrique est calculée à partir de la valeur temporelle mesurée (UGT-GmbH, 2020).

Outre ces sondes, qui calculent toutes indirectement la teneur en eau d'après la constante diélectrique du sol, la teneur en eau peut aussi être déterminée au moyen de sondes à neutrons ou de sondes gamma. Comme ces sondes contiennent des sources radioactives, elles sont soumises à des prescriptions spéciales de radioprotection (Fühler et Roth, 2004 ; Blume, Stahr et Leinweber, 2011).



Figure 33 : Sonde UMP disponible sur le marché pour mesurer la teneur volumétrique en eau du sol. Les sondes UMP associent les technologies TDR et FDR. Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de UGT GmbH.

C'est pourquoi elles sont rarement utilisées et ne seront pas présentées plus en détail dans ce rapport.

3.10. Réserve utile

Explication terminologique

La réserve utile (RU) désigne la part de l'eau du sol qui est accessible et utilisable par les plantes. L'eau disponible pour les plantes se trouve dans les pores grossiers inférieurs (jusqu'à 50 µm de diamètre équivalent) et dans les pores moyens d'un diamètre équivalent de 30 à 0,2 µm (Stations fédérales de recherches agronomiques, 1996 ; Stahr et al., 2012 ; VDLUFA, 2016). Les sols limoneux et argileux sont ceux qui présentent la RU la plus élevée (Stahr et al., 2012).

Mesure de la réserve utile

La réserve utile peut être déduite à partir de la courbe de désorption (chapitre 3.4.) d'un sol. En laboratoire, la courbe de désorption est déterminée sur des échantillons en cylindres de sol non perturbé. La réserve utile se calcule en déduisant l'eau morte de la capacité au champ.

L'eau dite «morte» est la part d'eau qui se trouve encore dans le sol à un pF de 4,2. La capacité au champ désigne la quantité d'eau qu'un sol peut retenir dans ses pores lorsqu'un équilibre statique est atteint avec la force de gravité. Elle se situe entre un pF de 1,8 et 2,5 suivant le niveau de la nappe (Stahr et al., 2012 ; VDLUFA, 2016). En laboratoire, la valeur équivalente à la capacité au champ est généralement déterminée, en référence au manuel allemand de cartographie des sols (4e édition), comme la teneur en eau volumétrique à un pF 1,8, ce qui correspond à un diamètre équivalent d'environ 50 µm (GT Sols, 1994 ; VDLUFA, 2016). Les forces de succion auxquelles cette valeur est définie varient toutefois selon le pays et la littérature. Au niveau international, la capacité au champ est fixée à pF 2.

3.11. Niveau de la nappe

Explication terminologique

Le niveau de la nappe décrit la position de l'eau de fond ou de pente sous la surface du sol ou sous un autre plan de référence. En hydrogéologie, la distance entre le niveau de l'eau et la surface du sol est appelée «niveau piézométrique» (Quante, 2017). D'un point de vue agronomique, le niveau de la nappe influence la croissance des plantes, le développement des racines et l'évapotranspiration (Gray et Mahapatra, 1965). Le niveau de l'eau s'élève lors de précipitations et s'abaisse en périodes de sécheresse.

Mesure du niveau de la nappe

En principe, le niveau de la nappe est déterminé dans un trou de sondage. Celui-ci peut être complété par un tube piézométrique (point 3.6.). La méthode consiste à creuser un trou dans le sol à l'aide d'un appareil approprié jusqu'à un niveau inférieur à celui de la nappe phréatique. Lorsque

le niveau statique est atteint, ce qui peut prendre plus ou moins de temps selon la nature du sol et sa conductivité hydraulique, le niveau de la nappe est déterminé en mesurant la distance en centimètres entre la surface du sol et la surface de la nappe (VDLUFA, 2016 ; Gray et Mahapatra, 1965).

La méthode piézométrique repose sur le même principe que la méthode du trou de sondage. Mais en plus, un tube piézométrique d'environ 5 cm de diamètre est installé dans le trou. Il doit être perforé dans la zone de détermination du niveau de la nappe. Le dispositif peut également être équipé en option d'un flotteur, ce qui permet de mesurer en continu le niveau de la nappe (Blume, Stahr et Leinweber, 2011). Lorsque le niveau statique est atteint, le niveau de la nappe est mesuré en tant que différence de hauteur en cm entre la surface de la nappe et la surface du sol (Blume, Stahr et Leinweber, 2011 ; Gray et Mahapatra, 1965).

3.12. Potentiel d'oxydo-réduction (potentiel redox)

Explication terminologique

Le potentiel d'oxydoréduction, ou potentiel redox du sol, détermine si une substance sera transformée par oxydation ou par réduction. Il indique donc l'état actuel de l'approvisionnement en oxygène du sol et ses effets biochimiques (Reiser et al., 2020 ; Stahr et al., 2012 ; Weil et Brady, 2017) (figure 34). Les réactions d'oxydoréduction sont utilisées par les micro-organismes pour produire de l'énergie. Plus le potentiel redox de la substance transformée est élevé, plus le gain d'énergie est important. Tant que de l'oxygène libre est disponible dans le sol, le potentiel d'oxydation reste élevé. Si l'oxygène est épuisé ou remplacé par des inclusions d'eau dans le sol, le potentiel redox du sol diminue (Stahr et al., 2012). Ce paramètre est donc très dépendant de la teneur en eau et peut ainsi varier considérablement dans l'espace et dans le temps. Dans les sols naturels, les potentiels redox peuvent fluctuer entre -500 mV et +1000 mV (Stahr et al., 2012 ; Reiser et al., 2020). Étant donné cette variabilité dans l'espace et dans le temps, la mesure du potentiel redox doit se faire de manière répétée, voire continue (Reiser et al., 2020). En outre, ce paramètre dépend aussi du pH, raison pour laquelle une standardisation à pH 7 devrait être effectuée. D'où la nécessité de mesurer aussi chaque fois le pH en plus du potentiel d'oxydoréduction (Stahr et al., 2012 ; Weil et Brady, 2017).

Mesure du potentiel redox

En principe, le potentiel redox est mesuré directement sur le terrain avec des électrodes selon la norme ISO 11271 (Stahr et al., 2012 ; Blume, Stahr et Leinweber, 2011) : une électrode de platine est installée dans le terrain en veillant à perturber le moins possible la structure du sol. Le potentiel est mesuré par rapport à une électrode normalisée dont le potentiel est connu. Le potentiel redox peut alors être directement lu sur un voltmètre connecté (Stahr et al., 2012 ; Blume, Stahr et Leinweber, 2011). Si les ions impliqués sont connus, le potentiel redox peut en plus être mis en rapport avec les plages de stabilité de différents états d'oxydo-réduction (Blume, Stahr et Leinweber, 2001). Les mêmes électrodes permettent de mesurer également le taux de diffusion de l'oxygène (ODR), qui



Figure 34 : Paroi d'un profil avec des taches de rouille qui indiquent clairement que des réactions d'oxydoréduction ont eu lieu.

Source de l'illustration : Wikimedia Commons.

donne aussi un aperçu de l'approvisionnement en oxygène du sol. Cependant, comme la mesure de l'ODR influence le potentiel redox, les mesures devraient être décalées dans l'espace ou dans le temps (Reiser et al., 2020). Une méthode permettant de mesurer en continu et à long terme avec la même électrode de platine à la fois le potentiel redox et l'ODR, est décrite dans Reiser et al. (2020).

Une autre méthode de détermination du potentiel redox est la méthode dite IRIS (Indicator of Reduction In Soils) (Rabenhorst, 2018). Elle consiste à enterrer dans le sol des tubes en PVC recouverts d'une couche d'hydrure de fer ou de birnessite. Selon le potentiel redox du sol, le revêtement (composés de Fe ou de Mn) se détache plus ou moins fortement des tubes. Après environ 2 semaines, ces derniers sont déterrés et photographiés pour déterminer les surfaces à nu. Cette méthode ne permet toutefois qu'un relevé semi-quantitatif du potentiel redox.

3.13. Résistance à la pénétration

Explication terminologique

La résistance à la pénétration est utilisée pour localiser et déterminer l'étendue spatiale des zones du sol compactés (Schwab, Dietrich et Gubler, 2018 ; Buchter et Häusler, 2009). Elle est mesurée à l'aide de différents types de pénétromètres. Ceux-ci sont classés, selon leur mécanisme de pénétration, en appareils dynamiques et appareils statiques (Lutz et Keller, 2020 ; Herrick et Jones, 2002). En principe, les pénétromètres sont constitués d'un instrument de mesure et d'une tige de sondage munie à son extrémité d'un cône servant de pointe de sonde. Le diamètre ou l'angle de la pointe de pénétration varient selon l'appareil, ce qui peut influencer les résultats des mesures (Lutz et Keller, 2020). D'autre part, la résistance à la pénétration dépend de l'état de la structure, de la composition ainsi que de l'humidité du sol (Schwab, Dietrich et Gubler, 2018 ; Lutz et Keller, 2020 ; Herrick et Jones, 2002).

Appareils de mesure dynamiques de la résistance à la pénétration

Dans les appareils dynamiques, également appelés «sondages au pénétromètre dynamique» ou «sondes de battage dynamiques», la sonde est enfoncée dans le sol à coups de maillet réguliers. À chaque coup, l'appareil mesure à la fois l'énergie



Figure 35 : La sonde Panda est un exemple de pénétromètre dynamique utilisé pour déterminer la résistance à la pénétration du sol.
Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de l'Observatoire national des sols, NABO.

de la frappe appliquée et la profondeur de pénétration de la pointe de la sonde et calcule sur cette base la résistance à la pénétration (en MPa). La surface du cône ainsi que la masse du maillet et de toutes les pièces mobiles de l'appareil doivent être connues (Lutz et Keller, 2020 ; Buchter et Häusler, 2009). Un exemple de sonde de battage dynamique est la sonde PANDA (Pénétromètre Automatique Numérique Dynamique Assisté par Ordinateur) très utilisée en Suisse (figure 35). Dans cet appareil, la sonde est enfoncée dans le sol avec un maillet normalisé. Certaines sondes de battage dynamique ne nécessitent pas de maillet, mais sont équipées d'un poids intégré dans l'appareil qui est lâché d'une certaine hauteur et exerce ainsi une force de frappe définie, ce qui permet de réduire au minimum l'influence de l'opérateur sur le résultat de la mesure. Un exemple de sonde de battage dynamique fonctionnant selon ce principe est le Light Weight Deflectometer de Sol Solution (Sol Solution, 2020).



Figure 36 : Pénétromètre statique, disponible sur le marché, permet de déterminer la résistance à la pénétration du sol.
Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de UGT GmbH.

Appareils de mesure statiques de la résistance à la pénétration

Avec les pénétrromètres statiques, la pointe de la sonde, contrairement aux instruments dynamiques, est enfoncée dans le sol à une vitesse constante (figure 36). La force appliquée est mesurée en tant que fonction de la profondeur de pénétration pour calculer la résistance à la pénétration. Cette force peut être exercée soit manuellement, soit par un mécanisme hydraulique ou électrique. Un exemple

de pénétrromètre statique à enfoncer manuellement dans le sol est le «Penetrologger» d'Eijkelkamp. Cet appareil peut être muni d'une pointe de sonde plus ou moins grande selon la résistance du sol. Il offre en plus la possibilité de connecter un capteur d'humidité du sol qui permet de déterminer à chaque mesure l'état d'humidité à la surface du sol (Eijkelkamp, 2020). Cette mesure complémentaire est importante, car la résistance à la pénétration dépend fortement de la teneur en eau du sol.

3.14. Comportement de retrait du sol

Explication terminologique

La déshydratation progressive d'un sol provoque des phénomènes de retrait dus aux forces de traction des ménisques d'eau entre les particules de sol (Düllmann, 2014). La courbe de retrait reproduit la relation entre volume et teneur en eau de l'échantillon de sol pendant le séchage (Leon et Wijaya, 2015 ; Li et Zhang, 2019 ; Braudeau et al., 1999). Cette courbe varie selon la nature du sol, respectivement sa granulométrie. Elle peut être divisée en deux à quatre phases (figure 37) (Leon et Wijaya, 2015 ; Braudeau et al., 1999 ; Düllmann, 2014). La première phase, dite de «retrait structurel», est celle durant laquelle les pores grossiers se vident, ce qui n'entraîne qu'un changement négligeable du volume de l'échantillon de sol. Dans la deuxième phase, également appelée phase de «retrait normal», la perte d'eau entraîne une diminution équivalente du volume de l'échantillon. Dans la troisième phase, la diminution du volume de l'échantillon n'est plus linéaire par rapport à la perte d'eau, mais le volume continue de diminuer. C'est pourquoi cette phase est appelée «retrait résiduel». Dans la quatrième et dernière phase, celle de «retrait nul», le volume de l'échantillon ne change plus, car les particules d'argile ne peuvent pas se rapprocher davantage, même si de l'eau continue à être relâchée (Düllmann, 2014). Le comportement de retrait des sols dépend beaucoup de leur composition, notamment de leur teneur en argile et des minéraux argileux présents. Plus la granulométrie d'un sol est fine, plus sa capacité de retrait est

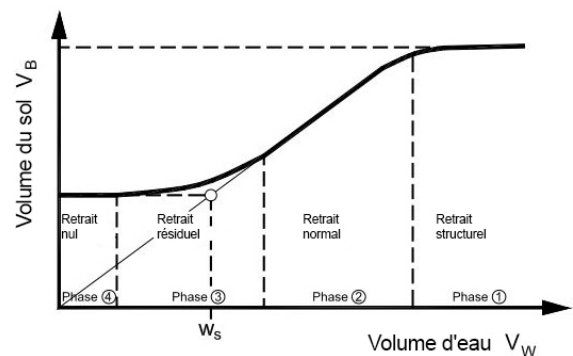


Figure 37 : Représentation schématique de la courbe de retrait d'un sol à texture fine, avec les quatre différentes phases de retrait. Illustration tirée de Durner, 2014.

élevée (Leon et Wijaya, 2015 ; Braudeau et al., 1999 ; Düllmann, 2014). Le comportement de retrait-gonflement des sols joue également un rôle important dans l'interprétation des courbes de désorption (chapitre 3.4.) (Düllmann, 2014 ; Li et Zhang, 2019).

Mesure du comportement de retrait des sols

Il n'existe pas de normes pour caractériser le comportement de retrait-gonflement, seule la détermination de la limite de retrait est fixée dans les normes DIN 18122 et ASTM D4943 ainsi qu'ASTM D427 (Düllmann, 2014 ; Li et Zhang, 2019). Pour pouvoir représenter la courbe de retrait et par conséquent la déformation du sol pendant le pro-

cessus de séchage, le volume et la teneur en eau du sol doivent être mesurés simultanément. Il est ainsi possible de représenter le comportement de retrait des sols lors d'une diminution de la teneur en eau. Cette dernière peut être mesurée par gravimétrie avec une balance. La mesure exacte du volume du sol se révèle plus difficile. De nombreuses méthodes sont disponibles. Elles peuvent être classées grossièrement en méthodes sans contact et méthodes avec contact direct (Li et Zhang, 2019). Le principe consiste soit à mesurer séparément les trois dimensions du changement de volume, soit à mesurer le retrait dans une seule direction et à extrapoler uniformément dans les autres directions en postulant un comportement de retrait isométrique. Certaines institutions placent également des mini-tensiomètres dans les échantillons de sol, afin de déterminer en plus le potentiel matriciel pendant le séchage. Dans l'idéal, il est ainsi possible d'établir non seulement la courbe de retrait, mais aussi la courbe de désorption (Weisskopf 2020, communication personnelle).

Méthodes de mesure directe du volume des échantillons de sol

La mesure avec un pied à coulisse est une méthode simple qui permet de déterminer de manière répétée le volume d'un échantillon de sol. On mesure la hauteur et le diamètre d'échantillons cylindriques, de manière à pouvoir calculer leur volume. Cette méthode n'est toutefois réalisable qu'avec des échantillons stables, uniformément cylindriques et bien préparés (Li et Zhang, 2019).

La hauteur de l'échantillon de sol peut aussi être mesurée automatiquement et en continu au moyen d'un capteur ou transducteur de déplacement. On part du principe que le diamètre de l'échantillon est constant, ce qui n'est pas forcément le cas et peut donc fausser les résultats (Li et Zhang, 2019). En admettant un processus de retrait isométrique, la variation de volume peut également être extrapolée dans les autres directions (diamètre).

Comme décrit au point 3.1, le volume peut également être mesuré par le principe d'Archimède du déplacement de l'eau. Cette méthode permet aussi de bien mesurer des échantillons de sol irréguliers, pour autant que l'enveloppe s'adapte à leur forme. Les inclusions d'eau ou de bulles d'air peuvent toutefois fausser les résultats (Li et Zhang, 2019 ; Braudeau et al., 1999). Cette méthode de mesure du volume occasionne un travail considérable et n'entre ainsi pas en ligne de compte pour des mesures en continu.

Méthodes de mesure du volume sans contact

Les méthodes sans contact permettent de mesurer le volume d'un échantillon sans qu'il ne soit touché par un capteur lors de la mesure. L'une des possibilités est de déterminer le volume par photogrammétrie. L'échantillon est photographié et ces photographies permettent ensuite de reconstituer un modèle 3D au moyen de triangulations et d'autres analyses. Au lieu de photographies, on peut aussi utiliser des capteurs laser pour réaliser le modèle. À partir de ces modèles, il est possible de calculer le volume de l'échantillon (Li et Zhang, 2019).

Braudeau et al. (1999) ont fait appel à un rétractomètre pour déterminer le volume des échantillons. Il s'agit d'un appareil équipé de plusieurs capteurs laser qui mesurent simultanément et en continu la hauteur et le diamètre de l'échantillon. La mesure du comportement de retrait du sol est effectuée dans des conditions contrôlées (Braudeau et al., 1999 ; Gabrielli Technology).

3.15. Stabilité des agrégats

Explication terminologique

Un agrégat est un corps constitué de particules de sol primaires de nature minérale ou organique assemblées entre elles (Stahr et al., 2012). La stabilité des agrégats permet d'évaluer l'érodabilité des sols (Blume, Stahr et Leinweber, 2011). Ce paramètre dépendant de différents facteurs, il existe de nombreuses méthodes pour le déterminer (Mair, 2017 ; Le Bissonais, 2016). Les plus courantes sont évoquées ci-après. L'unité dans laquelle la stabilité des agrégats est mesurée varie selon la méthode. Elle est souvent exprimée en pour cent d'agrégats stables, mais il est également possible de calculer le « mean weight diameter », qui est considéré comme une mesure de la stabilité des agrégats.

Évaluation visuelle de la stabilité des agrégats

La tendance à la battance au contact de l'eau peut être évaluée d'après la résistance que des agrégats opposent à la battance lorsqu'ils sont submergés d'eau. La méthode de la battance («Verschlammungsmethode») (selon Sekera et Brunner 1943) consiste à recouvrir d'eau désionisée une dizaine d'agrégats de 1 à 3 mm de diamètre placés dans une coupelle. Après un bref basculement de la coupelle, le degré de désintégration peut être déterminé visuellement selon une échelle d'évaluation à 6 niveaux. Cette méthode peut également être utilisée sur le terrain, mais uniquement sur des sols pauvres en sable et en gravier (Blume, Stahr et Leinweber, 2011 ; Mair, 2017).



Figure 38 : Déplacement des agrégats du sol sur un tamis placé dans un récipient d'eau dans le but de déterminer la stabilité des agrégats.
Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation du groupe de recherche Utilisation et protection des sols de la BFH-HAFL.

Mesure de la stabilité des agrégats

Dans la norme industrielle allemande DIN 19683-16, la stabilité des agrégats est déterminée selon la méthode du tamisage par voie humide (Buchter et al., 2004). Ces types de méthodes visent à reproduire les effets d'une forte averse entraînant une érosion par l'eau. Différentes méthodes existent, mais toutes fonctionnent selon le même principe (Mair, 2017 ; Le Bissonais, 2016). Dans tous les cas, les agrégats sont réhumectés sur un tamis qui est entièrement immergé dans l'eau et déplacé de haut en bas pendant une durée et à une vitesse déterminées (figure 38). On utilise souvent pour cela des colonnes de tamis de différentes mailles. Les agrégats se désagrègent en fonction de leur stabilité sous l'effet de la réhumectation et des forces hydrauliques exercées pendant le tamisage par voie humide (figure 39). Leur taille diminue et les agrégats instables tombent sur le tamis suivant aux mailles plus fines. Les résidus de tamisage sont séchés puis pesés, ce qui permet de connaître la répartition de la taille et du poids des fractions stables des agrégats, qui peuvent être calculés en pour cent de l'échantillon total (Mair, 2017 ; Agroscope Arbeitsvorschrift). Selon la méthode utilisée, les agrégats sont analysés secs à l'air, conditionnés à une certaine force de succion, ou à l'état d'humidité au champ. Les méthodes se distinguent en outre par le nombre de tamis et de tailles de mailles utilisés (Mair, 2017 ; Le Bissonais, 2016). Pour le tamisage par voie humide, il est recomman-



Figure 39 : Agrégats du sol restants après un tamisage par voie humide visant à déterminer la stabilité des agrégats.
Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation du groupe de recherche Utilisation et protection des sols de la BFH-HAFL.

dé d'employer une colonne de tamis qui peut être installée dans un dispositif permettant de régler la durée et la vitesse du processus de tamisage. Dans la plupart des cas, le tamisage dure environ une heure. En général, on effectue cinq répétitions de laboratoire par échantillon de sol et on calcule la moyenne pour caractériser l'échantillon. À partir de la distribution de la taille des particules, on peut aussi calculer le diamètre moyen pondéral («mean weight diameter») en tant que mesure de la stabilité des agrégats. Il s'obtient en faisant les sommes des diamètres moyens des agrégats multipliée par les pourcentages de poids de chaque classe d'agrégats, ce qui permet une comparaison entre le tamisage par voie humide et le tamisage à sec (Buchter et al., 2004 ; Agroscope Arbeitsvorschrift ; Mair, 2007).

La méthode de tamisage par voie humide modifiée selon Frei (2006) est dérivée de la précédente méthode. Un échantillon cylindrique est brisé en deux morceaux. Une moitié de l'échantillon est placée sur un tamis à mailles de 20 mm et fixée avec une grille de support pour éviter qu'il ne se renverse. Le dispositif de tamisage et l'échantillon de sol sont ensuite placés dans un bac en plastique rempli d'eau de manière à ce que l'échantillon soit complètement immergé. Après cinq minutes, l'eau est évacuée en 90 secondes environ, jusqu'au bord inférieur du tamis. Les matériaux terreux sur et sous le tamis sont séchés séparément après élimination des pierres. La stabilité des agrégats est calculée en tant que quotient des matériaux terreux sur le tamis et de la quantité totale de matériaux terreux de la moitié de l'échantillon cylindrique. Cette méthode permet d'étudier la stabilité des agrégats à l'état naturel et dans la composition naturelle du sol, car la structure du sol n'est désagrégée que lors du processus de tamisage (Burri, 2006).

Il existe, par analogie au tamisage par voie humide, une méthode de tamisage à sec qui vise à reproduire les forces de frottement produites par l'érosion éolienne. Les agrégats de moins de 4 mm sont tamisés sur un tamis rotatif pendant une durée déterminée et à une intensité définie. Les résidus de tamisage sont considérés comme des agrégats résistants et repesés. On obtient ainsi la distribution de la taille des agrégats ou il est aussi possible de calculer le «mean weight diameter» (Mair, 2007).

Pour déterminer la stabilité des agrégats sous l'influence de fortes précipitations, on peut aussi recourir à la méthode par aspersion (Rainfall Impact Method RMI). Celle-ci consiste à asperger les agrégats dans un simulateur de pluie, et à mesurer l'écoulement et la perte de sol. L'intensité et la durée des précipitations peuvent être variées. Les conditions sont très proches des conditions réelles sur le terrain, les agrégats sont aspergés uniquement depuis le haut (Mair, 2017 ; Le Bissonnais, 2016). Si l'essai d'aspersion est complété ensuite par un tamisage, le résultat peut être exprimé en «mean weight diameter» (Le Bissonnais, 2016).

La stabilité des agrégats peut aussi être déterminée par dispersion aux ultrasons (Mair, 2017 ; Mentler et al., 2004). Dans un premier temps, les agrégats de sol sont prétraités avec des ultrasons dans de l'eau distillée. Les ondes acoustiques ont pour effet d'accélérer le liquide et de le pousser entre les particules de sol, ce qui entraîne la désintégration des agrégats. Les agrégats sont eux aussi accélérés et leurs collisions provoquent une réduction supplémentaire de leur taille. La durée et l'intensité de l'exposition aux ondes sonores sont définies à l'avance. Ensuite, on procède à un tamisage par voie humide qui permet de déterminer les fractions d'agrégats stables (Mentler et al., 2004).

Une autre mesure de la stabilité des agrégats est basée sur la dispersibilité de l'argile. Dans les sols instables, les particules d'argile se détachent au contact de l'eau, alors que dans les sols stables, elles restent liées aux agrégats. Une fois détachées, les particules d'argile deviennent mobiles et peuvent entraîner la formation d'une croûte à la surface du sol («battance»), une diminution de l'infiltration de l'eau, une sensibilité accrue à l'érosion et la désagrégation de la structure du sol (Dexter et Czyz, 2000). La dispersibilité de l'argile dans les sols est étudiée par turbidimétrie (Dexter et Czyz, 2000 ; Burri, 2006). La méthode consiste à agiter un échantillon de sol dans de l'eau distillée et à le laisser reposer pendant 18 heures. Ensuite, la turbidité de l'eau est mesurée dans un turbidimètre par comparaison avec une solution d'étalonnage. Plus l'eau est trouble, plus la quantité d'argile détachée est importante et plus le sol est instable (Czyz et Dexter, 2008).

Il existe une autre méthode d'approximation de la stabilité des agrégats basée sur la stabilité à la percolation. Ce paramètre détermine la stabilité des agrégats sur la base de la quantité d'eau qui percole à travers une colonne contenant des agrégats de sol initialement secs à l'air (Mbagwua et Auerswald, 1999).

La méthode de mesure de la stabilité à la percolation a été développée par Sekera et Brunner (1943), puis perfectionnée notamment en Allemagne (Mair, 2017 ; 1999 ; Kainz et Weiss 1988). Elle consiste à placer 10 g d'agrégats séchés à l'air de 1 à 2 mm de diamètre dans un petit tube de 10 cm de long et de 1,5 cm de

diamètre fermé à l'autre extrémité par une gaze. Ensuite, de l'eau distillée est versée par le haut sur les agrégats secs à une pression hydrostatique de 20 cm. La quantité d'eau qui s'écoule dans le tube est déterminée par gravimétrie en tant que fonction du temps. Après 10 min, la mesure est arrêtée (Mbagwua et Auerswald, 1999 ; Kainz et Weiss, 1988). La stabilité à la percolation peut être exprimée en ml/min ou il est aussi possible d'établir une courbe des valeurs cumulées en tant que mesure de la stabilité des agrégats. Si le débit reste constant dans le temps, les agrégats sont considérés comme stables. S'il diminue fortement avec le temps, le sol est considéré comme instable (Mbagwua et Auerswald, 1999).

3.16. Évaluation visuelle de la structure

Explication terminologique

L'évaluation de la structure consiste à évaluer l'état du sol à partir de caractéristiques visuelles. La structure du sol est une propriété dynamique, influencée par des processus naturels ainsi que par l'être humain (notamment par le travail du sol et le passage de véhicules) (Guimaraes et al., 2017). Des méthodes simples d'évaluation visuelle de la structure du sol ont été vulgarisées et sont aujourd'hui fréquemment utilisées dans l'agriculture pour détecter les compactations des sols. L'évaluation de la structure est importante notamment pour aider les agriculteurs à prendre des décisions relatives à la gestion des sols (Guimaraes et al., 2017 ; Ball et al., 2017). De nombreuses méthodes visuelles différentes ont été développées et sont appliquées dans diverses parties du monde. Seule une sélection d'entre elles sont présentées ci-dessous (pour d'autres méthodes, voir également Guimaraes et al. (2017), Ball et al. (2017) et Boizard et al. (2007)).

Évaluation visuelle de l'état de la structure du sol

Différentes procédures peuvent être utilisées pour évaluer l'état de la structure du sol tant sur le terrain qu'en laboratoire. Leur principe est assez similaire : il consiste en général à évaluer l'état structurel du sol sur la base de la taille, de la forme et de la stabilité des agrégats, de la porosité visible, de la

couleur et de l'enracinement du sol (Guimaraes et al., 2017). En revanche, les méthodes se distinguent nettement au niveau de l'expression des résultats. Certaines utilisent des notes ou un indice. Les résultats sont ainsi disponibles sous forme chiffrée et peuvent être plus facilement comparés. D'autres décrivent la structure du sol sans donner d'évaluation chiffrée de l'état. Une méthode de description de la structure du sol est le test à la bêche («Spatendiagnose») selon Görbing (Beste, 2005), qui permet de se faire une idée générale de la structure. Un bloc de terre en forme de brique fournissant une image actuelle de l'état de la structure est prélevé à l'aide d'une bêche. La réalisation du test est



Figure 40 : Échantillons prélevés à la bêche en vue de l'évaluation visuelle de la structure du sol sur le terrain. Source de l'illustration : CCSols.

déconseillée si l'humidité du sol est trop élevée (supérieure à la capacité au champ) ou trop faible (sol sec). L'échantillon prélevé à la bêche est examiné et décrit directement sur le terrain du point de vue de l'état de la structure, de l'humidité du sol, de la croissance des racines et de la compaction (figure 40). Aucun autre instrument n'est nécessaire (Beste, 2005).

Parmi les autres méthodes figure l'évaluation visuelle des types d'agrégats et des résidus de la désagrégation de Nievergelt, Petrasek et Weisskopf (2002). Il s'agit d'une description semi-quantitative et normalisée de la forme de la structure basée sur la détermination de la taille, de la forme, de la

stabilité et de la part en masse des agrégats. L'évaluation de la structure doit être effectuée dans des conditions d'humidité modérée (pF 1,8 – 2,5). Un échantillon est prélevé avec une bêche ; les agrégats présents sont d'abord subdivisés en classes de grandeur. Ensuite, la forme et le type d'agrégats dans les classes de grandeur respectives sont déterminés au moyen de fiches illustrées et de tableaux. La résistance des agrégats est estimée par un test de pression entre deux doigts. La marche à suivre détaillée de cette évaluation visuelle de la structure est présentée dans la figure 41. Les résultats sont consignés dans un formulaire et évalués (Nievergelt, Petrasek et Weisskopf, 2002).

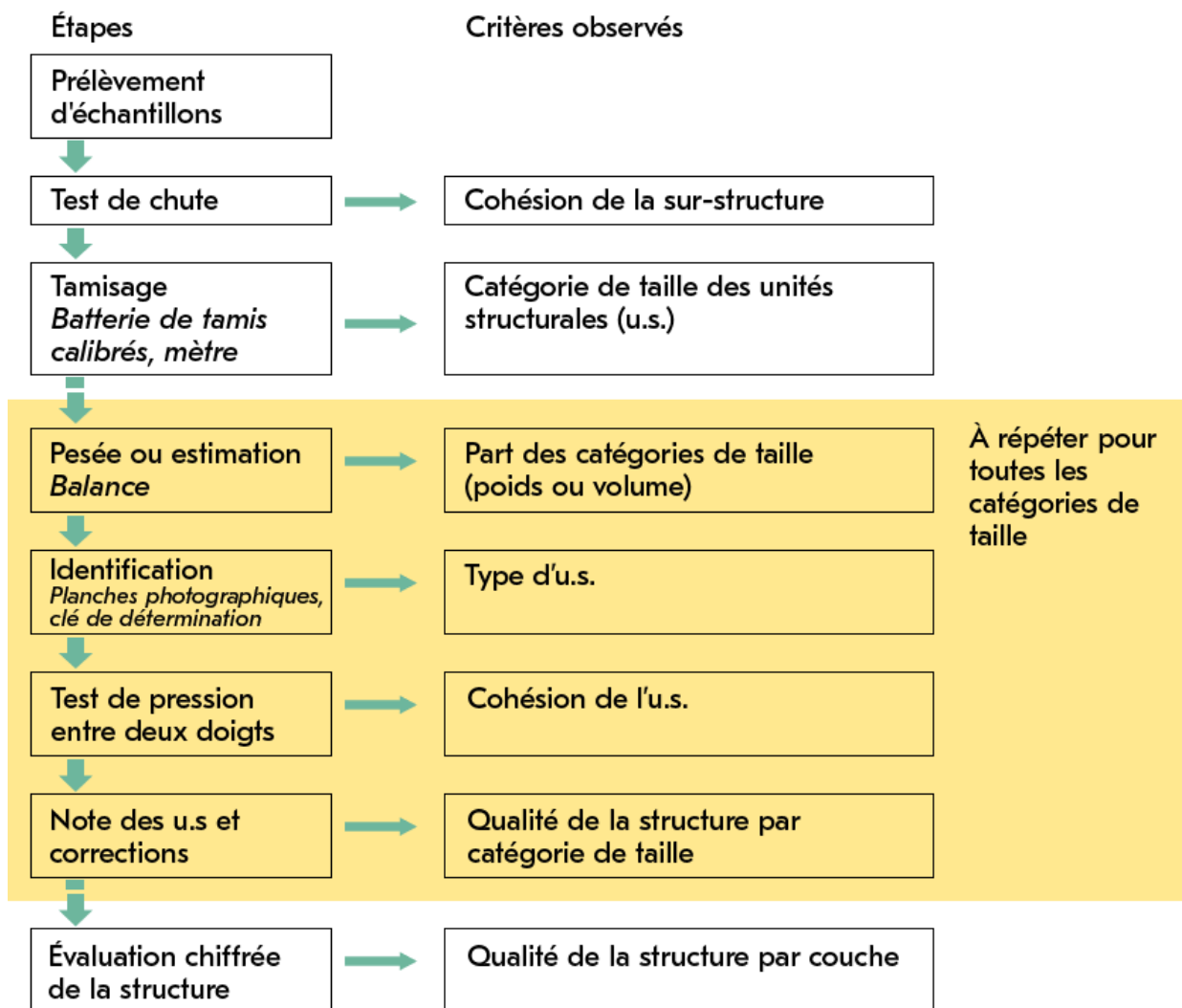


Figure 41 : Marche à suivre pour l'évaluation visuelle de la structure à la station de recherche de Reckenholz (u.s. = unité structurales). Graphique adapté et modifié d'après Nievergelt, Petrasek et Weisskopf, 2002.

La méthode Visual Evaluation of Soil Structure (VESS) est également réalisée sur la base d'un test à la bêche (Ball et al., 2017). Là aussi, la qualité de la structure du sol est évaluée à l'aide de tableaux directement sur le terrain (sur la paroi du profil ou sur un échantillon prélevé à la bêche). Cette méthode constitue une version améliorée du test à la bêche de Peerlkamp (Peerlkamp, 1959). L'échantillon prélevé à la bêche est brisé manuellement afin d'évaluer la forme, la taille et la porosité visible des fragments et des agrégats. La colonisation de l'échantillon par les racines est également examinée. Ces paramètres sont classés à l'aide d'un tableau sur une échelle de un à cinq, un étant la meilleure note et cinq la plus mauvaise. Il existe une procédure VESS («fiche VESS») pour la partie supérieure du sol et une autre pour la partie sous-jacente du sol («fiche subVESS»). L'évaluation subVESS porte sur la cohésion, la porosité, la colonisation par les racines et la forme des agrégats. Les évaluations VESS et subVESS doivent être réalisées sur des sols ni trop secs ni trop humides (Ball et al., 2017).

Pour pouvoir aussi réaliser la méthode VESS avec des échantillons cylindriques, la procédure a été adaptée et décrite en tant que «méthode coreVESS» : des échantillons prélevés dans des cylindres sont conditionnés en laboratoire (à -60 ou -100 hPa), puis évalués visuellement et notés à l'aide d'une fiche coreVESS en fonction de la stabilité, de la forme des agrégats et de la porosité. Cette procédure permet une évaluation standardisée de la structure du sol (Johannes et al., 2017).

Une «nouvelle méthode de test à la bêche» est élaborée actuellement par Agroscope, la HAFL et le FiBL. Elle consiste à examiner jusqu'à une profondeur de 40 cm les différents horizons d'un échantillon prélevé à la bêche, en évaluant la stabilité, le type, la taille et la fréquence des agrégats, la porosité, la couleur et l'odeur du sol, l'enracinement et l'activité des vers de terre ainsi que les résidus de récolte. Chaque critère est évalué dans chaque couche de sol par une note qui est reportée dans un formulaire d'évaluation. Pour les évaluations agricoles, des mesures d'amélioration à court terme et des mesures préventives à moyen terme sont expliquées en fonction du résultat du test. Il faut effectuer au moins deux prélèvements à la bêche par couche de sol (jusqu'à 40 cm de profondeur), dans des conditions de sol appropriées. Pour les cultures d'automne, le test à la bêche est réalisé en été après la récolte et pour les cultures de printemps au milieu de la période de végétation et, en plus, éventuellement après la récolte (Weisskopf 2020, communication personnelle).

4. Discussion et conclusion

4.1. Masse volumique apparente

Les méthodes de détermination de la masse volumique apparente peuvent être divisées en méthodes directes et indirectes (point 3.1, fig. 1). Il est en outre possible d'effectuer une estimation sur la paroi du profil, mais qui ne permet qu'une classification grossière de la masse volumique apparente : les valeurs ainsi obtenues sont trop imprécises pour être utilisées pour d'autres calculs. Il s'agit toutefois d'une méthode rapide et peu coûteuse qui fournit une première estimation qualitative de ce paramètre.

Les méthodes directes, contrairement aux méthodes indirectes, nécessitent le prélèvement d'échantillons, ce qui augmente considérablement le travail et entraîne des perturbations du sol (méthodes destructives). Si l'échantillon de sol est prélevé à un volume connu (comme dans la méthode du cylindre), il doit en outre être préparé au volume standard du cylindre. Cette étape entraîne un travail supplémentaire, mais elle est d'une grande importance pour la précision de la méthode.

Suivant le type de sol, il peut s'avérer préférable d'opter pour une autre méthode de détermination directe. La méthode du cylindre est surtout utilisée dans les sols agricoles. En présence de sols très pierreux, la méthode par excavation est mieux adaptée. Il faut toutefois compter environ 30 minutes pour une excavation. Cette méthode demande d'autant plus de travail et d'efforts que la zone à mesurer est située en profondeur dans le sol. Si le volume est déterminé au moyen d'un densitomètre ou d'un densitomètre à membrane, l'achat de l'appareil occasionne en outre des coûts supplémentaires. Dans ces deux méthodes directes, l'échantillon doit être séché au laboratoire pendant au moins 24 h afin de déterminer la masse sèche. S'il s'agit de sols très argileux dont les matériaux présentent une bonne cohésion, on peut aussi recourir à la méthode des mottes («Clod»), basée sur le principe de la poussée d'un liquide de densité connue par l'échantillon de sol. La littérature (Al-Shammary et al., 2018) relève toutefois que le prélèvement de mottes de terre représentatives est difficile, car les grosses mottes se désagrègent facilement. En outre, le prélèvement

devient de plus en plus difficile à mesure que la profondeur du sol augmente. Les échantillons doivent être placés pendant au moins 48 heures dans l'étuve, car les matériaux argileux ont besoin de plus de temps pour sécher. Toutes les méthodes discutées permettent de déterminer également la teneur en eau gravimétrique par pesage de l'échantillon avant et après le séchage en plus de la masse volumique apparente.

Les méthodes directes les plus répandues et qui présentent la plus haute résolution spatiale sont celles basées sur le principe de la méthode du cylindre (Al-Shammary et al., 2018 ; Buchter et Häusler, 2015). La mesure du volume demande en outre moins de travail qu'avec les autres méthodes directes, puisque celui-ci est déjà déterminé par les cylindres d'échantillonnage aux dimensions fixes. Dans la littérature, cette méthode est décrite comme fiable. Souvent, la matière sèche, qui doit être connue pour calculer la masse volumique apparente, n'est mesurée qu'à la fin d'une série de différentes mesures effectuées sur le même échantillon en cylindre de sol non perturbé, car celui-ci est ensuite inutilisable (point 8.2.). Cette méthode de détermination de la masse volumique apparente est considérée comme peu coûteuse et facile à mettre en œuvre même pour les profanes, car les appareils nécessaires font généralement partie de l'équipement standard de chaque laboratoire.

Les méthodes indirectes, contrairement aux méthodes directes, ne nécessitent pas de prélèvement d'échantillons de sol. Elles sont donc non destructives et plus efficaces. L'avantage est que la masse volumique apparente peut être mesurée plusieurs fois sur un même volume de sol, ce qui permet un suivi plus efficace de la dynamique temporelle. En revanche, ces méthodes sont généralement plus coûteuses, car elles requièrent des appareils de mesure supplémentaires. Les mesures sur le terrain par rayonnement gamma (méthode par radiation) sont rapides, mais l'appareil est cher à l'achat. Il doit en outre être calibré et requiert une grande expertise de la part de l'utilisateur ainsi que des

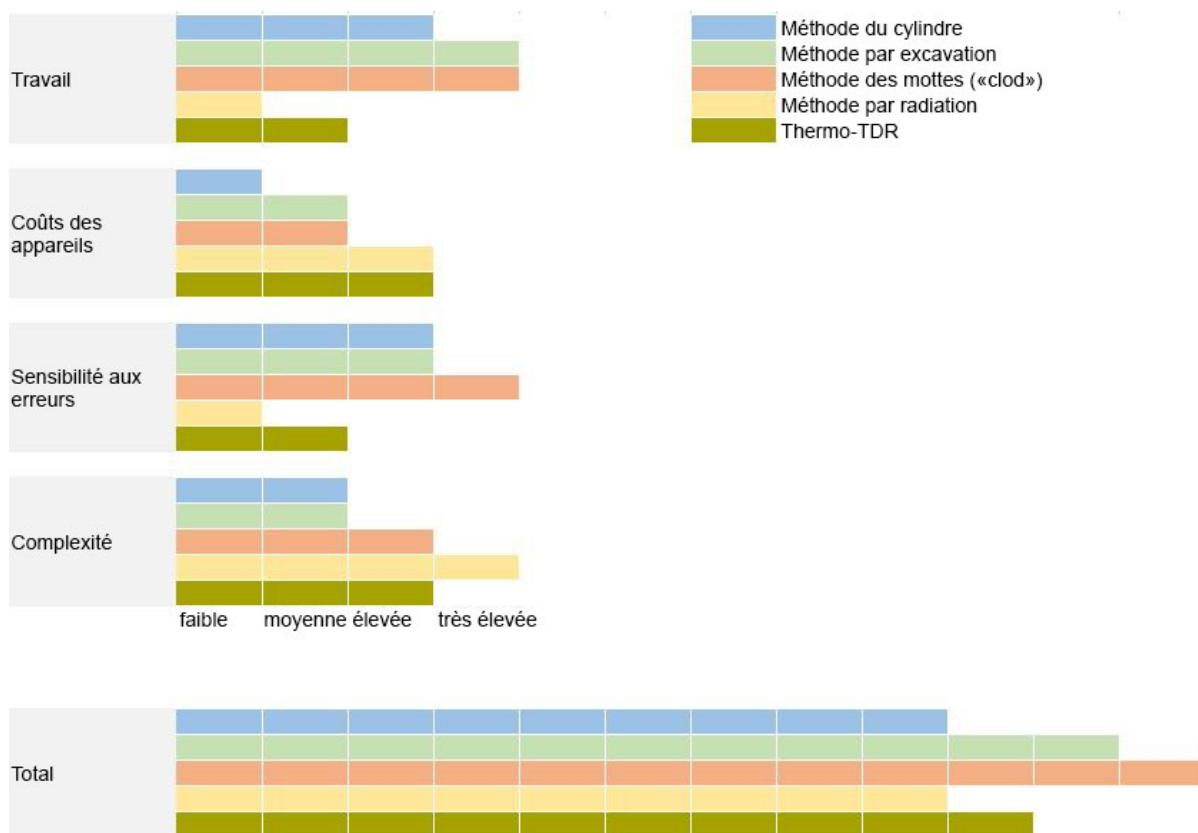


Figure 42 : Évaluation des méthodes d'analyse de la masse volumique apparente du point de vue des coûts, du temps de travail, de la sensibilité aux erreurs et de la complexité par analyse. Les coûts se réfèrent uniquement aux coûts des appareils. Les temps d'attente ne sont pas pris en compte dans le travail. On trouvera un aperçu des critères d'évaluation au chapitre 2.1. Les évaluations doivent être considérées comme des évaluations relatives entre les méthodes. Le «total» montre les champs cumulés par méthode. Plus il est élevé, plus la méthode est difficile, coûteuse, exigeante en travail et sujette à erreurs. La méthode par radiation n'a été évaluée que jusqu'à 30 cm de profondeur.

exigences accrues en matière de mesures de sécurité et d'organisation du travail. La précision de la méthode est considérée comme Modérément fiable. Lorsque les relevés sont effectués depuis la surface du sol, la probabilité d'erreurs augmente fortement avec la profondeur, de sorte que les mesures ne sont possibles que jusqu'à 30 cm de profondeur au maximum (Al-Shammary et al., 2018).

La technique Thermo-TDR est la seule méthode qui permette de mesurer la masse volumique apparente en continu dans le temps. Elle demande plus de travail que les autres méthodes indirectes, car les sondes doivent être enterrées dans le sol. Pour pouvoir déterminer la masse volumique apparente à partir des propriétés thermiques des sols, d'autres paramètres, comme la teneur en eau ou la granulométrie, devraient être aussi connus.

Recommandation : Malgré le travail assez important qu'elle nécessite, la méthode du cylindre, caractérisée par le prélèvement d'échantillons de sol d'un

volume connu, obtient globalement les meilleurs résultats (figure 42). Elle demande certes plus de temps que les méthodes indirectes, mais elle se laisse bien intégrer dans le déroulement des tâches du laboratoire et est simple à réaliser. Il est en outre facile d'en déterminer l'exactitude et la précision par l'étalonnage et le calcul d'erreur. Par ailleurs, le coût des appareils est réduit, car les instruments utilisés, à l'exception des cylindres de prélèvement, font normalement partie de l'équipement standard d'un laboratoire. Si le sol est trop pierreux, la méthode devient toutefois imprécise et devrait être remplacée par la méthode par excavation.

La méthode par radiation convient très bien et est très précise pour les mesures à partir de la surface du sol jusqu'à une profondeur de 30 cm, ce qui limite toutefois fortement sa résolution en profondeur (figure 42). Pour cette raison et compte tenu des prescriptions de sécurité plus strictes, nous recommandons la méthode du cylindre plutôt que la méthode par radiation.

4.1.1. Degré de compaction (degree of compactness)

La méthode d'Hakansson (1990) demande beaucoup de temps (une semaine d'application de pression) et nécessite un œdomètre, que peu de laboratoires possèdent. En outre, il a été démontré que les résultats des mesures à faible pression (200 kPa) pouvaient être influencés par la structure du sol et la teneur en eau, ce qui fausse les valeurs pour la masse volumique de référence. En utilisant cette méthode, Reichert et al. (2009) ont obtenu des valeurs plus basses pour les masses volumiques de référence — et par conséquent plus élevées pour le degré de compaction — qu'avec d'autres méthodes (entre autres l'essai Proctor et différents niveaux de pression).

L'essai Proctor est au contraire indépendant de la teneur initiale en eau, bien normalisé, et les appareils Proctor sont faciles à obtenir. Naderi-Boldaji et al. (2016) recommandent aussi cette méthode pour déterminer la masse volumique de référence.

Recommandation : Pour déterminer la masse volumique de référence servant à établir le degré de compaction, nous recommandons d'utiliser l'essai Proctor, car il est moins dépendant des autres paramètres du sol. Il convient de noter de manière générale que la masse volumique de référence, quelle que soit la méthode de détermination, est étroitement corrélée avec la teneur en argile.

4.2. Masse volumique réelle

La masse volumique réelle est calculée en tant que quotient de la masse par le volume de solide de l'échantillon de sol. Le volume de solide peut être déterminé selon différentes méthodes. Dans la méthode de référence PY-DR des stations fédérales de recherches agronomiques, il est mesuré au moyen d'un pycnomètre à eau. Les échantillons sont laissés au repos pendant la nuit, mis à bouillir pendant au moins 20 minutes, puis transférés dans un bain-marie thermostaté, ce qui augmente le temps nécessaire. Cette méthode requiert en outre différents appareils (pycnomètre à eau, agitateur magnétique avec chauffage, bain-marie thermostaté). Elle est considérée comme très précise (VDLUFA, 2016).

La détermination par le xylène est plus rapide que la méthode de référence. Mais il faut parfois aussi plusieurs heures jusqu'à ce que toutes les bulles d'air soient éliminées de l'échantillon (VDLUFA, 2016). La manipulation du xylène n'est pas sans danger, raison pour laquelle cette méthode est moins appréciée par les laboratoires. Ces deux

méthodes — xylène et pycnomètre à eau — ont l'avantage de pouvoir être réalisées avec des échantillons de sol perturbés. Elles peuvent donc être facilement programmées à la fin d'une procédure de laboratoire, il n'y a, par conséquent, pas besoin de prélever des échantillons de sol non perturbé en supplément (point 8.2).

La méthode avec un pycnomètre à air nécessite par contre des échantillons de sol séchés à la structure non perturbée. Elle est en outre moins précise en raison de la précision de lecture limitée du pycnomètre à air. Le coût des appareils est plutôt élevé, mais en contrepartie le travail est nettement réduit par rapport aux autres méthodes.

Recommandation : Pour déterminer la masse volumique réelle, nous recommandons la méthode de référence des stations fédérales de recherches agronomiques (PY-DR) avec un pycnomètre à eau, parce qu'elle s'intègre bien dans la procédure de laboratoire et qu'il n'est pas nécessaire de prélever des échantillons supplémentaires.

4.3. Pierrosité

Masse du squelette

La masse du squelette est déterminée par tamisage de l'échantillon de sol avec un tamis à mailles de 2 mm. L'échantillon peut être tamisé soit à sec, soit par voie humide. Le NABO (Observatoire national des sols de Suisse) recourt au tamisage par voie humide pour les gros échantillons volumiques et au tamisage à sec pour les échantillons d'horizons (Schwab & Gubler, 2016). S'agissant du temps de travail nécessaire, les deux méthodes sont équivalentes. Elles permettent toutes deux de déterminer la masse de la terre fine en soustrayant la masse du squelette de la masse totale de l'échantillon de sol. Le tamisage à sec peut entraîner des pertes de sol lors de la réduction de l'échantillon avec un concasseur à mâchoires. Mais ces pertes n'ont pas d'influence sur la masse du squelette. Les deux méthodes utilisent les mêmes appareils, qui font partie de l'équipement standard d'un laboratoire (tamis à mailles de 2 mm, balance, étuve).

Volume du squelette

À l'issue du tamisage, le volume du squelette peut être déterminé selon la méthode du déplacement. Celle-ci occasionne un travail supplémentaire et est, en outre, sujette à erreurs en cas de faible pierrosité du fait de la résolution numérique limitée de la lecture du volume. Le volume peut aussi être calculé à partir de la masse et de la masse volumique de la fraction du squelette (chapitre 3.3., équation 3). Pour cela, la masse volumique du squelette doit être déterminée avec un pycnomètre à eau. Depuis 2010, le NABO se base sur une estimation de la masse volumique pour le squelette de $2,4 \text{ g/cm}^3$ pour calculer le volume (Schwab & Gubler, 2016). L'utilisation d'une valeur estimée permet de réduire le travail, mais au prix d'une erreur systématique. Celle-ci est d'une grande importance en particulier en cas de différentes compositions minéralogiques du squelette. Une autre possibilité consiste à estimer la pierrosité en pour cent du volume par un examen visuel de la paroi du profil. Cette méthode requiert toutefois beaucoup d'expérience et dépend toujours des connaissances de la personne qui effectue l'évaluation.

Recommandation : La détermination de la masse du squelette peut s'effectuer aussi bien par tamisage à sec que par tamisage par voie humide. La méthode la plus simple pour déterminer la pierrosité volumique est de la calculer à partir de la masse et de la masse volumique du squelette. Dans les sols pierreux (à partir d'environ 10% de pierrosité), le volume du squelette peut aussi être déterminé par la méthode du déplacement.

4.4. Espace poral du sol : volume total des pores et distribution de la taille des pores

Les appareils utilisés pour étudier la distribution des pores varient en fonction du domaine de pF (cf. point 3.4.). Les mesures jusqu'à pF 4,2 sont souvent effectuées dans les laboratoires. En revanche, dans le domaine de pF 4,2 et au-delà, elles ne sont généralement pas pertinentes du point de vue de la disponibilité physiologique de l'eau pour les racines des plantes et sont donc rarement utilisées. Ces mesures dans les plages de pF élevées peuvent toutefois s'avérer utiles pour les modélisations du bilan hydrique. Dans la méthode de référence des stations fédérales de recherches agronomiques, les mesures dans le domaine des pores grossiers jusqu'à pF 2 sont effectuées avec des boîtes à sable (sandbox) équipées d'une colonne d'eau suspendue (plaques de succion et système de réglage de tension). Dans les plages de pF plus élevées, c'est la méthode de surpression avec une marmite à pression qui est utilisée. Les méthodes basées sur un dispositif de dépression ou sur une marmite à pression sont considérées comme largement équivalentes. Cependant, des analyses du service de la protection des sols de Zurich ont montré que les valeurs de porosité obtenues avec la méthode de la boîte à sable étaient toujours plus basses. Cela s'explique probablement par le fait que la surface du sable ne présente pas toujours la force de succion souhaitée. C'est pourquoi il conviendrait de contrôler sur chaque échantillon avec un tensiomètre la force de succion effective dans la zone de l'échantillon de sol (Isler, Luzius et Buchter, 2001). En outre, la méthode de la boîte à sable avec colonne d'eau suspendue ne permet de mesurer que la plage inférieure de pF, alors que la marmite à pression est utilisable sur toute la plage de pF (figure 43). Dans la plage des pressions basses, la qualité des mesures de ces dernières est toutefois moins bonne.

Les pores grossiers jusqu'à pF 2 peuvent aussi être déterminés selon la méthode volumétrique avec colonne d'eau suspendue (méthode VHW), ou à l'aide de l'appareil de mesure HYPROP 2 (jusqu'à

pF 2,8). Les deux dispositifs ne permettent d'utiliser et de mesurer qu'un seul échantillon à la fois. Si le contrôle des sources d'erreurs et des problèmes éventuels est ainsi facilité, en particulier dans la zone des pores les plus grossiers, le temps de travail est en revanche nettement plus important (figure 43). En outre, les appareils HYPROP 2 sont coûteux. Les dispositifs à dépression et à surpression permettent de mesurer plusieurs échantillons en même temps (une trentaine environ selon la taille des échantillons et de l'appareil) et réduisent ainsi considérablement la charge de travail.

Recommandation : Les appareils à dépression ou à surpression conviennent mieux pour des cadences d'analyse élevées, car ils permettent de mesurer plusieurs échantillons en même temps, ce qui relativise également leur différence de prix par rapport aux dispositifs pour échantillons individuels. La marmite à pression permet en outre d'effectuer des mesures sur toute la plage de pF, ce qui rend cette méthode particulièrement intéressante. Cependant, le risque d'erreur dans le domaine des pores grossiers est élevé, raison pour laquelle nous recommandons la mesure selon la méthode de référence des stations fédérales de recherches agronomiques (figure 43).

Volume total des pores

Le volume total des pores peut être calculé en tant que somme des différentes classes de pores (étapes sur la courbe de désorption). Mais il est souvent déterminé indépendamment de la courbe de désorption afin de contrôler la plausibilité de cette dernière. Dans ce cas, il peut être mesuré directement avec un pycnomètre à air. Le volume de matière solide peut être lu sur l'appareil lui-même et déduit du volume de l'échantillon pour obtenir le volume total des pores. Il s'agit donc d'une méthode efficace et d'un coût raisonnable. Le volume total des pores peut aussi être calculé en tant que différence entre la masse volumique apparente et la masse volumique réelle. La détermination de la masse volumique réelle avec le

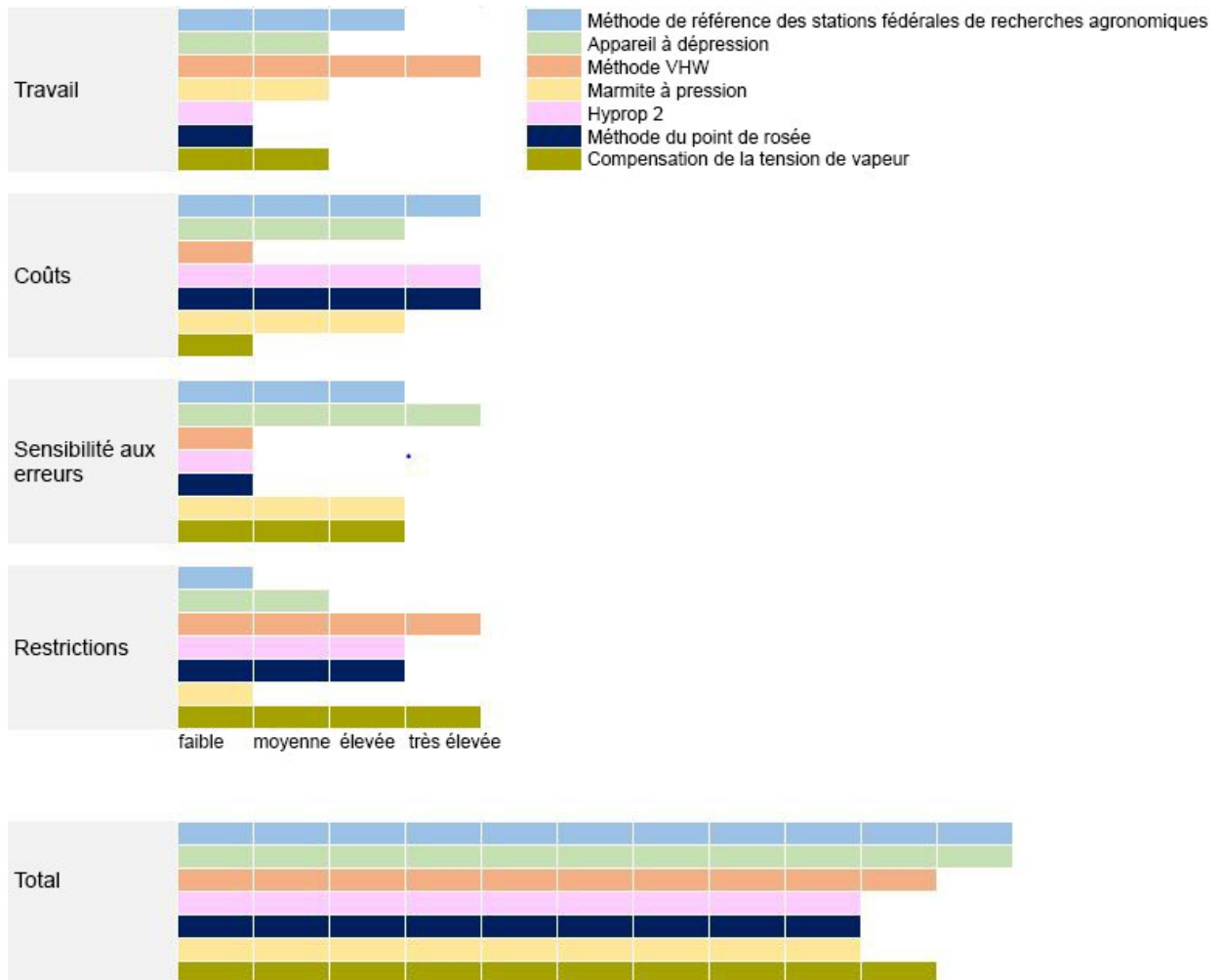


Figure 43 : Évaluation des méthodes d'analyse de la distribution de la taille des pores du point de vue des coûts, du temps de travail, de la sensibilité aux erreurs et des restrictions par analyse. Les coûts se réfèrent uniquement aux coûts des appareils. Les temps d'attente (par exemple pour atteindre l'équilibre à une force de succion donnée) ne sont pas pris en compte dans le travail. Les restrictions sont liées au domaine d'utilisation : si un appareil permet de mesurer toutes les plages de pF, les limitations sont faibles ; s'il ne peut être utilisé qu'à une plage spécifique, les limitations sont élevées. Les restrictions portent également sur la capacité des appareils en termes de nombre d'échantillons. Des capacités réduites signifient ici davantage de restrictions. Les évaluations doivent être considérées comme des évaluations relatives entre les méthodes. Le «total» montre les champs cumulés par méthode. Plus il est élevé, plus la méthode est spécifique, coûteuse, exigeante en travail et sujette à erreurs.

pycnomètre à eau entraîne toutefois un surcroît de travail considérable. En outre, la masse volumique apparente doit être connue ou déterminée en sus. C'est pourquoi cette méthode demande nettement plus de travail que celle du pycnomètre à air, pour un coût à peine inférieur.

Recommandation : Pour la détermination du volume total des pores, nous recommandons la méthode avec le pycnomètre à air, car c'est celle qui demande

le moins de travail. Si la masse volumique apparente et la masse volumique réelle doivent de toute façon être déterminées, le plus logique est de calculer le volume total des pores à partir de ces paramètres. Il est, en principe, toujours recommandé de déterminer le volume total des pores en tant que mesure indépendante, pour vérifier la justesse des procédures de travail pendant toute la mesure de la désorption.

4.5. Conductivité à l'air

La conductivité à l'air peut être mesurée aussi bien sur le terrain qu'en laboratoire avec différents appareils. Pour l'analyse en laboratoire, on utilise des échantillons en cylindres de sol non perturbé. Comme ceux-ci peuvent aussi être prélevés et analysés par horizon, les méthodes de laboratoire sont particulièrement indiquées pour les sols comportant plusieurs horizons distincts. Elles permettent, en outre, d'effectuer des analyses à différentes teneurs en eau. Lors de l'échantillonnage, il faut veiller à ne pas lisser les ouvertures des pores à la surface de l'échantillon. Avec les mesures in situ, la structure du sol est moins perturbée. De plus, les méthodes de terrain conviennent mieux pour les sols meubles dans lesquels le prélèvement d'échantillons de sol non perturbé est plus difficile. En revanche, les conditions générales et le volume de sol à mesurer sont ici plus difficiles à contrôler (Ball & Schjønning, 2002).

Les instruments de mesure fonctionnent selon des principes différents, mais qui peuvent être appliqués aussi bien sur le terrain qu'en laboratoire.

L'avantage avec le principe du gazomètre est que le flux d'air peut aussi bien être poussé qu'aspiré. En outre, les valeurs mesurées sont indépendantes de la température lors de l'essai, car on compare deux résistances à l'écoulement (VLDUFA, 2016).

Le principe de la pression différentielle est utilisé dans les appareils de fabricants comme Eijkelkamp. Ce type d'appareils permet d'assurer plus facilement pendant la mesure l'étanchéité de la surface étudiée (VLDUFA, 2016 ; Ball & Schjønning, 2002). L'appareil PL-300 de la société Umwelt-Geräte-Technik GmbH fonctionne également selon le principe de la pression différentielle. Utilisable aussi bien sur le terrain qu'en laboratoire, il peut en outre être connecté à des tensiomètres et des sondes TDR pour mesurer la force de succion et l'humidité du sol. Ces accessoires permettent de déterminer les conditions générales sur le terrain et d'améliorer ainsi considérablement l'interprétation des données, car la conductivité à l'air dépend de l'humidité du sol (Umwelt-Geräte-Technik GmbH, 2019).

La méthode acoustique ne peut être utilisée qu'in situ et à proximité de la surface du sol, ce qui limite fortement son application. Elle demande en outre plus de temps que les appareils de mesure à affichage direct, car il faut en plus déduire la conductivité à l'air à partir des valeurs acoustiques mesurées.

Recommandation : Le choix entre appareils de terrain ou de laboratoire dépend de la question étudiée et de l'état du sol. Les méthodes de terrain sont recommandées en particulier pour les sols meubles et uniformes. Dans ce cas, il faudrait également mesurer l'humidité du sol afin d'améliorer l'interprétation des résultats. Les méthodes de laboratoire sont plus précises, permettent d'effectuer des mesures répétées et à différents potentiels matriciels, et peuvent être appliquées à des profondeurs d'horizon définies. De plus, les valeurs de mesure de la conductivité à l'air peuvent être reliées à d'autres paramètres mesurés sur le même échantillon (voir un exemple à l'annexe 8.2). Les principes de mesure du gazomètre et de la pression différentielle sont à considérer comme très similaires. Un instrument de mesure utilisable à la fois sur le terrain et en laboratoire peut présenter des avantages.

4.6. Conductivité hydraulique à saturation

La conductivité hydraulique à saturation peut être déterminée par des méthodes de terrain ou de laboratoire ; dans le premier cas, on parle de conductivité hydraulique à saturation in situ. Les méthodes de terrain permettent de mesurer la conductivité hydraulique du sol en place et peuvent présenter ainsi un avantage par rapport aux méthodes de laboratoire, car les propriétés sont relevées sur l'ensemble du profil (Buchter et al., 1998). Les mesures in situ jouent un rôle important en particulier dans la zone de la nappe phréatique dans laquelle le prélèvement d'échantillons pour des analyses ultérieures en laboratoire est pratiquement impossible (Durner, 2003). Par ailleurs, les résultats des méthodes de terrain sont plus repré-

sentatifs que les valeurs de laboratoire obtenues sur des échantillons individuels (DIN 19682-8, 2012 ; Durner, 2003). Cependant, leur exécution demande énormément de temps (figure 44). Ainsi, il faut se rendre deux jours de suite sur un site pour pouvoir relever le niveau statique de la nappe. De plus, il est rare de trouver des nappes de fond ou des nappes perchées à un niveau élevé dans les sols agricoles, ce qui rend souvent impossible un relevé sur le terrain. C'est pourquoi, et bien qu'elles présentent certains avantages par rapport aux méthodes de laboratoire, les méthodes du trou à tarière et du piézomètre n'entrent pas en ligne de compte pour des mesures de routine à grande échelle (Buchter et al., 1998).

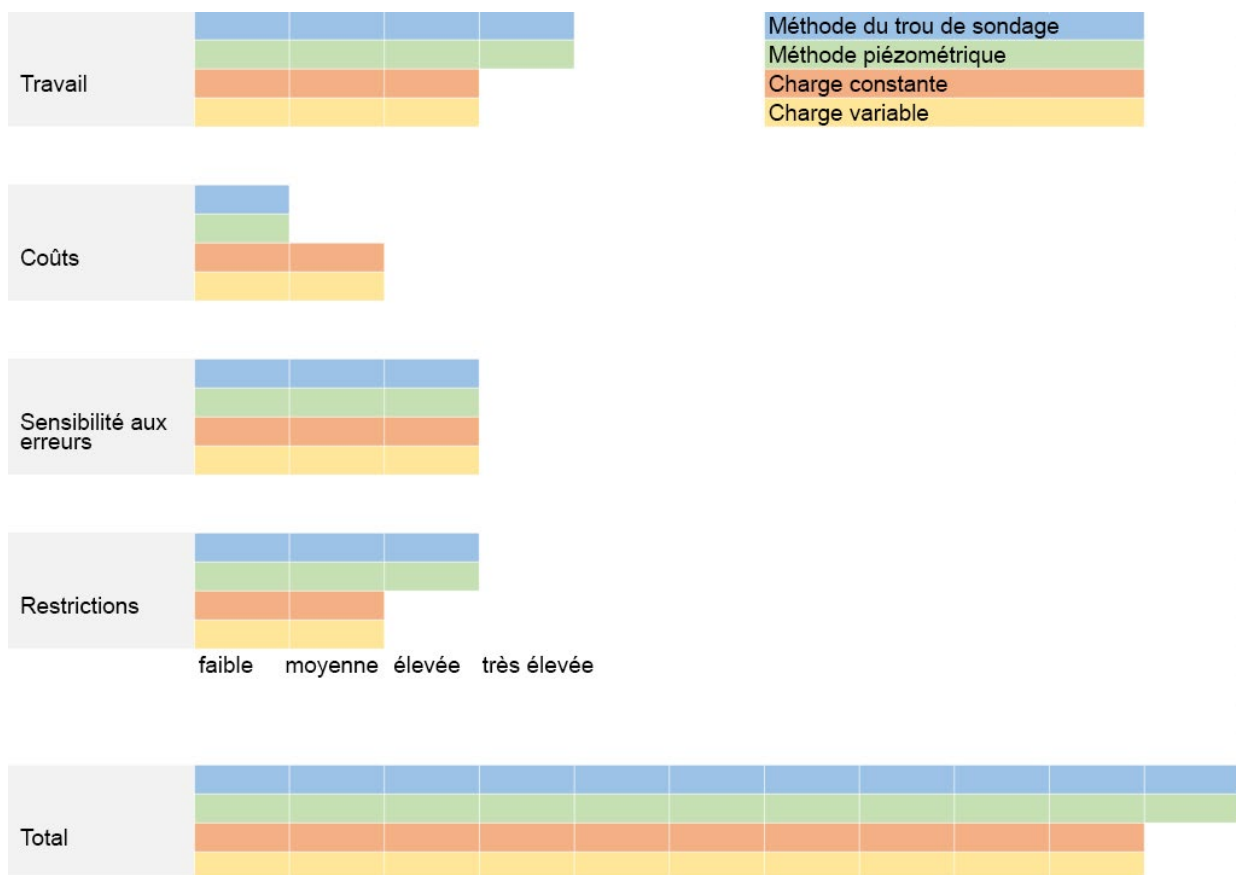


Figure 44 : Évaluation des méthodes de détermination de la conductivité hydraulique à saturation du point de vue des coûts, du temps de travail, de la sensibilité aux erreurs et des restrictions. Les coûts se réfèrent uniquement aux coûts des appareils. Les temps d'attente ne sont pas pris en compte dans le travail. Les restrictions portent sur l'applicabilité des méthodes à l'ensemble de la surface et sur la pertinence des valeurs mesurées. Les évaluations doivent être considérées comme des évaluations relatives entre les méthodes. Le «total» montre les champs cumulés par méthode. Plus il est élevé, plus la méthode est spécifique, coûteuse, exigeante en travail et sujette à erreurs.

Les méthodes de laboratoire demandent moins de temps que les méthodes de terrain, mais sont tout de même assez longues à réaliser et posent en outre quelques problèmes. Il convient notamment de ne pas sous-estimer le temps nécessaire à la préparation manuelle des échantillons de sol (environ 10 à 30 minutes par échantillon, selon la structure ou la texture). A cela s'ajoute le temps nécessaire jusqu'à leur saturation complète. En contrepartie, les échantillons en cylindres peuvent aussi être utilisés pour déterminer d'autres paramètres pédologiques, comme la masse volumique apparente. Comme on l'a vu, les petits échantillons en cylindres ne sont souvent pas suffisamment représentatifs du site à étudier et décrivent tout au plus les caractéristiques d'un seul horizon. Cet inconvénient peut être compensé jusqu'à un certain point par un nombre élevé d'échantillons (Buchter et al. 1998). Il ne faut toutefois pas sous-estimer les problèmes liés à la sensibilité aux erreurs et à la fourchette étendue des valeurs possibles de la conductivité hydraulique, qui rendent difficile l'interprétation des valeurs mesurées (Buchter & Häusler, 2009). Une étude du service de la protection des sols du canton de Zurich (Buchter et al., 2000a) a montré que les mesures pouvaient être considérablement influencées par la longueur des échantillons et les effets périphériques (flux d'eau entre la paroi du cylindre et l'échantillon de sol) ainsi que par le dispositif de mesure utilisé. Les comparaisons avec d'autres laboratoires ne sont possibles que si la méthode à utiliser est normalisée et très précisément prescrite et que des essais interlaboratoires sont régulièrement effectués. Il est préférable de choisir un perméamètre qui permette de mesurer la conductivité hydraulique aussi bien à charge constante qu'à charge variable, car la méthode appropriée varie suivant l'échantillon (Buchter et al. 1998, Buchter et al., 2000a).

Recommandation : Les méthodes utilisées pour mesurer la conductivité hydraulique à saturation, que ce soit sur le terrain ou en laboratoire, demandent beaucoup de travail et sont sujettes à erreurs (figure 44). Pour cette raison, la réalisation d'un relevé représentatif de ce paramètre à grande échelle et à une cadence élevée est à considérer comme difficile, d'autant plus que la conductivité hydraulique peut fortement varier sur un même site et présente une dynamique temporelle considérable. Les deux méthodes de laboratoire (à charge constante et à charge variable) nécessitent un peu moins de temps de travail que les méthodes de terrain et permettent d'effectuer aussi des relevés au-dessus du niveau de la nappe phréatique. C'est pourquoi, malgré les nombreux problèmes qu'elles posent, elles sont recommandées pour le relevé de la conductivité hydraulique à saturation.

4.7. Taux d'infiltration de l'eau

Le taux d'infiltration de l'eau peut être mesuré aussi bien sur le terrain qu'en laboratoire. La discussion ci-dessous se concentre toutefois sur les méthodes de terrain.

En terrain plat, ce paramètre peut être déterminé à l'aide d'infiltromètres et de perméamètres, dont certains sont bien établis sur le plan méthodologique et technique (Ghosh et al., 2019). Le plus souvent, le taux d'infiltration de l'eau est mesuré avec des infiltromètres à anneau unique ou à double anneau. La méthode à double anneau est bien établie et standardisée, mais elle demande beaucoup de temps et de ressources. La méthode dite «simplified falling head» évite ces inconvénients et permet de mesurer le taux d'infiltration de manière plus rapide et économe au moyen d'infiltromètres à anneaux. Les infiltromètres à tension prédéfinie permettent également une détermination assez précise du taux d'infiltration tout en économisant l'eau. En outre, contrairement aux infiltromètres à anneaux, la mesure peut s'effectuer à une force de succion définie, ce qui signifie que certaines plages de taille de pores peuvent être exclues du déplacement de l'eau. Le relevé demande toutefois beaucoup de temps. Le perméamètre de Guelph permet lui aussi de déterminer le taux d'infiltration de l'eau de manière simple et précise. L'appareil peut être monté et utilisé sans problème par une seule personne. Cependant, comme avec l'infiltromètre à double anneau, la mesure dans le trou à la tarière peut perturber la structure naturelle du sol. En contrepartie, le relevé peut être effectué à différentes profondeurs. Les relevés sur le terrain avec le perméamètre de Guelph sont par ailleurs bien établis, décrits et discutés de manière détaillée dans la littérature (Ghosh et al., 2019). Outre l'utilisation d'infiltromètres et de perméamètres, il est également possible de déterminer le taux d'infiltration de l'eau par des essais d'aspersion (avec des infiltromètres à aspersion, «sprinkler»). Cependant, ces installations ne sont pas normalisées, et les incertitudes qui en résultent par rapport au relevé et à l'interprétation du paramètre font que ces essais n'entrent pas en ligne de compte pour un relevé à grande échelle.

Recommandation : Les méthodes de mesure sur le terrain du taux d'infiltration prennent beaucoup de temps. En outre, étant donné qu'il s'agit d'un paramètre dynamique sur le plan spatial et temporel, il n'est pas certain qu'un relevé ponctuel effectué à différentes périodes de l'année dans le cadre d'une cartographie des sols soit utile et concluant. En revanche, les mesures de l'infiltration peuvent être utilisées pour en déduire des paramètres physiques du sol, comme la conductivité hydraulique.

Étant donné que la méthode du double anneau est bien établie et standardisée, nous la recommandons pour le relevé du taux d'infiltration de l'eau. Si une méthode plus rapide et économe en eau s'avère nécessaire, la technique «simplified falling head» ou le perméamètre de Guelph peuvent constituer de bonnes alternatives. La méthode «simplified falling head» est simple et rapide et ne nécessite pas beaucoup d'eau. Le perméamètre de Guelph permet de relever le paramètre à différentes profondeurs, peut être utilisé par une seule personne, et est en outre une méthode bien établie.

4.8. Force de succion

La force de succion peut être mesurée soit directement, soit indirectement. La détermination directe se fait par tensiométrie. C'est une méthode qui a fait ses preuves et est utilisée par exemple dans les réseaux cantonaux de mesure de l'humidité du sol en Suisse. Elle a l'avantage de permettre d'obtenir une information directe sur la force de succion. Son inconvénient est qu'en cas de sécheresse ou de gel prolongés, les mesures ou l'utilisation des appareils sont impossibles (Stehrenberger et Huguenin-Landl, 2016). D'autre part, en raison de leur conception, les tensiomètres ne peuvent relever que des forces de succion comprises entre 0 et 850 hPa, ce qui limite fortement la plage de mesure. Des tensiomètres dits «ultra-high» qui permettent de mesurer aussi des forces de succion plus élevées ont été développés ces dernières années. Ils se trouvent toutefois en phase de développement et ne sont pas encore utilisés de manière standardisée (Mendes et Gallipoli, 2020). La détermination indirecte de la force de succion recourt à des «équitensiomètres» ou à des capteurs d'humidité du sol (conductivité électrique ou thermique). Pour chaque méthode, un grand nombre d'appareils de mesure et de capteurs différents sont proposés par divers fabricants. Tous ces appareils ont l'avantage de ne nécessiter aucun entretien, d'être résistants au gel et de couvrir une plage de mesure relativement large, notamment dans le domaine des sols secs (Pan, 2010). Il s'agit toutefois de méthodes de mesure non standardisées, pour lesquelles les valeurs empiriques issues de la pratique font partiellement défaut. En outre, les capteurs d'humidité réagissent plus lentement que les tensiomètres aux variations d'humidité du sol, et nécessitent parfois un étalonnage individuel.

Recommandation : Pour déterminer la force de succion, nous recommandons d'utiliser des tensiomètres, car il s'agit d'une méthode standardisée pour laquelle il existe de nombreuses valeurs empiriques. Des tensiomètres de différentes tailles et de différents types sont disponibles selon la problématique étudiée et la durée et le domaine d'application. Cependant, pour obtenir des mesures précises et continues de la force de succion et des données pertinentes, il est recommandé de combiner ces mesures avec des méthodes indirectes ou avec des méthodes de détermination de la teneur en eau («courbes de désorption in situ»). En cas d'utilisation d'équitensiomètres ou de capteurs d'humidité du sol pour mesurer la force de succion (méthodes indirectes), il est recommandé d'effectuer des mesures de contrôle avec des tensiomètres (Matile et Meyer, 2017 ; Stehrenberger et Huguenin-Landl, 2016).

4.9. Teneur en eau

La teneur en eau peut être mesurée soit directement, soit indirectement. L'avantage des mesures indirectes à l'aide de sondes est qu'elles permettent d'effectuer plusieurs relevés au même endroit et sur de longues périodes et qu'il est ainsi possible de suivre les variations de la teneur en eau dans un même volume de sol. Les mesures directes sont destructrices et servent surtout à l'étalonnage des mesures indirectes (Gimper, 2010 ; Weil & Brady, 2017). Parmi les méthodes de mesure directes, la mesure gravimétrique est la plus facile à réaliser et à intégrer dans le déroulement des analyses en laboratoire (point 8.2.). Elle est aussi considérée comme la méthode de référence pour la teneur en eau sur la base de laquelle d'autres méthodes indirectes sont étalonnées (Stahr et al., 2012 ; Weil & Brady, 2017 ; Fühler & Roth, 2004). En raison du prélèvement des échantillons, cette méthode demande plus de travail que les mesures indirectes, mais le coût des appareils est moins élevé.

Comme la teneur en eau doit souvent être mesurée en continu dans le temps et non de manière ponctuelle, les méthodes indirectes représentent le cas d'application normal (Fühler & Roth, 2004). Il est important de veiller à un bon contact entre le sol et la surface de la sonde, sinon les résultats des mesures risquent d'être faussés. La précision peut être augmentée par un étalonnage spécifique au sol étudié qui permet de réduire l'influence de la structure et éventuellement d'une composition particulière de la matière solide (Gimper, 2010). Certaines sondes offrent en outre la possibilité de déterminer simultanément la température du sol. Parmi les techniques indirectes, la mesure TDR est actuellement la méthode la plus importante et aussi la plus précise (Stahr et al., 2012 ; Gimper, 2010). On trouve souvent sur le marché des sondes uniquement développées et fabriquées par certaines entreprises. Elles sont généralement moins chères que les autres sondes susmentionnées, mais il est difficile de savoir dans quelle mesure elles ont été testées sur le plan de la précision et des possibilités d'utilisation (Gimper, 2010).

Recommandation : La méthode gravimétrique est recommandée lorsqu'il s'agit d'une détermination unique de la teneur en eau, car il n'est pas nécessaire d'installer des capteurs. Si l'on suit de toute façon une procédure d'analyses de physique des sols en laboratoire, la teneur en eau peut aussi être déterminée directement par volumétrie (cf. exemple à l'annexe 8.2). Il se pose toutefois la question de savoir dans quelle mesure un relevé unique de la teneur en eau sur le terrain est pertinent, sachant que cette teneur peut varier fortement dans l'espace et dans le temps. Pour la mesure en continu de la teneur en eau, il est recommandé d'utiliser des sondes TDR, car l'expérience montre qu'elles fournissent des résultats précis.

4.10. Réserve utile

La réserve utile est déterminée en tant que différence entre teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent (pF 4.2). Pour cela, les valeurs de teneur en eau à pF 1,8 et pF 4,2 sont lues sur la courbe de désorption. Lors de cette lecture, la capacité au champ peut varier entre pF 1,8 et pF 2,5 suivant le niveau de la nappe phréatique. Comme la définition de la capacité au champ diffère dans la littérature et selon les pays, la valeur de référence de la force de succion pour la capacité au champ est sujette à controverse et varie entre pF 1,8 et 2,5. Si une courbe de désorption est établie, les valeurs peuvent être lues à partir de celle-ci à différentes forces de succion. Il est ainsi possible de faire une proposition appropriée pour chaque système de RU. On peut aussi prélever directement des échantillons à la capacité au champ et mesurer leur teneur en eau. Cependant,

il est là aussi difficile de déterminer à quel moment la capacité au champ est effectivement atteinte. En outre, le prélèvement des échantillons est alors très tributaire des conditions météorologiques. Après le prélèvement, l'eau est éliminée des échantillons de sol à pF 4.2 afin de déterminer le volume des pores fins. Cette opération nécessite une marmite à pression et une nouvelle préparation de l'échantillon (réduction du volume), ce qui rend cette méthode coûteuse et longue.

Recommandation : La solution la plus simple est de déduire la réserve utile de la courbe de désorption. Même si les avis divergent quant au pF correspondant à la capacité au champ, cette méthode de laboratoire fournit un ensemble cohérent de mesures qui permet de disposer de valeurs caractéristiques pour chaque définition de la RU.

4.11. Niveau de la nappe

Le niveau de la nappe peut être déterminé par la méthode du trou à la tarière ou du piézomètre. Si le tube piézométrique est complété par un flotteur, il peut être mesuré en continu (Blume, Stahr & Leinweber, 2011) (Blume & Leinweber, 2011). Les deux méthodes sont très similaires dans leur principe. La méthode du trou à la tarière a l'avantage de ne nécessiter aucun autre équipement (p. ex. tube piézométrique) et est, par conséquent, moins coûteuse. Cependant, le sol doit être suffisamment stable pour que le trou ne s'effondre pas pendant la remontée de l'eau à son niveau statique. Comme le niveau de la nappe peut fortement varier, il est judicieux de le mesurer sur une longue période. C'est pourquoi il est recommandé de stabiliser le trou avec un tube piézométrique. Celui-ci permet de garantir que le niveau de la nappe sera toujours mesuré au même endroit et par rapport au même

niveau de référence. Le travail occasionné par les deux méthodes est comparable ; l'une comme l'autre nécessitent de se rendre au moins deux fois à la station de mesure, car il faut un certain temps pour que le niveau statique s'établisse. Ce temps est d'autant plus long que la texture du sol est fine (Gray et Mahapatra, 1965). Pour pouvoir obtenir un relevé représentatif des variations du niveau de la nappe phréatique, il faudrait toujours effectuer plusieurs mesures.

Recommandation : Nous recommandons de mesurer le niveau de l'eau selon la méthode piézométrique, car elle permet de garantir la stabilité du trou foré et donc le bon déroulement des mesures à long terme. Le niveau de la nappe pouvant varier fortement, cela vaut la peine d'effectuer les mesures sur une période prolongée.

4.12. Potentiel d'oxydoréduction (potentiel redox)

Habituellement, le potentiel d'oxydoréduction est déterminé directement sur le terrain. Les électrodes sont placées dans le sol, en veillant à assurer un bon contact entre celui-ci et l'électrode afin d'éviter les erreurs de mesure. Les électrodes sont très solides et peuvent ainsi être utilisées pour de nombreuses mesures et pendant plusieurs années, ce qui atténue le prix élevé des sondes. Le potentiel redox peut être lu directement sur l'appareil de mesure auquel les électrodes sont connectées. Les mêmes sondes permettent de déterminer simultanément le taux de diffusion de l'oxygène (ODR). Il faut toutefois tenir compte du fait que la mesure du potentiel redox peut être influencée par cette mesure et que la fréquence de mesure du potentiel redox doit donc être réduite. La méthode IRIS semble moins précise, car il s'agit plutôt d'une évaluation qualitative, basée uniquement sur l'estimation de caractéristiques visuelles. De plus, elle nécessite deux déplacements sur le site et prend donc nettement plus de temps qu'une mesure unique au moyen d'électrodes.

Recommandation : Le potentiel redox a l'avantage de pouvoir être mesuré directement sur le terrain avec des électrodes. Mais ce paramètre varie tellement dans l'espace et dans le temps qu'un relevé unique sur le terrain n'est en principe pas pertinent. D'une manière générale, les mesures du potentiel redox demandent beaucoup de temps et d'entretien. En outre, leur interprétation n'est pas simple et nécessite de disposer d'autres paramètres pédologiques. C'est pourquoi nous déconseillons d'effectuer des mesures uniques du potentiel redox lors de projets de cartographie des sols.

4.13. Résistance à la pénétration

La résistance à la pénétration peut être mesurée soit avec des appareils statiques, soit avec des appareils dynamiques. L'angle et le diamètre des pointes de sonde peuvent varier selon les appareils. Il est difficile de comparer les mesures de différents pénétromètres, car les résultats sont influencés à la fois par le mécanisme de pénétration et par les caractéristiques de la pointe de la sonde (Schwab, Dietrich et Gubler, 2018 ; Lutz et Keller, 2020).

De plus, la résistance mesurée à la pénétration est étroitement liée à la teneur en eau, à la masse volumique apparente et à la texture du sol ainsi qu'à la manipulation de l'appareil (Schwab, Dietrich et Gubler, 2018 ; Herrick et Jones, 2002 ; Dexter et al., 2007). Cela complique aussi la comparaison des valeurs mesurées avec le même appareil, mais sur différents sites et à différents moments (Lutz & Keller, 2020).

Des comparaisons entre la sonde dynamique PANDA et le «Penetrologger» statique d'Eijkelkamp ont montré que les valeurs de résistance à la pénétration étaient sensiblement plus élevées avec la sonde PANDA. L'augmentation semble plus marquée dans les zones plus compactées, ce qui signifie que la sonde PANDA réagit avec plus de sensibilité aux compactations que le pénétromètre. En outre, la sonde PANDA peut être utilisée dans des conditions pédologiques plus variées (p. ex. pierrosité élevée) (Schwab, Dietrich et Gubler, 2018 ; Lutz et Keller 2020). Pour les mesures avec le «penetrologger», il est recommandé d'utiliser uniquement la pointe de sonde de 1 cm², car elle se montre plus sensible aux compactations et est plus facile à utiliser que les pointes à la surface de section plus importante (Lutz et Keller, 2020). Les pénétromètres statiques comme le penetrologger demandent nettement moins de temps pour les mesures que les pénétromètres dynamiques comme la sonde PANDA : 45 minutes pour un relevé de 20 mesures individuelles, contre à peu près le double avec la sonde PANDA (Schwab, Dietrich & Gubler, 2018 ; Lutz & Keller 2020). La sonde PANDA est fréquemment utilisée en Suisse

et en France, mais n'est pas très courante en dehors de ces pays. C'est pourquoi les pénétromètres statiques comme le penetrologger permettent une meilleure comparabilité des résultats au niveau international. Les deux appareils ont clairement montré que la résistance à la pénétration est d'autant plus faible que la teneur en eau est élevée. L'influence de l'eau du sol doit donc être impérativement connue pour pouvoir comparer plusieurs mesures entre elles. Par ailleurs, on a constaté sur les deux appareils une dispersion plus importante des valeurs lorsqu'elles sont relevées par différentes personnes au lieu d'une seule (Schwab, Dietrich et Gubler, 2018). Cette influence est nettement moins marquée avec les appareils fonctionnant grâce à la force hydraulique ou électrique. Mais ce type d'appareils est généralement plus lourd et plus compliqué à manier. Le «Light Weight Deflectometer» utilise un poids intégré dans l'appareil au lieu d'un marteau (comme la sonde PANDA), ce qui réduit également l'influence de l'utilisateur, car la force agissant sur la sonde est toujours la même.

Recommandation : En raison de leur meilleure comparabilité internationale et du temps de travail réduit, nous recommandons un appareil statique (p. ex. penetrologger) pour mesurer la résistance à la pénétration dans le cadre d'une cartographie des sols à l'échelle nationale. Mais la question demeure de savoir dans quelle mesure un relevé unique de la résistance à la pénétration est pertinent, sachant que celle-ci peut varier fortement dans l'espace et dans le temps.

4.14. Comportement de retrait du sol

Pour pouvoir représenter une courbe de retrait, il faut mesurer simultanément et en continu le volume et la teneur en eau d'un échantillon de sol pendant le processus de séchage. La teneur en eau peut être déterminée par gravimétrie et est facile à mesurer dans le temps avec des balances automatiques. En revanche, la détermination en continu du volume du sol se révèle plus difficile. La méthode doit être la mieux adaptée possible à ce type de mesure.

On peut classer les méthodes de détermination du volume d'un échantillon de sol en méthodes directes et indirectes. Dans les méthodes directes, l'échantillon est en contact en tout cas avec un appareil de mesure volumétrique. Il a donc plus de risque d'être détruit. Par conséquent, les méthodes indirectes sans contact sont plus intéressantes (Li et Zhang, 2019). La mesure de la hauteur et du diamètre au moyen d'un pied à coulisse ou d'un capteur de déplacement n'est applicable qu'avec des échantillons fermes, de forme régulièrement cylindrique et bien préparés, faute de quoi le risque d'erreur est élevé. Le capteur de déplacement à l'avantage de permettre une mesure en continu sans provoquer d'autres perturbations de l'échantillon. La détermination du volume par le principe de la poussée d'Archimède fonctionne de manière satisfaisante même avec des échantillons informes, mais il y a un risque que l'échantillon (meuble) soit détruit lors de la mesure. En outre, cette méthode ne convient pas pour des mesures en continu et n'est pas suffisamment sensible aux petites variations de volume. Les méthodes directes, exception faite des capteurs de déplacement, ne mesurent pas le volume en continu dans le temps, mais relèvent seulement certains points sur la courbe de retrait (Braudeau et al., 1999). Ce problème se pose également avec la méthode indirecte par photogrammétrie. Par contre, avec un rétractomètre, le volume et le poids sont mesurés simultanément et en continu, ce qui augmente la précision de la courbe. En outre, le travail de l'utilisateur est réduit, car il suffit de placer l'échantillon dans l'appareil, et les mesures se font ensuite de manière automatisée. Mais le coût des appareils est nettement

plus élevé que dans les autres méthodes. L'analyse dans le rétractomètre dure deux à trois jours (Bradeau et al., 1999 ; Gabrielli Technology, 2020).

Recommandation : L'analyse réalisée à l'aide d'un rétractomètre est la moins sujette à erreurs. Le coût des appareils est certes élevé, mais le travail est nettement réduit par rapport aux autres méthodes. Le rétractomètre ne permet toutefois d'analyser qu'un seul échantillon à la fois et n'est donc pas adapté à des cadences élevées. C'est pourquoi nous recommandons la détermination du volume sur des échantillons uniformes au moyen d'un capteur de déplacement. Les appareils sont moins coûteux et il est possible d'installer plusieurs dispositifs de mesure.

4.15. Stabilité des agrégats

Il existe un large éventail de méthodes permettant de déterminer la stabilité des agrégats. Parmi celles-ci, le tamisage à sec et par voie humide, les études de dispersion par ultrasons ou par turbidimétrie ainsi que les essais d'aspersion sont souvent utilisés (Burri, 2006 ; Mair, 2017 ; Le Bissonnais 2016). Toutes les méthodes reposent sur le même principe : elles consistent à déterminer la façon dont les agrégats se modifient sous l'action d'une force. On étudie un état avant et après la mesure, et la stabilité des agrégats est déduite de la comparaison entre ces deux états (Mair, 2017). La force agissante, et donc l'aspect étudié de la stabilité des agrégats, varie selon la méthode et le procédé. En outre, la stabilité des agrégats n'est pas toujours représentée de la même manière : souvent, on calcule un «mean weight diameter», ou elle est exprimée en pourcentage d'agrégats stables. C'est pourquoi les résultats provenant de méthodes différentes ne sont pas directement comparables entre eux (Burri, 2006 ; Mair, 2017).

En ce qui concerne le temps nécessaire, la méthode la plus longue semble être la dispersibilité de l'argile, car les échantillons doivent être laissés au repos pendant 18 heures. Sinon, elle ne demande pas beaucoup de travail. Dans la méthode de tamisage par voie humide, les échantillons restent pendant une heure dans le tamis mécanique. La méthode par ultrasons implique une dispersion préalable de l'échantillon aux ultrasons qui occasionne un travail supplémentaire. En outre, différents appareils sont nécessaires (bain à ultrasons et tour de tamisage par voie humide). Le tamisage à sec est beaucoup plus rapide que le tamisage par voie humide, car les échantillons ne sont tamisés que pendant une dizaine de minutes. Cependant, c'est aussi une autre force (le vent au lieu de la pluie) qui est prise en compte. Le procédé par aspersion reproduit bien les conditions réelles sur le terrain. Mais il demande lui aussi un temps de travail considérable. Et si les résultats doivent être exprimés en «mean weight diameter», il faut en plus effectuer un tamisage après l'essai. De nombreuses méthodes nécessitent en principe une intervention dans la structure du sol pour détacher

les agrégats de la masse, puis un tamisage mécanique pour séparer les différents agrégats en classes de grandeur. Ces tâches requièrent non seulement beaucoup de travail et de temps, mais rendent aussi plus difficile une exécution méthodologiquement uniforme des analyses et l'obtention de résultats comparables.

La méthode de la stabilité à la percolation demande peu de travail et d'équipement – une mesure ne dure que 10 minutes. Elle est en outre peu coûteuse, car il n'y a pas d'appareil spécial à acheter. La faible dispersion des mesures répétées en fait une méthode adaptée à la détermination de la stabilité des agrégats du point de vue de la sensibilité à l'érosion (Kainz & Weiss, 1988).

Comme chaque procédé relève un aspect différent de l'ensemble du système, le choix de la méthode adéquate doit se baser sur la problématique étudiée. Il est important que les types de forces exercées et leur intensité se situent dans la zone des effets réels (Burri, 2006, Mair, 2017, Le Bissonnais 2016). Pour ces diverses raisons, nous renonçons à recommander une méthode en particulier.

4.16. Évaluation visuelle de la structure

De très nombreuses méthodes visuelles permettent d'évaluer l'état des sols. Dans le test à la bêche selon Görbing, la structure du sol est décrite directement sur le terrain. C'est une méthode rapide et peu coûteuse, mais qui a l'inconvénient de n'être qu'une description qui ne donne pas d'évaluation de l'état de la structure. Il est ainsi difficile de comparer différents échantillons entre eux (Beste, 2005). Pour obtenir des valeurs chiffrées à partir de cette méthode, le test à la bêche selon Görbing peut être combiné par exemple avec l'estimation de la structure et des racines selon Beste (2003) (cf. Beste, 2003). Il en résulte toutefois une augmentation du temps de travail et du coût des équipements, car des appareils supplémentaires sont nécessaires. L'évaluation visuelle des types d'agrégats et des résidus de la désagrégation de Nievergelt, Petrasek et Weisskopf (2002) s'effectue aussi directement sur le terrain. Cette méthode se concentre sur les agrégats ou les résidus de la désagrégation, qui sont subdivisés par classes de grandeur et par types (Nievergelt, Petrasek et Weisskopf, 2002). Pour cela, il faut des tamis et une balance, ce qui augmente à la fois le coût et le travail. La méthode VESS est peu coûteuse, rapide et facile à réaliser (Johannes et al., 2017). Elle permet en outre d'évaluer aussi bien la couche supérieure (VESS) que la couche sous-jacente du sol (subVESS). La nouvelle méthode de test à la bêche développée par Agroscope, la BFH-HAFL et le FiBL propose également une analyse complète sans aucun appareil supplémentaire. Elle convient aussi bien pour la couche supérieure que pour la couche sous-jacente du sol (0–40 cm) et permet d'évaluer le sol selon plusieurs critères en rapport avec la structure et l'activité biologique. En outre, des mesures d'amélioration et de prévention basées sur les résultats du test à la bêche sont proposées pour l'exploitation agricole des sols (Weisskopf 2020, communication personnelle).

Dans toutes les méthodes mentionnées, la teneur en eau du sol lors de la réalisation des évaluations constitue une grandeur critique. Il peut arriver que son effet sur la résistance du sol soit mal évalué et conduise ainsi à des estimations erronées (Guimaraes et al., 2017). Une autre limite de ces méthodes réside dans leur subjectivité. C'est pourquoi il est conseillé d'effectuer les évaluations au moins en binôme et de perfectionner régulièrement la capacité de reconnaissance des personnes concernées (Johannes et al., 2017). Ces deux limites sont prises en compte dans la méthode coreVESS : les échantillons de sol sont conditionnés en laboratoire à une humidité standard de –60 ou –100 hPa, ce qui réduit l'influence des différences d'humidité du sol et améliore la comparabilité des résultats. Il en résulte toutefois des coûts d'équipement plus élevés ainsi qu'un travail supplémentaire, car le conditionnement des échantillons dure environ une semaine. L'évaluation en laboratoire se fait sur des échantillons anonymes, ce qui diminue la subjectivité. Cette procédure est donc plus standardisée que d'autres méthodes d'appréciation de l'état de la structure ; mais ici aussi, il est conseillé d'évaluer les échantillons en binôme (Johannes et al., 2017). Comme l'analyse ne porte que sur un seul échantillon en cylindre, cette méthode, comparée à un test à la bêche ou à une description de profils sur le terrain, ne donne qu'un aperçu limité de l'état de la structure d'un sol naturel.

Recommandation : Si l'on veut privilégier une procédure bien standardisée, la méthode coreVess est à recommander. Pour une détermination rapide sur le terrain, la méthode VESS est particulièrement intéressante, car elle ne nécessite aucun équipement supplémentaire et propose une évaluation notée de la structure du sol. La nouvelle méthode de test à la bêche d'Agroscope, de la HAFL et du FiBL sera certainement aussi intéressante lorsqu'elle aura été finalisée.

4.17. Aperçu des méthodes de mesure recommandées

Masse volumique apparente	Méthode du cylindre, méthode par radiation
Masse volumique réelle	Méthode de référence des stations fédérales de recherches agronomiques
Masse du squelette	Tamissage à sec, tamissage par voie humide
Volume du squelette	Par calcul comme quotient, pesage sous immersion (à partir d'environ 10% de pierrosité)
Volume total des pores	Pycnomètre à air / pycnomètre à gaz
Distribution de la taille des pores	Méthode de référence des stations fédérales de recherches agronomiques (PYZYL-P)
Volume des pores fins	Méthode du point de rosée (1'000 hPa – 50'000 hPa)
Conductivité à l'air	Principe de la pression différentielle
Conductivité hydraulique à saturation	Charge constante, charge variable
Taux d'infiltration de l'eau	Infiltromètre à tension prédéfinie (infiltromètre à disque, <i>disc permeameter</i> en anglais) Perméamètre de Guelph (en anglais : <i>constant head well-permeameter</i>)
Force de succion	Tensiométrie
Teneur en eau	Mesure gravimétrique, TDR (<i>Time Domain Reflectometry</i>)
Réserve utile	Lecture sur la courbe de désorption (différence entre la part de pores fins et la part de pores moyens et grossiers inférieurs)
Niveau de la nappe	Tube piézométrique
Résistance à la pénétration	Pénétromètre statique
Degree of compactness	Test Proctor
Comportement de retrait du sol	Mesure au moyen d'un capteur de déplacement / transducteur de déplacement (<i>displacement transducer</i>), rétractomètre
Évaluation visuelle de la structure	VESS (<i>visual evaluation of soil structure</i>), CoreVess, nouvelle méthode de test à la bêche

Tableau 3 : Aperçu des paramètres physiques du sol étudiés dans ce rapport et des méthodes de mesure recommandées.

4.18. Remarques finales

La présente recherche se limite à une liste de propriétés physiques des sols qui a été fixée par le CCSols en tant que mandant. D'autres caractéristiques physiques des sols, comme les propriétés mécaniques (p. ex. nécessaires pour la réduction préventive du risque de compaction du sol) n'ont pas été traitées dans cette étude.

Au vu de l'importance des décisions à venir quant au choix des paramètres et des méthodes de quantification de propriétés pédologiques dans le cadre de cartographies des sols à grande échelle, deux points ont particulièrement retenu notre attention :

- Choix des paramètres pour des clients importants : si des paramètres pertinents pour des clients importants ne sont pas retenus lors du choix des paramètres quantitatifs destinés à compléter et améliorer les informations pédologiques tirées des cartographies des sols, il sera difficile de les relever ultérieurement dans tous les sites concernés par la cartographie.

C'est pourquoi nous pensons qu'il serait très important de mener une analyse élargie et approfondie des besoins auprès de spécialistes du monde scientifique, des milieux de la pratique et des autorités, donc auprès des futurs utilisateurs d'informations pédologiques tirées de projets de cartographies des sols. Peut-on déduire de ces besoins des clients que des critères supplémentaires seraient nécessaires pour le choix des paramètres pédologiques ?

- Précision du choix des paramètres et des méthodes :
Les recommandations de ce rapport se basent sur certains critères et ont été appliquées à certains groupes de paramètres.
Le processus de sélection proprement dit nécessitera sans doute encore des réflexions et des évaluations supplémentaires qui ne peuvent pas être présentées dans ce rapport sous la forme et avec la précision requises.
C'est pourquoi les auteurs de cette recherche proposent de se tenir si nécessaire à la disposition du CCSols pour lui servir de «sparring partner» dans le choix des paramètres et des méthodes et pour répondre à des questions de détail et d'évaluation ciblées.

5. Liste des illustrations

Figure 1: Aperçu des différentes méthodes de détermination de la masse volumique apparente. Graphique adapté et modifié d'après Al-Shammary et al., 2018.	10
Figure 2: Enfoncement dans le sol de la sonde à percussion munie d'un cylindre pour le prélèvement d'un échantillon de sol non perturbé. Source: avec l'aimable autorisation du groupe de recherche Utilisation et protection des sols de la BFH-HAFL.	11
Figure 3: Échantillon en cylindre de sol non perturbé devant encore être préparé au volume normé défini. Source: avec l'aimable autorisation de Bářková, K., Matula, S. und Miháliková, M., Faculty of Agrobiolgy, Food and Natural Resources Czech University of Life Sciences Prague.	11
Figure 4: Un échantillon en cylindre préparé exactement au volume normé à l'aide d'un couteau. Source: avec l'aimable autorisation de Bářková, K., Matula, S. und Miháliková, M., Faculty of Agrobiolgy, Food and Natural Resources Czech University of Life Sciences Prague.	11
Vidéo 5: Vidéo de présentation de la méthode de la poche plastique (variante du pesage sous immersion) Cette vidéo d'Agroscope montre notamment comment appliquer correctement la variante du pesage sous immersion («Méthode de la poche plastique») pour déterminer la masse volumique apparente d'un échantillon de sol. Photo/vidéo : Groupe de recherche Qualité et utilisation du sol, Agroscope	12
Figure 6a : Cette illustration montre un instrument de mesure nucléaire qui mesure la transmission directe du rayonnement gamma émis. Illustration tirée de Al-Shammary et al., 2018.	13
Figure 6b : Cette illustration présente un instrument de mesure équipé d'une source de rayonnement nucléaire qui mesure la réflexion du rayonnement émis. Les deux techniques (fig. 6a et 6b) peuvent être utilisées pour déterminer la masse volumique apparente d'un sol. Illustration tirée de Al-Shammary et al., 2018.	13
Figure 7: Pycnomètre à eau, disponible dans le commerce, utilisé pour la détermination de la masse volumique de corps solides. Il n'est pas nécessaire de disposer d'échantillons de sol non perturbés. Source de l'illustration : Wikimedia Commons.	15
Figure 8: Pycnomètre à air servant à déterminer la matière solide d'un échantillon de sol. Des échantillons de sol structurellement non perturbés sont nécessaires. Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de UGT GmbH.	15
Figure 9 : Tableau servant à l'estimation visuelle de la pierrosité en volume selon la classification suisse KLABS. Source de l'image : KLABS 2010, v.3, annexe 3.7.2	16
Figure 10 : Boîte à sable («sandbox») disponible dans le commerce en tant qu'appareil à dépression pour déterminer le volume des pores grossiers d'un échantillon de sol. Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de Royal Eijkelkamp.	18
Figure 11 : Vue intérieure d'une boîte à sable avec des échantillons en cylindres de sol structurellement non perturbé. Dans un premier temps, les échantillons sont saturés en eau. Ils sont ensuite soumis à des forces de succion croissantes, et dès qu'un équilibre s'est établi à une force de succion donnée, ils sont pesés. Avec le poids sec et la densité connue de l'eau, qui dépend de la température, il est possible de calculer le volume de classes de pores déterminées. La boîte à sable convient pour le domaine des pores grossiers. Source de l'illustration : Avec l'aimable autorisation du groupe de recherche Utilisation et protection des sols de la BFH-HAFL.	18
Figure 12 : Marmite à pression du commerce utilisée comme appareil de surpression pour déterminer le volume des pores dans les plages de pF élevées, c'est-à-dire pour les pores moyens et fins. Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de UGT GmbH.	19
Figure 13 : Schéma du dispositif d'essai pour la mesure de la désorption avec la méthode VHW et un échantillon de sol de 3,9 cm de hauteur. 0 cm correspond au bord supérieur du support en plexiglas. Le milieu de l'échantillon de sol se situe 0,25 cm plus bas. Illustration reprise et adaptée d'après Isler, Luzius et Buchter, 2001 ; service de la protection des sols du canton de Zurich.	20

Figure 14 : Dispositif Hyprop 2 pour la mesure du volume de pores dans la plage de force de succion de 0–820 hPa (toute la plage des pores grossiers jusqu'aux pores moyens supérieurs). L'Hyprop 2 permet de mesurer simultanément la courbe de désorption dans la plage de force de succion indiquée ainsi que la conductivité hydraulique non saturée sur des échantillons de sol structurellement non perturbés. Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de METER Group.	21
Figure 15 : Le WP4C-Dew Point Meter permet de déterminer les pores fins dans la plage de mesure de pF 3,5 – 6,2. Il n'est pas nécessaire de disposer d'échantillons de sol non perturbés. Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de METER Group.	22
Figure 16 : Pycnomètre à air, disponible dans le commerce, permettant de déterminer le volume solide et liquide d'un échantillon de sol. En utilisant des échantillons de sol séchés et non perturbés dont on connaît le volume total, on peut calculer le volume total des pores. Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de Royal Eijkelkamp.	22
Figure 17 : Débitmètre PL-300 permettant de déterminer les conditions de conductivité à l'air dans un échantillon de sol non perturbé. Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de UGT GmbH.	24
Figure 18 : Représentation schématique de la méthode du trou à la tarière H = profondeur du trou sous le niveau statique de la nappe ; h_0 = profondeur de l'abaissement maximal de l'eau ; h_1, h_2 = profondeurs à deux moments pendant la remontée ; s = distance entre le fond du trou et le fond de la nappe ; r = rayon du trou. Illustration tirée de Durner, 2003.	25
Figure 19 : Représentation schématique de la méthode piézométrique. h_c = profondeur de la partie du trou non fermée par le tube, h_1, h_2 = profondeurs à deux moments pendant la remontée ; s = distance entre le fond du trou et le fond de la nappe ; r = rayon du trou. Illustration tirée de Durner, 2003.	25
Figure 20 : Appareil de mesure simultanée de la conductivité hydraulique à saturation sur cinq cylindres d'échantillons de sol non perturbé. Le même dispositif permet d'utiliser aussi bien la méthode de la «charge variable» que celle de la «charge constante» (en plaçant une hausse sur les cylindres en plastique). Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de Soilmoisture Corp.	27
Figure 21 : Infiltromètre à anneau unique utilisé pour déterminer le taux d'infiltration dans le sol. Source de l'illustration : Wikimedia Commons.	28
Figure 22 : Infiltromètre à double anneau en cours d'utilisation pour déterminer le taux d'infiltration. Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de Bářková, K., Matula, S. und Miháliková, M., Faculty of Agrobiology, Food and Natural Resources, Czech University of Life Sciences Prague.	28
Figure 23 : Grand infiltromètre à tension prédéfinie servant à déterminer l'infiltration de l'eau, ici dans un sol d'un site de grandes cultures. En haut à gauche de l'appareil, on peut voir le tube de dépression muni d'une entrée d'air qui est relié au réservoir d'eau. Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de Bářková, K., Matula, S. und Miháliková, M., Faculty of Agrobiology, Food and Natural Resources, Czech University of Life Sciences Prague.	29
Figure 24 : L'infiltromètre à mini-disque pour la détermination du taux d'infiltration est un infiltromètre à tension prédéfinie pratique, qui peut être utilisé par une seule personne. Source de l'illustration : Avec l'aimable autorisation de Bářková, K., Matula, S. und Miháliková, M., Faculty of Agrobiology, Food and Natural Resources, Czech University of Life Sciences Prague.	29
Figure 25 : Perméamètre de Guelph disponible dans le commerce pour mesurer le taux d'infiltration dans le sol. Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de Soilmoisture Corp.	30

<p>Figure 26 : Infiltromètre à aspersion de Cornell («Cornell sprinkle infiltrometer») installé dans un champ de maïs. Dans cette méthode, le taux d'infiltration est calculé en tant que différence entre le volume des précipitations et le taux de ruissellement de surface mesuré. Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de Cornell Soil Health Staff.</p>	30
<p>Figure 27 : Tensiomètres installés en permanence dans un champ pour mesurer la force de succion dans le cadre de l'essai à long terme d'Oberacker, dans le canton de Berne. Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de Lorenz Ramseier, LANAT, service de protection des sols du canton de Berne.</p>	32
<p>Figure 28 : Constitution d'un tensiomètre : 1) cellule de céramique poreuse, 2) tube transparent rempli d'eau, 3) électronique, 4) capteur de pression. Source de l'illustration : Wikimedia Commons.</p>	32
<p>Figure 29 : Capteur d'humidité du sol watermark disponible dans le commerce, constitué de deux électrodes intégrées dans du gypse et entouré d'une enveloppe perforée. Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de Royal Eijkkamp.</p>	33
<p>Figure 30 : Utilisation d'une sonde TDR sur la paroi d'un profil pour mesurer la teneur en eau volumétrique Source de l'illustration: CCSols.</p>	35
<p>Figure 31 : Utilisation d'une sonde TDR depuis la surface du sol pour mesurer la teneur en eau volumétrique Source de l'illustration: CCSols.</p>	35
<p>Figure 32 : Sélection de différents modèles de sondes TDR servant à mesurer la teneur en eau volumétrique. Source de l'illustration: CCSols.</p>	35
<p>Figure 33 : Sonde UMP disponible sur le marché pour mesurer la teneur volumétrique en eau du sol. Les sondes UMP associent les technologies TDR et FDR. Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de UGT GmbH.</p>	36
<p>Figure 34 : Paroi d'un profil avec des taches de rouille qui indiquent clairement que des réactions d'oxydoréduction ont eu lieu. Source de l'illustration : Wikimedia Commons.</p>	38
<p>Figure 35 : La sonde Panda est un exemple de pénétromètre dynamique utilisé pour déterminer la résistance à la pénétration du sol. Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de l'Observatoire national des sols, NABO.</p>	39
<p>Figure 36 : Pénétromètre statique, disponible sur le marché, permet de déterminer la résistance à la pénétration du sol. Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation de UGT GmbH.</p>	39
<p>Figure 37 : Représentation schématique de la courbe de retrait d'un sol à texture fine, avec les quatre différentes phases de retrait. Illustration tirée de Durner, 2014.</p>	40
<p>Figure 38 : Déplacement des agrégats du sol sur un tamis placé dans un récipient d'eau dans le but de déterminer la stabilité des agrégats. Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation du groupe de recherche Utilisation et protection des sols de la BFH-HAFL.</p>	42
<p>Figure 39 : Agrégats du sol restants après un tamisage par voie humide visant à déterminer la stabilité des agrégats. Source de l'illustration : avec l'aimable autorisation du groupe de recherche Utilisation et protection des sols de la BFH-HAFL.</p>	42

Figure 40 : Échantillons prélevés à la bêche en vue de l'évaluation visuelle de la structure du sol sur le terrain. Source de l'illustration : CCSols.	44
Figure 41 : Marche à suivre pour l'évaluation visuelle de la structure à la station de recherche de Reckenholz (u.s. = unité structurales). Graphique adapté et modifié d'après Nievergelt, Petrasek et Weisskopf, 2002.	45
Figure 42 : Évaluation des méthodes d'analyse de la masse volumique apparente du point de vue des coûts, du temps de travail, de la sensibilité aux erreurs et de la complexité par analyse. Les coûts se réfèrent uniquement aux coûts des appareils. Les temps d'attente ne sont pas pris en compte dans le travail. On trouvera un aperçu des critères d'évaluation au chapitre 2.1. Les évaluations doivent être considérées comme des évaluations relatives entre les méthodes. Le «total» montre les champs cumulés par méthode. Plus il est élevé, plus la méthode est difficile, coûteuse, exigeante en travail et sujette à erreurs. La méthode par radiation n'a été évaluée que jusqu'à 30 cm de profondeur.	48
Figure 43 : Évaluation des méthodes d'analyse de la distribution de la taille des pores du point de vue des coûts, du temps de travail, de la sensibilité aux erreurs et des restrictions par analyse. Les coûts se réfèrent uniquement aux coûts des appareils. Les temps d'attente (par exemple pour atteindre l'équilibre à une force de succion donnée) ne sont pas pris en compte dans le travail. Les restrictions sont liées au domaine d'utilisation : si un appareil permet de mesurer toutes les plages de pF, les limitations sont faibles ; s'il ne peut être utilisé qu'à une plage spécifique, les limitations sont élevées. Les restrictions portent également sur la capacité des appareils en termes de nombre d'échantillons. Des capacités réduites signifient ici davantage de restrictions. Les évaluations doivent être considérées comme des évaluations relatives entre les méthodes. Le «total» montre les champs cumulés par méthode. Plus il est élevé, plus la méthode est spécifique, coûteuse, exigeante en travail et sujette à erreurs.	52
Figure 44 : Évaluation des méthodes de détermination de la conductivité hydraulique à saturation du point de vue des coûts, du temps de travail, de la sensibilité aux erreurs et des restrictions. Les coûts se réfèrent uniquement aux coûts des appareils. Les temps d'attente ne sont pas pris en compte dans le travail. Les restrictions portent sur l'applicabilité des méthodes à l'ensemble de la surface et sur la pertinence des valeurs mesurées. Les évaluations doivent être considérées comme des évaluations relatives entre les méthodes. Le «total» montre les champs cumulés par méthode. Plus il est élevé, plus la méthode est spécifique, coûteuse, exigeante en travail et sujette à erreurs.	54

6. Liste des tableaux

Tableau 1: Liste des propriétés pédologiques à étudier selon le cahier des charges du 19.12.2019 du CCSols. Au cours de ce mandat, les questions ont été légèrement adaptées ; p. ex., les paramètres de la masse volumique réelle et de la stabilité des agrégats ont été intégrés dans la recherche.	6
Tableau 2: Subdivision de l'espace poral en différentes classes de pores avec les plages de force de succion et les diamètres équivalents correspondants. La subdivision de même que la dénomination des classes de pores peuvent varier selon les pays, les domaines d'utilisation et les buts de l'étude. Tableau tiré des méthodes de référence suisses des stations fédérales de recherches agronomiques 1996, volume 2, PYZYL-P.	17
Tableau 3 : Aperçu des paramètres physiques du sol étudiés dans ce rapport et des méthodes de mesure recommandées.	65

7. Bibliographie

Masse volumique apparente

- Al-Shammary, A.A.G., Kouzani, A.Z., Kaynak, A., Khoo, S.Y., Norton, M., Gates, W., 2018: Soil bulk density estimation methods: A review. *Pedosphere*. 28.4. 581.596.
- Blume, H-P, Stahr, K., Leinweber, P., 2011: *Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler*. 3. Neubearbeitete Auflage. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- Buchter, B., und Häusler, S., 2015: Ringversuch bodenphysikalische Kenngrößen: Laborvergleich mit Standardmethoden. *Agroscope Science* n° 13.
- Buchter, B., und Häusler, S., 2009: Arbeitshilfe zur Erfassung und Beurteilung von Bodenschadverdichtungen. *Société suisse de pédologie (SSP)*.
- Buchter, B., Häusler, S., Schulin, R., Weisskopf, P., Tobias, S., 2004: Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen. Positionspapier der BGS-Plattform Bodenschutz. *Société suisse de pédologie*, document 13. Centrale des moyens d'enseignement agricoles, Zollikofen.
- Department of sustainable natural resources, New South Wales Government, Australia: Bulk density of a soil: Clod Method. Soil survey standard test method. <https://www.environment.nsw.gov.au/resources/soils/testmethods/bdsc.pdf> (09.07.2020).
- Schwab, P., und Gubler, A., 2019: Herleitung von Schätzwerten für Lagerungsdichte und Raumgewicht Feinerde. *Observatoire national des sols (NABO)*, Agroscope, Zürich-Reckenholz.
- Schwab, P., und Gubler, A., 2016 (korrigiert 2018): Methoden zu Bestimmung physikalischer Begleitparameter an Bodenproben. *Environnement Agroscope Science* n° 40.
- Stations fédérales de recherches agronomiques (FAL) 1996: Analyses de sol pour la caractérisation des sites. Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Station de recherche Agroscope Changins Wädenswil ACW.
- Tian, Z., Lu, Y., Ren, T., Horton, R., Heitman, J.L., 2018: Improved thermo-time domain reflectometry method for continuous in-situ determination of soil bulk density. *Soil & Tillage Research* 178: 118.129.
- VDLUFA: Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V. 2016: *Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik. VDLUFA-Methodenbuch, Band 1: Die Untersuchung von Böden. Teillieferungen 1–7*. VDLUFA-Verlag Darmstadt.
- Walthert, L., Zimmermann, S., Blaser, P., Luster, J., Lüscher, P., 2004: *Waldböden der Schweiz. Band 1: Grundlagen und Region Jura*. Birmensdorf, Institut fédérale de recherches WSL. Bern, Hep Verlag.
- Weil, R., und Brady, C., 2017: *The nature and properties of soils*. 15th edition. Pearson Education.

Masse volumique réelle

- Stations fédérales de recherches agronomiques (FAL) 1996: Analyses de sol pour la caractérisation des sites. Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Station de recherche Agroscope Changins Wädenswil ACW.
- VDLUFA: Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V. 2016: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch, Band 1: Die Untersuchung von Böden. 1.7. VDLUFA-Verlag Darmstadt.

Pierrosité

- Buchter, B., Häusler, S., Schulin, R., Weisskopf, P., Tobias, S., 2004: Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen. Positionspapier der BGS-Plattform Bodenschutz. Société suisse de pédologie, document 13. Centrale des moyens d'enseignement agricoles, Zollikofen.
- Classification des sols de Suisse(KLABS) : 2010. Version 3, Société suisse de pédologie.
- Schwab, P., und Gubler, A., 2016 (korrigiert 2018): Methoden zu Bestimmung physikalischer Begleitparameter an Bodenproben. Environnement Agroscope Science n° 40.
- VDLUFA: Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V. 2016: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch, Band 1: Die Untersuchung von Böden. Teillieferungen 1-7. VDLUFA-Verlag Darmstadt.
- Walthert, L., Zimmermann, S., Blaser, P., Luster, J., Lüscher, P., 2004: Waldböden der Schweiz. Band 1: Grundlagen und Region Jura. Birmensdorf, Institut fédérale de recherches WSL. Bern, Hep Verlag.

Espace poral du sol : volume total des pores et distribution de la taille des pores (volume des pores grossiers, moyens et fins)

- Blume, H-P., Stahr, K., Leinweber, P., 2011: Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler. 3. Neubearbeitete Auflage. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- Buchter, B., und Häusler, S., 2009: Arbeitshilfe zur Erfassung und Beurteilung von Bodenschadverdichtungen. Société suisse de pédologie (SSP).
- Buchter, B., Häusler, S., Schulin, R., Weisskopf, P., Tobias, S., 2004: Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen. Positionspapier der BGS-Plattform Bodenschutz. Société suisse de pédologie, document 13. Centrale des moyens d'enseignement agricoles, Zollikofen.
- Campbell, G.S., Smith, D.M., Teare, B.L., 2007: Application of a Dew Point Method to Obtain the Soil Water Characteristics. In: Schanz T. (eds) Experimental Unsaturated Soil Mechanics. Springer Proceedings in Physics, vol 112. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Helliwell, J.R., Sturrock, C.J., Grayling, K.M., Tracy, S.R., Flavel, R.J., Young, I.M., Whalley, W.R., Mooney, S.J., 2013: Applications of X-ray computed tomography for examining biophysical interactions and structural development in soil systems: a review. European Journal of Soil Science 64: 279.297.

- Isler, S., Luzius, M., Buchter, B., 2001: Grobporenbestimmung – Verfahrensoptimierung für den Vollzug. Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich, Amt für Landschaft und Natur, Direktion der Volkswirtschaft.
- METER, 2020: WP4C User Manual. METER Group AG München, Germany. http://library.metergroup.com/Manuals/20588_WP4C_Manual_Web.pdf (20.08.2020).
- Schindler, U., Doerner, J., Müller, L., 2015: Simplified method for quantifying the hydraulic properties of shrinking soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 178 (1), 136 – 145.
- Schweizerische Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten (FAL) 1996: Analyses de sol pour la caractérisation des sites. Volume 2. Édition 1996 (modifications 1997 – 2012). Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Station de recherche Agroscope Changins Wädenswil ACW.
- UMS, 2015: Manual HYPROP, Version 2015-01, 96 pp. UMS GmbH, Gmunder Strasse 37, Munich, Germany. URL www.metergroup.com/hyprop-2/#support (19.05.2020).
- VDLUFA: Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V. 2016: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch, Band 1: Die Untersuchung von Böden. 1.7. VDLUFA-Verlag Darmstadt.

Conductivité à l'air

- Ball, B.C., und Schjønning, P., 2002: Air Permeability. Chapter 4.4 in: *Methods of Soil Analysis. Part 1, 3rd Edition.* Soil Science Society of America.
- DIN 19682-9: 2011-04, Bodenbeschaffenheit – Felduntersuchungen – Teil 9: Bestimmung der Luftdurchlässigkeit.
- Umwelt-Geräte-Technik GmbH, 2019: Bedienungsanleitung PL-300. Version 13/06/2019.
- VDLUFA: Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V. 2016: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch, Band 1: Die Untersuchung von Böden. Teillieferungen 1-7. VDLUFA-Verlag Darmstadt.

Conductivité hydraulique à saturation

- Buchter, B., und Häusler, S., 2009: Arbeitshilfe zur Erfassung und Beurteilung von Bodenschadverdichtungen. Empfohlene Labor- und Feldmethoden – Beilage: Gesättigte Wasserleitfähigkeit. Société suisse de pédologie (SSP).
- Buchter, B., Isler, S., Matile, L., 2000a: Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit k_{sat} an ausgewählten Standorten. Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich.
- Buchter, B., Isler, S., Matile, L., 2000b: Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit k_{sat} im Labor. Laboranleitung. Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich.
- Buchter, B., Isler, S., Matile, L., 1998: Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit k_{sat} . Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich.

- Danladi, A., Usman, I. A., Drambi, U. D., Otache, A. E., Musa, Y., 2018: Review of Some Methods of Determining in-Situ Saturated Hydraulic Conductivity of Soil. *American Journal of Science, Engineering and Technology*, 3(3), 53.
- DIN 19682-8:2012-07, Bodenbeschaffenheit - Felduntersuchungen - Teil 8: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit mit der Bohrlochmethode.
- Durner, W., Foken, T., Huwe, B., 2008: Geoökologisches Freilandpraktikum—Physikalische Methoden. Skript, Lehrstuhl für Hydrologie, Universität Bayreuth.
- Durner, W., 2003: Bodenhydrologische Versuche im Praktikum Hydrologie I. Skript. Institut für Geoökologie, Abteilung Bodenkunde und Bodenphysik, TU Braunschweig.
- Kashani, M. H., Ghorbani, M. A., Shahabi, M., Naganna, S. R., Diop, L., 2020. Multiple AI model integration strategy-application to saturated hydraulic conductivity prediction from easily available soil properties. *Soil and Tillage Research*, 196, 104449.
- Stations fédérales de recherches agronomiques (FAL) , 1996: Prélèvement d'échantillons en cylindres de sol non perturbé Méthode PYZYL-WD (échantillons en cylindres). Volume 2. Version 2015. Zürich-Reckenholz.
- Zhang, S. Y., Hopkins, I., Guo, L., Lin, H., 2019: Dynamics of infiltration rate and Field-Saturated soil hydraulic conductivity in a Wastewater-Irrigated cropland. *Water*, 11(8), 1632.

Taux d'infiltration de l'eau

- Bagarello, V., Iovino, M., Elrick, D., 2004: A simplified falling – head technique for rapid determination of field – saturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 68(1), 66–73.
- Blume, H-P., Stahr, K., Leinweber, P., 2011: Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler. 3. Neubearbeitete Auflage. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- DIN 19682-7:2015-08, Bodenbeschaffenheit – Felduntersuchungen – Teil 7: Bestimmung der Infiltrationsrate mit dem Doppelring-Infiltrometer.
- Durner, W., 2008: Ringinfiltration. Skript. Institut für Geoökologie, Abteilung Bodenkunde und Bodenphysik, TU Braunschweig.
- Durner, W., Foken, T., Huwe, B., 2008: Geoökologisches Freilandpraktikum—Physikalische Methoden. Skript, Lehrstuhl für Hydrologie, Universität Bayreuth.
- Durner, W., 2007: Bohrloch-Infiltration. Skript. Institut für Geoökologie, Abteilung Bodenkunde und Bodenphysik, TU Braunschweig.
- Durner, W., 2003: Bodenhydrologische Versuche im Praktikum Hydrologie I. Skript. Institut für Geoökologie, Abteilung Bodenkunde und Bodenphysik, TU Braunschweig.
- Eijkelkamp Soil & Water, 2018: Doppelring-Infiltrometer. Gebrauchsanweisung. – Eijkelkamp Soil & Water, 2012: Guelph-Permeameter. Operating Instructions.

- Fritz, H., Ollesch, G., Weigert, A., und Schmidt, J., 2007: Methodenvergleich der Bodenfeuchtebestimmung und Messung der Infiltration in teilweise gefrorene Böden. *Hercynia-Ökologie und Umwelt in Mitteleuropa*, 40(1), 19–31.
- Ghosh, B., Pekkatt, S., Yamsani, S.K., 2019: Evaluation of infiltrometers and permeameters for measuring hydraulic conductivity. *Advances in Civil Engineering Materials*, 8(1).
- Iserloh, T., 2013: Niederschlagssimulationen mit kleinen mobilen Berechnungsanlagen – Tropfenerzeugung, Regnervergleich, windbeeinflusster Niederschlag. Dissertation an der Universität Trier, Fachereich VI.
- Lili, M., Bralts, V.F., Yinghua, P., Han, L., und Tingwu, L., 2008: Methods for measuring soil infiltration: State of the art. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 1(1), 22–30.
- Lunzer, E., 2009: Untersuchung des Durchlässigkeitsbeiwertes in biologisch bewirtschafteten Böden. Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien.
- Meter, 2020: Mini Disk Infiltrimeter. Manual. http://publications.meter-group.com/Manuals/20421_Mini_Disk_Manual_Web.pdf (11.12.2020).
- Van Es, H.M., und Schindelbeck, R.R., 2003: Field procedures and data analysis for the cornell sprinkle infiltrometer. Department of Crop and Soil Science Research Series R03-01.
- Weber, M., 2013: Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitungssysteme und der Vorfrucht auf Pflanzenwachstum, Ertrag und Qualität sowie auf ausgewählte bodenphysikalische Kennzahlen bei Winterweizen (*Triticum aestivum* L.). Masterarbeit an der Universität für Bodenkultur in Wien.

Force de succion

- Blume, H-P., Stahr, K., Leinweber, P., 2011: *Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler*. 3. Neubearbeitete Auflage Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- DIN EN ISO 11276:2014-07, Bodenbeschaffenheit – Bestimmung des Porenwasserdrucks – Tensiometerverfahren.
- Matile, L., und Meyer, C., 2017: Bodenfeuchtesensoren, eine brauchbare Alternative zu Tensiometern auf Baustellen?. In *Bulletin-Société suisse de pédologie* (vol. 38, pp. 77–81). Elvadata.
- Pan, H., Qing, Y., Pei-yong, L., 2010: Direct and indirect measurement of soil suction in the laboratory. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15(3), 1–14.
- UGT, 2020: Produktkatalog. Umwelt-Geräte-Technik GmbH. https://www.ugt-online.de/fileadmin/Public/downloads/Produkte/Katalog_de.pdf (13.10.2020)
- UMEG, 2003: Saugspannungsmessung. Zentrum für Umweltmessungen, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg. U24-U61-NO3.
- Stehrenberger, E., und Huguenin-Landl, B., 2016: Evaluation Bodenfeuchtemessnetze. Bestehende Messnetze, Erwartungen der Nutzer und Anforderungen an ein ideales Bodenfeuchte-Messnetz. Genossenschaft Meteotest.

- Zuber, T., 2007: Untersuchungen zum Wasserhaushalt eines Fichtenwaldstandorts unter Berücksichtigung der Humusaufgabe. Dissertation an der Universität Bayreuth.

Teneur en eau

- Blume, H-P., Stahr, K., Leinweber, P., 2011: Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler. 3. Neubearbeitete Auflage. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- Flühler, H., und Roth, K., 2004: Physik der Ungesättigten Zone. ETH Zürich und Universität Heidelberg.
- Gimper, S., 2010: Evaluierung bestehender Messsensoren zur Ermittlung des Matrixpotenzials in Böden. Diplomarbeit zur Erlangung des Grades eines Diplom-Ingenieurs für Umwelttechnik. Fachhochschule Jena.
- Stahr, K., Kandeler, E., Herrmann, L., Streck, T., 2012: Bodenkunde und Standortlehre. Grundwissen Bachelor. Eugen Ulmer Verlag Stuttgart.
- Stehrenberger, E., und Huguenin-Landl, B., 2016: Evaluation Bodenfeuchtemessnetze. Bestehende Messnetze, Erwartungen der Nutzer und Anforderungen an ein ideales Bodenfeuchte-Messnetz. Meteotest Bern.
- UGT-GmbH, 2020: Über Bodenfeuchtesensoren. URL <https://www.ugt-online.de/produkte/bodenkunde/bodenfeuchtetemperaturleitfaehigkeit/ueber-bodenfeuchtesensoren/> (10.08.2020)
- VDLUFA: Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V. 2016: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch, Band 1: Die Untersuchung von Böden. Teillieferungen 1–7. VDLUFA-Verlag Darmstadt.
- Weil, R., und Brady, C., 2017: The nature and properties of soils. 15th edition. Pearson Education

Réserve utile

- AG Boden, 1994: Bodenkundliche Kartieranleitung, 4. Auflage. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Stahr, K., Kandeler, E., Herrmann, L., Streck, T., 2012: Bodenkunde und Standortlehre. Grundwissen Bachelor. Eugen Ulmer Verlag Stuttgart.
- VDLUFA: Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V. 2016: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch, Band 1: Die Untersuchung von Böden. Teillieferungen 1-7. VDLUFA-Verlag Darmstadt.

Niveau de la nappe

- Blume, H-P., Stahr, K., Leinweber, P., 2011: Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler. 3. Neubearbeitete Auflage. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- Gray, D.M., und Mahaptra, A.K., 1965: A method of measurement of the ground water table and soil hydraulic conductivity. Canadian Agricultural Engineering, 25 – 27.
- Quante, S., 2017: Messstellenbau – verständlich! 68. Deutsche Brunnenbauertage und BAW-Baugrundkolloquium.
- VDLUFA: Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V. 2016: Handbuch der Landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik (VDLUFA-Methodenbuch, Band 1: Die Untersuchung von Böden. Teillieferungen 1-7. VDLUFA-Verlag Darmstadt.

Potentiel d'oxydoréduction

- Blume, H-P., Stahr, K., Leinweber, P., 2011: Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler. 3. Neubearbeitete Auflage. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- Rabenhorst, M. C., 2018: A System for Making and Deploying Oxide-Coated Plastic Films for Environmental Assessment of Soils. Soil Science Society of America Journal, 82(5), 1301 – 1307.
- Reisser, R., Stadelmann, V., Weisskopf, P., Gram, L., Keller, T., 2020: System for quasi-continuous simultaneous measurement of oxygen diffusion rate and redox potential in soil. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 183, 316 – 326.
- Stahr, K., Kandeler, E., Herrmann, L., Streck, T., 2012: Bodenkunde und Standortlehre. Grundwissen Bachelor. Eugen Ulmer Verlag Stuttgart.
- Weil, R., und Brady, C., 2017: The nature and properties of soils. 15th edition. Pearson Education.

Résistance à la pénétration

- Buchter, B., und Häusler, S., 2009: Arbeitshilfe zur Erfassung und Beurteilung von Bodenschadverdichtungen. Société suisse de pédologie (SSP).
- Dexter, A.R., Czyz, E.A., Gate, E.A., 2007: A method for prediction of soil penetration resistance. Soil and Tillage Research (93), 412 – 419.
- Eijkelkamp, Soil & Water 2020: Penetrologger. Gebrauchsanweisung.
- Herrick, J.E., und Jones, T.L., 2002: A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. Soil Science Society of America Journal, 1320 – 1324.
- Schwab, P., Dietrich, M., Gubler, A., 2018: Messung des Eindringwiderstands und des Bodenwasserzustandes. Methodenvergleich verschiedener Geräte und Verfahren. Observatoire national des sols (NABO), Agroscope, Zürich-Reckenholz.
- Sol Solution, 2020: URL <https://www.sol-solution.com/en/our-materials/light-weight-deflectometer/#description> (17.09.2020).

Degré de compaction (Degree of compactness)

- Buchter, B., Häusler, S., Schulin, R., Weisskopf, P., Tobias, S., 2004: Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen. Positionspapier der BGS-Plattform Bodenschutz. Société suisse de pédologie, document 13. Centrale des moyens d'enseignement agricoles, Zollikofen.
- Håkansson, I., 1990: A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil Tillage Research*, 16, 105–120.
- Naderi-Boldajji, M., und Keller, T., 2016: Degree of soil compactness is highly correlated with the soil physical quality index S. *Soil and Tillage Research*, 159, 41–46.
- Reichert, J.M., Suzuki, L.E.A.S., Reinert, D.K., Horn, R., Hakansson, 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, 242–254.

Comportement de retrait du sol

- Braudeau, E., Constantini, J.M., Bellier, G., Colleuille, H., 1999: New Device and Method for Soil Shrinkage Curve Measurement and Characterization. *Soil Science Society of America Journal*, Vol 63, 525–535.
- Düllmann, H., 2014: Reaktionen feinkörniger Böden auf Wasserentzug und mögliche Auswirkungen auf die Geländeoberfläche und Gebäude im Rheinischen Braunkohlerevier. Geotechnisches Büro Prof. Dr.-Ing. H. Düllmann GmbH, Aachen.
- Gabrielli Technology: URL <http://www.gabrielli.com/en/prodotto.php?id=82> (28.09.2020).
- Leong, E.C., und Wijaya, M., 2015: Universal soil shrinkage curve equation. *Geoderma*, 237–239, 78–87.
- Li, L., und Thang, X., 2019: A New Approach to Measure Soil Shrinkage Curve. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 42, No.1, 1–18.

Stabilité des agrégats

- Agroscope Mode opératoire stabilité des agrégats (document interne).
- Blume, H-P., Stahr, K., Leinweber, P., 2011: Bodenkundliches Praktikum. Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler. 3. Neubearbeitete Auflage. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- Buchter, B., Häusler, S., Schulin, R., Weisskopf, P., Tobias, S., 2004: Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen. Positionspapier der BGS-Plattform Bodenschutz. Société suisse de pédologie, document 13. Centrale des moyens d'enseignement agricoles, Zollikofen.
- Burri, K., 2006: Boden-Aggregatstabilität als Parameter zur Quantifizierung von Vegetationseffekten auf oberflächennahe Bodenbewegung. Masterarbeit an der ETH Zürich und WSL.
- Czyz, E.A., und Dexter, A.R., 2008: Soil physical properties under winter wheat grown with different tillage systems at selected locations. *International Agrophysics*, 22, 191–200.
- Dexter, A.R., und Czyz, E.A., 2000: Effects of soil management on the dispersibility of clay in sandy soil. *International Agrophysics*, 14, 269–272.

- Kainz, M., und Weiss, A., 1988: Eignung verschiedener Aggregatstabilitätsmethoden zur Charakterisierung der Erosionsanfälligkeit.- In: Mitteilung der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft. Band 56, 81 – 84.
- Le Bissonnais, Y., 2016: Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 67(1), 11 – 21.
- Mair, S., 2017: Vergleich der Aggregatsstabilität von Böden mit unterschiedlicher Bodenbearbeitung. Masterarbeit an der Universität für Bodenkulturen, Wien.
- Mentler, A., Mayer, H., Blum, W.E.H., 2004: Characterization of soil aggregate stability by ultrasonic dispersion. *International Agrophysics*, 18, 39 – 45.
- Stahr, K., Kandeler, E., Herrmann, L., Streck, T., 2012: Bodenkunde und Standortlehre. Grundwissen Bachelor. Eugen Ulmer Verlag Stuttgart.

Stabilité à la percolation

- Kainz, M., und Weiss, A., 1988: Eignung verschiedener Aggregatstabilitätsmethoden zur Charakterisierung der Erosionsanfälligkeit.- In: Mitteilung der deutschen bodenkundlichen Gesellschaft. Band 56, 81 – 84.
- Mair, S., 2017: Vergleich der Aggregatsstabilität von Böden mit unterschiedlicher Bodenbearbeitung. Masterarbeit an der Universität für Bodenkulturen, Wien.
- Mbagwua, J.S.C., und Auerswald, K., 1999: Relationship of percolation stability of soil aggregates to land use, selected properties, structural indices and simulated rainfall erosion. *Soil & Tillage Research*, 50, 197 – 206.

Évaluation de la structure

- Ball, B.C., Guimarães, R.M.L., Cloy, J.M., Hargreaves, P.R., Shepherd, T.G., McKenzie, B.M., 2017: Visual soil evaluation: a summary of some applications and potential developments for agriculture. *Soil & Tillage Research*, 173, 114 – 124.
- Beste, A., 2005: Bodenqualität als Grundlage für Produktqualität im ökologischen Landbau. Vortrag XXXI. Fortbildungskurs Ökologischer Landbau, 10. und 11. März 2005. Büro für Bodenschutz und ökologische Agrarkultur.
- Beste, A., 2003: Weiterentwicklung und Erprobung der Spatendiagnose als Feldmethode zur Bestimmung ökologisch wichtiger Gefügeeigenschaften landwirtschaftlich genutzter Böden. Dissertation Universität Gießen, Verlag Dr. Köster, Berlin.
- Boizard, H., Batey, T., McKenzie, D.C., Richard, G., Roger-Estrade, J., Ball, B.C., Bradley, I., Cattle, S., Hasinger, G., Munkholm, L.J., Niewergelt, J., Peigné, J., Shepherd, G., 2007: Field meeting «Visual Soil Structure Assessment» held at the INRA Research Station, Estrées-Mons, France, 25 – 2 May 2005.
- Buchter, B., Häusler, S., Schulin, R., Weisskopf, P., Tobias, S., 2004: Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen. Positionspapier der BGS-Plattform Bodenschutz. Société suisse de pédologie, document 13. Centrale des moyens d'enseignement agricoles, Zollikofen.

- _ Guimaraes, R.M.L., Lamande, M., Munkholm, L.J., Ball, B.C., & Keller, T., 2017: Opportunities and future directions for visual soil evaluation methods in soil structure research. *Soil and Tillage Research*, 173, 104 – 113.
- Johannes, A., Weiskopf, P., Schuli, R., Boivin, P., 2017: To what extent do physical measurements match with visual evaluation of soil structure? *Soil and Tillage Research*, 173, 24 – 32.
- _ Nievergelt, J., Petrasek, M., Weiskopf, P., 2002 : Observer et évaluer la structure du sol. Les cahiers de la FAL 50. Station fédérale de recherches en agroécologie et agriculture, FAL, Zurich- Reckenholz.
- _ Peerlkamp, P.K., 1959: A visual method of soil structure evaluation. *Meded. v.d. Landbouwhogeschool en Opzoekingsstations van de Staat te Gent*, 24, 216 – 221.

8.2. Exemple de succession d'opérations en laboratoire sur des échantillons en cylindres de sol non perturbé

De nombreuses méthodes de physique des sols utilisent des échantillons en cylindres de sol non perturbé. S'ils ne sont pas détruits par les mesures, il est possible de déterminer plusieurs paramètres sur un seul de ces échantillons. On trouvera ci-après un exemple de succession d'opérations en laboratoire permettant de mesurer différents paramètres sur un même échantillon. La détermination de la conductivité à l'air pourrait encore être complétée par une mesure de la diffusion. De telles successions d'opérations existent également pour d'autres groupes de paramètres, p. ex. pour la combinaison de mesures de la porosité et de la stabilité mécanique. Les propriétés mesurables sur un même échantillon peuvent être plus ou moins nombreuses selon la combinaison de paramètres. Il convient de noter que la teneur en eau est déterminée par pesage tout au début des analyses et après le séchage.

Étape de travail	Paramètre
Préparation	→ Teneur en eau
Saturation en eau	
Désorption 30hPa	→ Pores grossiers supérieurs
Perméabilité à l'air 30 hPa	→ Conductivité à l'air
Désorption 60 hPa	→ Pores moyens médians
Perméabilité à l'air 60 hPa	→ Conductivité à l'air
Désorption 100 hPa	→ Pores grossiers inférieurs
Désorption 1000 hPa	→ Pores moyens supérieurs
Désorptions 15 000 hPa	→ Pores moyens médians, pores moyens inférieurs
Séchage, pesage	→ Masse volumique apparente, teneur en eau
Tamissage > 2mm	→ Pierrosité
Pycnomètre à eau	→ Volume total des pores, masse volumique réelle, pores fins

Centre de compétences sur les sols
BFH-HAFL
Länggasse 85 _ 3052 Zollikofen
info@ccsols.ch _ ccsols.ch