

KOBO
CCSols
CCSuolo

Kompetenzzentrum Boden
Centre de compétences sur les sols
Centro di competenze per il suolo



Nouvelles méthodes de cartographie des sols – Projet pilote CCSols de Prez (FR)

Rapport du CCSols N° 13

Centre de compétences sur les sols

Février 2026

Engagé en Suisse
pour une précieuse ressource

Mentions légales

Auteur-e-s: Urs Grob, Emilie Carrera, Marie Spycher, Barbra Karlen, Dominik Zahner, Simon Tutsch, Lucie Greiner, Gunnar Petter, Maxime Siegenthaler, Thorsten Behrens, Karsten Schmidt, Felix Stumpf, Michael Scheifele, Fabrice Wullschleger et Armin Keller

Année de parution: 2026

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

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

Photo de couverture: Vue par drone sur Prez, Image: Horsform/Canton de Fribourg.

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

Citation recommandée: Grob U., E. Carrera, M. Spycher, B. Karlen, D. Zahner, S. Tutsch, L. Greiner, G. Petter, M. Siegenthaler, T. Behrens, K. Schmidt, F. Stumpf, M. Scheifele, F. Wullschleger et A. Keller (2026) : Nouvelles méthodes de cartographie des sols — Projet pilote CCSols de Prez (FR). Rapport du CCSols N° 13. BFH-HAFL, CH-3052 Zollikofen-Berne, disponible sur <https://ccsols.ch/fr/downloadcenter>

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	9
1.1. Objectifs du projet	10
1.2. Communication	12
2. Description du périmètre de projet	13
2.1. Géologie et géomorphologie	13
2.2. Préparation des données environnementales et des géodonnées	14
3. Phase conceptuelle	15
3.1. Périmètre du projet ajusté	15
3.2. Concept d'échantillonnage	16
3.2.1. Niveaux hiérarchiques	16
3.2.2. Exemple de concept d'échantillonnage pour les sites de prélèvements (H3)	16
3.3. Phase de prospection	19
4. Travail de terrain	20
4.1. Contrôle qualité des relevés pédologiques	21
4.2. Profils (niveau hiérarchique H1)	23
4.2.1. Procédure	23
4.2.2. Résultats	23
4.3. Miniprofils (niveau hiérarchique H1.1)	26
4.3.1. Résultats	27
4.3.2. Comparaison entre profils et miniprofils	27
4.4. Echantillonnages (niveau hiérarchique H3)	29
4.5. Sondages pédologiques (niveau hiérarchique H2)	29
4.5.1. Test sur le terrain du véhicule de sondage Wintex MCL3	29
4.6. Piézomètres	30
4.7. Analyses de laboratoire	33
5. Outils de terrain	34
5.1. Nouveaux outils	34
5.1.1. Statut	34
5.1.2. Soildat-Live	35
5.1.3. Soilproperties	36
5.1.4. Polygones	37
6. Réalisation des cartes	38
6.1. Cartes de propriétés des sols	38
6.2. Cartes des caractéristiques des sols	42
7. Cartes thématiques	45
7.1. Potentiel de fourniture de l'azote selon PRIF (2017)	46
7.2. Indice de qualité des sols selon Hilbert et al. (2021)	47
7.3. Potentiel d'enrichissement en carbone sous forme stable des sols selon Johannes et al. (2017)	48

8. Conclusion et perspectives	49
8.1. Les sols de Prez	49
8.2. Déroulement et techniques du projet	50
8.3. Cartes réalisées	51
8.4. Perspectives	52
9. Liste des tableaux	56
10. Liste des illustrations	56
11. Liste des abréviations	56
12. Bibliographie	57
13. Annexe A	59
14. Annexe B (en allemand)	60
15. Annexe C (en allemand)	61

Préface



Afin de garantir une utilisation durable des sols, il est essentiel de déterminer leurs propriétés et leur qualité, en surface comme en profondeur, grâce aux cartographies. En tant que Centre de compétences sur les sols, nous nous engageons dans cet enjeu. De nouvelles méthodes et techniques permettent d'améliorer la cartographie, tant sur le plan quantitatif que qualitatif, et d'en accroître la rentabilité. En collaboration avec les cantons, les offices fédéraux et le secteur privé, ces méthodes sont testées et optimisées en conditions réelles dans différentes régions de Suisse, dans le cadre des projets pilotes CCSols et cantonaux. Ces projets pilotes permettent ainsi d'intégrer progressivement ces nouvelles méthodes dans la cartographie, tant pour les sols agricoles que pour les sols forestiers.



Le présent rapport technique résume la procédure et les principaux résultats du troisième projet pilote CCSols réalisé dans la commune de Prez (FR). Il s'adresse à un large public spécialisé et documente les différents développements techniques et méthodologiques de façon synthétique. Les méthodes scientifiques sous-jacentes sont détaillées dans la littérature spécialisée correspondante. Ce rapport s'appuie sur les rapports techniques des deux premiers projets pilotes CCSols (Diemerswil, BE et Lommis, TG). Les contenus techniques documentés dans ceux-ci ne sont pas décrits à nouveau dans le présent rapport, mais font l'objet de références. Ce rapport présente les nouvelles connaissances acquises dans plusieurs domaines. Il traite de l'optimisation des processus de travail et du contrôle de qualité des relevés pédologiques. Il aborde également l'utilisation d'outils numériques de terrain, la gestion des données et la collaboration entre le travail de terrain, le laboratoire et la science des données (data science).

Nous nous réjouissons d'avoir mené notre troisième projet pilote dans la commune de Prez, dans le canton de Fribourg. Grâce au soutien de la commune et des exploitant-e-s ainsi que des collaborateurs et collaboratrices de Grangeneuve (État de Fribourg) les travaux sur le terrain ont pu être réalisés comme prévu. Nos remerciements vont également au bureau d'ingénieurs Geotest SA, avec lequel les travaux sur le terrain ont été réalisés. Nous remercions tout particulièrement nos mandants de la Confédération, l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG) et l'Office fédéral du développement territorial (ARE), ainsi que la Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires (HAFL, Zollikofen) de la Haute école spécialisée bernoise (BFH). Toute l'équipe du CCSols tient à remercier chaleureusement les participant-e-s du projet pour leur soutien et leur excellente coopération.

Urs Grob et Emilie Carrera
Directeur et responsable de coordination de projets pédologiques, Suisse romande

Résumé

Le CCSols a pour objectif de perfectionner la cartographie des sols en Suisse sur le plan technique. Afin de tester de nouvelles méthodes de cartographie des sols et de les optimiser pour la mise en pratique, le CCSols mène des projets pilotes dans différentes régions de Suisse, en étroite collaboration avec les cantons, les offices fédéraux et les bureaux d'ingénieurs. Le troisième projet pilote présenté dans le présent rapport a été mis en œuvre dans la commune fribourgeoise de Prez sur 230 ha de surface agricole entre 2023 et 2025, en collaboration avec le canton de Fribourg et le bureau d'ingénieurs Geotest SA. En s'appuyant sur les expériences acquises lors des projets pilotes précédents à Diemerswil (BE) et Lommis (TG), plusieurs objectifs méthodologiques ont été définis :

- _ amélioration de l'estimation du niveau d'eau grâce à l'utilisation de piézomètres,
- _ mise en place d'un concept d'échantillonnage optimisé,
- _ adaptation du calendrier des travaux sur le terrain. La campagne d'échantillonnage a été réalisée en amont de la campagne de sondages afin de produire des cartes de propriétés des sols utilisables lors de cette dernière,
- _ développement et utilisation d'outils numériques de terrain (Statut, Soildat-Live, Soilproperties, outil Polygones),
- _ test de différentes méthodes de prélèvement, notamment les miniprofils (carottage de 14 cm) et les tubes de 1 mètre utilisés lors de la campagne de sondages,
- _ combinaison de sondages mécanisés et manuels avec une organisation structurée en lots de travail,
- _ formation d'un bureau de cartographie au nouveau processus de travail et aux nouveaux outils,
- _ optimisation des processus de modélisation,
- _ création de nouvelles cartes thématiques.

Le canton de Fribourg a assuré la mise à disposition du cadastre souterrain, la communication avec la commune, les exploitant-e-s et les propriétaires, ainsi que l'organisation des séances d'information.

Pour l'ensemble des données sur les sols ont été saisi numériquement directement sur le terrain à l'aide de l'application web Soildat. Des codes QR ont été utilisés de manière systématique dans tous les processus de travail pour la logistique des échantillons, tant sur le terrain qu'au laboratoire. Un contrôle qualité a été réalisé sur tous les relevés réalisés.

L'échantillonnage et les analyses spectroscopiques en laboratoire, réalisés avant la campagne de sondages, ont permis de créer des cartes matricielles (raster) pour six propriétés des sols :

- _ argile,
- _ limon,
- _ sable,
- _ carbonates,
- _ carbone organique,
- _ pH.

Celles-ci ont apporté un précieux soutien aux cartographes lors de la campagne de sondages. Les informations sur les sols relevés lors de ce projet ont également permis de réaliser des cartes des caractéristiques des sols. Sur la base des cartes des propriétés et des caractéristiques des sols, complétées par d'autres facteurs liés au site, des cartes thématiques ont été élaborées dans les domaines suivants :

- _ protection des eaux et des eaux souterraines,
- _ protection du climat (carbone),
- _ agriculture (fertilisation et chaulage),
- _ protection de la nature (potentiel de sites humides et secs),
- _ aménagement du territoire (indices de qualité des sols),
- _ sécheresse (irrigation).

Les résultats des relevés montrent que les sols contenus dans le périmètre sont principalement des Sols bruns limoneux développés sur des dépôts morainiques à l'ouest. Les crêtes sont composées de Régosols érodés, tandis que les dépressions et les anciennes zones humides abritent des sols influencés par les eaux souterraines (Gleys, Gleys-sols bruns) ainsi que des Sols semi-tourbeux dégradés. La partie orientale de la zone est caractérisée par des dépôts fluvioglaciaires, donnant lieu à des sols plus sableux. La répartition spatiale des sols est fortement influencée par les activités humaines, notamment le drainage, l'extraction de la tourbe et les remblais.

Zusammenfassung

Das KOBO hat zum Ziel, die Bodenkartierung in der Schweiz technisch weiterzuentwickeln. Um neue Methoden im Ablauf einer Kartierung zu testen und für die Praxis zu optimieren, führt das KOBO gemeinsam mit Kantonen, Bundesämtern und Ingenieurbüros in verschiedenen Regionen Pilotprojekte durch.

Das dritte Pilotprojekt wurde in der freiburgischen Gemeinde Prez in den Jahren 2023–2025 durchgeführt. Der Projektperimeter war 230 ha gross. Aufbauend auf den bisherigen Erfahrungen aus den Pilotprojekten in Diemerswil (BE) und Lommis (TG) wurden in Prez unter anderem folgende methodische Ziele verfolgt:

- _ Verbesserung der Grundwassermessung dank des Einsatzes von Piezometern,
- _ Optimierung des Beprobungskonzepts,
- _ Anpassung des zeitlichen Ablaufs der Feldarbeiten. Mit Hilfe von Erkundungsbohrungen wurden Bodeneigenschaftskarten erstellt. Diese Karten unterstützten die Pedolog:innen bei ihrer bodenkundlichen Feldarbeit,
- _ Weiterentwicklung und Einsatz digitaler Feldtools (Status, Soildat-Live, Bodeneigenschaften (Soilproperties), Polygon-Tool),
- _ Testen verschiedener Bohrmethoden, einschliesslich Miniprofile (Bohrungen von 14 cm) und 1-Meter-Hülsen für die Kartierphase,
- _ Kombination von maschinellen und manuellen Bohrungen, die gemäss verschiedener Kartierlose erfolgten,
- _ Schulung eines Kartierbüros im neuen Arbeitsablauf sowie im Umgang mit den neuen Tools,
- _ Optimierung der Modellierungsprozesse,
- _ Erstellung neuer Themenkarten.

Der Kanton Freiburg war zuständig für die Bereitstellung der Leitungspläne, für die externe Kommunikation sowie für die Organisation der Informationsanlässe.

Alle Bodendaten wurden mithilfe der Webanwendung Soildat direkt vor Ort erfasst. QR-Codes erleichterten die Probenlogistik auf dem Feld und im Labor. Alle Probenerhebungen wurden einer Qualitätskontrolle unterzogen.

Da die Probenentnahme und spektroskopische Analyse im Labor bereits vor der eigentlichen Feldarbeit durchgeführt wurden, konnten Rasterkarten für folgende sechs Bodeneigenschaften erstellt werden:

- _ Ton,
- _ Schluff,
- _ Sand,
- _ Karbonate,
- _ organischer Kohlenstoff,
- _ pH-Wert.

Dieses Vorgehen war für die Feldarbeiten eine wichtige Grundlage für die Kartierer:innen: Anhand der Bodeneigenschaftskarten, der verfügbaren Bodendaten sowie weiteren Standortfaktoren erstellten sie Themenkarten für nachfolgende Bereiche:

- _ Gewässer- und Grundwasserschutz,
- _ Klimaschutz (Kohlenstoff),
- _ Landwirtschaft (Düngung und Kalkung),
- _ Naturschutz (Feucht- und Trockenstandortpotenzial),
- _ Raumplanung (Bodenqualitätsindizes) und
- _ Trockenheit (Bewässerung).

Die bodenkundlichen Untersuchungen haben ergeben, dass im Projektgebiet mehrheitlich verbräunte, lehmige Braunerden vorkommen. Diese haben sich auf moränischen Ablagerungen im Westen entwickelt. In den Kuppenlagen finden sich erodierte Regosole, während in Senken und ehemaligen Feuchtgebieten grundwassergeprägte Böden (Gleye, Gley-Braunerden) sowie degradierte Halbbögel vorkommen. Der östliche Teil des Gebiets ist durch fluvioglaziale Ablagerungen geprägt, die zu sandreicheren Böden führen. Das räumliche Muster der Bodenverbreitung ist stark anthropogen beeinflusst, insbesondere durch Drainagen, Torfabbau, Aufschüttungen und historische Landnutzung.

1. Introduction

La cartographie des sols permet d'acquérir des informations pédologiques sur une région jusqu'à une profondeur d'environ 1 à 1.5m. Pour ce faire, les caractéristiques pédologiques les plus importantes sont relevées et les sols sont nommés selon la classification en vigueur. Ces données permettent d'évaluer la qualité, l'aptitude agricole et les fonctions des sols. Les informations pédologiques et les produits qui en sont issus, comme les cartes de propriétés des sols ou les cartes thématiques, revêtent une grande importance dans de nombreux domaines présentés dans la Figure 1 ci-dessous.

L'objectif du CCSols est de développer les techniques et les méthodes de cartographie des sols en Suisse, puis de mettre à disposition du public les informations pédologiques disponibles. Afin d'atteindre ses objectifs, il mène, en collaboration avec les cantons, les offices fédéraux et les bureaux d'ingénieurs, des projets pilotes dans différentes régions de Suisse.

Le présent projet constitue le troisième projet pilote CCSols. Il a été réalisé dans la commune fribourgeoise de Prez.

Bien que les produits issus de la cartographie des sols génèrent une forte valeur ajoutée à une grande partie de la société et que le besoin en informations pédologiques ne cesse d'augmenter, des cartes pédologiques ne sont disponibles actuellement que pour 13% de la surface agricole suisse (Rehbein et al. 2019). De plus, ces cartes ne contiennent pas toujours des données pédologiques suffisantes pour répondre aux besoins actuels.

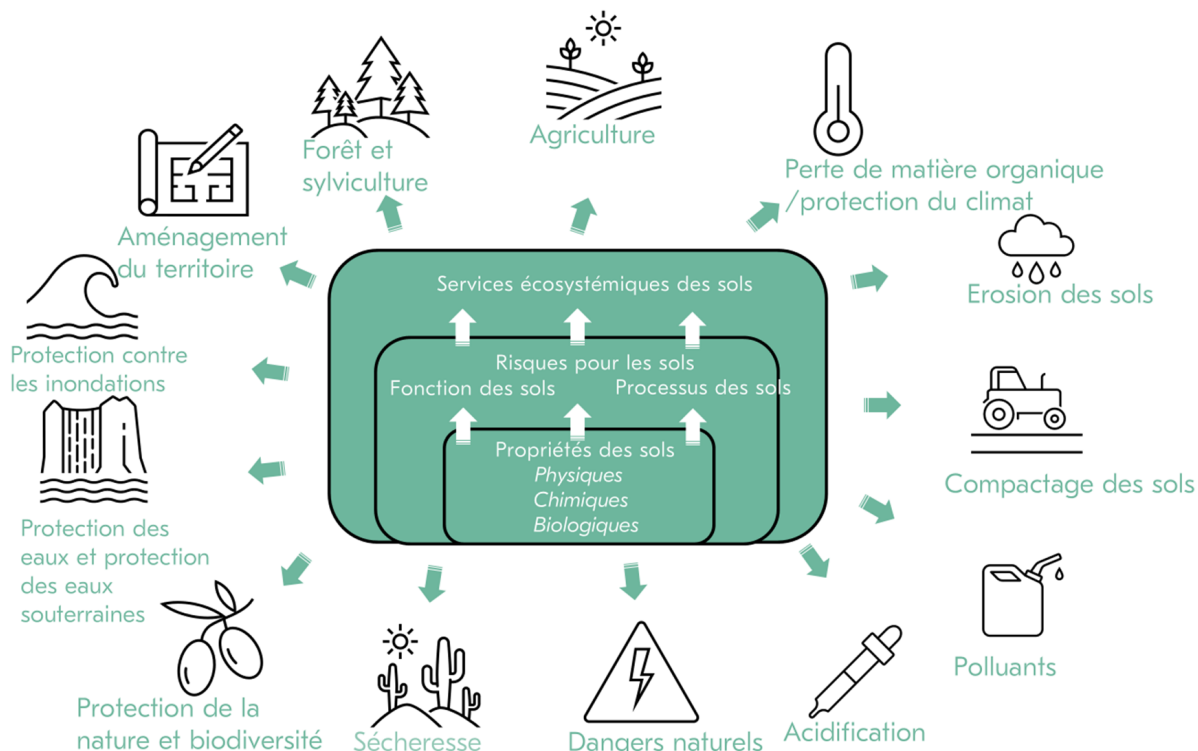


Figure 1 : Domaines dans lesquels les informations pédologiques peuvent apporter une valeur ajoutée.

1.1. Objectifs du projet

Tout comme les deux précédents projets pilotes CCSols et fort des expériences acquises au cours de ceux-ci, le présent projet a été mené de manière à apporter des contributions significatives au développement méthodologique et à l'optimisation de la cartographie des sols.

Les principaux objectifs de ce projet ont été :

- **L'amélioration du relevé des signes d'engorgement**

À cette fin, des piézomètres ont été installés afin de caractériser avec précision les conditions hydrologiques des sols et de déterminer l'évolution temporelle de leurs caractéristiques hydromorphiques.

- **Le développement et l'utilisation du concept d'échantillonnage**

Une structure d'échantillonnage hexagonale avec des zones de remplacement a été développée. La zone d'étude a été épurée des conduites souterraines, des routes et des bâtiments grâce à un ajustement semi-automatisé. Cette approche a permis un échantillonnage efficace et spatialement équilibré tout en tenant compte des conditions pratiques sur le terrain.

- **L'adaptation du déroulement chronologique des étapes de travail**

La Figure 2 présentée ci-dessous illustre le déroulement d'un projet de cartographie des sols. Dans le présent projet, l'adaptation a été réalisée au niveau du bloc «travail sur le terrain». Dans les précédents projets pilotes les cartes de propriétés des sols ont été produites en aval du travail de terrain, ce qui signifie qu'aucune carte n'était disponible pendant celui-ci. Dans le présent projet, la campagne d'échantillonnage à des profondeurs fixes et les analyses spectroscopiques en laboratoire (H3, Paragraphe 3.2) ont été réalisées en amont de la campagne de sondages afin que les cartes de propriétés des sols soient disponibles et aident les cartographes sur le terrain. La spectroscopie s'est limitée aux échantillons H3, contrairement au projet pilote réalisé à Lommis (TG). Ce changement a permis d'optimiser le déroulement des travaux et l'utilisation des ressources.

- **Le perfectionnement d'outils numériques**

Divers outils numériques ont été perfectionnés et utilisés sur le terrain, tels que «Soil-dat-Live» permettant la saisie et la visualisation de l'avancée de la saisie des données en temps réel, «Soil-properties» permettant la consultation des propriétés des sols et l'outil «Polygones» utilisé pour la saisie numérique des unités pédologiques. Ces derniers ont aidé les cartographes à relever des données efficacement tout en garantissant leur qualité.

- **Le test de différentes méthodes de prélèvement**

Lors de la campagne de profils, des sondages de gros diamètre ont été carottés afin d'évaluer s'il était possible de les utiliser à la place des profils classiques. Des tubes de 1 mètre de long et de 4,5 cm de diamètre ont été réalisés pour prélever des sondages utilisés pour la description des sols (H2) afin d'évaluer si une alternative au Aebi TT utilisé habituellement existait. Les sondages H2 ont été effectués à la fois mécaniquement et manuellement et séparés en lots de cartographie permettant un travail de terrain structuré.

- **La formation des cartographes**

La formation d'un bureau d'ingénieurs au nouveau processus de travail, aux cartes de propriétés des sols et aux outils numériques a été élaborée.

- **L'optimisation du processus de modélisation**

Des processus de modélisation permettant l'évaluation spatiale des propriétés et des paramètres des sols ont été optimisés.

- **La création de nouvelles cartes thématiques**

Le défi spécifique de ce projet consistait à intégrer ces avancées méthodologiques dans un processus de travail cohérent et applicable. Cela comprenait à la fois la mise en œuvre technique, la formation des cartographes et le transfert en continu des connaissances entre les personnes. Le périmètre du projet est décrit plus en détail aux Chapitres 2 et 3.

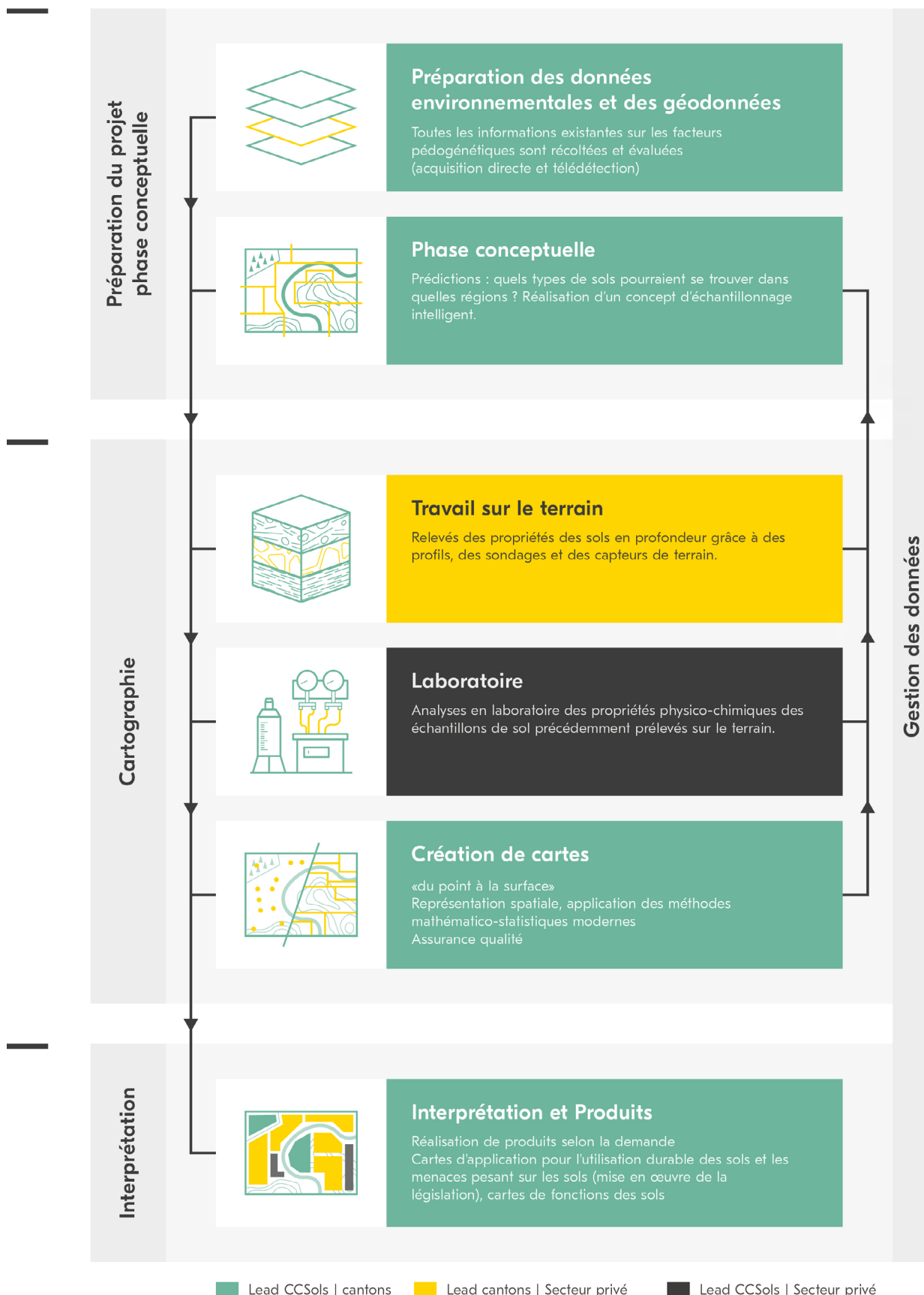


Figure 2: Présentation des trois phases principales du déroulement d'une cartographie des sols. Les six « blocs » sont décrits de façon plus détaillée dans le rapport du CCSols n°3 (Keller et al. 2023).

1.2. Communication

Une communication ouverte et transparente est essentielle à la réussite d'un projet de cartographie, car elle aide à clarifier les informations importantes, les attentes et les besoins et réduit les malentendus.

La première étape a été de prendre contact avec le canton de Fribourg, les autorités cantonales étant les principaux interlocuteurs et leur contribution s'avérant essentielle tout au long du projet.

La deuxième étape importante a été la rencontre avec la commune de Prez, suivie de la rédaction d'un article dans «[Le Preztexte n°6](#)» (Bonny et al. 2023) afin d'informer l'ensemble des habitant-e-s de la commune du projet.

Par la suite, les exploitant-e-s concerné-e-s par le projet ont été personnellement contacté-e-s et invité-e-s à une séance d'information en mars 2023. Les séances d'informations sont importantes pour présenter le projet et répondre aux questions des exploitant-e-s, mais aussi pour obtenir leur accord et pour partager leurs précieuses connaissances du terrain. Pour ce faire, plusieurs mesures de communication ont été prises :

- _ des posters ont été présentés,
- _ des flyers distribués (Figure 3),
- _ les exploitant-e-s ont été personnellement contactés par téléphone,
- _ des informations par e-mail leur ont été envoyées sur demande.

L'utilisation d'une application mobile de messagerie instantanée a grandement facilité les contacts et la planification des campagnes de terrain. Elle a été utilisée la plupart du temps avec les exploitant-e-s et a facilité l'envoi de photos et d'images.

Une séance de clôture présentant les produits issus des informations pédologiques relevées a également été organisée en juin 2025. Des posters et un document composé des produits ont été élaborés pour cette occasion.

De plus, plusieurs journées d'informations ont également été organisées durant toute la durée du projet. Une journée de formation continue basée sur les profils ouverts a été organisée en 2025 à l'attention des bureaux privés du canton de Fribourg (Figure 4).



Figure 3: Flyer du projet distribué lors de la séance d'information.



Figure 4: Journée de formation continue (Image: Horsform/Canton de Fribourg)

2. Description du périmètre de projet

2.1. Géologie et géomorphologie

La géologie dans la région de Prez (Weidmann 1996) est caractérisée par des dépôts quaternaires d'origine glaciaire recouvrant la molasse d'eau douce inférieure tertiaire (Molasse grise de Lausanne). Au niveau du périmètre du projet (Figure 5), la couverture quaternaire varie de quelques mètres jusqu'à plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. Aucun des sondages pédologiques n'a révélé la présence de soubassement molassique, ce qui suggère une couverture quaternaire de plus de 1,5m sur l'ensemble du périmètre.

Le périmètre du projet est caractérisé par deux grands types de dépôts distincts, qui expliquent notamment la topographie des lieux. La partie ouest, dont le relief est plus marqué, est dominée par des dépôts morainiques d'âge würmien. Les systèmes de drumlins sont facilement reconnaissables dans le paysage et jouent un rôle important dans la pédogenèse locale. Les sols issus de ce matériel morainique sont plus argileux. À l'est, les dépôts prédominants sont de nature fluvioglaciaire. Les sols issus de ce matériau sont plutôt sableux et correspondent à des dépôts du retrait würmien.

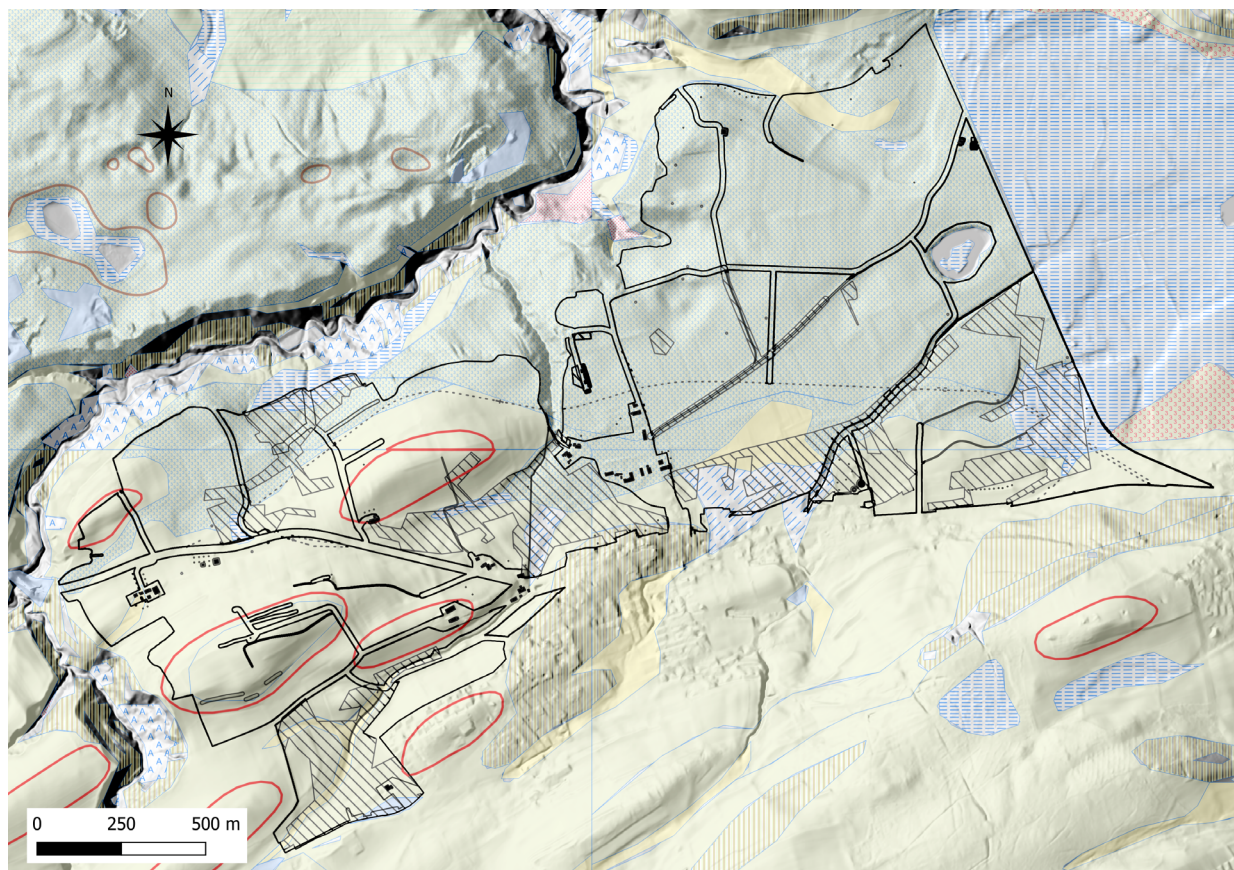


Figure 5:
Geocover modifié à l'aide des observations de terrain lors
des campagnes de prospection et de profils.

Des dépôts plus récents datant de l'holocène se retrouvent localement dans le paysage. De fines couvertures de limons de pente ainsi que quelques cônes de déjection à la limite sud du périmètre sont les témoins d'un paysage marqué par une certaine dynamique gravitaire. Des zones de marais, totalement drainés, se retrouvent en majorité dans la partie est, ainsi que très localement dans des zones de dépression topographiques. Toutefois, les sondages pédologiques ont révélé que l'emprise du marais, à l'est d'après l'atlas géologique, est plus restreinte et se limite dans l'extrémité sud-est du périmètre. Cependant, cela n'exclut pas que ce marais ait pu être aussi étendu par le passé et que l'ensemble de la tourbe ait été exploitée ou minéralisée.

Les sols étudiés ont été soumis à une forte influence anthropique depuis le néolithique (data-tions vers 2900–2600 av. J.-C.; Monnier 2020). La tourbe et des matériaux sableux et graveleux ont notamment été extraits et différentes conduites souterraines ont été construites. Le facteur humain est donc incontournable dans la compréhension de la pédogenèse de ce site d'étude. Les zones dans lesquelles l'influence anthropique est supposée la plus forte ont été représentées par un figuré hachuré (Figure 5).

2.2. Préparation des données environnementales et des géodonnées

Il existe de nombreuses données environnementales et géographiques qui décrivent spatialement les facteurs de formation des sols ou contiennent des informations sur ces facteurs. Plus d'informations sur ce sujet sont disponibles dans [le rapport final du projet de cartographie à Diemerswil](#) (Keller et al. 2023).

Le CCSols a déjà normalisé et créé plusieurs cartes de base pour toute la Suisse. Il s'agit, par exemple, des cartes suivantes :

- [Cartes de base concernant les dérivations du relief à différentes échelles \(TerraPoly\)](#). Elles aident les cartographes lors de la phase conceptuelle (Behrens et al. 2023).
- [Cartes de base relatives à la végétation et à l'utilisation du sol dans l'espace et dans le temps](#) (Stumpf et al. 2023a).
- [Cartes de base modélisées à l'échelle de la Suisse concernant les propriétés des sols sur trois profondeurs](#) (Stumpf et al. 2023b; Stumpf et al. 2024).

Quelques exemples de données environnementales et géographiques relatives à la zone cartographiée sont présentés dans les Annexes A1.3, A1.4, A1.5 et A1.6. Ces données ont été utilisées lors de la phase conceptuelle et lors de la réalisation des cartes. Une description détaillée des données environnementales et géographiques à l'échelle de la Suisse est disponible dans Stumpf et al. (2024).

3. Phase conceptuelle

3.1. Périmètre du projet ajusté

Avant de déterminer l'emplacement des relevés (profils, miniprofils, sondages et échantillonnages), tous les plans disponibles des conduites souterraines ont été regroupés et une zone tampon a été calculée autour de celles-ci (Figure 6). Cette démarche a permis de minimiser le risque de dommages lors des travaux. Le tampon minimum appliqué était de 3 m de chaque côté des conduites. Dans le cas des conduites de gaz, un tampon de 20 m de chaque côté a été appliqué afin d'écartier tout risque d'accident. Le périmètre ajusté résultant s'étend sur 230 ha.

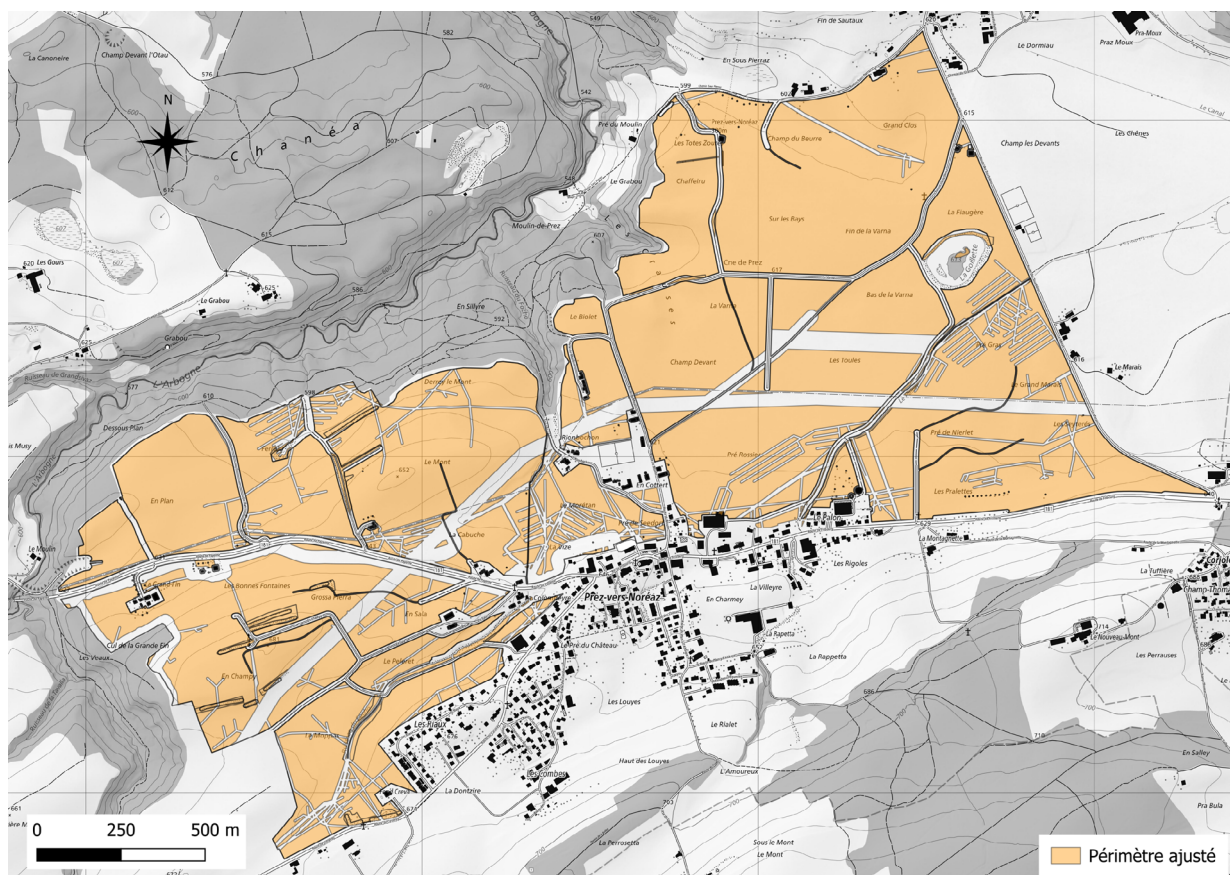


Figure 6 :
Carte du périmètre ajusté.

3.2. Concept d'échantillonnage

3.2.1. Niveaux hiérarchiques

Le concept d'échantillonnage repose sur différents niveaux hiérarchiques :

- _ **H0** : sondages de prospection (réalisés manuellement),
- _ **H1** : profils (réalisés à l'aide d'une pelle mécanique),
- _ **H1.1** : miniprofils (carottes de gros calibres réalisées avec un véhicule de sondage),
- _ **H2** : sondages destinés aux descriptions pédologiques (réalisés manuellement et mécaniquement),
- _ **H3** : échantillonnages destinés à la spectroscopie (réalisés mécaniquement).

La Figure 7 présente et explique les différents niveaux hiérarchiques H1, H2 et H3. L'emplacement des sites illustrés selon leur niveau hiérarchique est disponible dans l'Annexe A2.1.

3.2.2. Exemple de concept d'échantillonnage pour les sites de prélèvements (H3)

Dans le cadre de ce projet de cartographie, un concept d'échantillonnage pour les sites H3 a été développé à partir des cartes de base disponibles. Le concept applicable aux sites destinés aux sondages (H2) est élaboré de manière analogue, sur la base des résultats de la campagne H3 et des cartes établies pour les propriétés des sols. L'objectif est de recenser les différentes caractéristiques des sites dans le périmètre et de les représenter au mieux par le concept d'échantillonnage, en répartissant les sites de manière aussi uniforme que possible et en couvrant la variabilité spatiale des sols.




		Types de relevé/d'échantillonnage	Objectifs
		H3: Echantillonnages à des profondeurs fixes destinés à des analyses spectrométriques en laboratoire.	Estimation des propriétés des sols et création des cartes pour les différentes profondeurs.
		H2: Sondages destinés à la description et à la classification (manuels ou avec un véhicule de sondage)	Description et classification des sols (saisie avec l'application web Soildat)
		H1: Profils et carottage par battage	Description et classification des sols. Etalonnage/harmonisation des pédologues dans la région (saisie avec l'application web Soildat)

Figure 7 :
Illustrations des différents niveaux hiérarchiques.

Toutes les cartes de base pertinentes et disponibles pour l'ensemble de la zone ont été prises en compte et évaluées. Il s'agit notamment de cartes issues de la télédétection et d'analyses numériques du terrain, telles que l'accumulation locale et régionale des eaux de ruissellement ainsi que la forme du terrain. Des paramètres relatifs à l'utilisation des sols et à la réflectivité spectrale des surfaces non couvertes («Bare Soil»), issus de séries chronologiques Landsat, ont également été utilisés. L'ensemble de ces cartes de base a été calculé à une résolution spatiale de 2×2 m. Les cartes géologiques, très hétérogènes dans le périmètre, n'ont pas pu être intégrées.

L'élaboration du concept d'échantillonnage s'est appuyée sur une division de la zone du projet en une grille hexagonale, chaque hexagone couvrant une surface de 1 ha. Trois sites ont été attribués par hexagone afin de couvrir au mieux la variabilité locale. Dans un premier temps, l'écart-type a été calculé, pour chaque hexagone et pour chaque carte de base, afin de quantifier la variabilité locale. Lorsque l'écart-type d'une carte de base est faible dans tous les hexagones, celle-ci est considérée comme peu pertinente et n'est pas retenue dans le concept d'échantillonnage. Pour le périmètre du projet de Prez, les cartes présentant la plus forte variabilité étaient l'accumulation locale des flux, la forme du terrain et la variabilité de l'utilisation des sols sur la base des données Sentinel. La Figure 8 illustre un exemple d'évaluation de l'utilisation des sols.

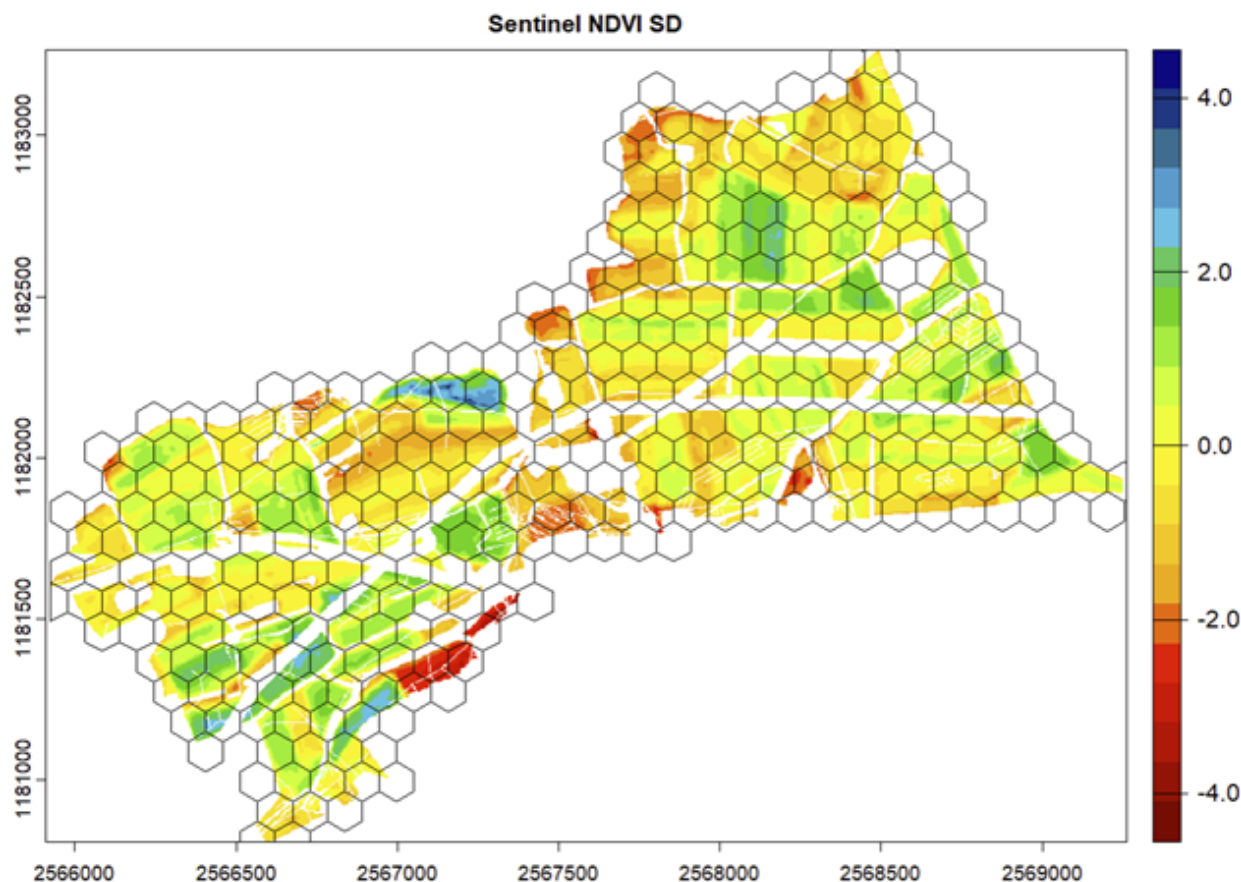


Figure 8:
Variabilité normalisée de l'utilisation des sols sur la base des données Sentinel avec superposition d'hexagones d'une superficie de 1 ha (NDVI: normalized difference of the vegetation index). Bleu: variabilité élevée, rouge: faible variabilité de l'utilisation des sols.

Au sein de chaque hexagone, les sites sont sélectionnés dans un deuxième temps à l'aide d'une combinaison de deux méthodes statistiques de regroupement (K-means et Kennard-Stone Sampling). Cette approche combine les avantages des deux méthodes: elle garantit, d'une part, que les sites présentant des conditions locales extrêmes ne dominent pas la sélection et, d'autre part, que l'ensemble des caractéristiques des sites de la région soit couvert. Une densité de trois sites par hectare permet de saisir la variabilité à petite échelle pour une cartographie à l'échelle 1:5000. Les échantillons issus des sites H3 sont prélevés et analysés par spectroscopie et par des méthodes de référence conventionnelles en laboratoire.

À Prez, par exemple, 85 sites de référence ont été sélectionnés parmi les 810 sites H3, soit environ 10%. La Figure 9 illustre le concept d'échantillonnage final pour Prez. Enfin, une surface de remplacement est définie pour chaque site H3 afin de permettre la réalisation des travaux de terrain lorsque les mesures ne peuvent pas être effectuées au point initialement prévu.



Figure 9:
Concept d'échantillonnage H3 final pour Prez. Les hexagones couvrent une surface de 1ha. Trois sites H3 sont sélectionnés par hexagone à l'aide de deux méthodes de regroupement. Les zones colorées en arrière-plan indiquent les surfaces de remplacement associées (trois au maximum) lorsque l'échantillonnage n'est pas possible au point prévu.

3.3. Phase de prospection

Au cours de la phase de prospection, une exploration du site a été effectuée afin de se familiariser avec celui-ci sur la base de toutes les données environnementales et géographiques disponibles et de déterminer les emplacements des profils. Entre le 25 mai et le 6 juillet 2023, le bureau d'ingénieurs et le CCSols ont mené une reconnaissance approfondie avec des sondages pédologiques (manuels) répartis sur 7 jours, au cours de laquelle 64 sondages ont été relevés avec un ensemble de données réduit. Les sondages de prospection sont désignés par la hiérarchie H0. À l'exception de quelques points prédéfinis statistiquement, les emplacements des sondages ont été déterminés par les cartographes eux-mêmes sur la base des données disponibles.

De plus amples informations sur la phase de prospection sont disponibles dans l'Annexe A2.2.

4. Travail de terrain

La Figure 10 montre la chronologie des travaux sur le terrain à Prez selon les niveaux hiérarchiques H0 à H3. Dans le processus de cartographie utilisé, la campagne d'échantillonnage H3 (prélèvements destinés à la spectroscopie) est effectuée avant la campagne de sondages H2. Entre ces deux campagnes, d'importants travaux en laboratoire (préparation des échantillons et mesures spectroscopiques) ainsi que la modélisation spatiale des cartes de propriétés des sols ont été réalisés. Ces cartes ont apporté leur aide aux cartographes lors de la campagne de terrain des sondages H2 pour évaluer la granulométrie, le pH, la teneur en carbone et la teneur en carbonates. Une grande partie de la campagne de profils H1 et de la campagne de sondages H2 a été réalisée par le bureau d'ingénieurs Geotest AG.

L'Annexe A3.1 présente des tableaux récapitulatifs de tous les prélèvements réalisés pendant ce projet tandis que les chapitres suivants abordent certains thèmes liés au travail sur le terrain. Les thèmes abordés sont :

- _ Le contrôle qualité des H1, H1.1 et H2 (Paragraphe 4.1).
- _ L'illustration de quelques profils H1 (Paragraphe 4.2).
- _ Les résultats obtenus avec les miniprofils H1.1 (y compris la comparaison avec les profils « classiques », Paragraphe 4.3).
- _ La procédure d'échantillonnage H3 (Paragraphe 4.4).
- _ L'évaluation des données ponctuelles provenant des sondages pédologiques H2 (Paragraphe 4.5).
- _ L'évaluation des résultats issus des piézomètres (Paragraphe 4.6).
- _ Les analyses en laboratoire (Paragraphe 4.7)

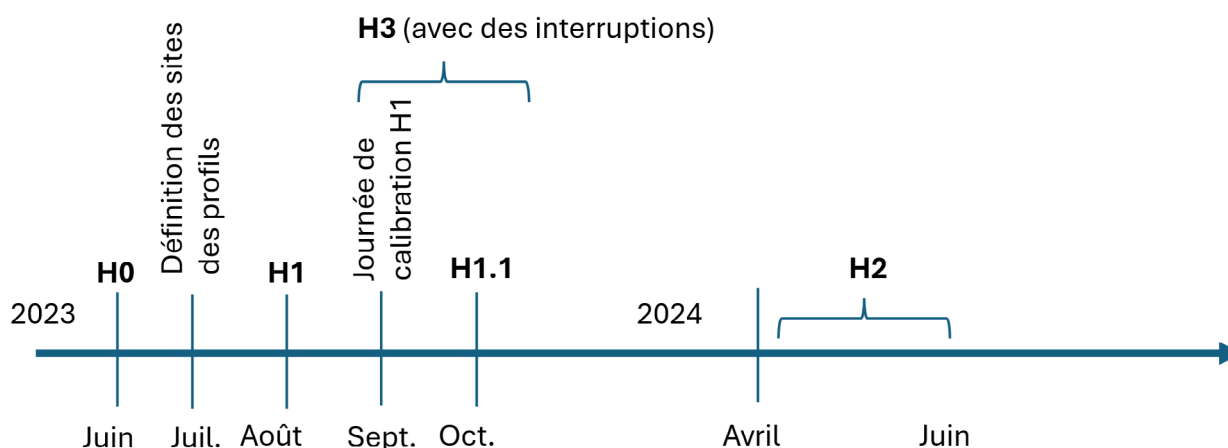


Figure 10 :
Aperçu chronologique des différents niveaux hiérarchiques.

4.1. Contrôle qualité des relevés pédologiques

Le contrôle qualité (CQ) des relevés pédologiques est réalisé de manière globale sur les différents niveaux hiérarchiques (H1, H1.1 et H2). Des exemples de procédures de contrôle qualité propres à chaque niveau hiérarchique sont brièvement décrits dans les sections suivantes. Il existe principalement deux types de contrôle qualité : le contrôle ponctuel et le contrôle surfacique.

Niveau hiérarchique H1 et H1.1 (contrôle qualité ponctuel)

Le déroulement du contrôle qualité ponctuel des profils pédologiques est représenté schématiquement dans la Figure 11. Le processus de contrôle qualité (CQ) commence par la saisie complète de la description des profils selon le masque H1 dans SoilDat (Annexe A3.2.2). Après un premier examen des descriptions par les responsables du contrôle qualité, des thématiques prioritaires sont définies.

Elles font ensuite l'objet d'une discussion approfondie lors de la journée de calibration et sont consignées dans un protocole de calibration (Annexe B). Celui-ci est spécifique au projet et sert de base à la description ultérieure des sondages H2.

Après la journée de calibration, les cartographes reçoivent du CCSols un retour détaillé de chaque profil. Ces différents retours sont traités par les cartographes et, s'il ne fait pas l'objet de discussions, directement pris en considération dans SoilDat. Cela comprend également les ajustements justifiés (par exemple, ajustement du sous-type lié à l'acidité sur la base des valeurs pH CaCl₂ mesurées en laboratoire). La version corrigée est équivalente à une deuxième description du profil. Après un nouveau contrôle d'exhaustivité, le CCSols valide les profils dans l'application web SoilDat, ce qui clôt le processus.

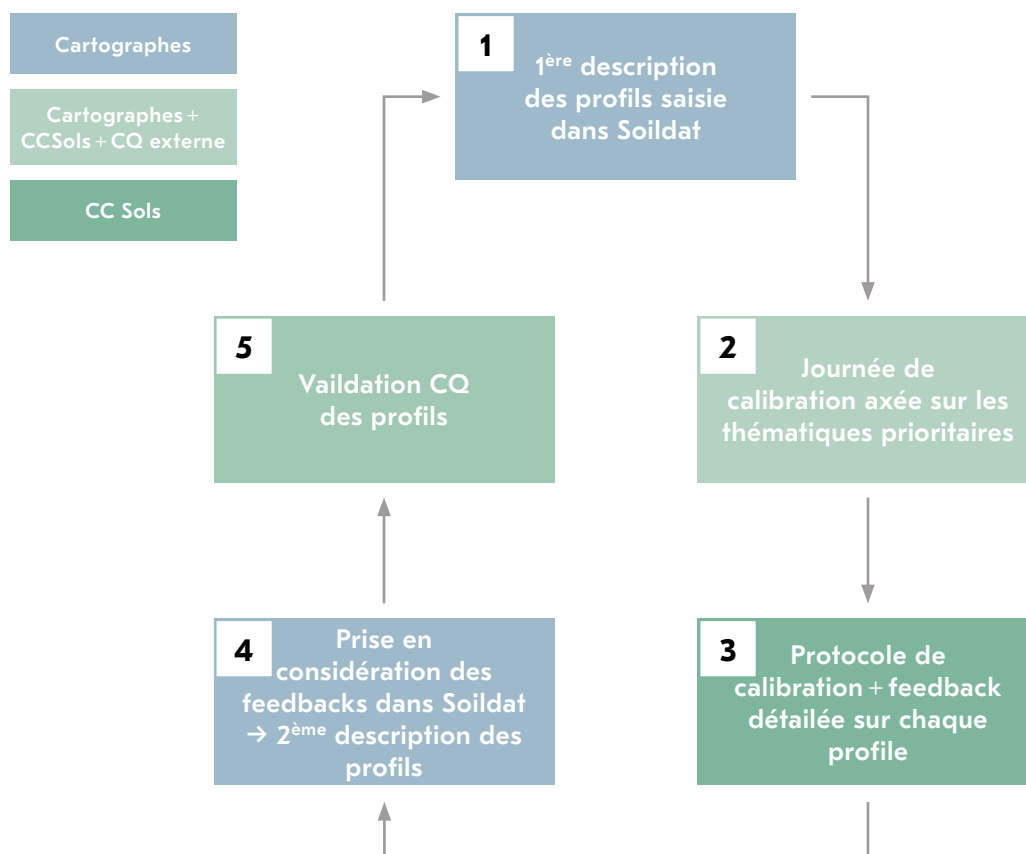


Figure 11 : Procédure de CQ ponctuel pour les profils et représentation des responsabilités respectives.

Niveau hiérarchique H2 (contrôle qualité ponctuel et global)

Concernant les sondages pédologiques (réalisés à l'aide d'un véhicule de sondage ou manuellement), un contrôle qualité ponctuel et global est effectué.

CQ ponctuel

Le déroulement du contrôle qualité ponctuel est représenté schématiquement dans la Figure 12. Les données ponctuelles relevées sont examinées à l'aide d'un script R appelé «Contrôle des données saisies dans Soildat» version 0,7. La version 0,5 de ce script a été développée par le groupe «Utilisation et protection des sols» de la BFH-HAFL et est depuis en constante évolution. Il s'agit d'un prototype qui n'est actuellement utilisé que dans le cadre des projets pilotes. Avec le passage à la KLABSKA et à Soildat KLABSKA, de nouveaux outils de contrôle qualité seront nécessaires pour le remplacer.

Le script R contient deux types de vérifications :

- **Contrôles d'exhaustivité** : par exemple, le type de sol (champ obligatoire) a-t-il été indiqué ?
- **Contrôles logiques** : par exemple, Gley oxydé en combinaison avec le sous-type G1 est incorrect.

Une fois le script exécuté, un document PDF est généré dans lequel tous les sondages sont classés en lignes et tous les contrôles en colonnes sous forme de tableau. Pour les contrôles d'exhaustivité, soit un x apparaît (p.ex. x=type de sol manquant), soit le numéro d'horizon (p.ex. 3=pour l'horizon 3, la teneur en argile est manquante). Pour les contrôles logiques, un x apparaît (p.ex. sous-type G1 pour le type de sol Gley oxydé). Un exemple d'extrait se trouve à l'Annexe A3.3.

Les documents PDF contenant les tableaux de correction sont ensuite traités par les cartographes et si les corrections ne font l'objet d'aucune contestation, elles sont directement réalisées dans Soildat.

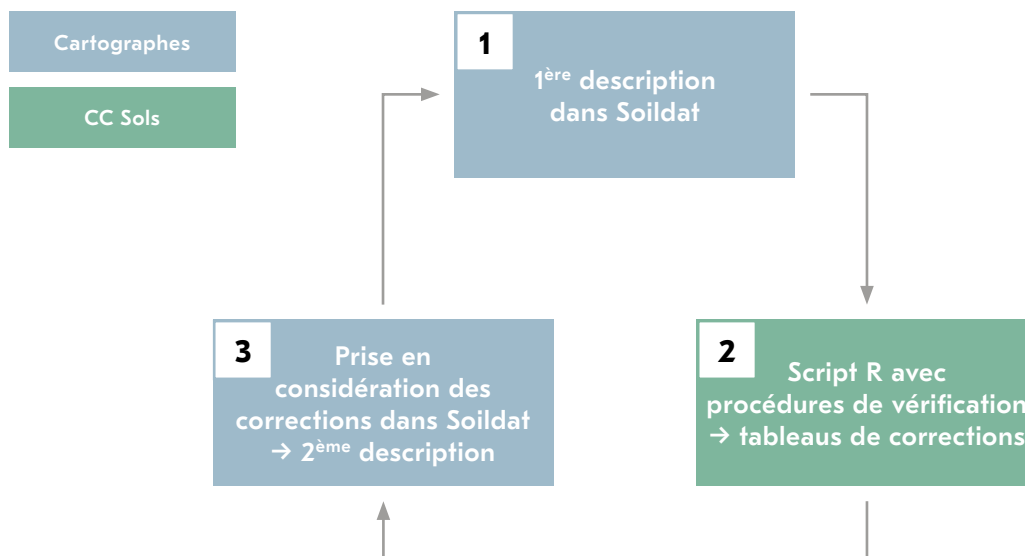


Figure 12 : Déroulement du contrôle qualité ponctuel lors des sondages pédologiques et représentation des responsabilités respectives.

CQ surfacique

Après le contrôle qualité ponctuel, qui vérifie l'exhaustivité et la cohérence de chaque sondage pris individuellement, un contrôle qualité surfacique est réalisé. Celui-ci vérifie s'il existe des différences de descriptions pédologiques entre les différents cartographes pour des sondages proches les uns des autres. Cela permet, par exemple, d'éviter que le régime hydrique soit évalué différemment pour deux sondages proches (par la personne A comme étant saturé et par la personne B comme étant temporairement engorgé, par exemple).

Les thèmes suivants ont été examinés en détail (sous forme de questions clés):

- **« Système » de drumlins**: les séquences Régosol/Sol brun (acide)/Sol brun calcaire dans le « système » de drumlins sont-elles cohérentes/logiques?
- **Colluvions**: la présence de colluvions dans la zone est-elle vérifiable? Le matériau parental « colluvion » a-t-il été évalué de façon uniforme? Un sous-type PK a-t-il été attribué en conséquence?
- **Remblais**: les remblais ont-ils été correctement identifiés conformément aux informations préalables? Les remblais ont-ils été recensés de manière homogène dans la zone ou ne sont-ils présents que de manière ponctuelle? Les tuiles romaines ont-elles été

recensées conformément au protocole de calibration?

- **Matériau parental**: harmoniser le matériau parental (primaire et secondaire).
- **Drainages**: comparer les données pédologiques avec la couche SIG représentant les drainages et compléter les sous-types DD si nécessaire.
- **Régime hydrique**: le régime hydrique dans la zone est-il cohérent? Les sous-types G/I/R ont-ils été attribués uniformément?
- **Sols organiques**: les sols organiques (Sols semi-tourbeux) de la zone sont-ils évalués uniformément?
- **Sols bruns lessivés**: les Sols bruns lessivés sont-ils évalués uniformément dans la région?

Afin de répondre aux questions clés, les données ponctuelles ont été exportées depuis Soildat et visualisées dans QGIS (avec différentes légendes). Pour chaque thème, différentes combinaisons d'informations pédologiques issues des données ponctuelles ont été utilisées et il a été possible de vérifier rapidement si les données ponctuelles des différents cartographes avaient été évaluées uniformément par rapport au thème. Les légendes ont été créées à l'aide d'un plugin Python, facilitant ainsi leur traitement.

4.2. Profils (niveau hiérarchique H1)

4.2.1. Procédure

Les emplacements des profils H1 (Annexe A2.1) ont été déterminés après la phase de prospection sans aide numérique (Paragraphe 3.3 et Annexe A2.2). Les 10 profils agricoles ont été ouverts à l'aide d'une pelle rétro, puis préparés, photographiés et relevés par les cartographes conformément à la classification pédologique en vigueur. (Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich-Reckenholz 1997; BGS 2010; Afu Solothurn 2020).

4.2.2. Résultats

Les descriptions simplifiées de 2 profils sont présentées ci-dessous. Les autres fiches descriptives et les fiches de profil (avec les résultats d'analyse) se trouvent dans l'Annexe A3.4.

Fiche descriptive du profil P01: Sol brun

Emplacement et utilisation: le profil P01 (Figure 13) se situe sur une surface plane et agricole à l'ouest du village de Prez-vers-Noréaz.

Classification: il s'agit d'un Sol brun très profond et normalement perméable qui s'est développé sur des dépôts morainiques de la dernière période glaciaire. Dans la couche sous-jacente du sol, il y a eu un enrichissement en argile et une faible pseudogleyification.

Horizons: le premier horizon montre un mélange et un enrichissement en matières organiques résultant de labours qui se retrouve habituellement dans les sols agricoles. Au-dessous se situe une zone de léger lessivage des argiles. Dans la couche sous-jacente du sol (en particulier à partir de 110 cm), le lessivage des argiles devient important: la teneur en argile est plus élevée que dans les horizons supérieurs et il y a des revêtements argileux dans les pores et sur les éléments grossiers (minéraux >2mm). L'augmentation de la teneur en argile entraîne une diminution du drainage conduisant à l'apparition de taches de rouille et de concrétions de manganèse.

Hypothèse sur l'origine du sol: ce sont des sols qui se développent habituellement sur le matériau morainique du Plateau suisse. Ce sol est en train d'évoluer vers un Sol brun lessivé. Ce type de sol se caractérise par un lessivage des argiles de la couche supérieure vers la couche sous-jacente du sol (reconnaisable dans ce sol dès le début). Un lessivage des argiles a lieu lorsque la pédogenèse est assez avancée et que le profil est complètement décarbonaté. Si la pédogenèse progresse suffisamment pour que les effets de retenue d'eau précédemment mentionnés soient renforcés, le sol devient un pseudogley.

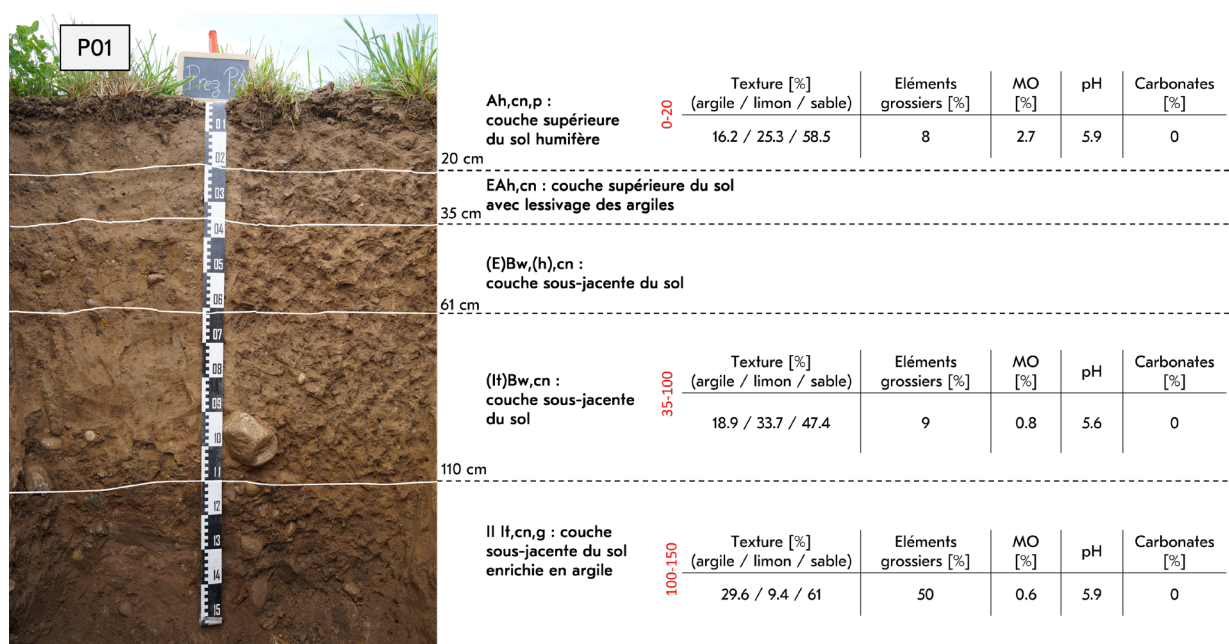


Figure 13:
Fiche descriptive du profil P01.
MO: matières organiques, CaCO₃: carbonates.

Fiche descriptive du profil P09 : Gley oxydé

Emplacement et utilisation : le profil P09 (Figure 14) se trouve dans une petite vallée au nord du périmètre cartographié. En raison de l'engorgement du sol, la surface n'est pas utilisée pour l'agriculture, mais comme prairie permanente.

Classification : le profil P09 correspond à un Gley oxydé drainé, assez superficiel à superficiel.

Horizons : compte tenu des autres profils, le profil P09 ne présente pas d'horizon labouré typique des terres arables. La couche supérieure comportant des matières organiques se transforme progressivement en couche sous-jacente. La couche sous-jacente et le sous-sol contiennent des couches de tourbe partiellement décomposées qui confèrent au sol une forte teneur en matières organiques et une couleur foncée. Des signes d'engorgement sous forme de taches de rouille sont visibles jusqu'à la surface, tandis que des zones blanchies ne sont présentes que par endroits dans la couche sous-jacente du sol. Le sous-sol constamment gorgé d'eau (à partir de 121 cm) présente un léger reflet bleuté.

Hypothèse sur l'origine du sol : le site est probablement une tourbière asséchée qui a été recouverte d'une couche de matériaux minéraux lors de son exploitation agricole et drainée. L'abaissement du niveau de l'eau a exposé la tourbe à l'air et a provoqué sa lente décomposition. Les taches de rouille dans les deux premiers horizons, qui indiquent un engorgement, sont probablement en grande partie reliques et indiquent le niveau d'eau avant le drainage, car un drainage actuel se trouve à environ 45 cm.

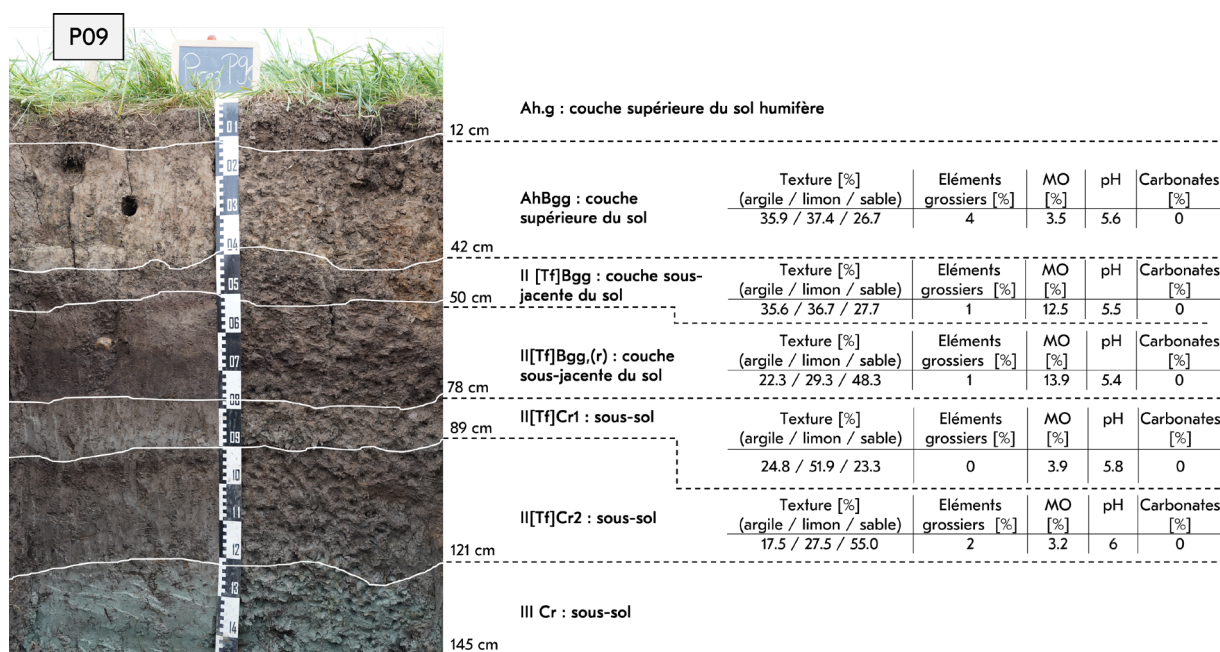


Figure 14 :
Fiche descriptive du profil P09.
MO : matières organiques, CaCO₃ : carbonates.

4.3. Miniprofils (niveau hiérarchique H1.1)

Dans le cadre du projet Wyss, un projet de recherche mené par le groupe «Utilisation et protection des sols» de la BFH-HAFL, différents appareils de sondage ont été testés dans la région de Wohlen (canton de Berne). Parmi ceux-ci figurait l'appareil de sondage de la société Zurbuchen GmbH qui permet de réaliser des carottes d'un diamètre de 14 cm et d'une profondeur maximale de 2 m en quelques minutes grâce à un système à percussion (Figure 15). Les carottes sont extraites manuellement du système de sondage et disposées dans des gouttières permettant ainsi leur description. Ces sondages de grand diamètre sont également appelés miniprofils, par analogie avec le contenu informatif des profils. Cet appareil de sondage constitue une alternative potentielle aux profils pédologiques située dans des pentes inférieures à 25–30%. En effet, ils sont nettement moins coûteux et fournissent presque autant d'informations que les fosses. Ils ont fait leurs preuves dans le cadre du projet Wyss, notamment en complément des profils (densification), voire en remplacement d'une partie de ceux-ci (Tanner et al.).

Procédure

Afin d'acquérir davantage d'expérience quant à la possibilité de réduire le nombre de profils, une partie des profils nécessaires dans le cadre de ce projet a été remplacée par 22 miniprofils (Annexe A2.1). De plus, un miniprofil a également été réalisé à proximité de chacun des 10 profils afin de comparer les descriptions pédologiques obtenues à l'aide des deux systèmes. Ces 10 miniprofils supplémentaires, ayant uniquement un objectif comparatif, ne sont ni recensés ni illustrés dans le présent rapport et ses annexes.



Figure 15:
Appareil de sondage Zurbuchen Bodenschutz GmbH.

4.3.1. Résultats

La description des miniprofils a été perturbée par la sécheresse de l'été/automne 2023 provoquée par de faibles précipitations. Les profils P04 et P16 de la Figure 16 illustrent notamment le problème rencontré au niveau de la structure. En effet, le fort assèchement de ces sols normalement perméables rend la détermination de la structure impossible (agrégats structurels asséchés).

4.3.2. Comparaison entre profils et miniprofils

Cette comparaison repose sur les miniprofils creusés à proximité de chacun des 10 profils et permet d'étoffer la comparaison déjà réalisée dans le cadre du projet Wyss dans la région de Wohlen (Tanner et al.). Afin de comparer de manière indépendante les profils et les miniprofils, ceux-ci ont été évalués par différents cartographes expérimentés sans connaissance préalable du sol concerné.

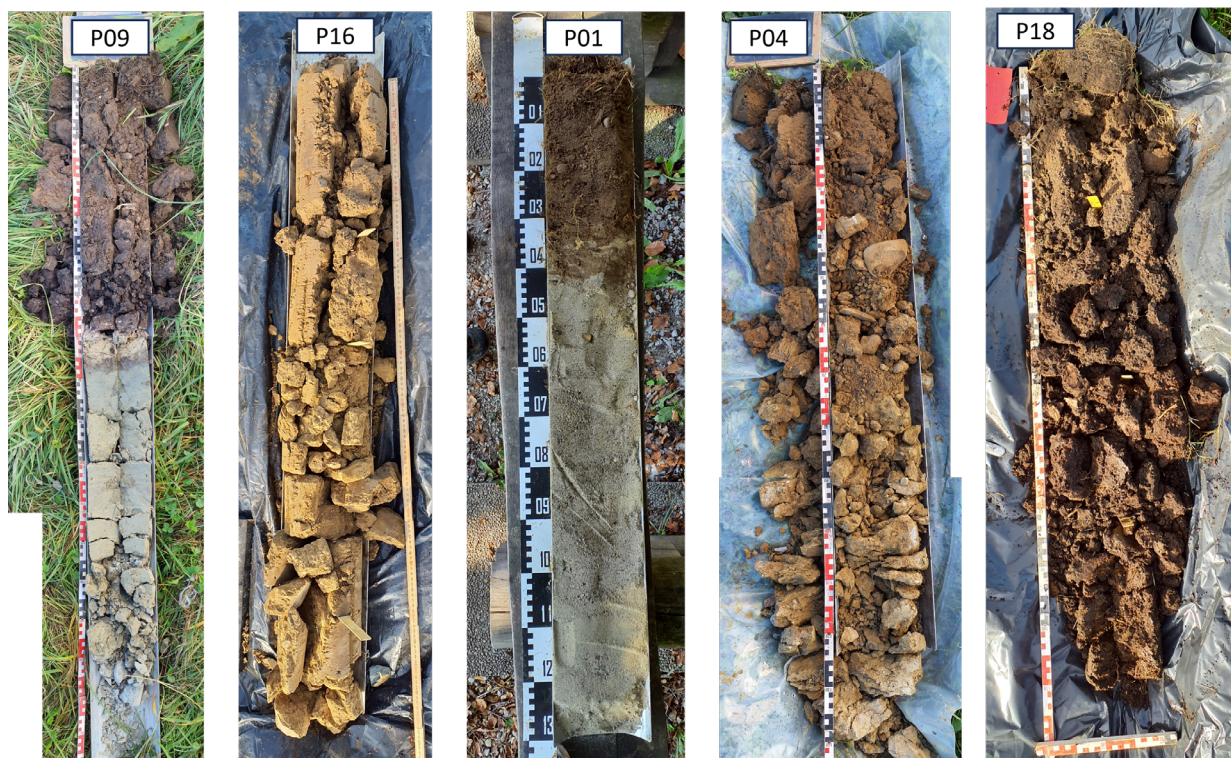


Figure 16:
Sélection de miniprofils.

Qualité de la description des différents attributs pédologiques

Cette comparaison a montré que les miniprofils permettent d'obtenir pour environ 80% des informations une qualité comparable à celle des profils. La qualité des données est principalement impactée lors de l'estimation des éléments grossiers (minéraux >2mm) et lors de l'évaluation de la structure. La description de la structure, entravée par la sécheresse, a rendu la comparaison plus difficile.

Variabilité à petite échelle

Lors de l'évaluation d'un profil, il est possible, dans la majorité des cas, d'utiliser les 3 parois de celui-ci, permettant ainsi une meilleure analyse de la variabilité à petite échelle d'un site. Dans le cas du

miniprofil, comme pour un sondage, la description est réalisée à partir d'une seule carotte, ce qui rend l'analyse de la variabilité à petite échelle impossible.

Profondeur du profil

Pour des raisons de sécurité, la profondeur de la fosse d'un profil est limitée à 150 cm. Les miniprofils peuvent être réalisés jusqu'à une profondeur de 2 m, ce qui peut être un avantage dans le cas de sols très profonds. Toutefois, dans un profil, il est aussi possible de descendre plus profondément avec une tarière hollandaise si cela s'avère nécessaire.

Les résultats détaillés des analyses statistiques sont présentés dans l'Annexe A3.5.

Critères d'évaluation	Profils	Miniprofils
Qualité de la description des différents attributs	100%	80% des informations peuvent être obtenues avec une qualité comparable. Limitation au niveau des éléments grossiers (minéraux >2mm) et de la structure
Classification	<i>Comparable:</i> les différences de classification constatées semblent reposer sur une interprétation différente des caractéristiques et non sur une description divergente des propriétés des sols.	
Nombre d'horizons	En moyenne 6–7	En moyenne 5
Coordination	Elevée	Elevée
Variabilité à petite échelle	Paroi du profil + parois latérales	Une seule carotte, la variabilité à petite échelle ne peut pas être évaluée
Limitations	→ Pente (pelle mécanique sur chenilles)	→ Description de la structure → Perte de matériau en cas de substrats sablo-graveleux et organique → Effet de tri en cas de substrats sablo-graveleux (les grains grossiers migrent vers la surface) → Pente (véhicule porteur)
Echantillonnage	Échantillons composites + prélèvements de cylindres	Seuls les échantillons composites sont possibles
Capacité	10 profils/jour	20–30 sondages/jour
Efficacité cartographique	2–3/jour	6–7/jour
Indemnisation des exploitant-e-s	Oui	Non
Prix unitaire	450–500	365
Coût total par unité (valeur moyenne)	1167	576
Acceptation	Basse	Modérée à élevée
Profondeur des profils	Max. 150 cm + tarière	Max. 2 m
Conservation	Aucune	Possible pendant plusieurs mois si les carottes sont emballées hermétiquement, calibration à nouveau possible avant une campagne de terrain

Tableau 1:

Résumé de l'analyse comparative entre les profils et les miniprofils.

Code couleur : vert = les miniprofils présentent des avantages par rapport aux profils ; jaune = les miniprofils et les profils sont comparables ; rouge = les miniprofils présentent des inconvénients par rapport aux profils.

4.4. Echantillonnages (niveau hiérarchique H3)

L'échantillonnage a été réalisé soit à l'aide du véhicule de sondage du CCSols, soit manuellement, selon une densité de 3 points par hectare (Annexe A2.1), ce qui représente un total de 810 sites. Les prélèvements ont été effectués sur 3 profondeurs

(0–20 cm, 20–40 cm et 40–70 cm). Tous les échantillons ont ensuite été traités en laboratoire et mesurés par spectroscopie infrarouge (Paragraphe 4.7). Des analyses de référence ont été effectuées sur 255 des 2347 échantillons.

4.5. Sondages pédologiques (niveau hiérarchique H2)

Les sondages H2 servent à l'analyse pédologique. Au total, 330 sondages H2 ont été réalisés lors de ce projet (Annexe A2.1). Environ la moitié d'entre eux ont été effectués à l'aide d'une machine et l'autre moitié à la main. Les sondages à la machine ont été réalisés à l'aide du véhicule de sondage du CCSols muni de la tour de sondage Greenground et le véhicule de sondage Wintex MCL3. Davantage d'informations à ce sujet sont disponibles dans l'Annexe A3.8.

Les résultats de l'évaluation statistique des 330 sondages sont disponibles dans l'Annexe A3.8.

peut traiter, ce qui engendre de nombreuses descriptions hors site et nécessite davantage de pédologues par zone. Cela comporte des risques pour la qualité du relevé pédologique et entraîne également des coûts supplémentaires pour la collecte des tubes dans le champ.

L'utilisation de sondages mécaniques (Green-ground ou Wintex MCL3) est recommandée dans le cadre de la cartographie des sols à l'échelle de la Suisse, en combinaison avec des sondages manuels, notamment lorsqu'une procédure en plusieurs phases est appliquée. Les conditions de base sont les suivantes :

4.5.1. Test sur le terrain du véhicule de sondage Wintex MCL3

Ce paragraphe présente les conclusions du test du véhicule de sondage Wintex MCL3. D'autres informations, telles que la présentation du véhicule, sont disponibles dans l'Annexe A3.6,

Conclusion du test sur le terrain :

L'utilisation de véhicules de sondage n'est généralement pas adaptée à la cartographie de petites zones. En effet, les sondages manuels sont beaucoup mieux adaptés (moins invasifs) et évitent les complications liées à la communication. D'autre part, le rapport entre le rendement journalier des machinistes et celui des cartographes n'est pas équilibré avec les sondages mécaniques. Le nombre de sondages effectués chaque jour est nettement supérieur à ce qu'une équipe de cartographes

- Une calibration préalable des cartographes et une visite de la région avec réalisation de sondages H2 (par exemple, manuels), afin que les descriptions hors site soient de bonne qualité.
- Un outil de communication efficace pour obtenir l'accord des exploitant-e-s.
- Solutions techniques aux limitations connues (pour Wintex MCL3: sols organiques, substrats sablo-graveleux, forte teneur en pierres, récupération sans destruction des substrats difficiles depuis les tubes, pentes > 20%).

4.6. Piézomètres

Les mesures des eaux souterraines sont pertinentes pour la cartographie, car elles apportent des informations complémentaires sur les conditions d'engorgement actuelles et passées des sols. Ces données supplémentaires permettent de mieux interpréter les caractéristiques d'engorgement observées dans les profils. Elles aident notamment à identifier l'évolution du régime hydrique et à fournir des indications sur les conditions d'engorgement passées, en particulier dans les zones drainées et les marais.

Il est généralement difficile de distinguer l'influence des eaux souterraines de celle des nappes perchées. Ces dernières résultent d'une accumulation temporaire d'eau au-dessus d'horizons peu perméables et dépendent fortement des conditions météorologiques et de la saison. Étant donné que ces deux formes d'engorgement génèrent des traits rédoxiques similaires dans les sols et que les mesures ponctuelles des niveaux des eaux souterraines ne fournissent qu'une information « instantanée », leur différenciation reste souvent délicate. Dans les sols drainés, cette distinction est encore complexifiée par les dispositifs de drainage. Dans ce contexte, seule une approche combinant les mesures du niveau d'eau, l'analyse des profils de sol et la connaissance du site permet généralement d'aboutir à des résultats fiables. Même lorsque le niveau actuel des eaux souterraines est fortement modifié par le drainage, la position et la profondeur des horizons rédoxiques peuvent néanmoins témoigner de niveaux d'eau durablement élevés.

Dans le périmètre du projet de Prez, cinq piézomètres ont été installés et équipés d'enregistreurs de données destinés au suivi des niveaux des eaux souterraines. L'objectif principal de ces mesures était de tester leur intégration dans le processus de cartographie et d'acquérir de l'expérience dans l'utilisation des enregistreurs ainsi que dans la gestion des données. Dans un second temps, les données de mesure devaient également servir aux travaux pédologiques. L'implantation des points de mesure a été définie en fonction de la situation géomorphologique, des propriétés des sols et des conditions hydrogéologiques attendues. Des sites représentatifs ont été sélectionnés le long de gradients topographiques et d'humidité, ainsi que

dans des secteurs supposément soumis à l'influence des eaux souterraines ou des drainages, afin de mettre en évidence les variations spatiales du régime hydrique. Le choix des emplacements a également été effectué en accord avec les propriétaires fonciers et le canton.

La Figure 17 montre la position des cinq piézomètres dans le périmètre, tandis que la Figure 18 illustre l'évolution temporelle des niveaux des eaux souterraines mesurés. Le piézomètre P01 n'est pas analysé plus en détail ci-dessous, car il se trouve dans un contexte hydrologique différent, avec un niveau d'eau souterraine relativement stable. De plus, le site est fortement influencé par les activités humaines.

Concernant les piézomètres P02 à P05, le gradient hydraulique, c'est-à-dire la pente de la nappe phréatique, a été calculé. Les gradients variaient entre 0,0037 et 0,0084, avec une médiane de 0,004 (soit une pente d'environ 0,4%), ce qui est représentatif d'une zone à faible pente. Le gradient plus élevé observé pour la valeur minimale indique une situation hydraulique légèrement plus pentue lorsque les niveaux des eaux souterraines sont bas.

La direction d'écoulement des eaux souterraines calculée est, dans l'ensemble, cohérente et s'oriente principalement du sud vers le sud-sud-est (150–190°). Cela correspond à un champ d'écoulement stable, orienté régionalement, avec une pente hydraulique modérée et une direction d'écoulement clairement définie.

La Figure 18 montre que les précipitations entraînent, de manière générale, une augmentation des niveaux des eaux souterraines dans tous les piézomètres (P02 à P05), bien que cette réaction soit différée dans le temps et de durée variable selon les sites. Aux piézomètres P02 et P03, l'élévation du niveau d'eau se produit généralement quelques jours après un épisode pluvieux, le maximum étant atteint le plus souvent au bout d'une à deux semaines. Par la suite, le niveau des eaux souterraines diminue progressivement, sur plusieurs jours à plusieurs semaines, en fonction des conditions météorologiques. Le piézomètre P04 présente une réponse fortement retardée et pro-

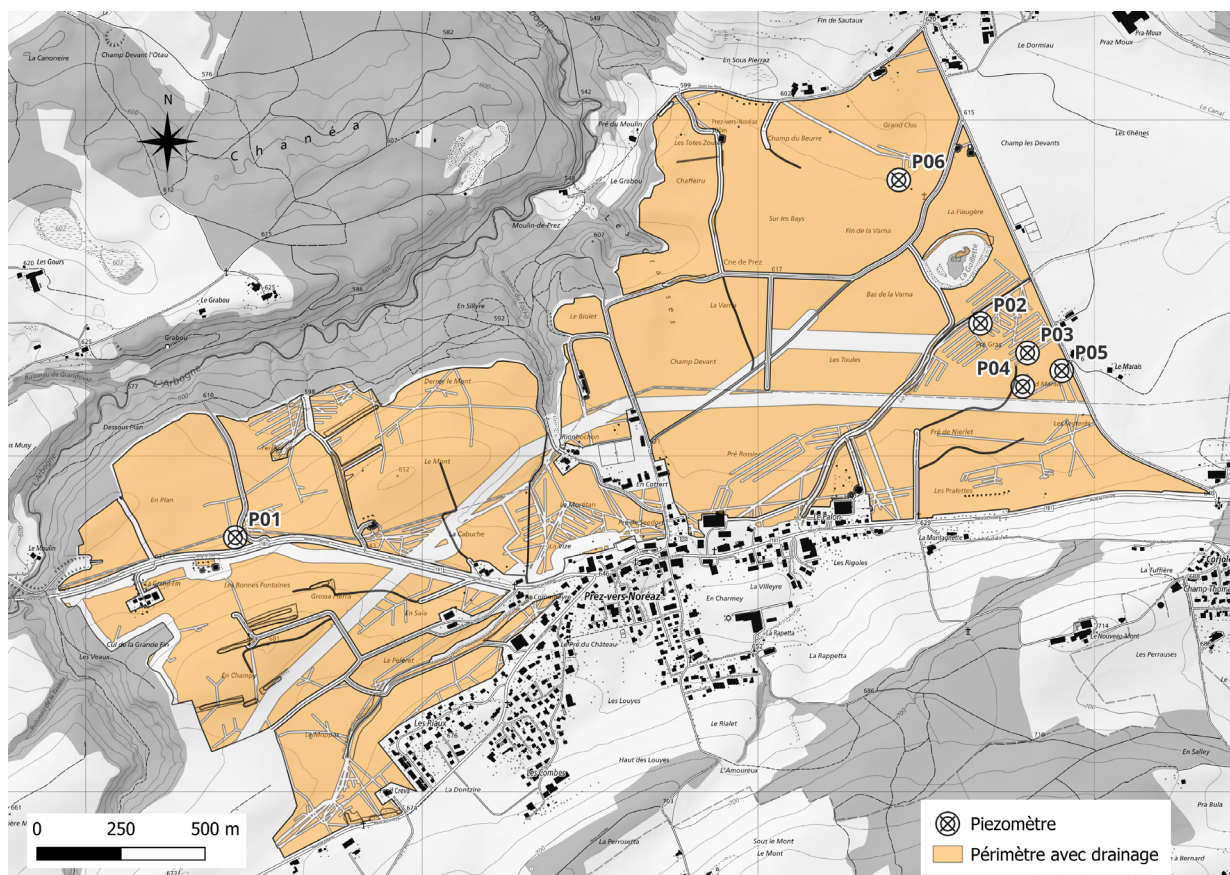


Figure 17:
 Emplacements des piézomètres. Le piézomètre P06 n'a pas été installé.

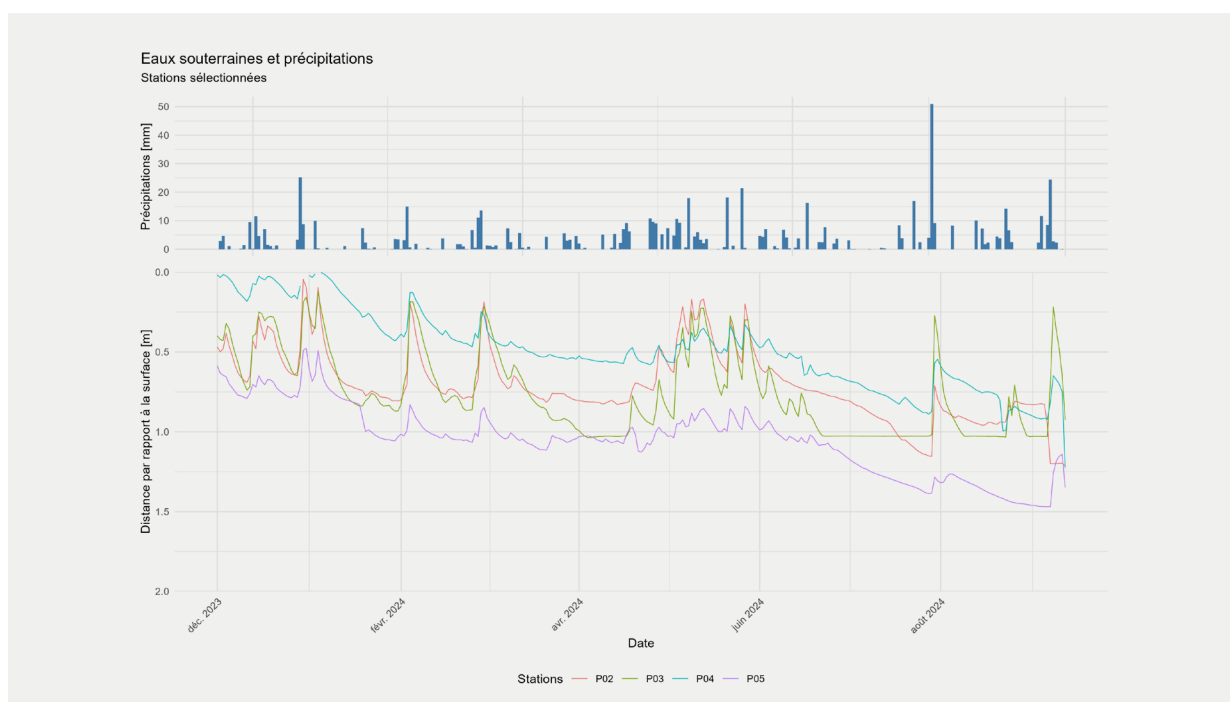


Figure 18:
 Représentation du niveau des eaux souterraines (moyennes journalières) en relation avec les précipitations enregistrées par la station climatique de Payerne (PAY) (Source: MétéoSuisse).

longée : l'augmentation du niveau ne commence que quelques jours à une semaine après la pluie et persiste pendant plusieurs semaines. Le même type de réaction a été observé au piézomètre P05, avec toutefois un retard temporel encore plus marqué.

Les descriptions des sols sur les sites des piézomètres ont été réalisées en novembre 2023, c'est-à-dire à un moment où le niveau des eaux souterraines était le plus bas. Cet élément doit être pris en compte lors de l'interprétation des descriptions. Pour les piézomètres P02 à P05, les sous-groupes du régime hydrique ont généralement été évalués de manière plausible. Concernant les sous-types, le sous-type R a été attribué de façon trop stricte et dans la plupart des cas (R2 au lieu de R1). Ainsi, au moment de la description des profils en novembre 2023, la position du niveau des eaux souterraines avait été surestimée.

Dans la description du sol au **piézomètre P02**, une tache d'oxydation nettement visible a été relevée à partir d'environ 88 cm, alors que le niveau d'eau mesuré en 2024 se situait généralement plus haut. La hauteur de l'horizon influencé par les eaux souterraines (gg) a donc été sous-estimée dans la description et se situe, compte tenu des mesures du niveau des eaux souterraines, à environ 70 cm. Par conséquent, l'horizon 5 du P02 devrait plutôt être classé comme gg, la limite r se situant autour de 90 cm. L'attribution au groupe de régime hydrique «k» est correcte, et aucun drainage n'a été observé.

La description du **piézomètre P03** présente d'importantes taches d'oxydation à partir de 25 cm de profondeur. Le niveau de la nappe phréatique a principalement fluctué entre 20 et 90 cm. Pendant environ 40% de la période de mesure, notamment lors de longues phases de sécheresse, le niveau de la nappe est descendu en dessous de 90 cm. La limite de «r» ainsi que le bilan hydrique ont donc été correctement évalués.

Le **piézomètre P04** est situé dans la zone la plus humide du groupe. Des taches d'oxydation sont visibles à partir d'environ 21 cm de profondeur, et des horizons tourbeux ont été observés à partir de 30 cm. La position des horizons «g» et «gg» n'est pas discernable à l'œil nu et ne peut être déduite qu'à partir du degré de décomposition des résidus tourbeux.

Le niveau d'eau varie fortement selon les saisons. Au printemps, il atteint fréquemment la surface, descend à environ 50 cm en été et atteint des valeurs minimales d'environ 1 m en automne. La limite de l'horizon «gg» a probablement été fixée légèrement trop haut et se situe de manière plus réaliste autour de 35 cm. L'horizon 2 peut donc être décrit comme un horizon «g».

Le classement dans le groupe de régime hydrique «v» est correct, aucun drainage n'a été atteint.

Le **piézomètre P05** se situe dans la zone la plus sèche du groupe. Des taches d'oxydation ont été observées à partir d'environ 75 cm de profondeur, tandis que le niveau d'eau se situait généralement autour de 90 cm pendant la période d'observation. En conséquence, la profondeur de l'horizon «r» est inférieure à celle initialement estimée. Le groupe de régime hydrique (I) a été correctement déterminé et, ici aussi, aucun drainage n'a été atteint.

La comparaison des descriptions des profils avec l'évolution des niveaux des eaux souterraines met en évidence l'importance de ces données pour l'interprétation des caractéristiques d'engorgement. En particulier, pour les substrats peu représentatifs comme les horizons tourbeux ou en cas d'abaissement du niveau des eaux et de drainage, la fréquence d'engorgement et le régime hydrique peuvent être évalués de manière plus précise.

Pour une interprétation pédologique des conditions hydriques, il est idéal de disposer de mesures sur plus d'un an pour connaître les conditions à long terme des sols. Cependant, pour les petits projets pilotes couvrant quelques centaines d'hectares, un tel suivi n'est pas nécessaire. En revanche, pour des projets de cartographie à grande échelle, il serait pertinent d'utiliser des piézomètres sur des sites typiques dès la phase conceptuelle, afin de réaliser des séries de mesures pluriannuelles pour étayer les descriptions pédologiques.

Ces séries de mesures permettent de valider les descriptions pédologiques des conditions hydriques des sols, en particulier pour les sous-types (G, R) et les sous-groupes du régime hydrique. Elles permettent également de mieux représenter les profondeurs de drainage lorsque ces données sont disponibles. En ce sens, les séries de mesures

des niveaux d'eau souterraine ajoutent une valeur importante à l'évaluation des profils types et à la cartographie de terrain. Idéalement, ces mesures devraient être disponibles dès la description des profils et lors de la journée de calibration pour ajuster les descriptions en conséquence.

La distinction entre sols influencés par les eaux souterraines et ceux influencés par les nappes perchées est limitée avec les piézomètres, qui mesurent principalement le niveau d'eau. Une meilleure fiabilité peut être obtenue en combinant des capteurs d'humidité ou des tensiomètres à différentes profondeurs. Ces instruments permettent de détecter, par exemple, une saturation temporaire au-dessus d'horizons peu perméables, typique des sols influencés par les nappes perchées. Pour les sols influencés par les eaux souterraines, la dynamique de l'eau suit le niveau de la nappe phréatique. En complément, des mesures de conductivité hydraulique des profils pourraient fournir davantage d'informations sur les couches affectant l'engorgement.

De plus, les mesures du potentiel redox peuvent constituer un complément utile. Elles permettent de visualiser les conditions aérobies et anaérobies à différentes profondeurs. Des valeurs redox constamment basses peuvent indiquer la profondeur des eaux souterraines, tandis que des conditions redox très fluctuantes et limitées dans le temps peuvent suggérer plutôt un engorgement lié à des nappes perchées. En raison de leur sensibilité aux facteurs spécifiques du site et de l'environnement, les mesures redox sont particulièrement pertinentes lorsqu'elles sont combinées avec des données sur le niveau d'eau et l'humidité des sols.

4.7. Analyses de laboratoire

Les propriétés chimiques et physiques des sols ont été déterminées en laboratoire. Les analyses chimiques de référence ont été réalisées en partie par un laboratoire externe et en partie par le laboratoire de la HAFL, tandis que les analyses physiques et spectroscopiques ont été réalisées exclusivement à la HAFL. Les analyses ont porté, sur la texture, le pH, la teneur en carbonates et en matières organiques ainsi que, plus rarement, sur la capacité d'échange cationique (CEC).

De plus amples informations sur les analyses de laboratoire sont disponibles dans l'Annexe A5.

5. Outils de terrain

5.1. Nouveaux outils

Le passage à une cartographie de terrain reposant sur l'utilisation de nombreuses cartes matricielles (raster) a nécessité l'introduction de nouveaux outils adaptés (pour les tablettes avec l'application Qfield) afin de garantir un travail efficace sur le terrain. Au début des travaux sur le terrain, le bureau de cartographie a suivi une formation approfondie sur la nouvelle procédure. Celle-ci comprenait notamment une introduction au nouveau processus de travail avec les cartes de propriétés des sols (BEK, [Paragraphe 6.1](#)), l'utilisation des outils numériques de terrain et l'organisation de la description des sondages en lots de travail.

Les outils suivants ont été développés et testés lors des travaux de terrain :

- **Statut** : outil d'organisation permettant d'avoir une vue d'ensemble des sondages H2,
- **Soilproperties** : consultation des cartes de propriétés des sols d'un sondage H2,
- **Soildat-Live** : visualisation de toutes les données Soildat disponibles (avec mise à jour en direct),
- **Polygones** : permet de dessiner des polygones simplifiés.

5.1.1. Statut

La couche Statut (Figure 19) est un outil qui facilite l'organisation de la cartographie de terrain : le statut actuel d'un relevé et ces modifications sont synchronisés et affichés sur toutes les tablettes de l'équipe de cartographie.

Au début du projet, tous les sondages de la couche Statut online ont le statut «*open*». Lorsqu'un sondage est réalisé et décrit manuellement par un ou une pédologue, son statut passe à «*beschrieben*», ce qui indique aux équipes de terrain que le sondage est terminé.

Lorsque le sondage est effectué à l'aide d'une machine, le machiniste peut préciser si le sondage est laissé sur place («*gebohrt on-site*») ou si les tubes contenant les carottes sont emportés et stockés ailleurs («*gebohrt [Depot]*»). Les cartographes savent ainsi s'ils doivent se rendre sur le site pour décrire le sondage ou si celui-ci se trouve au dépôt.

La couche Statut permet également de saisir, directement sur le terrain, les informations relatives aux caractéristiques de surface, telles que les dommages liés au piétinement du bétail ou la présence de sillons d'érosion. Un lien hypertexte permet en outre de créer directement une nouvelle observation dans Soildat. L'objectif de cette couche est de faciliter l'organisation du travail de terrain, d'offrir une vue d'ensemble de l'avancement des travaux et de simplifier la saisie des données.

- Bohrungen
- *open*
 - *gebohrt (on-site)*
 - *gebohrt (Depot)*
 - *beschrieben*

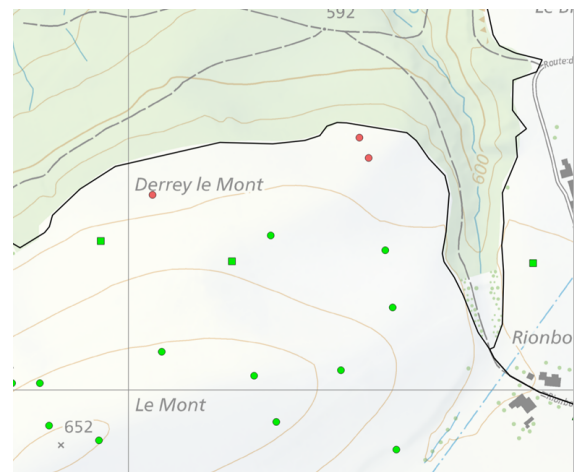


Figure 19 :
Aperçu de la couche Statut

5.1.2. Soildat-Live

La couche online Soildat-Live permet de visualiser toutes les données pédologiques enregistrées dans Soildat pour le projet. Lorsqu'un sondage est décrit, sa description apparaît en quelques minutes et peut être consultée par tous les cartographes. Cet outil est particulièrement utile pour les grandes équipes (>4 personnes), car il intègre les sondages dans leur contexte paysager et aide à uniformiser les descriptions des sols.

Selon le niveau de zoom, différentes informations sur les sondages sont affichées. La vue éloignée (Figure 21) présente les données au niveau « Beobachtung/Observation » de Soildat (groupe de régime hydrique, type de sol et sous-types), tandis que la vue rapprochée (Figure 20) fournit les détails des horizons, comme leur désignation, profondeur, teneur en carbonates (classe) et en éléments grossiers (minéraux >2 mm).

Les attributs affichés dans la vue éloignée et la vue rapprochée peuvent être modifiés et d'autres attributs peuvent être visualisés selon le projet.

Actuellement, la couche en ligne Soildat-Live ne peut être utilisée que dans les projets pilotes du CCSols (accès à la base de données nécessaire).

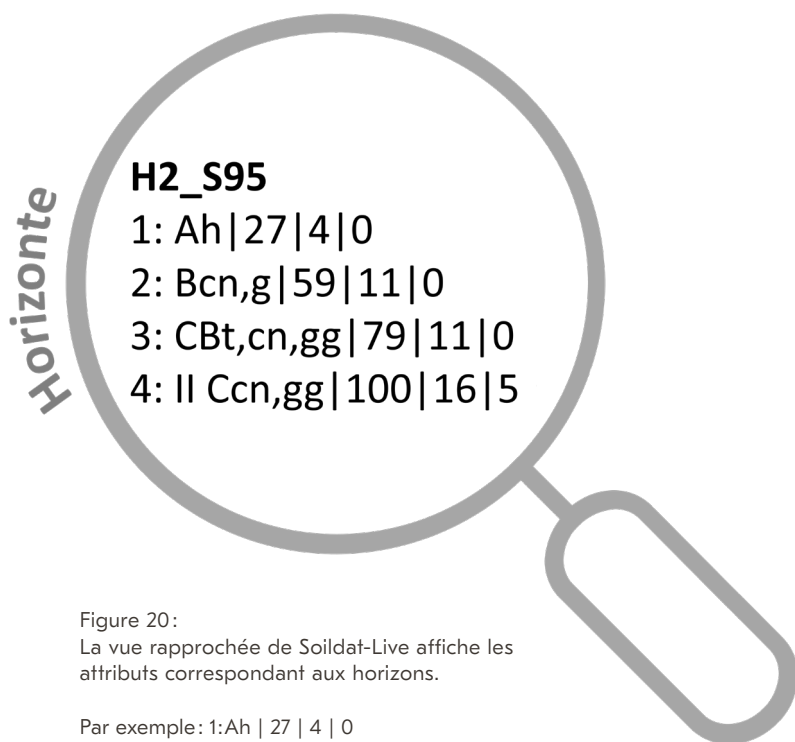


Figure 20:
La vue rapprochée de Soildat-Live affiche les attributs correspondant aux horizons.

Par exemple: 1:Ah | 27 | 4 | 0
 1= numéro de l'horizon
 Ah= désignation de l'horizon
 27= limite inférieure de l'horizon 1 en cm
 4= Teneur en gravier estimée en %
 0= Classe de carbonates selon le test HCL

Beobachtung

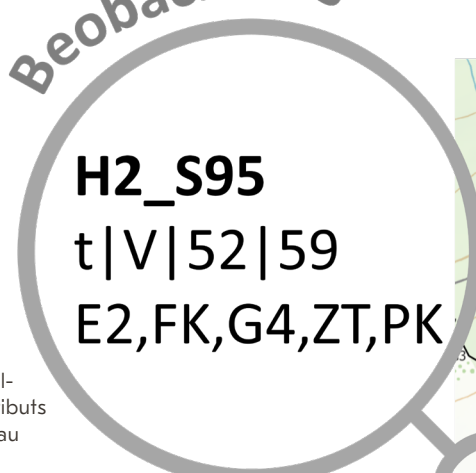
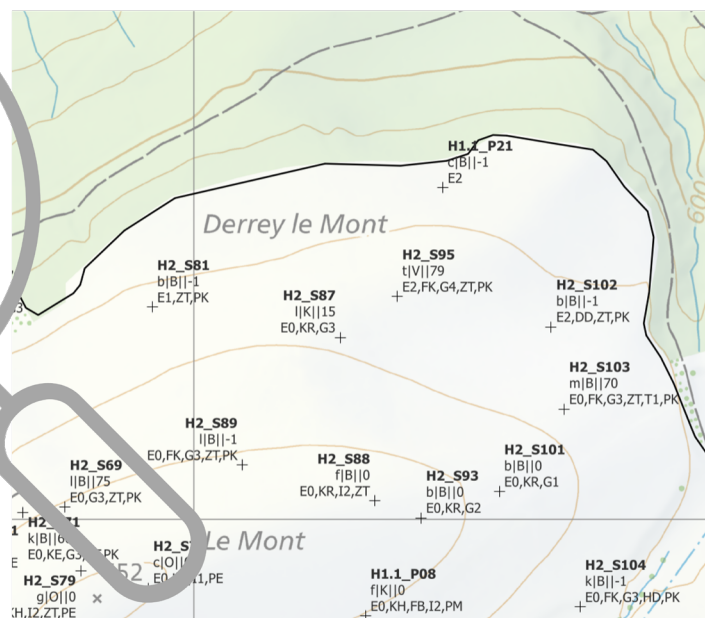


Figure 21:
La vue éloignée de Soildat-Live affiche les attributs correspondant au niveau « Observation ».

Par exemple: t | V | 52 | 59 ainsi que E2, FK, G4, ZT, PK
 t= groupe de régime hydrique
 V= type de sol
 52= profondeur utile en cm
 59= limite des carbonates en cm
 E2, FK, G4, ZT, PK= tous les sous-types disponibles



5.1.3. Soilproperties

L'outil Soilproperties fournit les propriétés des sols modélisées à partir des analyses spectroscopiques H3 (argile, limon, sable, matières organiques, carbonates, pH [Figure 22a]) pour trois profondeurs fixes (T1: 0–20 cm, T2: 20–40 cm, T3: 40–70 cm).

Dans le cadre du projet OP3, 12 cartes matricielles (raster) et une couche « points » ont été intégrées dans un projet QField. Afin d'optimiser l'ergonomie et la lisibilité, seules les cartes correspondant aux profondeurs T1 et T3 sont affichées.

Ces cartes permettent une lecture rapide des grands processus pédogénétiques dominants à l'échelle du périmètre et contribuent à l'optimisation des relevés ainsi qu'à la délimitation des polygones de représentativité des sondages.

Une couche « points », générée à partir des pixels des cartes matricielles, regroupe l'ensemble des propriétés modélisées dans sa table attributaire (Figure 22b). Elle n'est visible qu'à des niveaux de zoom élevés afin de limiter la surcharge visuelle.

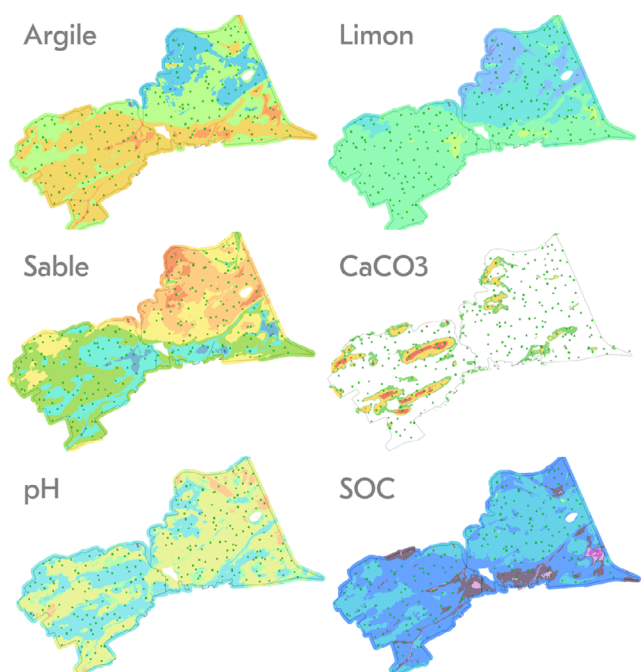


Figure 22a:
Outil QField Soilproperties.

Extraits des cartes de propriétés des sols modélisées (Soilproperties raster) pour la profondeur T1: 0–20 cm.

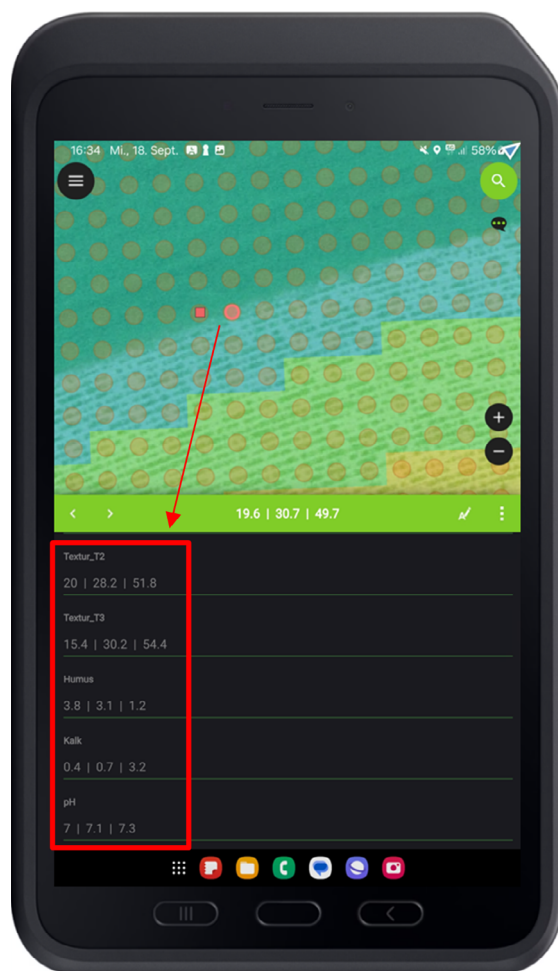


Figure 22b:
Outil QField Soilproperties.

Extrait de la couche points (Soilproperties points), qui permet de visualiser les valeurs modélisées en un point.

5.1.4. Polygones

L'outil de saisie des polygones permet de numériser rapidement et facilement les unités spatiales pertinentes sur le plan pédologique séparant les types de sols et les groupes de régimes hydriques (Figure 23). Chaque polygone peut être défini comme provisoire ou définitif. Ils peuvent être également supprimés (celle-ci est effectuée automatiquement lors de la prochaine synchronisation avec la base de données).

La procédure est basée sur la KA23 (Marugg und Siegrist 2023) toutefois dans celle-ci seule une esquisse est demandée et aucune délimitation pédologique détaillée n'est attendue. Les chevauchements et les espaces entre polygones sont autorisés.

Les esquisses sont ensuite régionalisées à l'aide de méthodes pédométriques. La saisie des polygones s'effectue de préférence directement sur le terrain dans QField.

Plus d'informations sur la saisie, la délimitation des polygones et leur utilisation sont disponibles dans l'Annexe A6.



Figure 23: Polygones représentatifs dessinés à partir de l'analyse du paysage, des cartes de propriétés des sols et de la couche Soildat-Live.

6. Réalisation des cartes

La modélisation spatiale ou la régionalisation des données pédologiques ponctuelles relevées permettent de générer des cartes matricielles (raster) et vectorielles (polygones) des propriétés et des caractéristiques des sols. À cette fin, des méthodes géostatistiques, des méthodes de régression et de classification, ainsi que des procédures issues du domaine de l'intelligence artificielle

(Machine Learning) sont utilisées. L'objectif principal de la modélisation spatiale est de représenter quantitativement les relations spatiales entre les propriétés des sols relevées ponctuellement et les covariables. Davantage d'informations sur les méthodes sont disponibles dans le [rapport OP2](#) de Lommis (Grob et al. 2024).

6.1. Cartes de propriétés des sols

Le Tableau 2 présente un aperçu des cartes de propriétés des sols modélisées pour ce projet. Seules 3 cartes sont présentées dans la suite de ce paragraphe ; les autres sont disponibles dans l'Annexe C1. Chacune des 6 propriétés des sols a été représentée sur 3 profondeurs pour un total de 18 cartes. La qualité des modèles pour les cartes de propriétés des sols est globalement bonne avec un coefficient de détermination (R^2) moyen de 0,87 pour la profondeur de 0–20 cm, de 0,84 pour la profondeur de 20–40 cm et de 0,85 pour la profondeur de 40–70 cm.

Propriétés des sols	Unités	Profondeur
Teneur en argile	% masse	0–20, 20–40, 40–70 cm
Teneur en limon	% masse	0–20, 20–40, 40–70 cm
Teneur en sable	% masse	0–20, 20–40, 40–70 cm
Teneur en matières organiques	% masse	0–20, 20–40, 40–70 cm
Teneur en carbonates	% masse	0–20, 20–40, 40–70 cm
Valeur pH (CaCl ₂)	–	0–20, 20–40, 40–70 cm

Tableau 2 :
Liste des cartes de propriétés des sols disponibles dans l'Annexe C1.

Les cartes de propriété des sols, modélisées à l'aide des échantillonnages H3 (Paragraphe 4.4.) permettent d'obtenir rapidement des informations sur les sols du périmètre.

La Figure 24 présente les valeurs modélisées de la teneur en carbonates pour la profondeur T1 (0–20 cm) répartis en 4 classes.

Lors de la formation des sols issus de matériaux parentaux carbonatés, les carbonates se dissolvent progressivement de la surface vers la profondeur sous l'effet de l'eau, avec une possible reprécipitation en profondeur. La présence de carbonates près de la surface peut indiquer des processus d'érosion. Sur la carte des carbonates, des zones avec des teneurs supérieures à 2% de CaCO_3 apparaissent nettement jusqu'en surface.

À l'ouest du périmètre, des drumlins (Figure 5) forment des collines allongées du sud-ouest vers le nord-est. Le sommet de ces collines est particulièrement exposé à l'érosion, surtout en raison du déboisement et du travail du sol, qui fragilise le terrain. Une autre zone d'érosion se situe dans la partie nord du périmètre, dans laquelle de petites ravines s'étirent d'est en ouest vers le cours d'eau qui borde la partie nord du périmètre.

Dans la partie est du périmètre, des zones carbonatées jusqu'en surface se dessinent également. La topographie ne pouvant pas expliquer leur présence, leur origine peut s'expliquer par une précipitation secondaire du CaCO_3 dissous dans les eaux souterraines, remontant localement près de la surface. Une autre explication possible est d'ordre anthropique: des travaux successifs sur d'anciens cours d'eau ou des remblais lors de la construction de la route ont pu faire remonter les carbonates en surface par brassage.

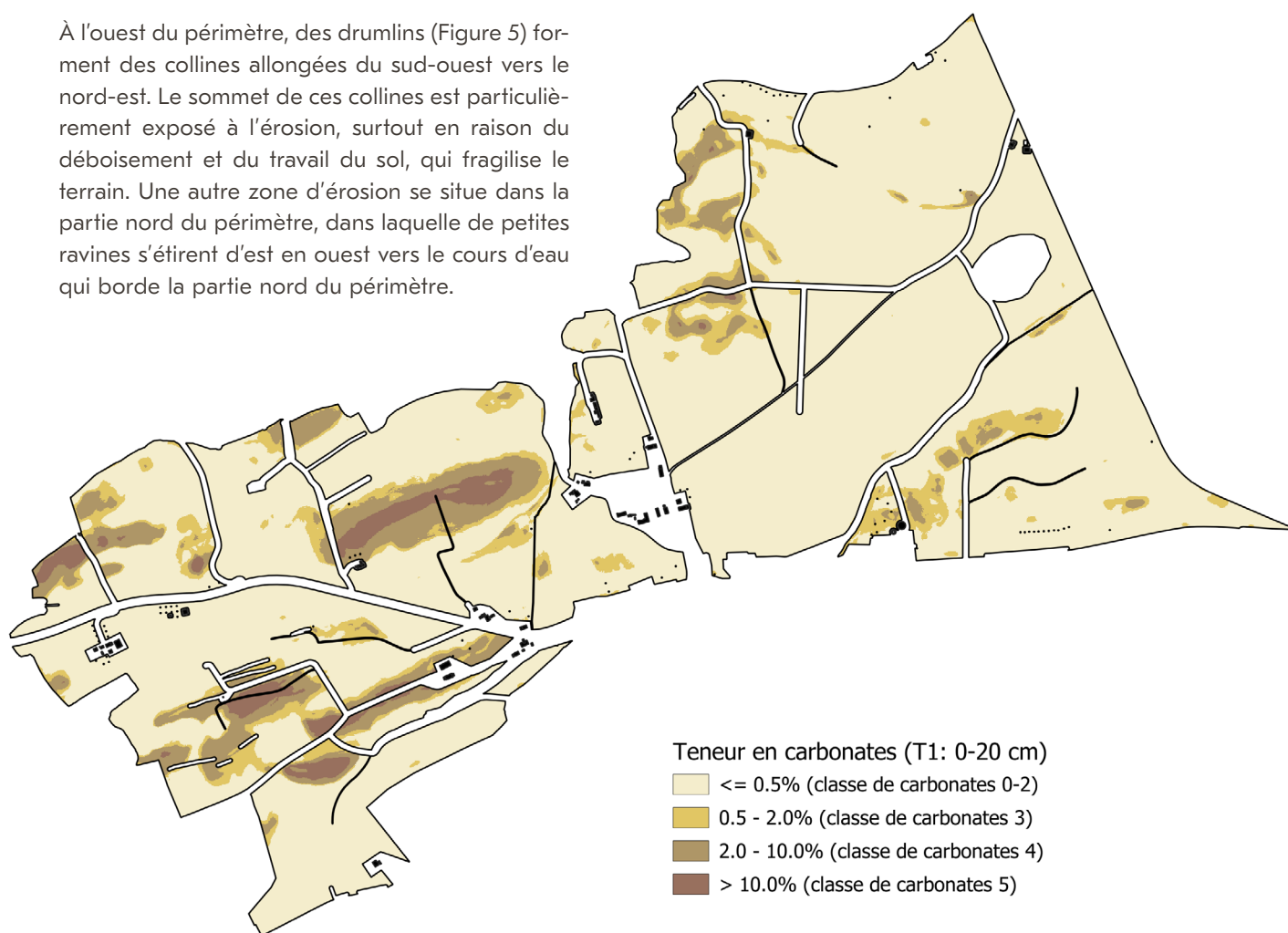


Figure 24:
Teneur en carbonates des sols de 0–20 cm.

La Figure 25 présente les valeurs modélisées de la teneur en sable pour la profondeur T3 (40–60 cm). Le périmètre du projet suggère la présence de deux unités distinctes : la partie nord-est (> 50% de sable) et la partie sud-ouest (< 50% de sable). Le geocover modifié (Figure 5) montre que ces unités résultent de deux lithologies différentes : des teneurs plus faibles en sable correspondent à des dépôts morainiques, tandis que la partie plus sableuse correspond à des dépôts de retraits fluvio-glaciaires. Cette différence lithologique influence significativement la nature des sols et leurs fonctions.

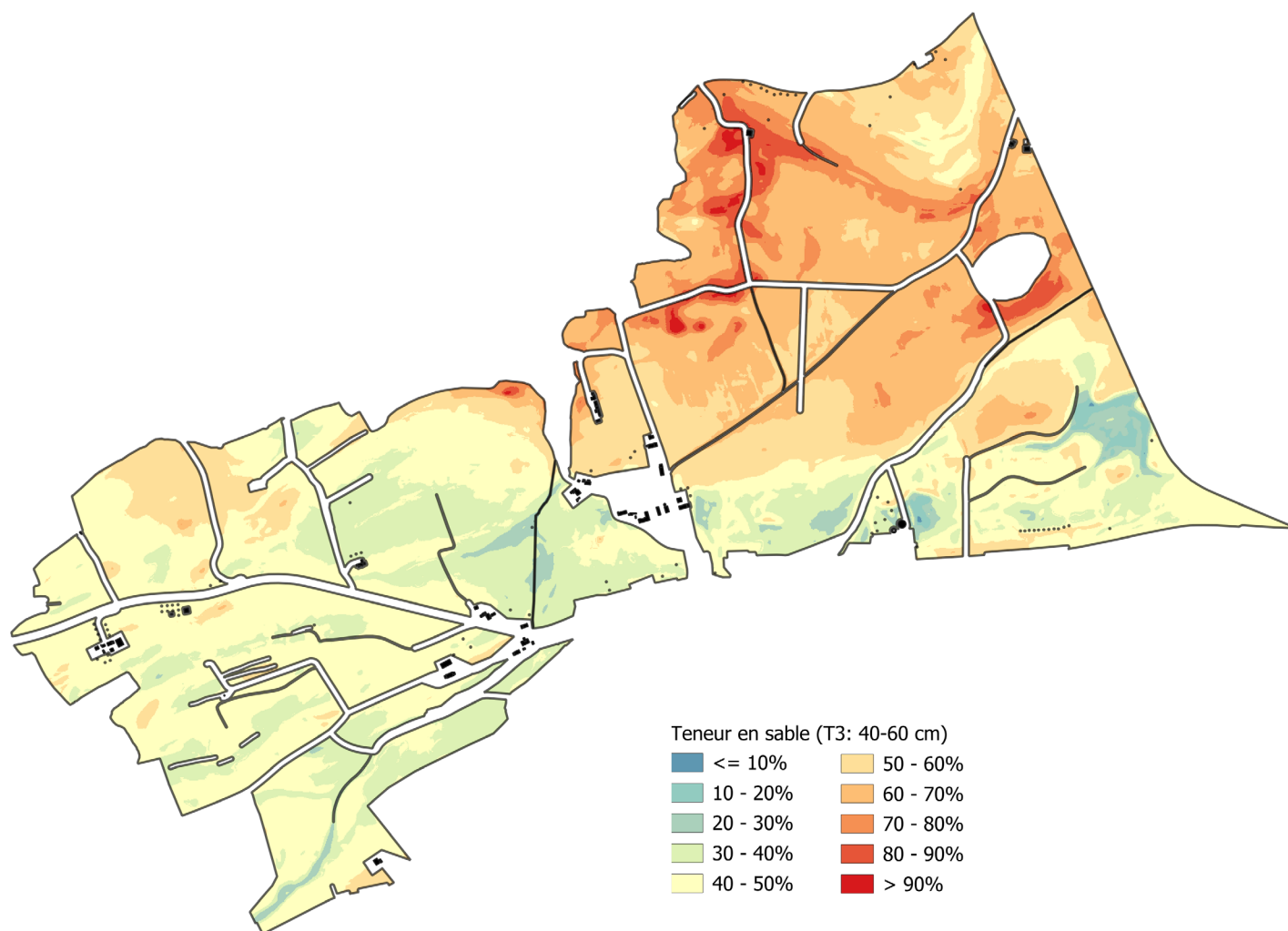


Figure 25:
Teneur en sable des sols de 40–60 cm.

La Figure 26 présente les valeurs modélisées de la teneur en argile pour la profondeur T1 (0–20 cm). Comme sur la carte de la teneur en sable, les dépôts morainiques se distinguent des matériaux fluvioglaciaires. Les sols contenant moins de 20% d'argile correspondent aux matériaux fluvioglaciaires très sableux. Les sols les plus argileux se situent dans des zones de dépressions liées à d'anciens cours d'eau de faible énergie et à des phénomènes de ruissellement de surface. Dans ces zones, les matériaux fins (limons et argiles) ont pu se concentrer progressivement par gravité.

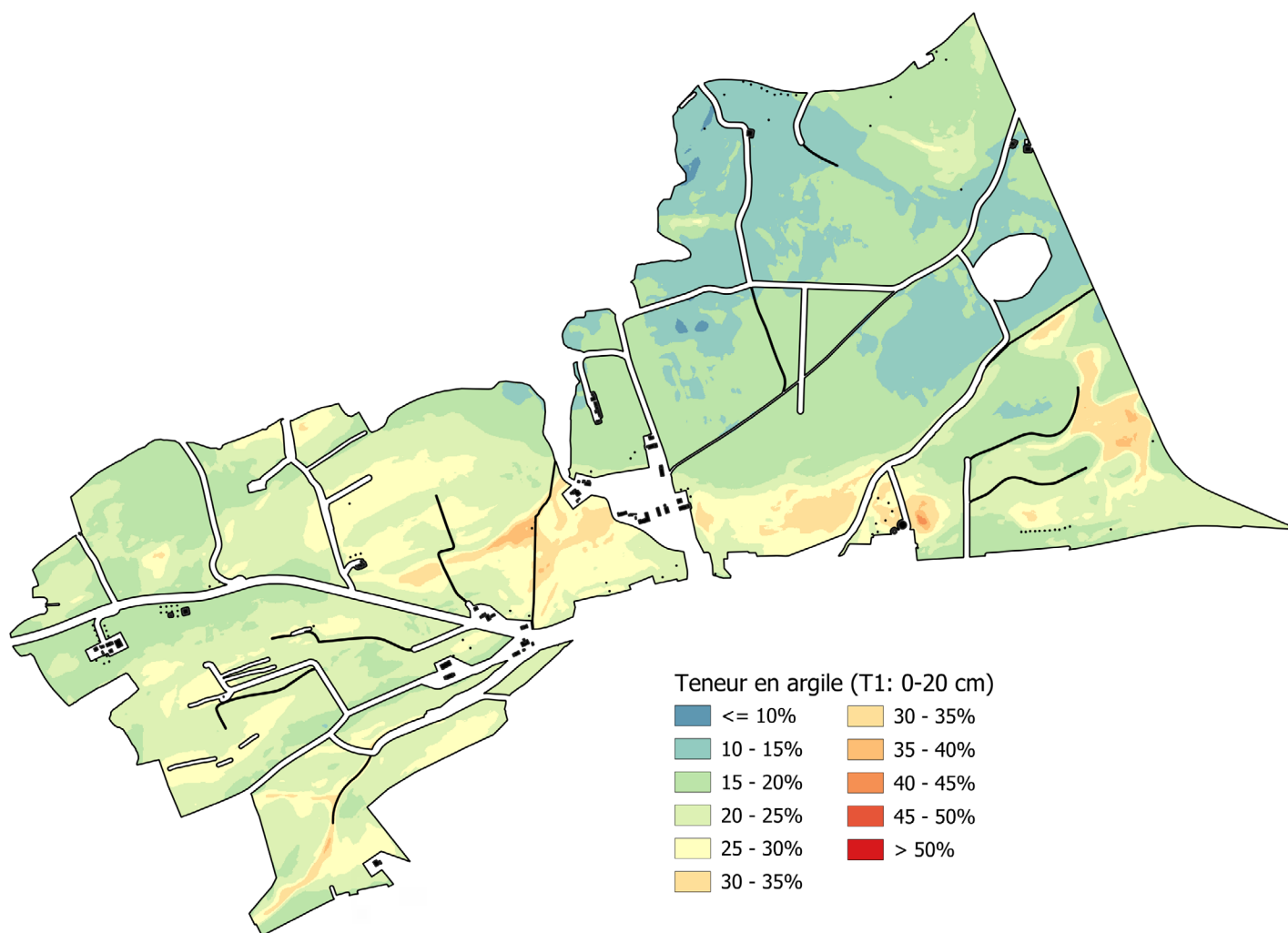


Figure 26:
Teneur en argile des sols de 0–20 cm.

6.2. Cartes des caractéristiques des sols

Le Tableau 3 présente un aperçu des cartes de propriétés des sols modélisées pour ce projet. Seules 3 cartes sont présentées dans la suite de ce paragraphe ; les autres sont disponibles dans l'Annexe C2.

Propriétés des caractéristiques des sols	Unités	Profondeur
Capacité d'échange cationique	molc/m ²	0–90 cm
Groupes de régime hydrique	cm	–
Limite des carbonates	cm	–
Profondeur jusqu'à l'horizon «gg»	cm	–
Profondeur jusqu'à l'horizon «r»	cm	–
Profondeur utile	cm	–
Réserve utile	mm	–
Types de sols	–	–
Sous-types I, G, R	–	–

Tableau 3 :
Liste des cartes des caractéristiques des disponibles dans l'Annexe C2.

Le paysage et les sols de Prez sont fortement marqués par la dernière glaciation. À l'ouest, des drumlins présentent des Régosols sur leurs sommets et des Sols bruns faiblement pseudogleyifiés sur les pentes et au pied. Des Sols bruns lessivés apparaissent dans les pentes concaves, tandis que des Sols bruns calcaires contiennent des carbonates secondaires apportés par l'eau de ruissellement. Dans les dépressions et les lits d'anciens cours d'eau, des sols influencés par l'eau souterraine ou par le ruissellement sont observés, tels que les Gley oxydé et Gley-sol brun, actuellement drainés (Figure 27).

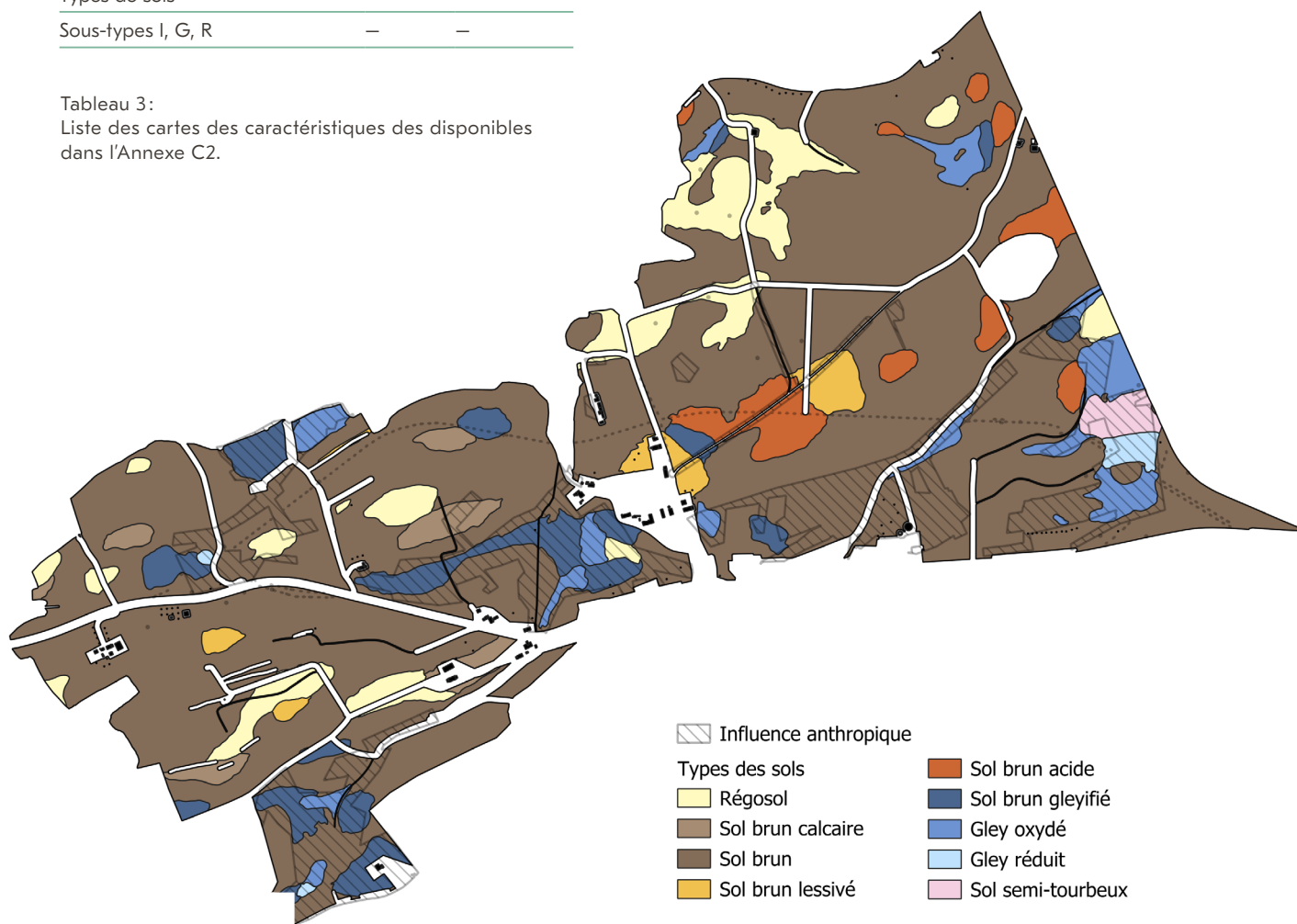


Figure 27 :
Carte des types de sols. Les hachures indiquent les zones potentiellement influencées par l'activité humaine.

La partie orientale, moins accidentée et modelée par des processus fluvioglaciaires, présente principalement des Sols bruns et des Régosols, avec des Sols bruns acides et des Sols bruns lessivés dans les substrats très sableux. Les Sols bruns acides ont été désignés à l'aide du pH Hellige sur le terrain et peuvent diverger des modélisations des cartes illustrant le pH CaCl₂. Des divergences peuvent, par conséquent, exister entre les cartes de propriétés des sols illustrant le pH et la présence de Sols bruns acides.

Dans l'ancienne zone humide «Le Grand Marais», au sud du lac «La Goillette», subsistent des Sols semi-tourbeux dégradés. La zone des sols organiques s'étend probablement vers le «Lac de Seedorf», mais sa présence est limitée dans le périmètre du projet. Ces sols sont fortement influencés par l'activité humaine (drainages, remblais, renaturation du ruisseau «le Palon»), comme indiqué par la hachure noire sur la carte. Dans les marges de la tourbière, des Gleys réduits, des Gleys oxydés et quelques Gleys-sols bruns ont été cartographiés. Aucun remblai n'a été modélisé; la hachure indique les zones potentiellement influencées par l'activité humaine.

La croissance en profondeur des racines des plantes peut être ralentie ou complètement bloquée à cause de plusieurs facteurs: eau stagnante et nappe phréatique, squelette (gravier/pierres) ou de mauvaises propriétés des sols (structure, compaction). Dans le périmètre d'étude se trouvent principalement des sols modérément profonds à profonds, ce qui correspond à une profondeur utile pour les plantes de 50 cm à 100 cm (Figure 28). La profondeur élevée est due aux sols morainiques perméables et profondément altérés. Des sols moins profonds se trouvent localement dans les dépressions (comme «le Grand Marais») et sur les collines érodées (drumlins à l'ouest du périmètre).

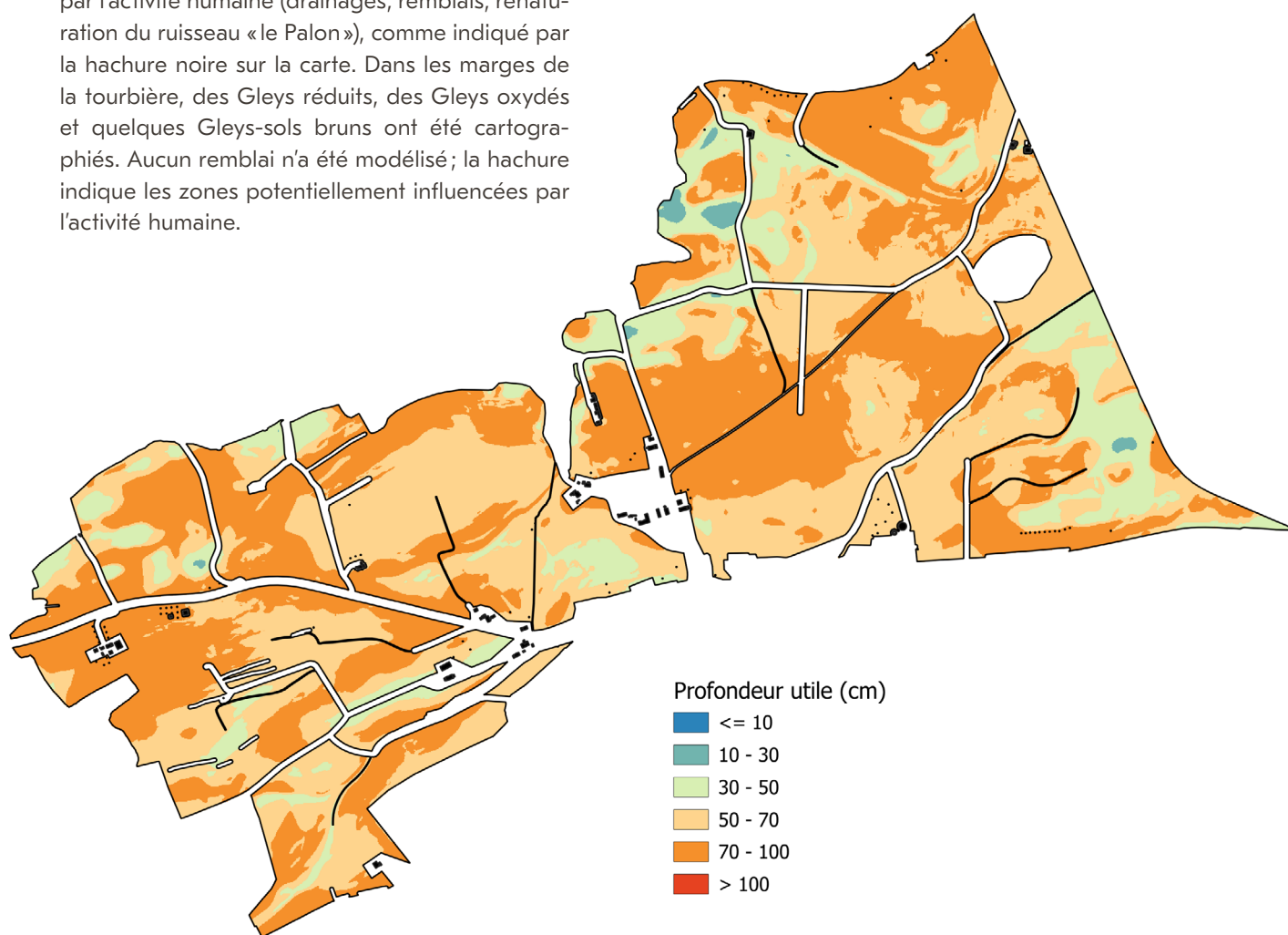


Figure 28:
Carte de la profondeur utile

Le régime hydrique et le degré d'hydromorphie des sols sont essentiels. Les sols affectés par une nappe perchée se distinguent de ceux influencés par une nappe de fond permanente à battement (eau souterraine ou de pente). Dans le périmètre d'étude, ce sont toutefois les sols normalement perméables qui prédominent. La perméabilité de ces sols n'est donc pas entravée, ce qui a un effet positif sur la croissance des plantes. Des sols présentant des signes d'engorgement se rencontrent localement dans les dépressions. Les sols influencés par une nappe de fond permanente (sous-type G) sont illustrés à la Figure 29; plus l'indice est élevé (G1 à G6), plus l'influence de la nappe est marquée.

Les sols très fortement gleyifiés sont principalement présents dans la zone du «Grand Marais», dans laquelle des Sols semi-tourbeux dégradés ainsi que des Gleys réduits et oxydés ont été cartographiés. Ces sols ayant été drainés, l'influence actuellement exercée par la nappe est probablement limitée, comme l'indique la forte minéralisation des anciens horizons tourbeux. Aucun sol présentant des signes d'engorgement liés à une nappe perchée n'a été identifié dans le périmètre d'étude. Par conséquent, aucune carte correspondante n'a été réalisée.

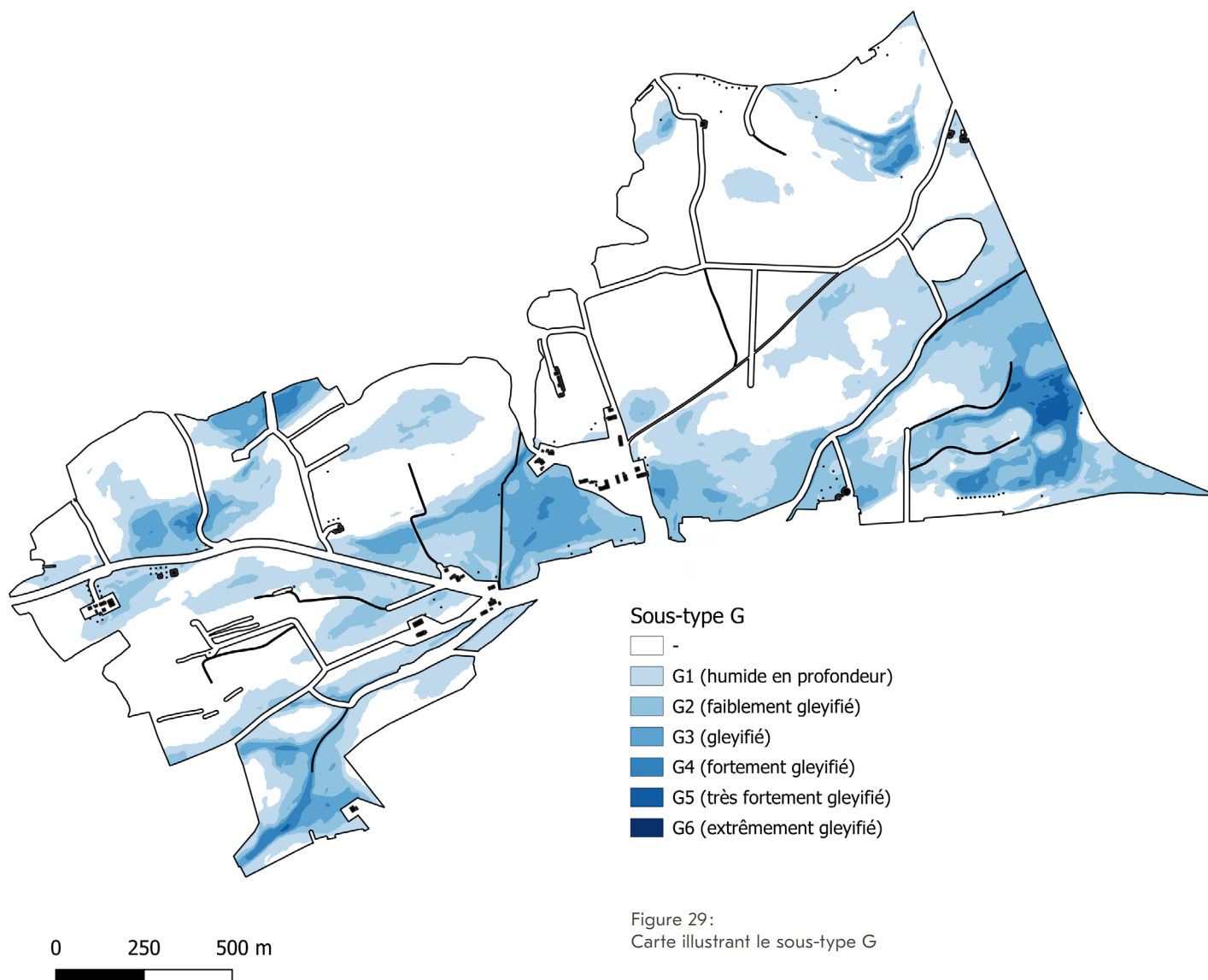


Figure 29:
Carte illustrant le sous-type G

7. Cartes thématiques

Les cartes thématiques rendent les informations sur les sols accessibles à différents groupes d'utilisateurs et d'utilisatrices. Leur élaboration constitue une étape essentielle de la cartographie des sols: elle repose sur le traitement et l'interprétation ciblés d'informations clés issues des cartes de base (Chapitre 6), adaptées aux besoins de publics spécifiques. Ces cartes servent à définir des mesures pratiques ou des actions favorisant une utilisation durable des sols. En couvrant de nombreux domaines, elles élargissent considérablement le cercle des utilisateurs et utilisatrices et créent une plus-value pour la société, notamment

dans des domaines tels que la sylviculture, la protection contre les aléas climatiques et les crues, l'agriculture, la sécheresse, l'aménagement du territoire et la biodiversité.

Pour ce présent projet pilote CCSols, une sélection de cartes thématiques couvrant différents domaines a été réalisée (voir Tableau 4). Toutes les cartes thématiques et la documentation méthodologique sont disponibles sur le portail des sols (bodendaten.ch) et, de manière synthétique, dans l'Annexe C3. Trois cartes thématiques sont présentées plus en détail ci-dessous.

Domaines et noms des produits	Sources
Agriculture	
Potentiel de fourniture de l'azote	PRIF 2017
Facteur de correction pédologique pour la fertilisation azotée normalisée	PRIF 2017
Capacité de stockage des nutriments	Lehmann et al. 2013
Besoins en chaulage	VDLUF 2000
Aménagement du territoire	
Aptitude agricole CA 2023 (version d'essai)	Greiner et al. 2025
Indice de qualité des sols	Angelini et al. 2023
Indice de qualité des sols	Engel und Stadtmann 2020
Indice de qualité des sols	Hilbert et al. 2021
Indice de qualité des sols	Knoll et al. 2010
Indice de qualité des sols	Miller et al. 2022
Protection contre les inondations	
Fonction de régulation du régime hydrique	Danner et al. 2003
Protection de la nature	
Fonction d'habitat pour les microorganismes	Oberholzer et Scheid 2007
Potentiel de sites humides	Vögeli et al. 2022
Potentiel de sites secs	Lienhard et Merkel 2002
Protection des eaux et eaux souterraines	
Capacité à lier et à dégrader les polluants	Bechler et Toth 2010
Capacité à lier les métaux lourds	DVWK 1988
Rétention des nutriments face aux pertes par infiltration et par ruissellement	Jäggli et al. 1998
Protection du climat	
Potentiel d'enrichissement en carbone	Johannes et al. 2017
Stockage de carbone	—
Sécheresse	
Besoin en irrigation	Müller et al. 2012
Aptitude à l'irrigation	Presler et Bagnoud 2013

Tableau 4:
Cartes thématiques réalisées dans le cadre du projet pilote CCSols de Prez.
Toutes les cartes et leur documentation méthodologique sont disponibles sur le portail des sols (bodendaten.ch) et, de manière synthétique, dans l'Annexe C3.

7.1. Potentiel de fourniture de l'azote selon PRIF (2017)

La minéralisation des matières organiques fournit de l'azote. Le potentiel de fourniture de l'azote dépend de la teneur en matières organiques et en argile des sols: plus la teneur en matières organiques est élevée et moins elles sont liées dans des complexes argilo-humique, plus ce potentiel est important. Le facteur d'engorgement n'est pas pris en compte dans cette méthode.

La connaissance du potentiel de fourniture de l'azote permet d'adapter la fertilisation en fonction du site. Les sols à fort potentiel contribuent de manière significative à l'apport en nutriments pour les plantes. Cette fonction est essentielle pour la fertilité des sols et une production végétale durable.

La carte thématique «Potentiel de fourniture de l'azote» repose sur la méthode PRIF (2017, plus de détails sur bodendaten.ch).

Les paramètres utilisés pour cette méthode d'évaluation sont:

- _ la teneur en argile,
- _ la teneur en matières organiques.

Le potentiel de fourniture de l'azote est évalué selon cinq classes (Figure 30). Cette méthode est adaptée aux surfaces agricoles.

Dans la zone d'étude, le potentiel de renouvellement de l'azote est majoritairement faible en raison de teneurs moyennes en matières organiques faibles et de teneurs en argile élevées. En revanche, dans les zones humides, dans lesquelles les teneurs en matières organiques dépassent celles en argile, ce potentiel est plus élevé. Le potentiel d'apport en azote est particulièrement élevé dans la zone de la tourbière basse à l'est.

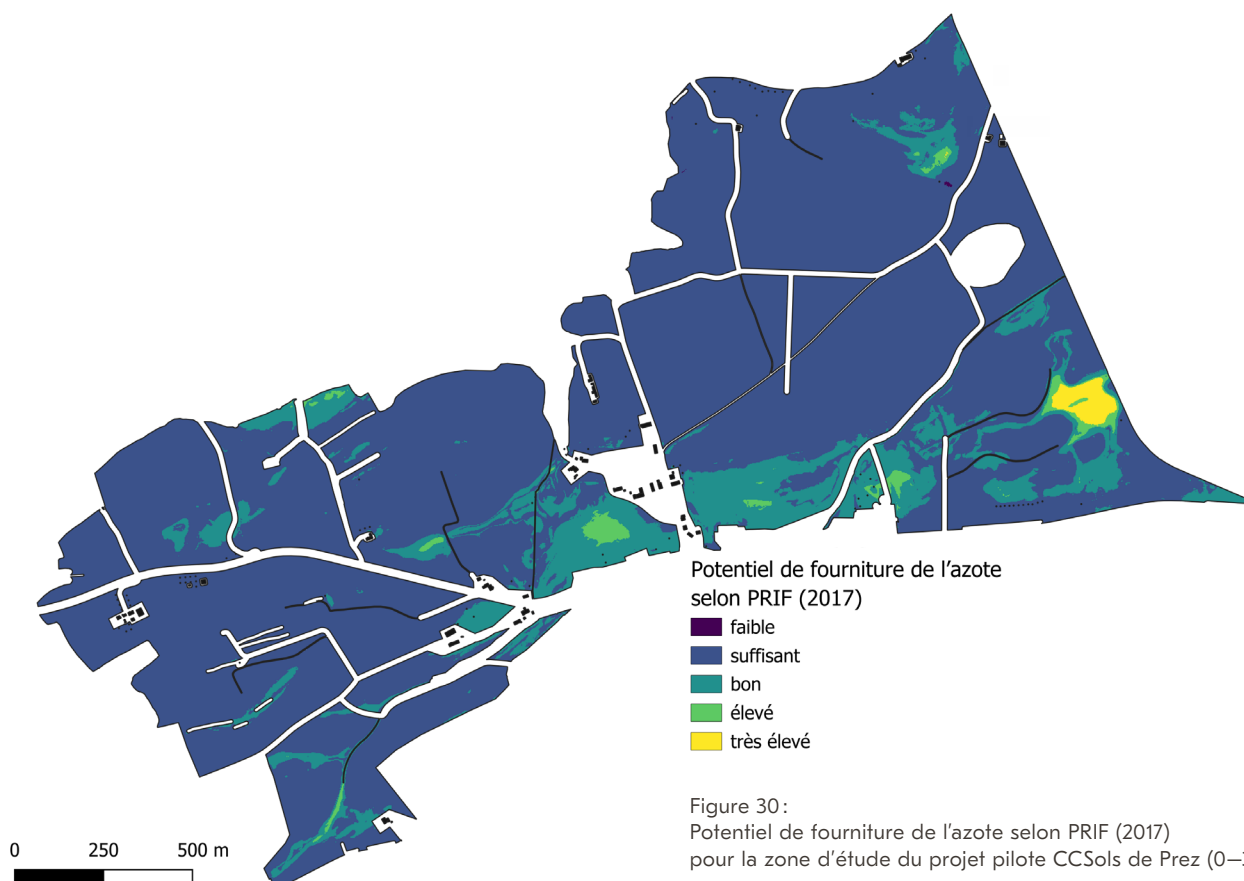


Figure 30:
Potentiel de fourniture de l'azote selon PRIF (2017)
pour la zone d'étude du projet pilote CCSols de Prez (0–30 cm).

7.2. Indice de qualité des sols selon Hilbert et al. (2021)

Un indice de qualité des sols regroupe certaines fonctions des sols et les évalue selon des critères définis ou les priorités des parties prenantes. Il sert d'indicateur de la qualité des sols et facilite la prise de décision ainsi que la communication dans le domaine de l'aménagement du territoire, dans le but d'éviter leur dégradation et de garantir une utilisation durable. Selon Hilbert et al. (2021), cet indice prend en compte la fonction d'archivage, la fonction de régulation de l'eau, la fonction de production agricole, la capacité à lier et à dégrader les polluants, ainsi que le potentiel des surfaces sèches et humides.

La carte thématique «Indice de qualité des sols» repose sur la méthode de Hilbert et al. (2021, plus de détails sur bodendaten.ch).

Les paramètres utilisés pour cette méthode d'évaluation sont les suivants:

- _ la teneur en argile, en limon, en éléments grossiers et en matières organiques, ainsi que le pH,
- _ la masse volumique apparente totale de l'échantillon et celle de la terre fine,
- _ le sous-groupe de régime hydrique,
- _ la limite supérieure du sous-sol et des horizons «gg» et «r»,
- _ le type de sol.

L'indice de qualité des sols est divisé en cinq classes (Figure 31). Cette méthode convient à tous les types de sols et aux différentes utilisations des terres.

Dans la zone d'étude, l'indice de qualité des sols est faible par rapport à d'autres régions ([voir bodendaten.ch](http://voir.bodendaten.ch)). En effet, cet indice attribue de bonnes notes aux sols ayant une fonction d'habitat ou d'archivage élevée, caractéristiques absentes dans cette zone. Les autres fonctions des sols sont considérées secondairement. Les sols humides sont mieux évalués, car les sites très humides ou très secs sont valorisés pour la fonction habitat. À l'est, les sols plutôt secs et sableux ne sont pas considérés comme particulièrement secs selon cette méthode et obtiennent par conséquent un score faible pour cette fonction.

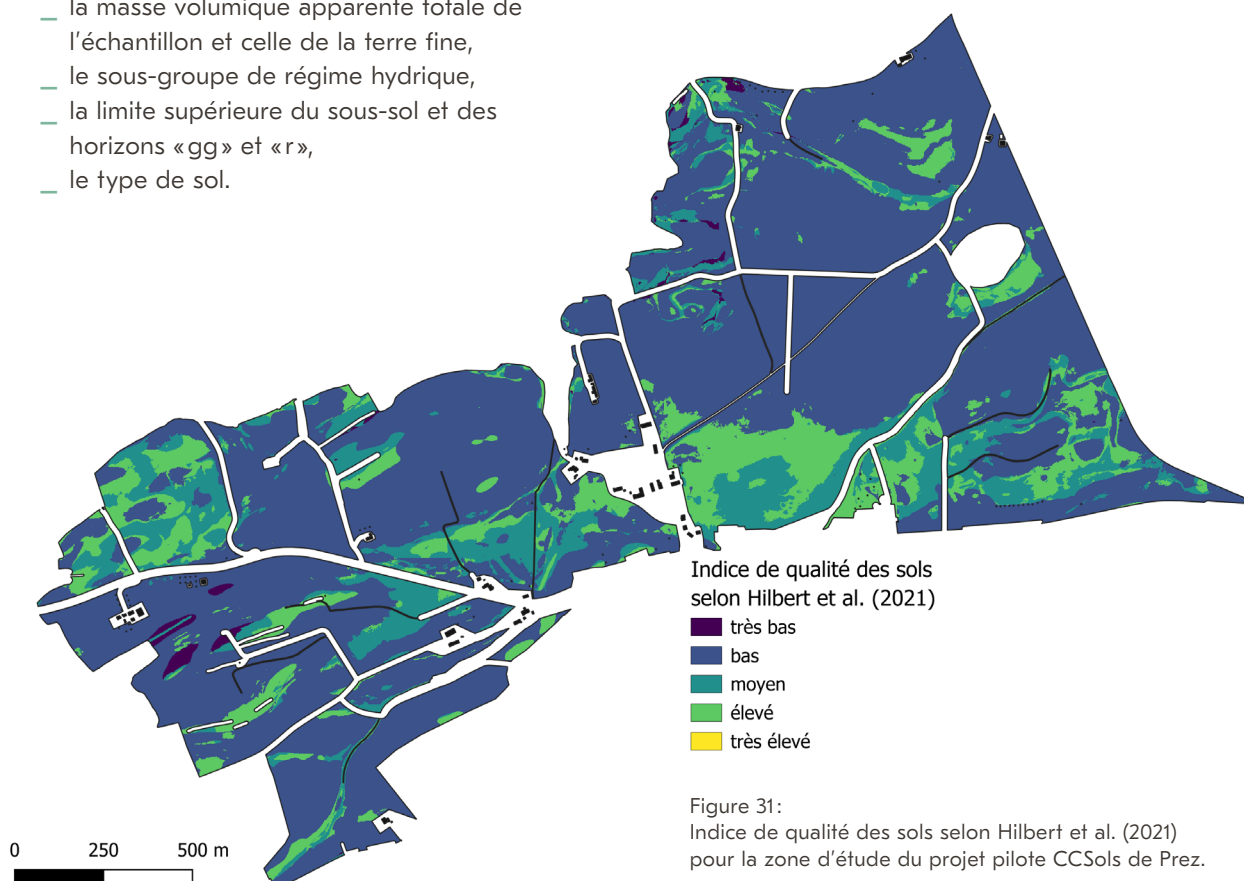


Figure 31:
Indice de qualité des sols selon Hilbert et al. (2021)
pour la zone d'étude du projet pilote CCSols de Prez.

7.3. Potentiel d'enrichissement en carbone sous forme stable des sols selon Johannes et al. (2017)

Les matières organiques des sols sont constituées de résidus végétaux et d'organismes morts, ainsi que de produits issus de leur décomposition et transformation. Elles possèdent une grande capacité de stockage de l'eau et des nutriments, et influent positivement sur de nombreuses fonctions des sols. Composées pour plus de la moitié de carbone, elles jouent un rôle important dans le contexte du changement climatique.

Le potentiel de stockage de carbone à long terme des sols dépend de sa teneur actuelle en matières organiques, de sa teneur en argile et d'autres facteurs liés à son emplacement. Les minéraux argileux permettent la formation de composés stables (complexes argilo-humiques), protégeant le carbone de la dégradation microbienne. La méthode utilisée ici repose de manière simplifiée sur le rapport matières organiques-argile. La carte thématique montre le potentiel des sols à stocker du carbone à long terme, en plus du carbone déjà présent.

La carte thématique «Potentiel d'enrichissement en carbone» se base sur la méthode d'évaluation de Johannes et al. (2017, plus de détails sur boden-daten.ch).

Les paramètres utilisés sont :

- _ la teneur en argile, en éléments grossiers et en carbone,
- _ la masse volumique apparente de la terre fine.

Le potentiel d'enrichissement est exprimé en t/ha et classé en quatre catégories (Figure 32). Son évaluation fait l'objet de controverses dans la littérature et plusieurs méthodes internationales existent. La méthode de Johannes et al. (2017) n'est qu'une des possibilités. La méthode la plus adaptée aux sols suisses reste à déterminer et à valider. Elle ne convient qu'aux sols minéraux, les sols organiques (Sols semi-tourbeux) de la zone du projet ayant été exclus de la carte.

Dans la zone d'étude, les sols ont majoritairement un potentiel moyen d'enrichissement en carbone. Les sols plutôt humides, avec des réserves de carbone élevées, ont un potentiel faible. Certains sols à l'ouest de la zone ont un fort potentiel d'enrichissement. Ces sols stockent plus de carbone que les sols non engorgés à l'est, mais leur potentiel d'enrichissement est néanmoins plus élevé en raison de leur teneur relativement élevée en argile.

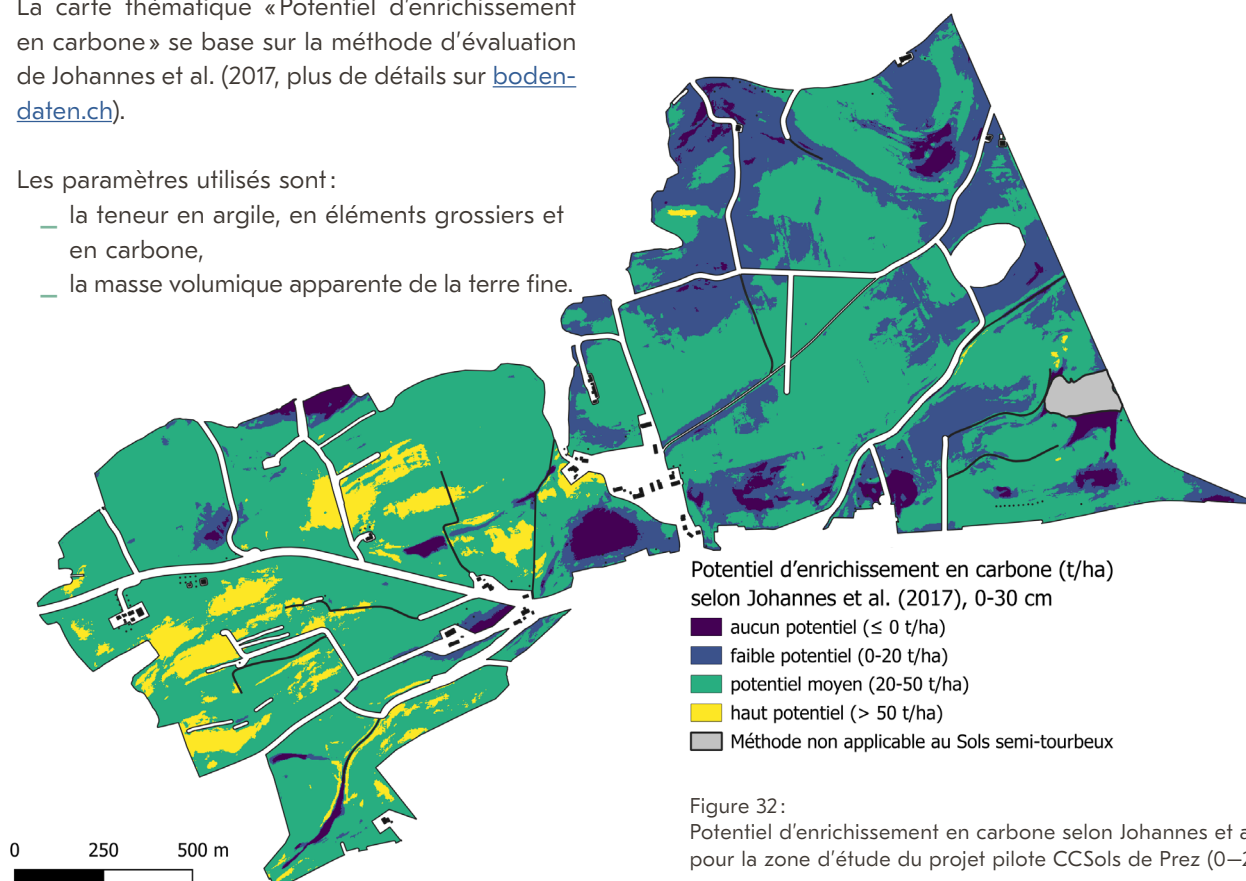


Figure 32: Potentiel d'enrichissement en carbone selon Johannes et al. (2017) pour la zone d'étude du projet pilote CCSols de Prez (0–20 cm).

8. Conclusion et perspectives

8.1. Les sols de Prez

L'étude des sols de la commune de Prez révèle une grande diversité pédologique, directement liée à l'histoire glaciaire et aux activités humaines de la région. Cette diversité influence fortement l'agriculture, la gestion de l'eau et la préservation de l'environnement local.

Principaux types de sols et usages

À Prez, on trouve principalement des sols bruns limoneux sur moraines à l'ouest, adaptés aux cultures, mais aussi sujets à l'érosion sur les crêtes. Dans les dépressions et anciennes zones humides, des sols influencés par l'eau souterraine (Gleys) et des sols semi-tourbeux dégradés sont présents, souvent utilisés comme prairies. À l'est, les sols sont plus sableux en raison des dépôts fluvioglaciers. L'utilisation agricole domine, mais la variabilité des sols impose une gestion différenciée.

Problèmes identifiés

- **Engorgement et drainage:** Certaines zones souffrent d'un excès d'eau, nécessitant des systèmes de drainage. Cela a parfois entraîné la décomposition de la matière organique et une baisse de la capacité de stockage du carbone.
- **Érosion:** Les crêtes et certaines parties du nord du périmètre sont touchées par l'érosion, aggravée par le travail du sol et le manque de couverture végétale.
- **Variabilité spatiale:** La diversité des sols complique la gestion uniforme des terres agricoles.
- **Influence humaine:** Drainages, remblais et extractions ont modifié la structure naturelle des sols et peuvent réduire leur valeur écologique.

Recommandations et besoins d'action

- **Adapter la gestion agricole:** les pratiques doivent être ajustées en fonction des caractéristiques locales des sols, notamment pour la fertilisation, l'irrigation et le choix des cultures.
- **Prévenir l'érosion:** promouvoir la couverture végétale et limiter le travail du sol dans les zones sensibles, en particulier sur les crêtes.
- **Valoriser les outils numériques:** poursuivre l'utilisation d'outils modernes pour un suivi précis et cohérent des sols, ce qui facilite la prise de décision pour les autorités et les exploitants.
- **Sensibiliser et impliquer:** informer la population et les acteurs locaux sur l'importance de la préservation des sols et encourager leur participation aux mesures de gestion durable.

8.2. Déroulement et techniques du projet

Organisation du projet et communication

Le troisième projet pilote CCSols de Prez a une nouvelle fois démontré qu'une communication ouverte et exhaustive avec l'ensemble des personnes impliquées est essentielle. Elle constitue une condition préalable importante à la réussite d'un projet de cartographie. La collaboration avec le canton de Fribourg, la commune de Prez et le bureau d'ingénieurs Geotest SA s'est avérée très constructive. L'organisation de plusieurs séances d'information, la mise à disposition de matériel d'information et la communication directe avec les exploitant-e-s ont largement contribué à l'acceptation du projet.

Concept d'échantillonnage optimisé

Le concept d'échantillonnage en hexagone avec des surfaces de remplacement définies, utilisé à Prez, a fait ses preuves. L'ajustement semi-automatisé du périmètre du projet (extraction des conduites, routes et bâtiments) a permis un échantillonnage efficace et spatialement équilibré qui prend en compte des conditions pratiques sur le terrain. Cette démarche sera affinée dans les futurs projets, notamment en ce qui concerne la flexibilité dans le choix des sites pour les cartographes.

Chronologie adaptée

Une innovation méthodologique majeure de ce projet réside dans l'adaptation de la chronologie des travaux: l'échantillonnage H3 et l'analyse spectroscopique ont été réalisés en amont de la campagne de sondages H2. Cette organisation a permis l'élaboration rapide de cartes des propriétés des sols (BEK), fournissant un appui déterminant aux cartographes sur le terrain. Cette démarche s'est avérée particulièrement efficace et est recommandée pour les futurs projets. Les BEK ont facilité l'évaluation des propriétés des sols in situ et ont renforcé la cohérence et la qualité des descriptions pédologiques.

Contrôle qualité des relevés pédologiques

Les dispositifs de contrôle qualité mis en place, tant à l'échelle ponctuelle que surfacique, se sont révélés particulièrement efficaces. Le script R dédié à la vérification automatisée de l'exhaustivité et de la cohérence logique des données a permis une détection rapide des incohérences dans les relevés de terrain. Par ailleurs, le contrôle qualité

surfacique a facilité l'identification et la correction des incohérences spatiales entre sites adjacents. Les journées de calibration et le protocole correspondant ont constitué un élément clé de l'harmonisation des descriptions pédologiques. Ces procédures sont désormais validées et peuvent être déployées de manière standardisée dans des projets similaires.

Outils numériques de terrain

Les outils numériques de terrain développés et utilisés à Prez (Statut, Soildat-Live, Soilproperties et Polygones) ont contribué de manière significative à l'amélioration de l'efficacité des travaux de terrain. La visualisation en temps réel des données relevées grâce à Soildat-Live a constitué un atout majeur, en facilitant la consultation des descriptions de sites adjacents par l'ensemble des cartographes et en renforçant la cohérence des relevés. L'outil Soilproperties a permis un accès direct aux cartes modélisées de propriétés des sols sur le terrain, tandis que l'outil Polygones a assuré une saisie numérique efficace des unités pédologiques. L'ensemble de ces outils s'est révélé robuste et sera optimisé pour une utilisation dans de futurs projets.

Les miniprofils, une alternative aux profils classiques

Le recours à des carottages de gros calibre (miniprofils, H1.1) en remplacement partiel des profils pédologiques classiques s'est révélé prometteur. Bien que la qualité de l'information recueillie atteigne environ 80% de celle des profils classiques, les miniprofils présentent un rendement journalier nettement supérieur (20 à 30 carottages par jour contre environ 10 profils) ainsi que des coûts sensiblement réduits. Leurs limites principales concernent l'évaluation des éléments grossiers, de la structure et de la variabilité à petite échelle. Il est dès lors recommandé d'intégrer les miniprofils de manière ciblée dans les futurs projets, en complément des profils classiques, afin de renforcer la densité spatiale des informations dans des contextes pédologiques bien maîtrisés.

Relevé des caractéristiques d'engorgement

La mise en place de piézomètres destinés à la caractérisation précise des conditions d'engorgement des sols a permis d'obtenir des informations essentielles sur la dynamique temporelle de ce-

lui-ci. Dans la perspective d'une meilleure appréciation des fonctions des sols en relation avec le régime hydrique, il est recommandé d'intégrer ces mesures de manière systématique dans certaines zones lors de futurs projets.

Collaboration avec les bureaux d'ingénieurs

La collaboration avec le bureau d'ingénieurs Geotest SA s'est révélée constructive. La formation sur les nouveaux processus de travail, les outils numériques de terrain et l'utilisation des cartes de propriétés des sols a été très bien accueillie. L'organisation des sondages H2 structurée en lots de travail a prouvé son efficacité. Pour les futurs projets, il est recommandé d'impliquer davantage les bureaux d'ingénieurs dès la phase de prospection afin de faciliter l'acquisition de connaissances et la compréhension des conditions des sols dans la région.

Sondages H2 mécanisés et manuels

L'association de sondages H2 mécanisés et manuels présente à la fois des avantages et des limites. Les sondages mécanisés offrent un rendement quotidien plus élevé, mais nécessitent une plus grande coordination et une communication étroite avec les exploitant-e-s. La description des carottes hors site comporte des risques pour la qualité des relevés pédologiques. Dans le cadre de la cartographie à grande échelle en Suisse, il est recommandé d'associer sondages mécanisés et manuels, tout en calibrant préalablement les cartographes et en disposant d'un outil de communication fiable pour contacter les exploitant-e-s.

Spectroscopie et analyses en laboratoire

Les analyses spectroscopiques réalisées en laboratoire ont atteint un très haut niveau de qualité, avec des valeurs moyennes de R^2 de 0,85. L'amélioration du contrôle qualité des mesures spectrales et l'optimisation de la modélisation ont largement contribué à ces résultats. Le principal défi reste le traitement du grand nombre d'échantillons (séchage, tamisage, broyage). Des optimisations supplémentaires sont nécessaires pour rendre ce processus encore plus efficace.

8.3. Cartes réalisées

Création de cartes et modélisation spatiale

La modélisation spatiale des données pédologiques, réalisée à l'aide de méthodes d'apprentissage automatique (machine Learning), a permis d'obtenir des cartes des sols de grande qualité. La cartographie des différentes propriétés des sols à différentes profondeurs permet d'adapter l'utilisation des informations selon la thématique étudiée. L'approche itérative, avec plusieurs cycles de modélisation, et la collaboration étroite entre pédologues, modélisateurs et modélisatrices ont fait ses preuves. Pour les futures cartographies à grande échelle, il sera important d'étudier la densité d'échantillonnage nécessaire afin d'assurer une qualité de carte définie.

Cartes thématiques pour différents groupes d'utilisateurs et d'utilisatrices

La création de cartes thématiques pour divers domaines (agriculture, protection des eaux, protection du climat, protection de la nature, aménagement du territoire, sécheresse) illustre le grand potentiel de la cartographie des sols pour un large cercle d'utilisateurs et d'utilisatrices. La documentation détaillée des méthodes, disponible sur bodendaten.ch, favorise la transparence et la traçabilité. Pour les futurs projets, le dialogue avec les différents groupes sera renforcé afin de poursuivre le développement conjoint de cartes thématiques pratiques et adaptées aux besoins de chacun.

8.4. Perspectives

Ce troisième projet pilote mené à Prez a permis au CCSols d'acquérir une expérience supplémentaire importante dans la mise en œuvre pratique de nouvelles méthodes. Les principaux enseignements tirés de ce projet concernent :

- _ l'utilisation réussie d'un calendrier de travail adapté, intégrant une campagne d'échantillonnage H3 réalisée avant la campagne de sondage H2,
- _ l'efficacité des outils numériques de terrain pour faciliter la cartographie,
- _ les processus de contrôle qualité appliqués aux relevés pédologiques,
- _ l'utilisation de miniprofils comme alternative économique aux profils classiques,
- _ l'amélioration du relevé des caractéristiques d'engorgement grâce à l'utilisation de piézomètres.

Ces connaissances sont directement intégrées dans la planification d'autres projets pilotes. L'objectif est de poursuivre l'optimisation des méthodes et de les mettre progressivement en pratique dans la cartographie des sols en Suisse. Le développement de la cartographie des sols vise, à terme, à permettre la cartographie de surfaces plus étendues de manière rapide et économique, sans compromettre la qualité des données pédologiques.

Une mise en œuvre réussie à l'échelle nationale nécessite une collaboration étroite entre la Confédération, les cantons, les bureaux d'ingénieurs et le CCSols. Les expériences acquises dans le cadre des trois projets pilotes de Diemerswil, de Lommis et de Prez constituent une base solide pour le déploiement progressif de nouvelles méthodes dans la cartographie des sols en Suisse.

9. Liste des tableaux

Tableau 1: Résumé de l'analyse comparative entre les profils et les miniprofils. Code couleur: vert = les miniprofils présentent des avantages par rapport aux profils; jaune = les miniprofils et les profils sont comparables; rouge = les miniprofils présentent des inconvénients par rapport aux profils.	27
Tableau 2: Liste des cartes de propriétés des sols disponibles dans l'Annexe C1.	37
Tableau 3: Liste des cartes des caractéristiques des disponibles dans l'Annexe C2.	41
Tableau 4: Cartes thématiques réalisées dans le cadre du projet pilote CCSols de Prez. Toutes les cartes et leur documentation méthodologique sont disponibles sur le portail des sols (bodendaten.ch) et, de manière synthétique, dans l'Annexe C3.	44

10. Liste des illustrations

Figure 1 : Domaines dans lesquels les informations pédologiques peuvent apporter une valeur ajoutée.	8
Figure 2: Présentation des trois phases principales du déroulement d'une cartographie des sols. Les six « blocs » sont décrits de façon plus détaillée dans le rapport du CCSols n°3 (Keller et al. 2023).	10
Figure 3: Flyer du projet distribué lors de la séance d'information.	11
Figure 4: Journée de formation continue (Image: Horsform/Canton de Fribourg)	11
Figure 5: Geocover modifié à l'aide des observations de terrain lors des campagnes de prospection et de profils.	12
Figure 6: Carte du périmètre ajusté.	14
Figure 7 : Illustrations des différents niveaux hiérarchiques.	15
Figure 8: Variabilité normalisée de l'utilisation des sols sur la base des données Sentinel avec superposition d'hexagones d'une superficie de 1ha (NDVI: normalized difference of the vegetation index). Bleu: variabilité élevée, rouge: faible variabilité de l'utilisation des sols.	16
Figure 9: Concept d'échantillonnage H3 final pour Prez. Les hexagones couvrent une surface de 1ha. Trois sites H3 sont sélectionnés par hexagone à l'aide de deux méthodes de regroupement. Les zones colorées en arrière-plan indiquent les surfaces de remplacement associées (trois au maximum) lorsque l'échantillonnage n'est pas possible au point prévu.	17
Figure 10: Aperçu chronologique des différents niveaux hiérarchiques.	19
Figure 11: Procédure de CQ ponctuel pour les profils et représentation des responsabilités respectives.	20
Figure 12: Déroulement du contrôle qualité ponctuel lors des sondages pédologiques et représentation des responsabilités respectives.	21
Figure 13: Fiche descriptive du profil P01. MO: matières organiques, CaCO ₃ : carbonates.	23
Figure 14: Fiche descriptive du profil P09. MO: matières organiques, CaCO ₃ : carbonates.	24
Figure 15: Appareil de sondage Zurbuchen Bodenschutz GmbH.	25
Figure 16: Sélection de miniprofils.	26
Figure 17: Emplacements des piézomètres. Le piézomètre P06 n'a pas été installé.	30
Figure 18: Représentation du niveau des eaux souterraines (moyennes journalières) en relation avec les précipitations enregistrées par la station climatique de Payerne (PAY) (Source: MétéoSuisse).	30
Figure 19: Aperçu de la couche Statut	33
Figure 20: La vue rapprochée de Soildat-Live affiche les attributs correspondant aux horizons.	34
Figure 21: La vue éloignée de Soildat-Live affiche les attributs correspondant au niveau « Observation ».	34
Figure 22a: Outil QField Soilproperties. Extraits des cartes de propriétés des sols modélisées (Soilproperties raster) pour la profondeur T1: 0–20 cm.	35
Figure 22b: Outil QField Soilproperties. Extrait de la couche points (Soilproperties points), qui permet de visualiser les valeurs modélisées en un point.	35
Figure 23: Polygones représentatifs dessinés à partir de l'analyse du paysage, des cartes de propriétés des sols et de la couche Soildat-Live.	36

Figure 24: Teneur en carbonates des sols de 0–20 cm.	38
Figure 25: Teneur en sable des sols de 40–60 cm.	39
Figure 26: Teneur en argile des sols de 0–20 cm.	40
Figure 27: Carte des types de sols. Les hachures indiquent les zones potentiellement influencées par l'activité humaine.	41
Figure 28: Carte de la profondeur utile	42
Figure 29: Carte illustrant le sous-type G	43
Figure 30: Potentiel de fourniture de l'azote selon PRIF (2017) pour la zone d'étude du projet pilote CCSols de Prez (0–30 cm).	45
Figure 31: Indice de qualité des sols selon Hilbert et al. (2021) pour la zone d'étude du projet pilote CCSols de Prez.	46
Figure 32: Potentiel d'enrichissement en carbone selon Johannes et al. (2017) pour la zone d'étude du projet pilote CCSols de Prez (0–20 cm).	47

11. Liste des abréviations

Termes	Explications
CCSols	Centre de compétences sur les sols
KOBO	Kompetenzzentrum Boden
NABODAT	Système national d'information pédologique (est géré par le Centre de services NABODAT)
RU	Réserve utile
NIR	NIR est l'abréviation pour « spectroscopie dans l'infrarouge proche ». La spectroscopie NIR fonctionne avec une lumière dont la longueur d'onde est comprise entre environ 0,7 et 1,4 μm , soit entre le spectre visible et l'infrarouge moyen.
ODK	Open Data Kit: outil de saisie qui permet aux utilisateurs et aux utilisatrices de remplir des formulaires hors ligne et d'envoyer les données saisies à un serveur lorsqu'une connexion est établie.
PU	Profondeur utile
Soildat	Soildat est une application web permettant de saisir des données pédologiques (profils et sondages) directement sur le terrain à l'aide d'appareils mobiles.

12. Bibliographie

- _ Afu Solothurn (Hrsg.), 2020. Projekthandbuch Kanton Solothurn: KARTIER-METHODIK, Teil III, Kartiermethode FAL24+ (6. Auflage.). 45 S.
- _ Angelini ME, Heuvelink GBM, Lagacherie P, 2023. A multivariate approach for mapping a soil quality index and its uncertainty in southern France. *European Journal of Soil Science*, 74 (2), e13345. <https://doi.org/10.1111/ejss.13345>
- _ Bechler K, Toth O, 2010. Bewertung von Böden nach ihrer Leistungsfähigkeit. Leitfaden für Planungen und Gestattungsverfahren.
- _ Behrens T, Hertzog M, Schmidt K, Keller A, 2023. TerraPoly – Karten zu multiskaligen Reliefableitungen zur Unterstützung der Konzeptphase und Feldarbeiten in Bodenkartierungen. KOBO-Bericht Nr. 4.
- _ BGS, 2010. Klassifikation der Böden der Schweiz Bodenprofiluntersuchung, Klassifikationssystem, Definitionen der Begriffe, Anwendungsbeispiele. Luzern.
- _ Bonny D, Gendre S, Jolliet P, Bovet P, Staub Barbey I, Egger S, Perroud C, Bersier I, 2023. Le Preztexte n°6. Informations communales, commune de Prez. Autorités communales, Commission de l'information. https://prez.ch/fileadmin/user_upload/documents/accueil/administration-autorite/administration-communale/bulletins_d_informations_communales/Preztexte_juin_2023.pdf
- _ Danner C, Henshold C, Weidenhammer S, Aussendorf M, Kraft M, Weidenbacher A, Kölling C, 2003. Das Schutzgut Boden in der Planung. Bewertung natürlicher Bodenfunktionen und Umsetzung in Planungs- und Genehmigungsverfahren. Landesamt BG, für Umweltschutz BL (Hrsg.).
- _ DVWK, 1988. Filtereigenschaften des Bodens gegenüber Schadstoffen. Teil I: Beurteilung der Fähigkeit von Böden, zugeführte Schwermetalle zu immobilisieren. DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft.
- _ Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich-Reckenholz (Hrsg.), 1997. Kartieranleitung Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden. 175 S.
- _ Engel N, Stadtmann R, 2020. Bodenfunktionsbewertung auf regionaler und kommunaler Ebene: Ein niedersächsischer Leitfaden für die Berücksichtigung der Belange des vorsorgenden Bodenschutzes in der räumlichen Planung. 5,51 MB. https://doi.org/10.48476/GEOBER_26_2020
- _ Greiner L, Petter G, Keller A, 2025. Manuel pour l'estimation de l'aptitude agricole. Méthode des classes d'aptitude (méthode CA) Version actualisée 2023. Version test 1.1. sous <https://ccsols.ch/fr/downloadcenter/>
- _ Grob U, Hertzog M, Keller A, Tutsch S, Zahner D, Scheifele M, Greiner L, Schmidt K, Stumpf F, Petter G, et al., 2024. KOBO-Bericht Nr. 11: Neue Methoden in der Bodenkartierung – Pilotprojekt Lommis.
- _ Hilbert S, Thelemann M, Brandt M, Siewert W, Gerstenberg JH, 2021. Planungshinweise zum Bodenschutz. Leitbild und Massnahmenkatalog für den vorsorgenden Bodenschutz in Berlin.
- _ Jäggli F, Peyer K, Pazeller A, Schwab P, 1998. Grundlagenbericht zur Bodenkartierung des Kantons Zürich.
- _ Johannes A, Matter A, Schulin R, Weisskopf P, Baveye PC, Boivin P, 2017. Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? *Geoderma*, 302, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.021>
- _ Keller A, Grob U, Hertzog M, Zahner D, Greiner L, Stumpf F, Petter G, Wallner M, Sprafke T, Racine S, et al., 2023. Neue Methoden in der Bodenkartierung – Pilotprojekt Diemerswil: KOBO-Bericht Nr. 3.

- _ Knoll A, Sutor G, Huber G, Kübler B, 2010. «Pilotprojekt Boden». Bewertung von Bodenfunktionen in Planungsverfahren.
- _ Lehmann A, David S, Stahr K, 2013. TUSEC – Bilingual-Edition: Eine Methode zur Bewertung natürlicher und anthropogener Böden (Deutsche Fassung). Stuttgart. https://soil.uni-hohenheim.de/uploads/media/TUSEC_2.Aufl_03.pdf
- _ Lienhard A, Merkel K, 2002. Ein neues Planungsinstrument und Zielwerte für LEK und ÖQV im Kanton Zürich.
- _ Marugg D, Siegrist J, 2023. Beschreibung, Klassifikation und Kartierung der Böden der Schweiz: Teil III Kartieranleitung (KA23).
- _ Miller R, Busch J, Friedrich K, Fritzsich D, Goldschmitt M, Handke K, Pflanz D, Sauer S, Vorderbrügge T, Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz, 2022. Themenhefte Vorsorgender Bodenschutz, Heft 5: Kompensation des Schutzguts Boden in Planungs- und Genehmigungsverfahren.
- _ Monnier J, 2020. 5000 ans d'histoire sur 2,5 km à Prez-vers-Noréaz. Abgerufen am 28.01.2026, <https://doi.org/10.5169/SEALS-919816>
- _ Müller U, Engel N, Heidt L, Schäfer W, Kunkel R, Wendland F, Roehm H, Elbracht J, 2012. Klimawandel und Bodenwasserhaushalt. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG). GeoBerichte (20). https://doi.org/10.48476/GEOBER_20_2012
- _ Oberholzer H-R, Scheid S, 2007. Bodenmikrobiologische Kennwerte. Erfassung des Zustands landwirtschaftlicher Böden im NABO-Referenzmessnetz anhand biologischer Parameter (NABObio). Umwelt-Wissen, 0723, 76.
- _ Presler J, Bagnoud N, 2013. Generelles Projekt der 3. Rhonekorrektur. Grundlagenstudie Bodenkunde. Technischer Bericht.
- _ PRIF, 2017. Principes de la fertilisation des cultures agricoles en Suisse (PRIF). Guillaume, T., Liebisch F., Carlen C. (Dir.). www.prif.ch
- _ Rehbein K, Sprecher C, Keller A, 2019. Übersicht Stand Bodenkartierung in der Schweiz: Ergänzung des Bodenkartierungskataloges Schweiz um Bodeninformationen aus Meliorationsprojekten.
- _ Stumpf F, Behrens T, Schmidt K, Keller A, 2023a. Vegetation und Landnutzung – Karten zur Vegetation und Landnutzung in Raum und Zeit aus der Fernerkundung zur Unterstützung der Konzeptphase und Feldarbeiten in Bodenkartierungen. BFH-HAFL, Zollikofen. Report No. 5.
- _ Stumpf F, Behrens T, Schmidt K, Keller A, 2023b. Hinweiskarten für Bodeneigenschaften Landesweit modellierte Karten für Bodeneigenschaften für drei Tiefenstufen. https://ccsols.ch/wp-content/uploads/2023/11/Hinweiskarten_Bodeneigenschaften_CH_final.pdf
- _ Stumpf F, Behrens T, Schmidt K, Keller A, 2024. Exploiting Soil and Remote Sensing Data Archives for 3D Mapping of Multiple Soil Properties at the Swiss National Scale. Remote Sensing, 16 (15), 2712. <https://doi.org/10.3390/rs16152712>
- _ Tanner S, Nussbaum M, Büeler F, Kellermann L, Oechslin S, Tuchschnid R, Burgos S. Erstellen und Anwenden von Bodenkarten im Kanton Bern.
- _ VDLUFA, 2000. Standpunkt des VDLUFA. Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker- und Grünlandböden.
- _ Vögeli B, Bossard M, Gimmi U, Gsponer R, Raster J, Schiebli R, Pezzatti M, Beltrami R, Wanner C, Wiedmer U, et al., 2022. Bezeichnung und Sicherung der prioritären Potenzialflächen für Feuchtgebiete gemäss Naturschutz-Gesamtkonzept: Technischer Bericht, Fassung vom 9. Dezember 2022.
- _ Weidmann M, 1996. Feuille 1204 Romont. – Atlas géologique Suisse 1:25 000, carte 99.

13. Annexe A

L'annexe A contient des compléments généraux concernant le déroulement de la cartographie à Prez. Elle est disponible sur le [site web du CCSols](#).

- _ A 1. Préparation des données environnementales et des géodonnées**
- _ A 1.1 Cartes historiques
- _ A 1.2 Cultures principales
- _ A 1.3 Analyses du relief
- _ A 1.4 Végétation et utilisation du sol
- _ A 1.5 Informations spectrales sur les sols
- _ A 1.6 Cartes indicatives de propriétés des sols
- _ A 2. Phase conceptuelle**
- _ A 2.1 Concept d'échantillonnage
- _ A 2.2 Phase de prospection
- _ A 3. Travail de Terrain**
- _ A 3.1 Aperçu du nombre de relevés réalisés lors des travaux de terrain
- _ A 3.2 Masques Soildat
- _ A 3.2.1 Masque OP3 H0
- _ A 3.2.2 Masque OP3 H1 & H1.1
- _ A 3.2.3 Masque OP3 H2 LIGHT
- _ A 3.2.4 Masque OP3 H2 Full
- _ A 3.3 Contrôle qualité des relevés pédologiques
- _ A 3.4 Résultats des descriptions des H1
- _ A 3.4.1 Fiche descriptive du profil P02: Gley – Sol brun
- _ A 3.4.1.1 Fiche descriptive du profil P03: Sol brun
- _ A 3.4.1.2 Fiche descriptive du profil P04: Sol brun
- _ A 3.4.1.3 Fiche descriptive du profil P05: Regosol
- _ A 3.4.1.4 Fiche descriptive du profil P06: Braunerde
- _ A 3.4.1.5 Fiche descriptive du profil P07: Saure Braunerde
- _ A 3.4.1.6 Fiche descriptive du profil P08: Regosol
- _ A 3.4.1.7 Fiche descriptive du profil P10: Braunerde
- _ A 3.5 Miniprofils (niveau hiérarchique H1.1)
- _ A 3.6 Sondages pédologiques (niveau hiérarchique H2)
- _ A 3.6.1 Test sur le terrain du véhicule...
- _ A 3.6.2 Résultats de l'évaluation statistique des sondages H2 (n = 330)
- _ A 3.7 Piézomètre
- _ A 3.8 Analyse en laboratoire
- _ A 3.8.1 Analyses des propriétés chimiques des sols
- _ A 3.8.2 Analyses des propriétés physiques des sols
- _ A 4. Outil de terrain**

14. Annexe B (en allemand)

L'annexe B contient le protocole de calibration (en allemand). Elle est disponible sur le [site web du CCSols](#).

- _ B 1. **Basisinformation Relief**
- _ B 2. **Redundante Untertypen**
- _ B 3. **Verwendung Feld «PNG-Schätzung »**
- _ B 4. **Vernässung**
- _ B 5. **Organische Böden**
- _ B 6. **Ausgangsmaterial**
- _ B 7. **Lithologischer Wechsel**
- _ B 8. **Definition B-Horizont**
- _ B 9. **Zuordnung zu Bodenbereich**
- _ B 10. **Bodentyp Braunerde**
- _ B 11. **(Halb-)Moor überschüttet/degradiert**
- _ B 12. **Technogenes Material**
- _ B 13. **Archäologie und anthropogenes Material**
- _ B 14. **Trockenheitsbedingte Einschränkungen während der Profilbeschreibung**
- _ B 15. **Take-Home-Messages: Vergleich zwischen Labor- und Feldschätzwerte**

15. Annexe C (en allemand)

L'annexe C contient les cartes de propriétés des sols, les cartes des caractéristiques des sols et les cartes thématiques. Elle est disponible sur le [site web du CCSols](#).

- **C 1. Cartes de propriétés des sols**
- C 1.1 Teneur en argile
- C 1.2 Teneur en limon
- C 1.3 Teneur en sable
- C 1.4 Teneur en matières organiques
- C 1.5 Teneur en carbonates
- C 1.6 pH
- **C 2. Cartes des caractéristiques des sols**
- C 2.1 Capacité d'échange cationique effective
- C 2.2 Groupes de régime hydrique
- C 2.3 Limite des carbonates
- C 2.4 Profondeur jusqu'à l'horizon «gg»
- C 2.5 Profondeur jusqu'à l'horizon «r»
- C 2.6 Profondeur utile
- C 2.7 Réserve utile
- C 2.8 Types de sol
- C 2.9 Sous-types I, G, R
- **C 3. Cartes thématiques**
- C 3.1 Agriculture
- C 3.1.1 Potentiel de fourniture de l'azote (PRIF 2017)
- C 3.1.2 Facteur de correction pédologique pour la fertilisation azotée normalisée (PRIF 2017)
- C 3.1.3 Capacité de stockage des nutriments (Lehmann et al. 2013)
- C 3.1.4 Besoins en chaulage (VDLUFA 2000)
- C 3.2 Aménagement du territoire
- C 3.2.1 Aptitude agricole CA 2023 (version d'essai, Greiner et al. 2025)
- C 3.2.2 Indice de qualité des sols (Angelini et al. 2023)
- C 3.2.3 Indice de qualité des sols (Engel et Stadtmann 2020)
- C 3.2.4 Indice de qualité des sols (Hilbert et al. 2021)
- C 3.2.5 Indice de qualité des sols (Knoll et al. 2010)
- C 3.2.6 Indice de qualité des sols (Miller et al. 2022)
- C 3.3 Protection contre les inondations
- C 3.3.1 Fonction de régulation du régime hydrique (Danner et al. 2003)
- C 3.4 Protection de la nature
- C 3.4.1 Fonction d'habitat pour les microorganismes (Oberholzer et Scheid 2007)
- C 3.4.2 Potentiel de sites humides (Vögeli et al. 2022)
- C 3.4.3 Potentiel de sites secs (Lienhard et Merkel 2002)
- C 3.5 Protection des eaux et eaux souterraines
- C 3.5.1 Capacité à lier et à dégrader les polluants (Bechler et Toth 2010)
- C 3.5.2 Capacité à lier les métaux lourds (DVWK 1988)
- C 3.5.3 Rétention des nutriments face aux pertes par infiltration et par ruissellement (Jäggli et al. 1998)
- C 3.6 Protection du climat
- C 3.6.1 Potentiel d'enrichissement en carbone (Johannes et al. 2017)
- C 3.6.2 Stockage de carbone
- C 3.7 Sécheresse
- C 3.7.1 Besoin en irrigation (Müller et al. 2012)
- C 3.7.2 Aptitude à l'irrigation (Presler et Bagnoud 2013)
- **C 4. Table des illustrations**
- **C 5. Bibliographie**

Centre de compétences sur les sols

BFH-HAFL

Länggasse 85_3052 Zollikofen

info@ccsols.ch _ ccsols.ch