



## Nouvelles méthodes élaborées pour la carto- graphie des sols – Projet Chamblieux-Bertigny

**Rapport du CCSols Nr. 9 (KOBO-Bericht Nr. 9)**

Janvier 2024

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

## Impressum

**Auteurs et autrices** : Emilie Carrera, Urs Grob, Marie Hertzog, Dominik Zahner, Lucie Greiner, Felix Stumpf, Gunnar Petter, Marion Wallner, Maxime Siegenthaler, Baptiste Englert, Sandra Racine, Tobias Sprafke, Thorsten Behrens, Armin Keller.

**Année de publication** : 2024

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

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

**Recommandation d'utilisation de la citation**: E. Carrera, U. Grob, M. Hertzog, D. Zahner, L. Greiner, F. Stumpf, G. Petter, M. Wallner, M. Siegenthaler, B. Englert, S. Racine, T. Sprafke, T. Behrens, A. Keller. (2023). Nouvelles méthodes élaborées pour la cartographie des sols – Projet Chamblieux-Bertigny. Rapport du CCSols Nr. 9, BFH-HAFL, CH-3052 Zollikofen-Berne, disponible sur [www.ccsols.ch](http://www.ccsols.ch)

**Hinweis für deutschsprachige Personen** : Dieser Bericht erscheint ausschliesslich in Französisch. Eine Zusammenfassung der Arbeiten in deutscher Sprache finden Sie unter folgendem Link: [Kartierprojekt Fribourg-Chamblieux](#)

**Copyright** : selon le symbole de la licence Creative Commons ci-dessous, la reproduction non-commerciale est encouragée, mais seulement avec la mention de la source et l'envoi d'un exemplaire de la publication à l'éditeur. La transmission est régie par les mêmes conditions.



## Avant-propos



Pour une utilisation durable des sols, il est nécessaire de déterminer leurs propriétés et leur qualité en surface et en profondeur à l'aide de cartographies des sols. La contribution du Centre de compétences sur les sols à cette cause environnementale est le développement, l'optimisation et le test de différentes nouvelles méthodes et techniques permettant d'améliorer les cartographies des sols tant en termes de rentabilité, de quantité que de qualité. Afin de satisfaire cet objectif, le CCSols réalise, en collaboration avec les cantons et le secteur privé, des projets dans différentes régions de Suisse. Ainsi, grâce à ceux-ci, de nouvelles méthodes seront progressivement intégrées dans la cartographie des sols, aussi bien agricoles que forestiers.



Le présent rapport technique résume la démarche et les principaux résultats du projet réalisé dans le secteur de Chamblieux-Bertigny dans le canton de Fribourg. Celui-ci s'adresse à un large panel de spécialistes et documente, en s'appuyant sur le « Rapport CCSols n° 3 » (Nouvelles méthodes dans la cartographie des sols - projet pilote Diemerswil), les différents développements techniques et méthodologiques de la manière la plus accessible possible. Pour les méthodes scientifiques de base, nous vous proposons de lire la littérature spécialisée correspondante.

Nous sommes très heureux d'avoir pu réaliser ce projet dans le secteur de Chamblieux-Bertigny. Grâce aux conditions météorologiques favorables, les campagnes de terrain ont pu être terminées comme prévu à la fin de l'été 2021. Le premier projet pilote du CCSols a démarré peu après celui-ci à Diemerswil (BE). La réalisation de ce projet ambitieux a entraîné des retards dans les évaluations et la rédaction du présent rapport. Nous remercions le canton, les communes et les exploitants locaux pour leur accord et leur soutien sans lesquels ce projet n'aurait pas pu avoir lieu. Nous remercions également tout particulièrement 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) de la Haute école spécialisée bernoise (BFH). Toute l'équipe du CCSols tient aussi à remercier chaleureusement les participants au projet pour leur soutien et leur collaboration.

Urs Grob et Emilie Carrera  
*Directeur adjoint et collaboratrice scientifique du Centre de compétences sur les sols*

## Résumé

Le Centre de compétences sur les sols mène des projets dans différentes régions de Suisse, en collaboration avec les cantons, les offices fédéraux et les bureaux d'ingénieurs afin de tester de nouvelles méthodes de cartographie des sols et de les optimiser pour la pratique sur le terrain. Le présent rapport résume la démarche méthodologique et les principaux résultats du projet qui s'est déroulé à Chamblieux-Bertigny. Ce projet a été mené en 2021 sur environ 54 ha de terres agricoles situées sur les territoires communaux de Fribourg, Givisiez, Granges-Paccot et Villars-sur-Glâne (canton de Fribourg). Les objectifs principaux du CCSols pour ce projet étaient l'utilisation et l'intégration des nouvelles méthodes et techniques dans le déroulement d'une cartographie des sols :

- Utilisation d'un nouveau système de véhicule de sondage (réalisation de carottes permettant la description des sols et l'échantillonnage pour la détermination de la masse volumique apparente)
- Utilisation de la spectroscopie NIR et MIR en laboratoire
- Mesure des propriétés physiques des sols
- Elaboration d'un concept d'échantillonnage et régionalisation à haute résolution spatiale des propriétés et des caractéristiques des sols (cartes matricielles (raster) et polygonales)
- Gestion des données grâce à l'application SoilDat et des échantillons grâce à des codes QR.
- Organisation du projet et de la communication avec les services cantonaux et communaux ainsi qu'avec les particuliers
- Formation des nouveaux collaborateurs de l'équipe du CCSols

Ce travail s'inscrit un projet cantonal de plus grande ampleur de recouvrement de l'autoroute N12 et d'aménagement de la zone de Chamblieux-Bertigny. Dans ce contexte, le canton de Fribourg avait besoin d'outils permettant de communiquer facilement des informations pédologiques aux différents acteurs afin que les fonctions des sols soient le moins possible diminuées lors de la réalisation du projet. Les acteurs du projet proviennent de domaines très différents tels que l'aménagement du territoire, l'architecture ou encore la politique et ont besoin de cartes thématiques pour correctement intégrer les sols et leur préservation dans leurs décisions. C'est pour cette raison que le CCSols a ajouté l'objectif suivant à sa liste des tâches :

- Réalisation de cartes thématiques tenant compte des besoins des utilisateurs et incluant des cartes de prise en compte de la qualité des sols dans l'aménagement d'un centre urbain

(couverture de l'autoroute et planification de zones de développement urbaines durables)

De nombreuses données environnementales et géographiques préexistantes ont d'abord été préparées et traitées avant le début du projet. Celles-ci donnent des indications préalables sur les processus pédologiques pertinents et les caractéristiques des sols dans la région. Des analyses temporelles et multi-échelles de la végétation et de l'utilisation du sol ont été réalisées sur la base de données de télédétection. De plus, des analyses multi-échelles du relief ont été effectuées et des caractéristiques typiques de celui-ci telles que la pente, la courbure du terrain, l'accumulation de l'eau et l'indice d'humidité topographique ont été calculées. Le choix des emplacements des relevés pédologiques et des points d'échantillonnage s'est fait sur la base du concept d'échantillonnage hiérarchique (H), optimisé à l'aide des données environnementales et géographiques, suivant :

- H1 : Emplacements des profils (n=5) avec description des sols et échantillonnage permettant l'estimation des propriétés pédologiques en laboratoire
- H2 : Emplacements des sondages avec description pédologique réalisés majoritairement à l'aide du nouveau véhicule de sondage (n=105)
- H3 : Emplacements des échantillonnages manuels (n=105) dédiés à l'analyse spectroscopique (NIR et MIR) dans le laboratoire
- H4 : Emplacements des sondages avec description pédologique et échantillonnage pour les propriétés physiques des sols en laboratoire réalisés à l'aide du véhicule de sondage (n=10).

Ces différents sites hiérarchisés ont été relevés/prélevés jusqu'à une profondeur maximale de 150 cm (H1), 120 cm (H2), et 60 cm (H3) et 120 cm (H4). Le véhicule de sondage utilisé pour la majorité des sites H2 et H4 se compose d'un Aebi TT75 (véhicule porteur) et d'un système de sondage développé avec la société GreenGround. Ce dernier est capable de prélever des carottes dans des cartouches « Humax » d'un diamètre de 5 cm ou 8 cm jusqu'à une profondeur de 1.2 mètre. Grâce à la maniabilité et au poids relativement léger du véhicule, les sondages ont pu être réalisés sans difficulté sur de nombreuses parcelles. La description pédologique des profils (H1) et des sondages (H2 et H4) s'est basée sur les attributs de la FAL24+. Des journées d'harmonisation ont été organisées afin d'assurer la qualité de la description pédologique des profils (H1) et des sondages (H2 et H4). La densité de points était d'environ de 4 sites par

hectare au total (sites avec description pédologique (H1, H2 et H4) et site d'échantillonnage (H3)).

Au total, 497 échantillons pédologiques ont été mesurés par spectroscopie NIR et MIR ; parmi ceux-ci, 94 échantillons pédologiques ont été sélectionnés et leurs propriétés de base ont été analysées avec les méthodes de référence (texture, pH, teneur en matière organique et en carbonates) par un laboratoire indépendant. Par la suite, les modèles des spectres NIR et MIR ont été étalonnés à l'aide de ces résultats (94 analyses de référence). Le coefficient de détermination  $R^2$  se situait dans une fourchette de 0.6 à 0.7 pour les modèles. Sur la base de ces derniers, les propriétés des sols ont été prédites pour les 403 autres échantillons pédologiques. Ainsi, les propriétés des sols à différentes profondeurs étaient disponibles pour quatre sites par hectare.

En supplément des propriétés chimiques, les propriétés physiques des sols ont été mesurées sur des sites sélectionnés. La masse volumique apparente a été déterminée à l'aide du véhicule de sondage et de ses cartouches permettant l'échantillonnage volumétrique pour les sites H4 à des profondeurs variables selon les horizons pédologiques décrits. De plus, des petits cylindres (100 cm<sup>3</sup>) ont été prélevés sur tous les profils (H1) pour les mesures de la marmite à pression (courbes pF) et des cylindres plus grands (250 cm<sup>3</sup>) ont été pris sur trois profils pour la détermination de la rétention en eau des sols.

Pour tous les sites, les métadonnées, les données relatives au site et au sol ont été saisies numériquement directement sur le terrain à l'aide de l'application web SoilDat. Afin d'améliorer la logistique, une étiquette spécifique munie d'un code QR a été développée pour les échantillons de terrain et de laboratoire. Toutes les données pédologiques, les attributs et leurs codes sont basés sur le modèle de données NABODAT et seront importés dans le Système national d'information pédologique NABODAT et mis à disposition du canton de Fribourg après la publication de ce rapport.

Dans la zone du projet de Chamblieux-Bertigny, les sols ont été, à de multiples reprises, remaniés, transformés et déplacés pour le besoin de la construction des différentes routes, autoroutes, bâtiments commerciaux et habitations. C'est pour cette raison que les remblais sont les types de sol relativement fréquents. Néanmoins, d'un point de vue pédologique, le sol brun est le type de sol dominant dans la région. Les sols bruns lessivés et les sols bruns acides sont très largement moins

représentés puisqu'au total, ils ne sont que 6 sur 120 sols décrits.

Les cartes de base pour les propriétés des sols et pour les caractéristiques pédologiques ont été produites sur la base de modèles mathématiques et statistiques. Pour la création des cartes, des méthodes issues du domaine de l'apprentissage automatique (ML) ont été utilisées avec à chaque fois une combinaison de différents procédés non linéaires (apprentissage ensembliste). Le résultat est une régionalisation des propriétés des sols en format raster pour différents niveaux de profondeur. Selon les besoins des utilisateurs, des niveaux de profondeur variables peuvent être choisis pour ces cartes de base. Des cartes munies de polygones ont été établies pour les paramètres pédologiques tels que la profondeur utile et le niveau d'engorgement.

Sur la base des cartes de base et d'autres données environnementales et géographiques, un ensemble de cartes thématiques centré sur les besoins des acteurs du projet cantonal a été sélectionné pour le périmètre de Chamblieux-Bertigny. Grâce à une extension progressive de l'offre de cartes thématiques au fil des différents projets du CCSols, le cercle des utilisateurs des informations pédologiques issues de la cartographie des sols va être élargi et les multiples fonctions des sols vont être mises à disposition d'un grand nombre de personnes. Pour ce projet, les cartes thématiques demandées étaient :

- le stockage du carbone organique dans les sols et le potentiel d'enrichissement de ceux-ci
- la fonction de régulation du climat
- la capacité de rétention en eau

Des cartes thématiques ont été présentées aux différents acteurs du projet venant de divers horizons lors d'ateliers organisés par le canton. Les différents corps de métiers ont ainsi pu débattre de l'utilisation de telles cartes dans le projet d'aménagement du territoire.

Le présent rapport montre de manière indubitable le potentiel d'intégration de nouvelles méthodes dans la cartographie des sols et le besoin d'informations pédologiques de qualité de la part des différents utilisateurs. Dans le cadre d'autres projets pilotes du CCSols dans différentes régions de Suisse, le développement de la cartographie des sols va être poursuivi en collaboration avec tous les acteurs publics et privés.

# Zusammenfassung

Das Kompetenzzentrum Boden führt gemeinsam mit Kantonen, Bundesämtern und Ingenieurbüros Projekte in verschiedenen Regionen der Schweiz durch, um neue Methoden für die Bodenkartierung zu testen und für die Praxis optimieren zu können. Der vorliegende Bericht fasst das methodische Vorgehen und die wichtigsten Ergebnisse des Projekts in Chamblieux-Bertigny zusammen. Das Projekt wurde 2021 auf rund 54 ha landwirtschaftlich Fläche in den Gemeindegebieten von Freiburg, Givisiez, Granges-Paccot und Villars-sur-Glâne (Kanton Freiburg) durchgeführt. Die Hauptziele des Projekts waren der Einsatz und die Integration folgender neuer Methoden und Techniken in den Ablauf einer Bodenkartierung:

- Einsatz eines neuen Bohrsystems mit Trägerfahrzeug (Herstellung von Bohrkernen, die eine Bodenbeschreibung und Probenahmen zur Bestimmung des Raumgewichts ermöglichen)
- Einsatz von NIR- und MIR-Spektroskopie im Labor
- Messung physikalischer Bodeneigenschaften
- Erstellung eines Beprobungskonzepts und räumlich hochauflösende Regionalisierung von Bodeneigenschaften und -kennwerten (Raster- und Polygonkarten)
- Datenverwaltung über die Soildat-Applikation und Probenverwaltung über QR-Codes
- Projektorganisation und Kommunikation mit kantonalen und kommunalen Stellen sowie mit Privatpersonen.
- Ausbildung neue Mitarbeiter im Team KOBO.

Das Projekt war zudem Teil eines grösseren kantonalen Projekts zur Überdeckung der Autobahn N12 und zur Entwicklung des Gebiets Chamblieux-Bertigny. In diesem Zusammenhang benötigte der Kanton Freiburg Werkzeuge, mit denen die Bodeninformationen leicht an die verschiedenen Akteure weitergegeben werden können, damit die Bodenfunktionen bei der Umsetzung des Projekts so wenig wie möglich beeinträchtigt werden. Die Projektbeteiligten kommen aus sehr unterschiedlichen Bereichen wie Raumplanung, Architektur oder Politik und benötigen thematische Karten, um den Boden und seine Erhaltung richtig in ihre Entscheidungen einbeziehen zu können. Aus diesem Grund hat das CCSols das folgende Ziel verfolgt:

- Erstellung von Themenkarten, die die Bedürfnisse der Nutzer berücksichtigen und Karten zur Berücksichtigung der

Bodenqualität bei der Planung eines urbanen Zentrums (Überdeckung der Autobahn und Planung von nachhaltigen Stadtentwicklungsgebieten) beinhalten

Für das Projektgebiet wurden zunächst zahlreiche Umwelt- und Geodaten aufbereitet und prozessiert. Diese geben vorab Hinweise auf relevante bodenbildende Prozesse und Ausprägungen von Bodeneigenschaften im Gebiet in Bezug auf die bodenbildenden Faktoren Klima, Landnutzung, Terrain und Geologie. Basierend auf Fernerkundungsdaten wurden zeitliche und multiskalige Vegetations- und Landnutzungsanalysen abgeleitet. Zudem wurden multiskalige Reliefanalysen durchgeführt und typische Relief-eigenschaften wie beispielsweise Hangneigung, Krümmung, Fließakkumulation und Topographischer Feuchteindex berechnet. Die Auswahl der Standorte für die bodenkundliche Ansprache und der Probenahmepunkte erfolgte anhand des folgenden hierarchischen Beprobungskonzepts (H), das auf Basis der aufbereiteten Umwelt- und Geodaten optimiert wurde:

- H1: Standorte mit Bodenprofilen (n=5) zur pedologischen Ansprache und Probenahmen, die eine Bestimmung der Bodeneigenschaften im Labor ermöglichen,
- H2: Standorte mit Bohrungen für die pedologische Ansprache, hauptsächlich mit dem neuen Bohrfahrzeug durchgeführt (n=105)
- H3: Standorte mit manuellen Beprobungen (n=105) für spektroskopische Analysen (NIR und MIR) im Labor.
- H4: Standorte mit Bohrungen für die pedologische Ansprache und Probenahme für physikalische Bodeneigenschaften im Labor (n=10), die mit dem Bohrfahrzeug durchgeführt wurden.

Für diese Stufen wurden Bodenproben bis zu einer maximalen Tiefe von 150 cm (H1), 120 cm (H2), 60 cm (H3) und 120 cm entnommen. Das Bohrfahrzeug wurde für die meisten der Standorte H2 und H4 verwendet. Es besteht aus einem Aebi TT75 (Trägerfahrzeug) und einem mit der Fa. GreenGround entwickelten Bohrsystem. Dieser ist in der Lage, Humax-Bohrkerne mit einem Durchmesser von 5 cm oder 8 cm bis zu einer Tiefe von 1.2 Metern zu entnehmen. Dank der Wendigkeit und des relativ leichten Gewichts des Aebi-Trägerfahrzeugs konnten für viele Parzellen die Bohrungen ohne Probleme durchgeführt werden. Die pedologische Beschreibung der Profile (H1) und der Bohrungen (H2 und H4) basierte auf den Attributen der FAL24+. Um die Qualität der bodenkundlichen Beschreibung der

Profile (H1) und der Sondierungen (H2 und H4) zu gewährleisten, wurden Eichtage durchgeführt. Die Punktdichte betrug insgesamt etwa 4 Standorte pro Hektare (Standorte mit pedologischer Beschreibung, H1, H2 und H4, als auch Standorte der spektroskopisch-praktischen Probenahmen H3).

Insgesamt wurden 497 Bodenproben mit NIR- und MIR-Spektroskopie gemessen, von denen 94 Bodenproben ausgewählt und ihre Eigenschaften mit Referenzmethoden (Textur, pH, organische Substanz und Kalk) von einem unabhängigen Labor analysiert wurden. Anschliessend wurden die Modelle der NIR- und MIR-Spektren mit Hilfe dieser Ergebnisse kalibriert ( $n = 94$  Referenzanalysen). Das Bestimmtheitsmass  $R^2$  lag zwischen 0.6 und 0.7 für die Modelle. Auf der Grundlage dieser Modelle wurden die Bodeneigenschaften für die übrigen 403 Bodenproben vorhergesagt. Auf diese Weise waren die Bodeneigenschaften in verschiedenen Tiefen für vier Standorte pro Hektar verfügbar.

Neben chemischen wurden auch bodenphysikalische Bodeneigenschaften von ausgewählten Standorten gemessen. Das Raumgewicht wurde mit Hilfe des Bohrfahrzeugs und der volumenbezogenen Probenahmetechnik (Hülsen) für Horizonte H4-Standorten aus variabler Tiefe gemäss den Vorgaben der pedologischen Ansprache bestimmt. Zusätzlich wurden an allen Profilen jeweils Horizonte mit kleinen Zylindern ( $100 \text{ cm}^3$ ) für Drucktopfmessungen (pF-Kurven) sowie an drei Profilen grössere Zylinder ( $250 \text{ cm}^3$ ) für die Bestimmung des Wasserretentionsverhaltens der Böden entnommen.

Für alle Standorte wurden die Metadaten, Standort- und Bodendaten direkt im Feld mit der Web-Applikation SoilDat digital erfasst. Für die Probenlogistik wurde eine Kodierung für die Beschriftung der Feld- und Laborproben mit QR-Codes entwickelt. Alle erhobenen Bodendaten, Attribute und deren Codierung basieren auf dem NABODAT-Datenmodell und werden nach der Publikation dieses Berichts in das Bodeninformationssystem NABODAT importiert und dem Kanton Fribourg zur Verfügung gestellt.

Innerhalb des Projektgebiets von Chamblieux-Bertigny wurde der Boden mehrmals umgeschichtet, verändert und verschoben, um Strassen, Autobahnen, Geschäfts- und Wohnhäuser zu bauen. Aus diesem Grund kommen Auffüllungen relativ häufig vor. Aus pedologischer Sicht

ist die Braunerde der vorherrschende Bodentyp im Gebiet. Parabraunerde und saure Braunerde sind mit insgesamt nur 6 von 120 beschriebenen Böden deutlich weniger vertreten.

Die Grundlagenkarten für Bodeneigenschaften und für die pedologischen Kennwerte wurden auf Basis von mathematisch-statistischen Modellen erzeugt. Für die Kartenerstellung wurden Methoden aus dem Bereich des maschinellen Lernens (ML) eingesetzt, wobei jeweils eine Kombination aus unterschiedlichen nichtlinearen Verfahren angewendet wurde (Ensemble-Verfahren). Im Ergebnis liegen regionalisierte Bodeneigenschaften im Rasterformat für unterschiedliche Tiefenstufen vor. Je nach Bedürfnis der Nutzer:innen können variable Tiefenstufen für diese Grundlagenkarten gewählt werden. Polygonkarten wurden für die pedologischen Kenngrössen wie pflanzennutzbare Gründigkeit, Bodentyp und Vernässungsart erstellt.

Auf Basis der Grundlagenkarten und weiteren Umwelt- und Geodaten wurde für den Perimeter Chamblieux-Bertigny ein Set an Themenkarten in Bezug zur Multifunktionalität der Böden erstellt. Mit einem schrittweisen Ausbau des Angebots an Themenkarten soll zukünftig der Nutzerkreis von Bodeninformationen aus Bodenkartierungen erweitert, und sollen die vielfältigen Bodenfunktionen für einen breiten Nutzerkreis verfügbar gemacht werden. Das erste Set umfasst folgende Themenkarten:

- der Kohlenstoffvorrat und das Potenzial zur Kohlenstoffanreicherung der Böden
- der Kühlungsfunktion
- des Wasserspeichervermögens

Im Rahmen von Workshops, die vom Kanton organisiert wurden, wurden den verschiedenen Projektbeteiligten aus unterschiedlichen Bereichen thematische Karten vorgestellt. Die verschiedenen Nutzergruppen hatten so die Möglichkeit, die Verwendung solcher Karten im Raumplanungsprojekt zu diskutieren.

Der vorliegende Bericht zeigt eindrücklich das Potenzial für die Integration neuer Methoden in der Bodenkartierung auf. Im Rahmen von weiteren KOBO-Pilotprojekten in verschiedenen Regionen der Schweiz soll die Weiterentwicklung der Bodenkartierung in Zusammenarbeit mit allen Akteur:innen weiter vorangetrieben werden.

# Table des matières

1	Introduction et objectifs	9
1.1	Contexte et genèse du projet	9
1.2	Aperçu du déroulement de la cartographie des sols	11
1.3	Préparation et organisation du projet	13
2	Description du site	14
3	Données environnementales et géodonnées	17
4	Phase conceptuelle	18
4.1	Adaptation du périmètre du projet	18
4.2	Concept d'échantillonnage	19
5	Campagne de terrain	21
5.1	Véhicule de sondage	21
5.2	Gestion des données	23
5.2.1	Codes QR	23
5.2.2	Soildat	23
5.3	Aperçu de l'étendue des relevés réalisés durant les campagnes de terrain	23
5.4	Profils (emplacements H1)	26
5.5	Sondages (emplacements H2)	27
5.6	Echantillonnage (emplacement H3)	28
5.7	Sondages (emplacement H4)	29
6	Analyses en laboratoire	30
6.1	Préparation des échantillons	30
6.2	Analyses des propriétés chimiques des sols	31
6.3	Analyses des propriétés physiques des sols	31
6.4	Spectroscopie en laboratoire	34
7	Spectroscopie et création de cartes	36
7.1	Cartes de propriétés des sols	37
7.1.1	Teneur en carbone organique	37
7.1.2	Teneur en argile (texture)	38
7.1.3	pH	38
8	Cartes thématiques	40
8.1	Méthode	40
8.1.1	Capacité de rétention en eau	40
8.1.2	Fonction de Régulation du climat	41
8.1.3	Epaisseurs de l'horizon Ah et B	41
8.1.4	Stockage du carbone organique et rapport carbone organique sur argile	41
8.2	Résultats	42
8.2.1	Capacité de rétention en eau	42
8.2.2	Fonction de régulation du climat	43
8.2.3	Epaisseur de l'horizon Ah et B	43
8.2.4	Stockage du carbone organique et rapport carbone organique sur argile	44
8.3	Perspectives	45
9	Conclusion et perspectives	46
10	Annexes	48
11	Tableaux	49
12	Figures	50
13	Liste des abréviations	52
14	Références	53

# 1 Introduction et objectifs

Une carte des sols peut être considérée comme un inventaire des propriétés pédologiques d'une région. Ces dernières sont, entre autres, obtenues dans le cadre de cartographies des sols grâce, notamment, à des sondages et à des profils verticaux allant jusqu'à une profondeur maximum d'environ 1 à 1.5 m. Lors des campagnes de terrain, des données pédologiques importantes, telles que la texture, la teneur en matière organique, la structure du sol et ses horizons, la profondeur, la pierrosité, les traces d'engorgement et le régime hydrique sont relevés. Lorsque celles-ci sont complétées par une description pédologique plus exhaustive et catégorisées grâce à la classification des sols, elles permettent, notamment, d'évaluer la qualité des sols, leurs fonctions en tant que milieu environnemental et leurs aptitudes à être utilisés pour différentes applications. Elles fournissent également des bases de décision dans les domaines suivants (Keller et al. 2018) :

- Agriculture et foresterie
- Aménagement du territoire et inventaire SDA
- Protection du climat et de l'environnement
- Protection de la biodiversité et de la nature
- Protection des eaux
- Dangers naturels et protection contre les crues
- Mise en œuvre de la législation sur la protection des sols et les projets de construction
- Recherche et sciences

## 1.1 Contexte et genèse du projet

Le secteur de Chamblieux-Bertigny regroupant les communes de Fribourg, Givisiez, Granges-Paccot et Villars-sur-Glâne est actuellement traversé par l'autoroute N12 qui génère des désagréments visuels et auditifs. Celui-ci occupe également une surface importante au cœur d'un secteur à fort développement et entraîne par conséquent une perte de revenu non négligeable. C'est pour ces différentes raisons que des discussions concernant la possibilité d'ériger des murs antibruit puis de recouvrir l'autoroute au niveau de Chamblieux ont commencé il y a plusieurs années. L'aboutissement des travaux est envisagé pour 2050-2060. Le périmètre total est d'environ 80 ha et comprend des parcelles en zones résidentielles, mixtes, d'intérêt général, industrielles et agricoles (dont des SDA) (Figure 1).

Afin que les sols soient pris en compte dans ce projet d'agglomération de grande ampleur, les autorités cantonales de la protection des sols ont contacté la fondation sanu durabilitas afin de réaliser une carte d'indice de qualité des sols (IQS). Ces dernières ainsi que les cartes thématiques et d'applications peuvent servir de base de décision dans le domaine de l'aménagement du territoire et ainsi permettre une meilleure gestion des différentes qualités de sols. C'est dans le but d'obtenir des données pédologiques fiables et des cartes thématiques et d'applications que le Service de l'environnement fribourgeois et la fondation sanu durabilitas ont pris contact avec le CCSols afin que celui-ci participe au projet. Après discussion, le périmètre total a alors été ajusté et réduit à 54 ha pour le présent projet. En effet, seules les surfaces agricoles y ont été considérées.



Figure 1 : Projet d'agglomération Chambloux-Bertigny. Le périmètre du projet est représenté en rouge.

Carte de fond : zone urbaine de Fribourg [online], 46°47'43"N 7°07'27"E, altitude 746 m, Google Earth pour Chrome, © Google 30/5/2023, URL : <http://www.google.com/earth>

L'objectif principal des projets du CCSols est le développement de nouvelles méthodes et techniques dans les différentes étapes de la cartographie des sols. Cela concerne notamment le travail sur le terrain, les analyses des propriétés des sols en laboratoire ou l'évaluation spatiale des données pédologiques relevées. Par exemple, un système de sondages monté sur un véhicule permet de réaliser plus rapidement des carottes de différents diamètres et à différentes profondeurs pour la description pédologique. Autre exemple, les méthodes spectroscopiques peuvent être utilisées en combinaison avec des méthodes analytiques classiques de laboratoire afin d'augmenter le niveau d'information des cartes pédologiques (Viscarra Rossel et al. 2022). L'intégration de mesures spectroscopiques dans la cartographie des sols réduit progressivement le nombre d'analyses de référence « classiques » en Laboratoire.

Les objectifs du CCSols pour ce projet ont été :

1. le test d'un nouveau système de sondage monté sur un véhicule permettant la réalisation de carottes destinées à la description pédologique,
2. l'intégration de nouvelles méthodes NIR et MIR en laboratoire,
3. le traitement et l'analyse des données à l'aide de méthodes mathématiques et statistiques permettant l'élaboration d'un concept d'échantillonnage, la calibration des données spectrales en utilisant des analyses de référence, l'évaluation spatiale des propriétés et caractéristiques des sols,
4. l'adaptation et l'optimisation des processus et des procédures de travail sur le terrain, y compris la logistique liée aux échantillons,
5. le développement de compétences professionnelles internes au CCSols en vue de la réalisation de projets pilotes (par exemple à Diemerswil BE, Lommis TG, etc.),
6. la création de cartes de base au format raster (cartes matricielles) et polygonal illustrant les propriétés et les caractéristiques pédologiques, ainsi que la création de cartes d'application pour différents groupes d'utilisateurs.

## 1.2 Aperçu du déroulement de la cartographie des sols

Le déroulement d'un projet de cartographie des sols se divise en principe en trois phases (Figure 2) : premièrement la préparation du projet et la phase de conception, deuxièmement la cartographie de terrain proprement dite et la création de cartes, et troisièmement l'évaluation élargie des données pédologiques relevées et la création de produits et cartes thématiques. La Figure 2 présente le déroulement d'une cartographie des sols de manière succincte. Des processus itératifs sont nécessaires à l'intérieur et entre chacune des six composantes. Ce chapitre explique brièvement, la mise en œuvre de ces composantes dans le projet de Chamblieux-Bertigny. Les différentes étapes partielles sont décrites en détail dans les chapitres suivants.

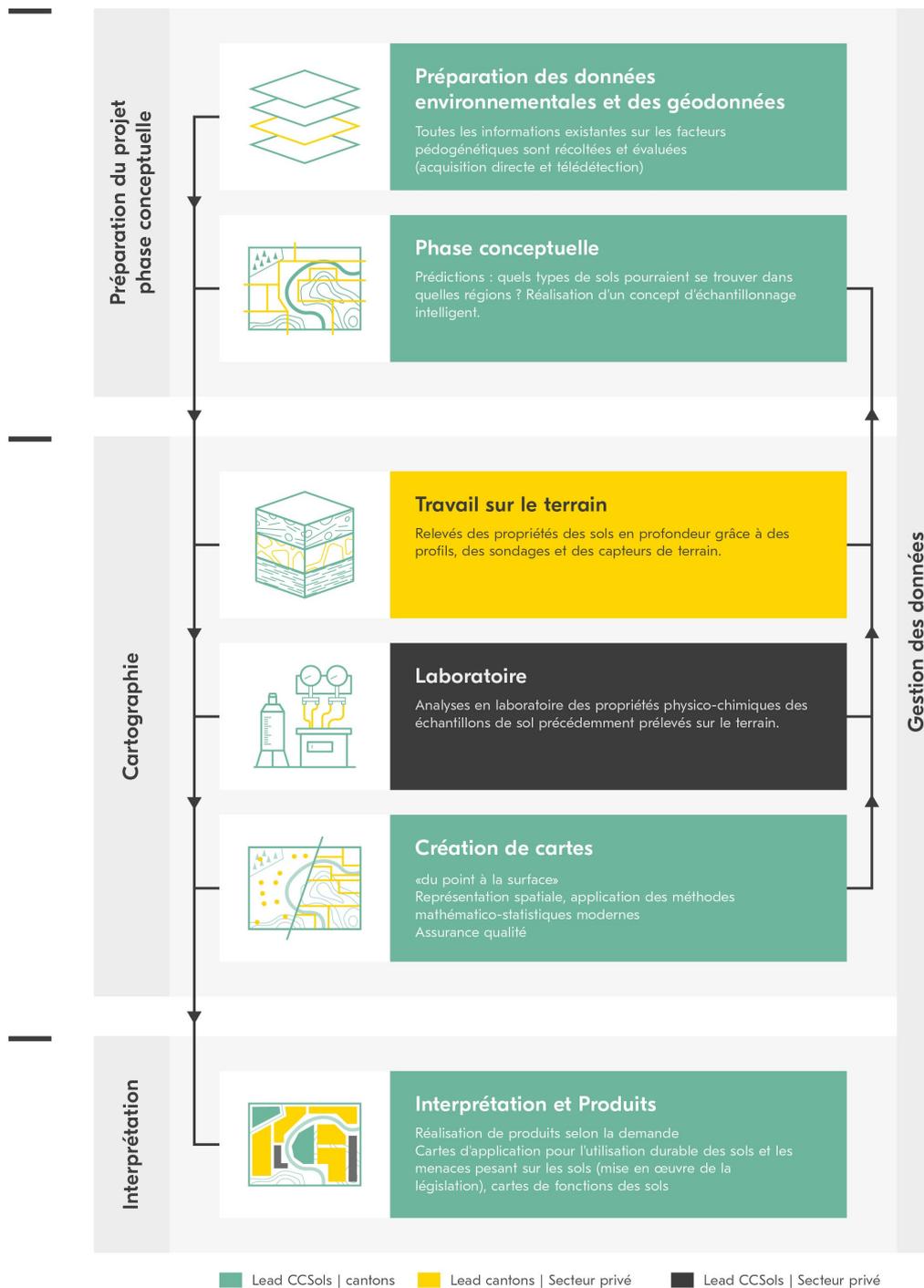


Figure 2 : Déroulement de la cartographie des sols en 3 phases : 1) préparation du projet et phase conceptuelle, 2) campagne de terrain et réalisation des cartes de bases, 3) Evaluation et produits.

Durant la phase conceptuelle, toutes les données environnementales et les géodonnées disponibles et pertinentes sont préparées pour l'ensemble du périmètre du projet. Elles servent à caractériser le plus précisément possible la zone d'étude avant la campagne de terrain. Ainsi, toutes les variables environnementales susceptibles de fournir des indications sur des facteurs pédologiques importants sont prises en compte. Il s'agit en particulier des données issues des cartes existantes, du modèle numérique de terrain et de la télédétection ainsi que les données sur l'utilisation actuelle et historique des sols (p. ex. les remblais). Les données cadastrales telles que les plans sur les conduites et les drainages sont également répertoriées.

Pour ce projet, un concept d'échantillonnage statistique situant les profils, les sondages et les points d'échantillonnage a été élaboré sur la base d'une sélection des variables mentionnées précédemment et d'une journée de prospection sur le terrain. Grâce à cette démarche, les zones pédologiquement importantes et l'ensemble de la variabilité pédologique de la zone ont été couverts. Le nombre d'emplacements des différents types de relevés est dépendant de l'investissement qu'il demande. Ainsi, le nombre de profils sera inférieur (environ 1/10ha) au nombre de sondages (environ 2/ha) et au nombre de points d'échantillonnage (environ 2/ha).

Durant la campagne de terrain, les sols ont été décrits en utilisant une description et une classification harmonisées des sols (Marugg et Schmidhauser 2020) et échantillonnés. Toutes les données ont été saisies numériquement dans l'application Soildat.

A la suite du travail sur le terrain, les échantillons prélevés et les données relevés ont été analysés. Les mesures en laboratoire comprenaient les mesures spectroscopiques des échantillons pédologiques dans le domaine de l'infrarouge proche (NIR) et moyen (MIR), les mesures de la masse volumique apparente, les mesures de la courbe de désorption ainsi que les analyses dites de référence et les mesures de la capacité d'échange cationique qui ont été réalisées par un laboratoire externe.

A l'aide de ces informations, des cartes de propriétés des sols pour différentes profondeurs et des cartes illustrant les caractéristiques de la zone (par ex., groupe de régime hydrique, type de sol) ont été réalisées. Elles couvrent l'ensemble de la surface étudiée et ont été établies à l'aide de méthodes issues du domaine de l'apprentissage automatique (machine learning). Dans le domaine de la pédologie, la modélisation quantitative (spectroscopique et spatiale) est décrite de manière généralisée par le terme Digital Soil Mapping (DSM) (Behrens et al. 2017a ; Behrens et al. 2018). Les modèles DSM se basent sur la corrélation entre les données pédologiques relevées sur le terrain et les variables environnementales préparées lors de la phase conceptuelle. Alors que les méthodes DSM pour la cartographie des sols sont de plus en plus utilisées au niveau international depuis environ deux décennies (Minasny 2016), il existe en Suisse relativement peu d'expériences sur la manière dont les méthodes DSM peuvent être mises en pratique et optimisées. Dans le cadre de différents projets de recherche, de premières expériences ont pu être recueillies en Suisse au cours des dernières années (Mosimann 2013 ; Nussbaum 2018 ; Oechslin 2022).

La dernière étape du déroulement de la cartographie des sols est l'évaluation. Elle consiste à élaborer, en collaboration avec les acteurs du projet, des cartes d'application variées et spécifiques aux utilisateurs. Il peut s'agir, par exemple, de cartes thématiques pour l'agriculture ou la sylviculture, mais aussi, selon les besoins, de cartes thématiques pour l'aménagement du territoire, la biodiversité, le climat ou la protection de la nature (infrastructure écologique). La mise à disposition des données pédologiques issues des profils et des sondages (données ponctuelles) accompagnées de leurs métadonnées (par ex. photos de profils, croquis originaux) ainsi que des cartes d'application, des cartes vectorielles (polygones) et des cartes matricielles régionalisées (données surfaciques) couvrent un large panel de besoins. Toutes les données pédologiques relevées sur le terrain sont à la fin des projets intégrées dans le Système national d'information sur les sols NABODAT.

### 1.3 Préparation et organisation du projet

La préparation de ce projet comprenait les jalons suivants :

- Elaboration de procédures pour les campagnes de terrain,
- Apprentissage du maniement du véhicule de sondage et élaboration de la procédure d'échantillonnage,
- Mobilisation des ressources en personnel pour la préparation des échantillons pédologiques en laboratoire,
- Communication avec la Direction de l'aménagement, de l'environnement et des constructions du canton de Fribourg ainsi qu'avec les exploitants et les propriétaires fonciers concernés par le projet.

Les différentes étapes illustrées dans la Figure 2 et le Tableau 1 ont commencé au printemps 2021 et se sont terminées en automne 2022. Quelques cartes ont été adaptées au printemps 2023 à la suite de discussions avec le canton. Le Tableau 1 compare de manière détaillée les rôles respectifs des différents acteurs dans la réalisation du projet Chamblieux-Bertigny. Parmi les principaux objectifs se trouvaient notamment la mise en service du nouveau véhicule de sondage et l'utilisation des outils numériques (Soildat) pour les campagnes de terrain. C'est pour cette raison, aucun bureau d'études n'a été impliqué dans ce projet. Le rôle « travail sur le terrain », en particulier, sera à l'avenir une tâche centrale confiée au secteur privé.

Tableau 1 : Rôles et réalisations clés dans l'organisation du projet Chamblieux-Bertigny.

Rôles	Réalisations
Conception	La conception générale du projet a été réalisée par le CCSols conformément au mandat qui lui a été confié par les Offices fédéraux et les cantons. De manière générale, les projets du CCSols sont planifiés en collaboration avec les cantons concernés et des zones appropriées sont sélectionnées.
Soutien au projet	La Direction de l'aménagement, de l'environnement et des constructions (DAEC) et le Service de l'environnement du canton de Fribourg (SEn) ainsi que les exploitants et propriétaires concernés ont soutenu le projet en approuvant toutes les phases du projet.
Travail sur le terrain	Pendant la campagne de terrain, l'équipe du CCSols s'est scindée en deux entités travaillant simultanément. Un groupe est resté auprès du véhicule de sondage et à réaliser les descriptions et un autre groupe a été chargé des échantillonnages. Pendant la campagne de terrain, qui a duré plusieurs semaines, cinq à six personnes étaient la plupart du temps présentes sur le terrain.
Laboratoire	Les analyses de laboratoire ont également été effectuées par le CCSols sur le site de la HAFL, à l'exception des analyses de référence qui ont été confiées à un laboratoire externe.
Evaluation	Après l'harmonisation et le contrôle qualité des données relevées, celles-ci ont été évaluées, calibrées, régionalisées et visualisées sous forme de cartes thématiques et d'application. Ces étapes ont également été réalisées par le CCSols.

## 2 Description du site

Le périmètre d'étude du présent projet compte 54 ha et s'est concentré exclusivement sur les surfaces agricoles. Les deux grandes surfaces agricoles, qui appartiennent à deux propriétaires différents, sont séparées par l'autoroute N12 (Figure 3). Les différentes infrastructures qui ont été construites dans ou aux abords de cette zone, telles que la route cantonale ou encore l'autoroute (Figure 4) ont sensiblement modifié les fonctions des sols. Par exemple, les sols de la partie nord proche de l'autoroute n'étaient plus en mesure d'assurer la percolation de l'eau lors de fortes précipitations ce qui rendait la zone difficilement praticable et cultivable. Les fonctions des sols de la partie sud semblaient, avant les investigations, avoir été plus préservées pour les travaux de construction (Figure 5).



Figure 3 : Vue de la zone d'étude prise depuis un champ de la partie sud du périmètre.



Figure 4 : Autoroute N12 séparant la zone d'étude.



Figure 5 : Champs de la partie sud du périmètre.

Dans un premier temps, les cartes préexistantes de la zone d'étude ont été examinées et les produits issus des données de la télédétection et du modèle numérique de terrain ont été réalisés. Les cartes générées sur la base de ces données environnementales et géographiques représentent des sources d'informations précieuses pour tout le projet aussi bien pour la phase conceptuelle et les campagnes de terrain que pour la modélisation spatiale des propriétés des sols. Ces cartes fournissent des indications sur les facteurs pédologiques pertinents pour une région donnée comme l'utilisation du sol, le type de terrain, la géologie ou encore le climat. Par ailleurs, dans l'optique d'une cartographie pédologique surfacique ces paramètres permettent une meilleure compréhension de la variabilité dans l'espace des propriétés et caractéristiques des sols.

La partie suivante décrit le site de Chamblieux-Bertigny en fonction des variables environnementales directement disponibles. Le chapitre 3, quant à lui, aborde le traitement et la transformation d'autres

données environnementales et géographiques. Toutes les variables géographiques et environnementales traitées ont été rassemblées dans un projet SIG et mises à la disposition des cartographes pendant la phase sur le terrain sous forme papier.

La carte géologique (Figure 6) donne les grandes lignes de la situation géologique à l'échelle 1:25'000. D'après celle-ci (feuille 98 Fribourg) et les données de forage du système cantonal d'information géographique, la zone d'étude est caractérisée majoritairement par des dépôts morainiques du dernier maximum glaciaire d'une épaisseur variable de 0 à 30 mètres environ. Ces sédiments sont caractérisés par des matériaux morainiques argileux, limoneux et sableux ( $q_{4m}$  moraine rhodanienne) avec une composition en gravier pouvant localement varier. En dessous des sédiments glaciaires et affleurants dans la partie sud du périmètre du projet, des couches molassiques plus anciennes nommées couches de la Singine se retrouvent sous une couverture quaternaire fine ( $m_2$ ). Il s'agit de molasses gréseuses gris-vert à granulométrie variable et localement conglomératique. L'Atlas géologique ne présente pas de formation superficielle quaternaire particulière (graviers de retrait, éboulis, dépôts torrentiels, etc.) cependant elle indique la présence d'un remblai artificiel de dimension significative dans la partie centrale du périmètre. Les cartes historiques disponibles sur swisstopo ont également montré que la zone d'étude avait mainte fois été remaniée sur une grande partie du périmètre.

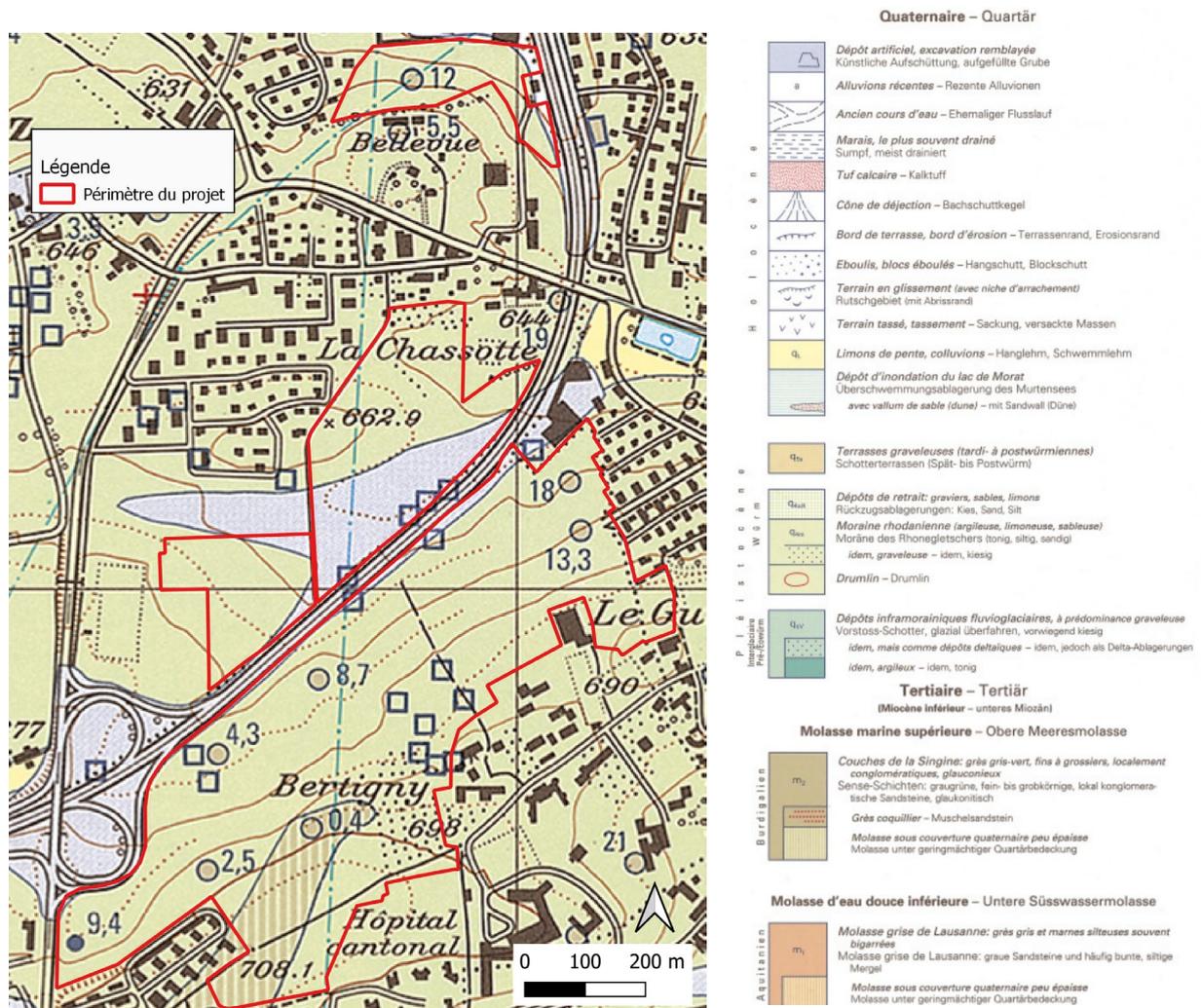


Figure 6 : Extrait de l'Atlas géologique de la Suisse 1:25000 (Office fédéral de topographie swisstopo). Le périmètre du projet est représenté en rouge.

L'analyse de terrain a permis d'illustrer différentes caractéristiques de celui-ci. Ci-dessous, la Figure 7 montre la répartition des classes de pente selon la FAL24+ dans la zone d'étude (Station fédérale de recherches en agroécologie et agriculture, Zurich-Reckenholz 1997 ; SSP 2010 ; Afu Solothurn 2020). La zone du projet de Chamblieux-Bertigny se situe en grande partie sur une pente de 0 à 15 %.

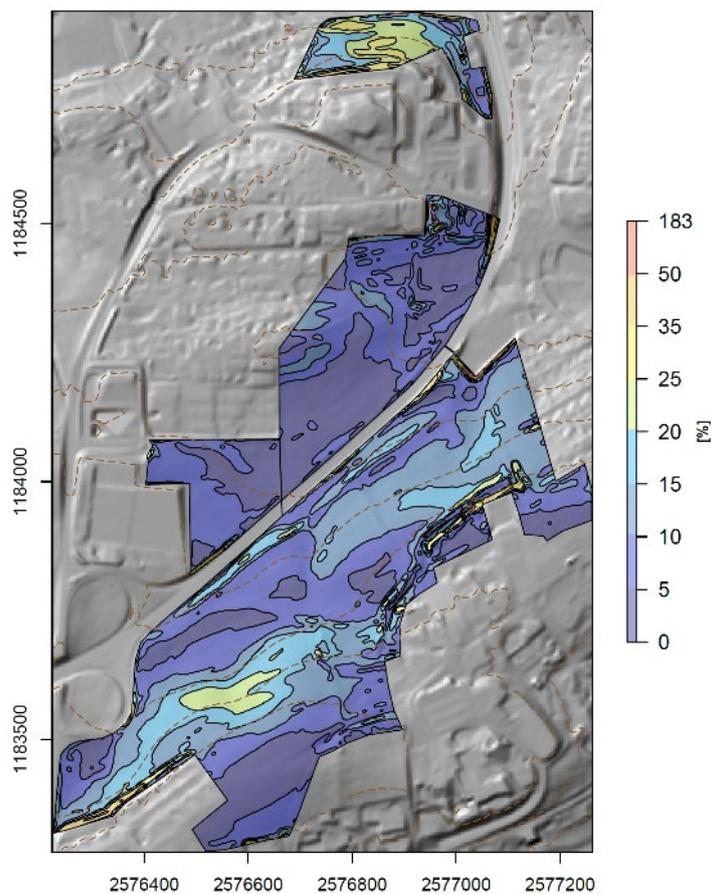


Figure 7 : Illustration de la pente classée selon l'échelle de la FAL24+.

### 3 Données environnementales et géodonnées

La modélisation spatiale nécessite un grand nombre de données environnementales et géographiques qui contiennent des informations sur les facteurs de formation des sols ou qui sont en corrélation spatiale avec eux. Ces données proviennent notamment de la télédétection. Parmi celles-ci se trouvent les cartes matricielles (raster) couvrant l'ensemble de la surface terrestre et portant sur les paramètres du relief, de la végétation et de l'utilisation du sol, ainsi que directement sur les données pédologiques (et plus précisément, sur les analyses multi-échelles du relief, de la dynamique multi-temporelles de l'utilisation du sol, de l'information spectrale spatiale de la surface du sol ou d'images satellites optimales ainsi que de modèles nationaux des propriétés des sols sur la base des données NABODAT, par exemple). Ces documents ont été et sont développés au CCSols et sont déjà partiellement disponibles en tant que services offerts (Stumpf et al. 2023; Behrens et al. 2023)<sup>1</sup>.

La base de données utilisée est d'une part le modèle numérique d'altitude swissALTI3D, qui est calculé sur la base de mesures Laser-Scan effectuées par avion (swisstopo 2021), et d'autre part les séries temporelles basées sur les satellites des missions Landsat depuis 1985 et des missions Sentinel depuis 2018 (ESA 2022 ; USGS 2022). Sur la base des quelque 35'000 données ponctuelles du Système national d'information pédologique NABODAT (Centre de services NABODAT 2022), des cartes indicatives des propriétés des sols ont été modélisées à l'échelle nationale pour différentes profondeurs. A l'aide d'un modèle de cartographie numérique des sols (DSM), les propriétés des sols telles que le pH, la teneur en argile et en limon ainsi que la teneur en matière organique ont été prédites pour l'ensemble de la Suisse avec un niveau de détail spatial et une résolution en profondeur donnés. Même si les cartes indicatives présentent de grandes incertitudes pour les prévisions spatiales des propriétés des sols, elles peuvent fournir des informations préliminaires importantes sur les modèles spatiaux attendus des propriétés des sols pour une cartographie détaillée d'une région. Pour le projet Chamblieux-Bertigny, des cartes indicatives pour les teneurs en matière organique, en limon et en argile ainsi que pour le pH ont été utilisées pour la couche supérieure du sol.

Vous trouverez des informations plus détaillées sur le sujet dans le « Rapport CCSols n° 3 » (Nouvelles méthodes dans la cartographie des sols - projet pilote Diemerswil).

<sup>1</sup> Cartographier les sols : <https://ccsols.ch/fr/cartographier-les-sols/>.

## 4 Phase conceptuelle

### 4.1 Adaptation du périmètre du projet

Le périmètre du projet est né d'un consensus entre les autorités fribourgeoises et le CCSols. En effet, la délimitation a été décidée par rapport aux besoins du projet de développement urbain durable dans le secteur Chamblieux–Bertigny et aux besoins du développement technique des méthodes de cartographie des sols en zone agricole. Par la suite, le périmètre a été adapté et découpé afin d'y exclure les conduites souterraines et les fondations des poteaux électriques entourés par une zone tampon (Figure 8).

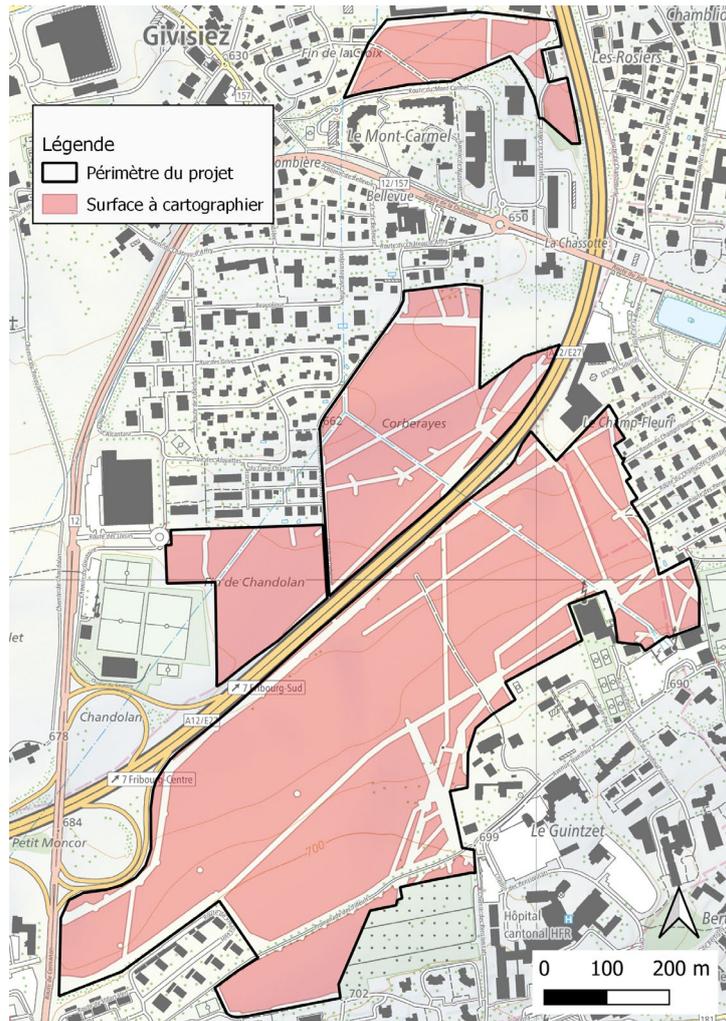


Figure 8 : Illustration du périmètre du projet Chamblieux-Bertigny du CCSols (fond de carte : carte nationale (couleur) 1:10'000, swisstopo).

## 4.2 Concept d'échantillonnage

Les emplacements des sondages et des échantillonnages ont été définis dans un concept d'échantillonnage hiérarchisé sur la base du périmètre adapté du projet. Les variables environnementales suivantes ont été modélisées : pente, ruissellement, forme du terrain et carte indicative des teneurs en matière organique pour toute la Suisse. La sélection des emplacements s'est donc faite sur la base d'informations existantes et prétraitées. Les sites ont été choisis de telle sorte que toutes les variables environnementales utilisées soient couvertes. Les emplacements des profils ont été définis originellement de la même façon que les points de sondages et d'échantillonnages, toutefois leur position a été revue à la suite de la journée de prospection afin que leur emplacement couvre d'une manière optimale toute la variabilité de la zone d'étude.

La littérature décrit différentes méthodes permettant de dériver un concept d'échantillonnage hiérarchisé sur la base de plusieurs variables environnementales (Behrens et Scholten 2006b). Le problème de la plupart des méthodes est que, lorsque le nombre de points diminue, les plages de valeurs extrêmes sont regroupées dans des groupes plus grands, ce qui fait que les caractéristiques pédologiques importantes d'une région peuvent ne pas être entièrement couvertes. C'est pourquoi, dans le cadre de ce projet, une combinaison de différentes méthodes a été utilisée pour un design d'échantillonnage optimal. Les deux méthodes "kmeans" et "Kennard-Stone" ont été combinées (Kennard et Stone 1969 ; Ramirez-Lopez et al. 2014 ; Schmidt et al. 2014). L'objectif étant de recenser d'une part toutes les valeurs extrêmes, qui sont d'une grande importance pour la compréhension pédologique globale, et d'autre part les combinaisons de caractéristiques pertinentes pour l'ensemble de la surface.

Cette approche a été utilisée afin de réaliser un concept hiérarchique de l'emplacement des relevés. Le concept d'échantillonnage englobe la répartition spatiale de tous les points de relevé. Cela signifie que l'on y trouve i) les emplacements des profils (H1), ii) les emplacements des sondages (H2) effectués, en grande partie, à l'aide du véhicule de sondage, iii) les emplacements des échantillonnages (H3) et les emplacements des sondages avec mesure de la masse volumique apparente, analyses de référence<sup>2</sup> et CEC (H4) effectués également à l'aide du véhicule de sondage. La Figure 9 montre l'emplacement des sites par niveau hiérarchique.

<sup>2</sup> Analyses de référence : texture, pH, teneur en carbone organique/matière organique et en carbonates.

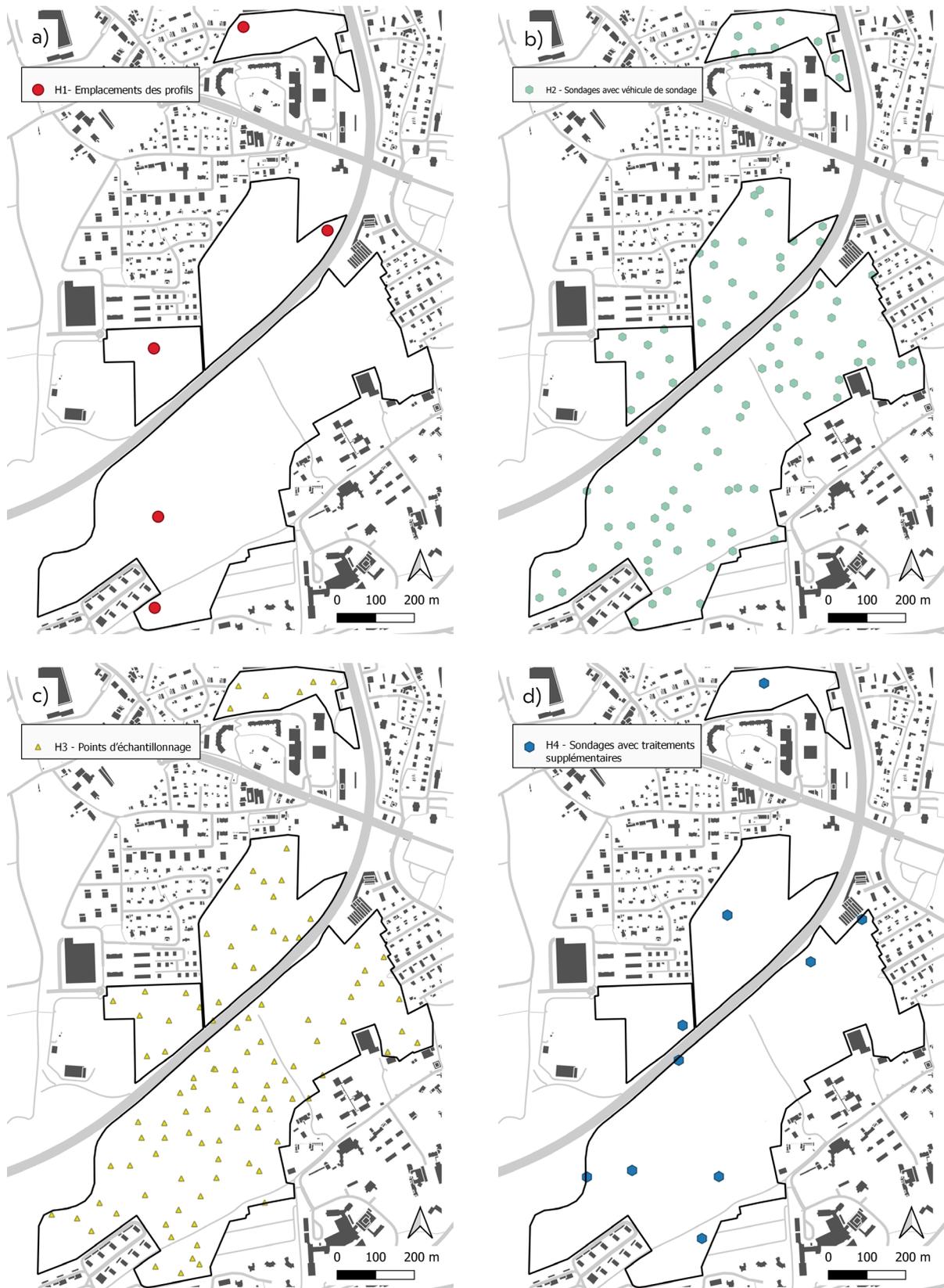


Figure 9 : Réalisation d'un concept d'échantillonnage hiérarchisé : a) emplacements des profils (H1) ; b) emplacements des sondages (H2) ; c) emplacements des échantillonnages destinés aux analyses spectroscopiques (NIR et MIR) dans le laboratoire (H3) ; d) emplacements des sondages avec traitements supplémentaires (H4).

## 5 Campagne de terrain

Les campagnes de terrain peuvent être réparties selon les étapes suivantes, par analogie avec les niveaux hiérarchiques H1 à H4 mentionnés ci-dessus (Tableau 2) :

- Journée de prospection
- Relevés des profils pédologiques (site H1)
- Relevés des sondages réalisés à l'aide du véhicule de sondage (site H2)
- Echantillonnages, destinés à l'analyse spectroscopique en laboratoire, réalisés à l'aide d'une tarière gouge (site H3)
- Relevés des sondages accompagnés de la prise d'échantillons volumiques (sites H4) réalisés à l'aide du véhicule de sondage

Pour tous les sites (H1 – H4) les métadonnées, les données de localisation et les données pédologiques (hormis H3, qui sont des échantillonnages sans description) ont été saisies numériquement directement dans Soldat sur le terrain. Les emplacements des sites H2 – H4 ont été exportés sur QField afin de faciliter leur localisation lors des campagnes de terrain. La gestion des données s'étend sur toutes les étapes de la cartographie des sols (Figure 2). Les outils de gestion des données sont décrits plus en détail dans la suite de ce document.

### 5.1 Véhicule de sondage

Hormis les zones dans lesquelles l'utilisation du véhicule de sondage était impossible (sols mouillés) et qui ont nécessité l'utilisation d'une tarière hollandaise, tous les sondages (H2 et H4) ont été réalisés à l'aide de celui-ci. Le véhicule de sondage utilisé lors de ce projet se compose d'un Aebi TT75 servant de support et d'une tour de sondage (Figure 10). Le système de sondage a été développé en collaboration avec l'entreprise GreenGround AG. La tour de sondage est capable de prélever des carottes « Humax » jusqu'à une profondeur de 1.2 m grâce à des cartouches de 20 cm ou 30 cm de longueur et d'un diamètre de 5 cm ou 8 cm. Lors de ce projet, des cartouches de 30 cm de longueur ayant un diamètre de 8 cm ont été préférentiellement utilisées, car celles-ci permettent une description pédologique de meilleure qualité. Toutefois, les prélèvements dans les sols ayant une forte pierrosité ont été réalisés à l'aide de cartouche de 30 cm de longueur et de 5 cm de diamètre. De plus, le véhicule de sondage permet de réaliser des prélèvements d'échantillons volumétriques presque intacts, ce qui fournit plusieurs avantages : (i) une description pédologique optimisée permettant une meilleure reconnaissance de nombreuses caractéristiques pédologiques comparée à celles reconnues lors de l'utilisation d'une tarière hollandaise; (ii) les échantillons pédologiques peuvent être prélevés de manière plus ciblée à des profondeurs définies; (iii) le système de sondage permet de déterminer le poids volumétrique grâce au prélèvement d'échantillons volumétriques. Pour tous les sondages, les carottes de 1.2 m de profondeur ont été prélevées à l'aide 5 cartouches en prélevant 4 fois 25 cm et 1 fois 20 cm (dernière cartouche). Cette limitation, de 1.2 m, de la profondeur est due à la tour de sondage. Chaque prélèvement a été réalisé en utilisant une nouvelle cartouche qui peut être fermée par un couvercle. Ceci facilite le transport et diminue les risques de dégradation. Les cartouches ont, dans la majorité des cas, été réutilisées après la description.

Afin de limiter les trajets dans les champs, de gagner du temps et de faciliter le travail de la personne en charge des prélèvements, les emplacements des sondages ont été retrouvés grâce à un appareil GPS et au programme QField puis marqués par un drapeau avant l'utilisation du véhicule de sondage. Il en a été de même avec le marquage des emplacements des profils, sans toutefois utiliser QField (Figure 11).



Figure 10 : Véhicule de sondage utilisé à Chamblieux-Bertigny.



Figure 11 : Drapeau utilisé pour marquer les emplacements des sites H1, H2 et H4 avant le passage du véhicule de sondage.

Afin de procéder à la description du sol, les différentes cartouches contenant les carottes pédologiques issues des sondages mécaniques ont été placées et préparées les unes derrière les autres en respectant la profondeur (Figure 12). Lors du processus de prélèvement, la couronne de sondage de la société GreenGround AG entraîne un allongement de la carotte creusée. En d'autres termes une cartouche de 30 cm de longueur est remplie par un prélèvement d'une profondeur de 25 cm. La carotte est par conséquent étirée de 5 cm. Afin de rectifier cette différence, l'échelle de longueur de la boîte a été adaptée (Figure 13).



Figure 12 : Sondages prélevés à l'aide du véhicule de sondage. Le matériel a été sorti de la cartouche et préparé.



Figure 13 : Préparation de la carotte pour la description pédologique dans une boîte spécialement conçue à cet effet.

Une fois la description et l'échantillonnage terminés, le trou créé par le sondage a été rebouché sur place avec les matériaux pédologiques restants.

## 5.2 Gestion des données

### 5.2.1 Codes QR

Le modèle de données NABODAT et un code QR (Figure 23) ont été utilisés pour les étiquettes des échantillons de terrain et de laboratoire. Le nom de l'échantillon comprend une abréviation du projet (p. ex. CHAM), le n° de la campagne de terrain ou la répétition (p. ex. E1), le type de relevé et le numéro du site (p. ex. SP5, S pour site et P pour profil) ainsi qu'une information sur la profondeur (p. ex. T2). CHAM\_E1\_SP5\_T2 serait par exemple un échantillon de la première campagne de terrain de Chamblieux-Bertigny, prélevé à la deuxième profondeur du profil 5. Ces codes ont été utilisés de manière systématique dans tous les processus de travail et ont été lus par les tablettes de terrain ou les scanners au laboratoire à l'aide d'un logiciel spécial.

### 5.2.2 Soildat

Grâce à Soildat, on dispose d'une application web (Figure 14) qui permet une saisie sécurisée des données même sans connexion au serveur (hors ligne). Elle est aussi optimisée pour les besoins des cartographes pendant le travail de terrain. Des tutoriels en format vidéo sont disponibles pour cet outil sur la page d'accueil du CCSols ([www.ccsols.ch](http://www.ccsols.ch)). La saisie des données se fait sur n'importe quel smartphone ou tablette. Grâce aux champs de saisie prédéfinis sur la base de la classification des sols de Suisse (SSP 2010), la qualité des données et la réduction des erreurs augmentent.

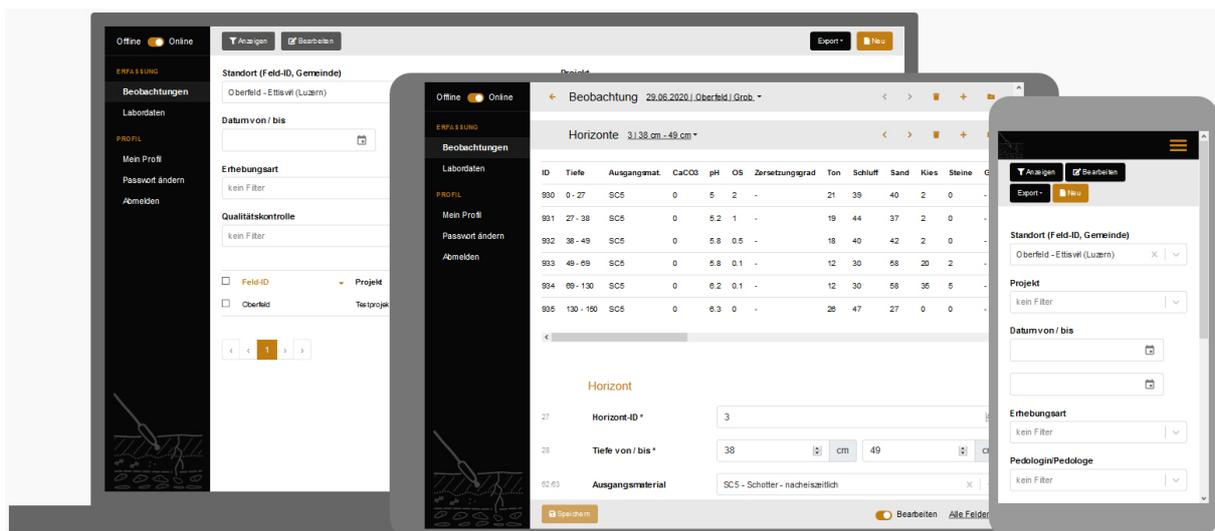


Figure 14 : Interface de saisie de Soildat.

## 5.3 Aperçu de l'étendue des relevés réalisés durant les campagnes de terrain

Les profils (H1) et les sondages (H2 et H4), ont été relevés selon un jeu de données provenant de la FAL24+ (Station fédérale de recherches en agroécologie et agriculture, Zurich-Reckenholz 1997 ; SSP 2010 ; Afu Solothurn 2020). Pour les profils (H1) un relevé pédologique complet a été réalisé tandis que pour les sondages (H2 et H4) seule une sélection d'attributs a été relevée. Tous les attributs ont été saisis numériquement sur le terrain à l'aide de l'application web Soildat (voir chapitre 5.2.2). Lors de l'échantillonnage (H3), aucun attribut pédologique n'a été relevé. Les mesures spectroscopiques de tous les échantillons (H1-H4) ont été effectuées en laboratoire.

Tableau 2 : Aperçu des différents niveaux hiérarchiques du concept d'échantillonnage

	Profils pédologiques	Sondages avec des- criptions	Echantillonnage	Sondages avec descriptions et analyses supplémentaires
Niveaux hiérarchiques / abréviation	H1	H2	H3	H4
<b>Mode de relevé</b>				
Matériel utilisé	Pelle rétro	Véhicule de sondage	Tarière gouge	Véhicule de sondage
<b>Données relevées</b>				
Photo du profil/son- dages	Oui	Oui	-	Oui
Relevés pédologiques selon la FAL24+*	Oui	Oui (réduit)	-	Oui (réduit)
Petits cylindres (pF, masse volumique appa- rente)	Oui (sur tous les pro- fils)	-	-	-
Grands cylindres (Hyprop & WP4C)	Oui (3 profils)	-	-	-
Cartouches prises grâce au véhicule de sondage (masse volumique apparente)	-	-	-	Oui (sur 10 sites)
Analyses de référence	Oui	-	-	Oui
<b>Densité des points et délimitation des profondeurs</b>				
Densité des points [par ha]	0.09	1.76	1.94	0.19
Nombre de points [-]	5	95	105	10
Profondeur maximale [cm]	150	120	60	120
Type de délimitation des profondeurs	Horizons	Horizons	Profondeur fixe	Horizons
Nombre maximal d'hor- izons relevés	8	7	2	6
Profondeur fixe [cm]	-	-	0–20 40–60	-

	Profils pédologiques	Sondages avec des- criptions	Echantillonnage	Sondages avec descriptions et analyses supplémentaires
<b>Prélèvement des échantillons</b>				
<b>Mode d'échantillon- nage**</b>	Grands sacs à échantillons Petits et grands cylindres	Grands sacs à échantillons	Grands sacs à échantillons	Grands sacs à échantillons
<b>Poids moyen de l'échantillon humide [g]</b>	env. 1000	env. 1000	env. 300	env. 1000
<b>Nombre maximal d'échantillons</b>	4	3	2	3
<b>Niveaux de profondeur prédéfinis de l'échantil- lon</b>	-	-	2	-
<b>Nombre total d'échan- tillons</b>	18	198	210	29
<b>Analyses de référence (laboratoire externe)</b>				
<b>Nombre d'échantillons de référence (laboratoire externe)</b>	18	24	23	29
<b>Pourcentage d'échantil- lons de référence [%]</b>	100	12.12	11.06	100

\* Voir en annexe.

\*\* Grands sacs à échantillons : échantillon composite d'environ 1000g.

#### Remarques concernant le tableau

Les mesures de la masse volumique apparente, les analyses de référence et l'analyse de la capacité d'échange cationique ont été réalisées sur environ 10% des sondages H2. Ces points H2 spécifiques sont dénommés dans le tableau H4.

Les mesures en laboratoire ont été menées en automne 2021.

#### 5.4 Profils (emplacements H1)

Après la sélection définitive des emplacements des 5 profils (Figure 15), ceux-ci ont été ouverts à l'aide d'une petite pelle mécanique à chenilles. Les parois des profils ont ensuite été préparées, photographiées et relevées.

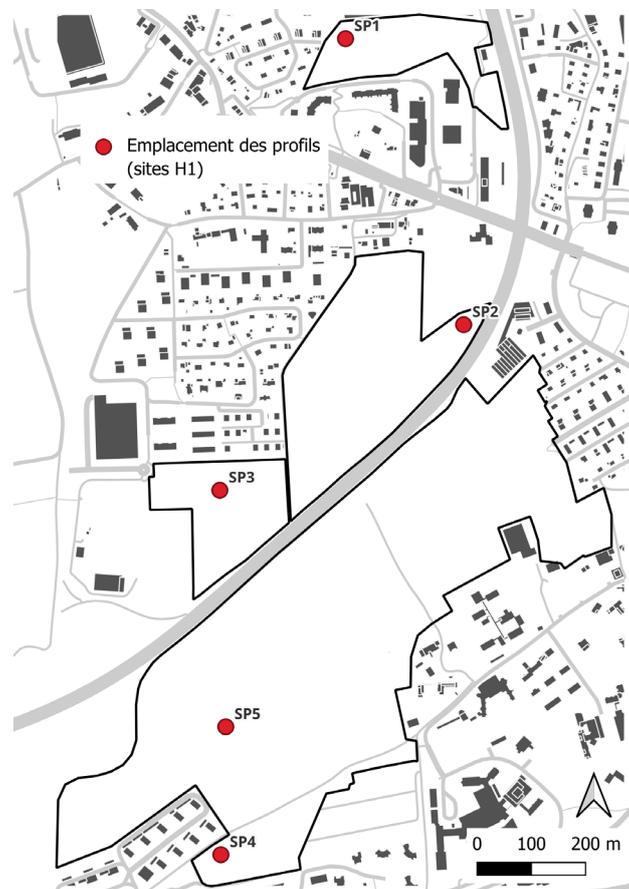


Figure 15 : Aperçu de l'emplacement des profils H1 (SP=Site, Profil).

À la suite de la description de ces 5 profils, les pédologues se sont mis d'accord sur une description pédologique commune lors d'une journée d'harmonisation. Les profils ont constitué le standard de la description et de la classification des sondages (H2 et H4) de la région, car ils reflètent l'étendue des propriétés des sols rencontrées dans le périmètre du projet. Les profils ont été ouverts pour une période de trois à quatre semaines. La Direction de l'aménagement, de l'environnement et des constructions fribourgeois s'était engagée à dédommager les exploitants pendant cette période. Des échantillons ont été prélevés sur 3-4 horizons par profil afin que les analyses de référence, la mesure de la capacité d'échange cationique (CEC) et les mesures spectroscopiques puissent être réalisées. De plus, des cylindres ont été prélevés afin de réaliser des analyses physiques, telles que les mesures de désorption dans l'autoclave (Tableau 2).

## 5.5 Sondages (emplacements H2)

La campagne de sondage a débuté à la suite de la journée d'harmonisation précédemment évoquée. Ce sont 95 sondages H2 (Figure 16) qui ont été réalisés à l'aide du véhicule de sondage. L'ensemble des sondages H2 et H4 donne une densité d'environ deux sondages par hectare (Tableau 2). La planification des sondages a été réalisée sur le terrain selon l'avancée des cultures présentes dans le périmètre. La zone se situant au sud de l'autoroute a été réalisée en premier, les zones de pâturage et de prairie servant de tampon entre les sondages dans les cultures. L'autorisation de pénétrer dans les surfaces a été obtenue individuellement au préalable à chaque fois.

En plus de la description pédologique (Figure 17), des échantillons ont été prélevés dans trois horizons au maximum. Les sondages H2 ont été relevés par plusieurs cartographes et malgré la journée d'harmonisation le contrôle qualité a révélé des différences dans les descriptions pédologiques. C'est pourquoi il a été nécessaire de procéder à une harmonisation des données après la fin de la campagne de terrain. Celle-ci a été documentée en conséquence dans un rapport consensuel, puis transmise au projet de révision de la classification des sols de Suisse (RevKLABS) et finalement finalisée en fonction des retours d'information.

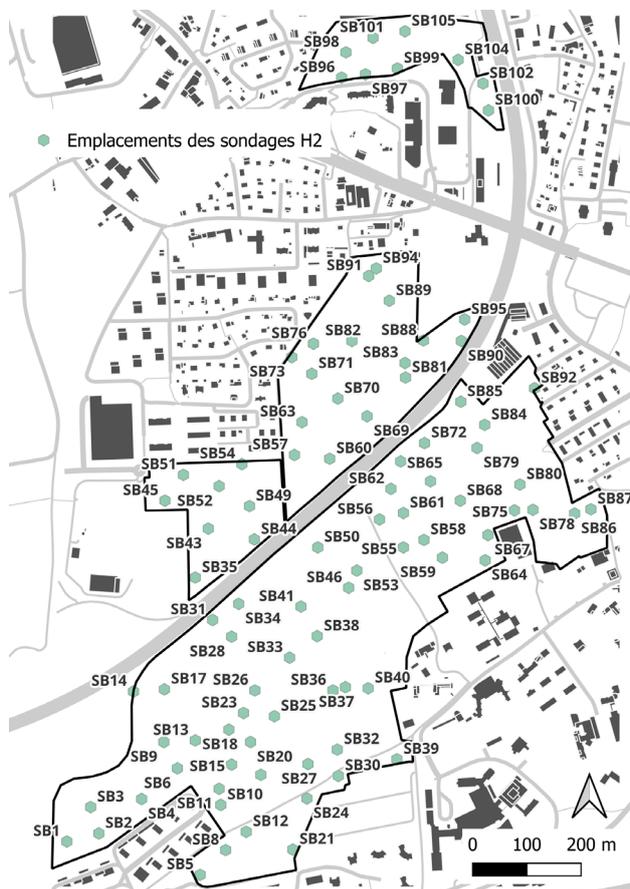


Figure 16 : Aperçu de l'emplacement des sondages H2 (SB=Site, Bohrung).



Figure 17 : Description d'un sondage.

### 5.6 Echantillonnage (emplacement H3)

La campagne d'échantillonnage a été réalisée en parallèle de la campagne de sondage par une équipe de deux personnes. Comme illustré dans le Tableau 2, les échantillons de tous les sites H3 ont été prélevés à des profondeurs définies (0-20 cm et 40-60 cm) grâce à une tarière gouge.

Les campagnes d'échantillonnage permettent d'obtenir de précieux renseignements sur les propriétés pédologiques d'une région plus facilement et rapidement que les sondages. Les données ainsi récoltées donnent la possibilité de diminuer le nombre de sondages par hectares tout en gardant une bonne qualité d'informations pédologiques. Dans le présent projet, le test a consisté à réaliser près de 2 échantillonnages et 2 sondages par hectare au lieu des 4 sondages faits habituellement.

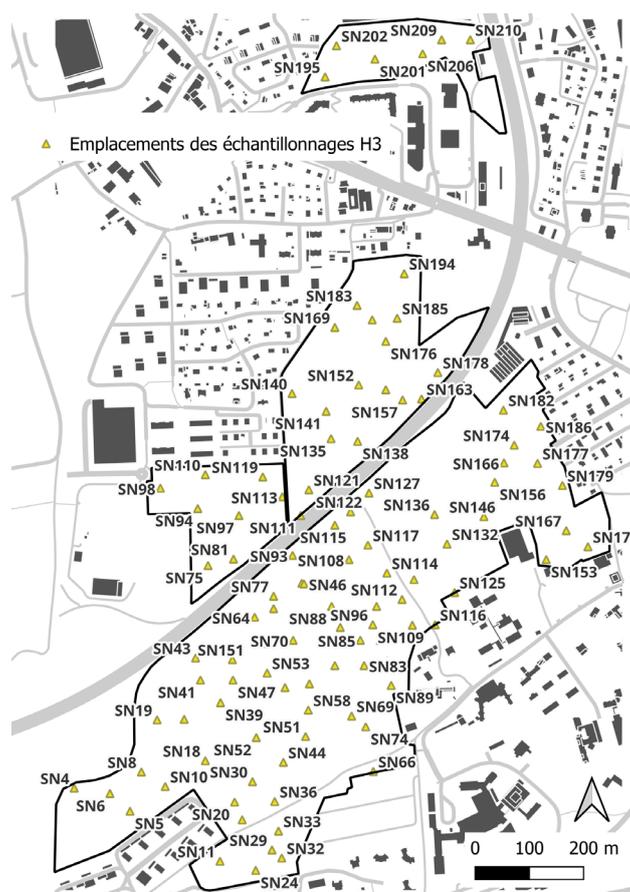


Figure 18 : Aperçu de l'emplacement des échantillonnages H3 (SN=Site, NIR).

### 5.7 Sondages (emplacement H4)

Les 10 sondages H4 ont été réalisés en même temps que la campagne de sondage H2 (Figure 19). Ces sondages spéciaux ont été relevés de la même façon que les sondages H2 standard, mais davantage d'informations y ont été examinées. En effet, en plus de la description « standard » réalisée sur les sondages H2, des échantillons volumiques ont été prélevés à l'aide du véhicule de sondage afin de mesurer par voie humide la masse volumique apparente en laboratoire. Tous les échantillons ont également été envoyés dans un laboratoire externe afin d'y analyser la capacité d'échange cationique, la texture, le pH, la teneur en carbone organique (Corg) et en carbonates.

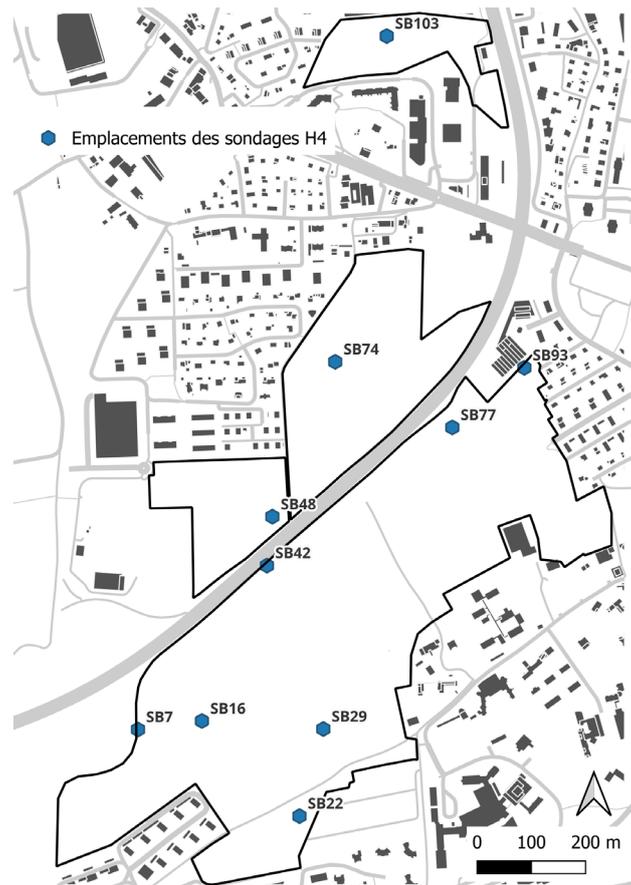


Figure 19 : Aperçu de l'emplacement des sondages H4 (SB=Site, Bohrung).

## 6 Analyses en laboratoire

Dans le cadre de ce projet, les propriétés chimiques et physiques des sols ont été déterminées en laboratoire. Les analyses chimiques ont été confiées à un laboratoire externe et ont été réalisées selon les méthodes de référence. Les analyses ont porté sur la texture (teneur en argile, limon et sable), le pH-CaCl<sub>2</sub>, la teneur en carbonates (carbonates de calcium), la teneur carbone organique et, pour une sélection d'échantillons, sur la capacité d'échange cationique (CEC). Toutes les mesures physiques et spectroscopiques ont été effectuées à la HAFL. Le Tableau 2 donne un aperçu du nombre d'échantillons traités et la Figure 24, illustre les sites pour lesquels les échantillons ont été analysés. L'Annexe A fournit de plus amples détails sur les méthodes.

### 6.1 Préparation des échantillons

En règle générale, environ 1 kg de matière fraîche par échantillon ont été prélevés sur le terrain sur les profils et les sondages. L'échantillonnage H3 a fourni environ 500 g de sol frais par site. Dans un premier temps, les échantillons de sol frais provenant des profils H1 et des sondages H4 ont été envoyés à un laboratoire externe. C'est celui-ci qui a réalisé la préparation des échantillons pour les analyses chimiques. Le reste des échantillons préparés par eux a été envoyé au CCSols à la suite des analyses afin que ces échantillons puissent également être mesurés avec le spectromètre. Au CCSols, la préparation en laboratoire des échantillons de sol frais prélevés sur les sondages H2 et les échantillonnages H3 a commencé par leur enregistrement et leur pesage. La deuxième étape a consisté à retirer la biomasse telle que les racines, les feuilles et les morceaux de bois. Un tri manuel du squelette a également été réalisé (Figure 20). Le sol et le squelette triés ont été séchés au four dans des barquettes en aluminium séparées à 60°C et en général pendant 2 à 3 jours jusqu'à ce que leur poids soit constant. Les agrégats ont, ensuite, été broyés à l'aide d'un concasseur à mâchoires (modèle Retsch BB50 ; Figure 21) et tamisés à 2 mm. Le squelette contenu dans le résidu de tamisage et le squelette trié à la main ont été rassemblés et archivés ensemble.



Figure 20 : Tri manuel de l'échantillon de sol fraîchement prélevé sur le terrain. Figure 21 : Concasseur à mâchoires permettant de broyer les agrégats.

Les échantillons tamisés à 2 mm provenant du laboratoire externe et de celui du CCSols ont été finement rebroyés à l'aide d'un moulin à billes (Figure 22) pour les mesures spectroscopiques. L'appareil fait tourner sur elles-mêmes des capsules rondes contenant chacune 50-60 ml de terre fine et deux corps broyants. A l'intérieur des capsules de broyage, les deux plaques qui s'y trouvent font tomber les corps broyants

sur les échantillons à chaque rotation. Après 48 heures de broyage, les capsules ont été vidées et le matériel a été mis dans des flacons à échantillons en plastique munis d'un code QR (Figure 23).



Figure 22 : Moulin à billes de 5 étages.



Figure 23 : Stade final de la préparation des échantillons : flacons en plastique contenant les échantillons pédologiques finement broyés (<100mm).

## 6.2 Analyses des propriétés chimiques des sols

Dans un premier temps, les propriétés chimiques des sols ont été analysées sur tous les échantillons H1 et H4 par un laboratoire externe utilisant les méthodes de référence de l'Agroscope (voir annexe A). Dans un deuxième temps, 12 % des échantillons H2 et environ 11 % des échantillons H3 déjà préparés par le laboratoire du CCSols ont été envoyés au même laboratoire externe afin de calibrer les modèles des mesures spectroscopiques (Tableau 2). Le Tableau 3 dresse la liste de tous les échantillons pédologiques mesurés à l'aide d'analyses de référence et la Figure 24 les situent (rond rouge).

Tableau 3 : Illustration du nombre d'analyses chimiques mesurées avec des analyses de référence.

	Corg	MO*	Carbonates	pH	Sable	Limon	Argile	CEC/SB**
<b>H1</b>	18	18	18	18	18	18	18	18
<b>H2</b>	24	24	24	24	24	24	24	0
<b>H3</b>	23	23	23	23	23	23	23	0
<b>H4</b>	29	29	29	29	29	29	29	29

\* le taux de matière organique a été calculé à partir de la teneur en Corg, ( $MO = Corg \times 1.725$ ).

\*\* CEC : CEC potentielle : Ca, H, K, Mg, Na. La saturation en base (SB) a été calculée.

## 6.3 Analyses des propriétés physiques des sols

Les propriétés physiques des sols caractérisées, entre autres, à l'aide de la courbe de désorption ou de la masse volumique apparente permettent de comprendre le transport et le stockage de l'eau, de l'air et des nutriments dans le sol. La masse volumique apparente est également très importante pour les sols anthropiques qui sont souvent compactés. Au total, la mesure de la masse volumique apparente, aussi

bien totale que de la terre fine<sup>3</sup> a été réalisée sur 41 horizons provenant des sites H4 (triangle noir sur la Figure 24).

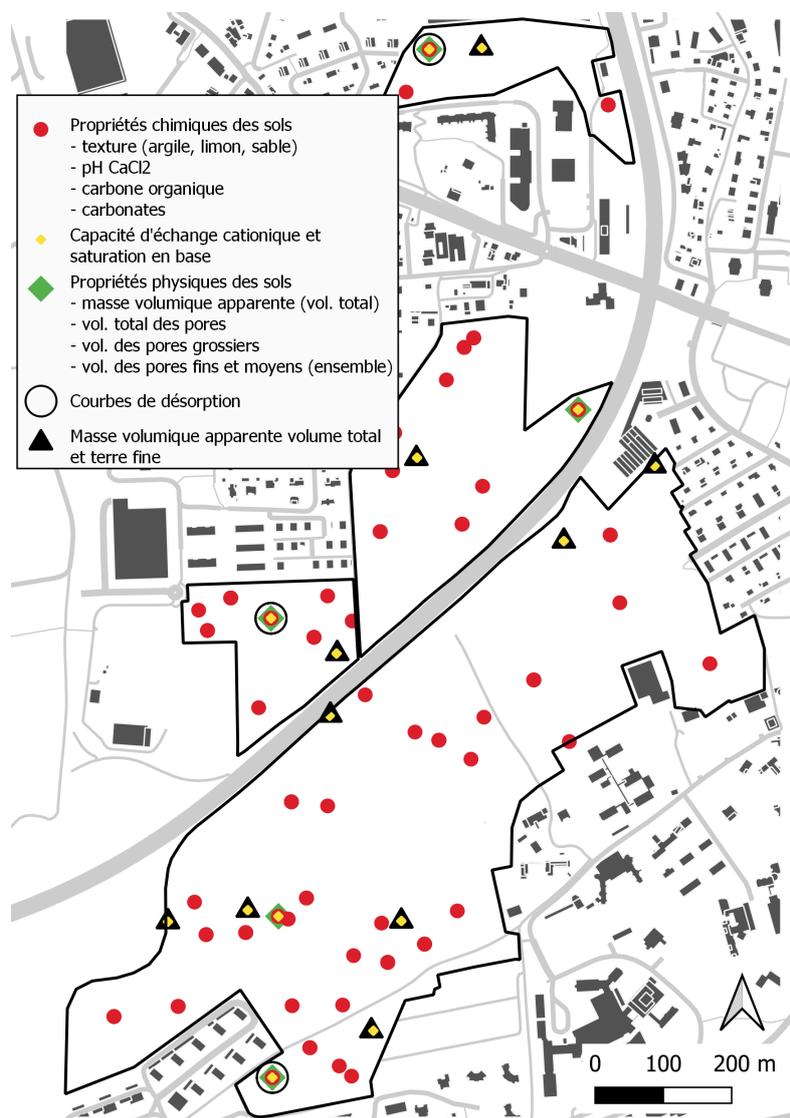


Figure 24 : Aperçu de l'emplacement des sites sur lesquels des analyses ont été réalisées (les sites analysés à l'aide de la spectroscopie ne sont pas illustrés).

La masse volumique apparente totale et de la terre fine ont été déterminées pour la première fois à l'aide d'échantillons volumiques prélevés dans des cartouches grâce au véhicule de sondage. Pour ce faire, des carottes ont été prélevées à une profondeur variable selon les horizons délimités à la suite de la description pédologique. Les premiers 25 cm de chaque horizon ont été prélevés. Lorsque l'horizon faisait moins de 25cm, le prélèvement s'est arrêté à la limite inférieure de celui-ci. Lorsque l'horizon faisait plus de 25 cm, le reste de l'horizon n'a pas été conservé. Les échantillons frais contenus dans ces cartouches ont été pesés sur le terrain à l'aide d'une balance de laboratoire portable, puis, dans le laboratoire, ils ont été placés dans une étuve à 105 °C. Ils ont ensuite été tamisés à 2 mm par voie humide et reséchés à 105°C jusqu'à un poids constant. La masse volumique totale et de la terre fine de l'échantillon ont été calculées à l'aide du poids sec de l'échantillon et du squelette ainsi que du volume connu de la carotte de sondage prélevée.

<sup>3</sup> La masse volumique apparente de la terre fine est calculée en soustrayant la masse volumique du squelette (fraction grossière) à la masse volumique totale.

Des cylindres de petite taille ( $100 \text{ cm}^3$ ) ont été prélevés dans trois à quatre horizons de chacun des cinq profils (losange vert dans la Figure 24). Ils ont été préparés (Figure 25 et Figure 26) et pour la mesure de la marmite à pression (courbes pF, Figure 27).

Cette analyse permet de déterminer le volume des pores fins, moyens, grossiers et totaux et la masse volumique apparente totale. De plus, trois cylindres ( $250 \text{ cm}^3$ ) ont également été prélevés sur trois des 5 profils. De la même façon que pour la marmite à pression, les échantillons ont été préparés en laboratoire (Figure 25 et Figure 26). Afin de pouvoir précéder à une comparaison méthodique, le comportement de rétention en eau a été déterminé grâce aux systèmes de mesure HYPROP et WP4C (tous deux de la société METER-Group ; (Schindler et al. 2015). Les mesures effectuées sur cette sélection d'horizons ont permis d'acquérir une première expérience en laboratoire sur ces nouveaux systèmes de mesure disponibles (Figure 29). D'autres détails sur les méthodes de physique des sols ont été récemment résumés dans Weiss et al. 2021. La comparaison méthodologique entre les mesures conventionnelles réalisées avec la marmite à pression et les mesures effectuées avec le système HYPROP-WP4C n'a pas encore été effectuée et sera documentée dans un rapport séparé. La masse volumique apparente totale a également été réalisée sur les grands cylindres.



Figure 25 : Cylindres munis d'une surface minutieusement préparée de sorte qu'elle soit la plus plate possible afin de maximiser les contacts.



Figure 26 : Phase de saturation en eau des cylindres avant leur passage dans la marmite à pression ou le HYPROP.



Figure 27 : Installation des échantillons dans la marmite à pression.



Figure 28 : Echantillon en cours d'analyse sur le HYPROP.

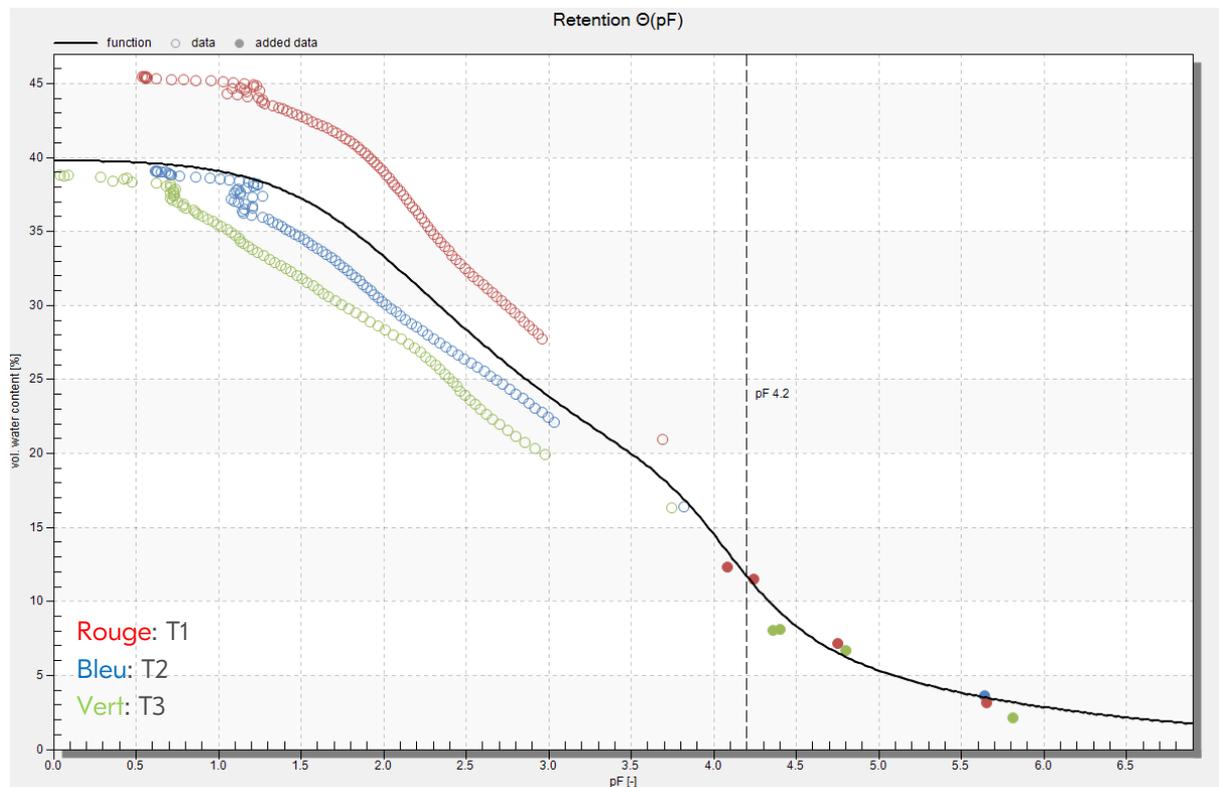


Figure 29 : Mesure de la courbe de rétention en eau pour trois profondeurs différentes pour le profil pédologique 1 situé dans une prairie permanente. Le système de mesure HYPROP permet de mesurer le potentiel de succion (potentiel matriciel) jusqu'à pF 3.5 (zone humide à gauche), le WP4C mesure la plage pF 4.0 à 6.5 (zone sèche à droite). Le point de flétrissement permanent se situe à pF 4.2 (T1 : couche supérieure du sol, T2 et T3 : couche sous-jacente du sol, T = Tiefe = profondeur).

## 6.4 Spectroscopie en laboratoire

L'analyse spectroscopique d'échantillons pédologiques est une méthode rapide et peu coûteuse permettant de faire des prévisions de nombreuses propriétés de base des sols. En la combinant à des mesures de référence classiques ainsi qu'à des méthodes de régression statistiques et mathématiques, il est possible de prévoir la teneur en carbone organique (Corg), le pH et la texture (Viscarra Rossel et al. 2022)

des sols. Ces mesures spectroscopiques ont été faites sur tous les échantillons prélevés (H1-H4) lors de ce projet. Les échantillons broyés ont été analysés en laboratoire dans le domaine de l'infrarouge proche (NIR) et moyen (MIR). Ces deux méthodes ont pour principe la mesure du rayonnement réfléchi par un échantillon pédologique finement broyé (spectroscopie à réflexion diffuse). Les spectres NIR, compris entre 1000 nm et 2500 nm, ont été mesurés à l'aide de la Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier Büchi NIRFlex-N500 (Figure 30). Les spectres MIR, compris entre 1330 nm et 16660 nm, ont été mesurés avec un Bruker INVENIO équipé d'un module à haut débit (HTS-XT) (Figure 31). Un multisampler (plaque de mesure de multi-échantillon) permet une mesure automatisée de 23 échantillons par cycle (Figure 32).



Figure 30 : Büchi NIRFlex-N500 spectromètre infrarouge proche (NIR) avec ustensiles de mesure et ordinateur portable.



Figure 31 : Bruker INVENIO équipé d'un module à haut débit (HTS-XT).



Figure 32 : Remplissage de la plaque de mesure multi-échantillon avant la mesure MIR (© Susanne Goldschmid/OFEV).

## 7 Spectroscopie et création de cartes

Dans le processus de cartographie des sols du projet de Chamblieux-Bertigny, l'élaboration des cartes a été une des tâches centrales du traitement des données, comme le furent précédemment les étapes de préparation des données environnementales et géographiques et l'élaboration du concept d'échantillonnage. Dans cette étape, des approches méthodologiques de la science des données (Data Science) sont utilisées pour l'évaluation de la spectroscopie et pour la modélisation spatiale des propriétés et des caractéristiques des sols.

L'analyse spectroscopique et la modélisation se réfèrent aux mesures de laboratoire NIR (société Büchi) et MIR (société Bruker). Dans un premier temps, un petit nombre d'échantillons représentatifs (environ 5 à 15 %) est sélectionné. Les propriétés pédologiques de ces échantillons sont analysées de manière classique dans un laboratoire externe à l'aide des méthodes de référence classiques. Dans un deuxième temps, les spectres NIR et MIR de tous les échantillons sont mesurés. Il est alors possible d'établir des corrélations entre les spectres et les propriétés des sols mesurées de manière classique et d'en déduire des modèles. Ces modèles peuvent ensuite être appliqués aux spectres mesurés pour tous les échantillons de la région (Viscarra-Rossel et Behrens 2010 ; Viscarra Rossel et al. 2022). Ainsi, il est possible de réduire globalement les coûts des analyses pédologiques ou d'augmenter considérablement la densité spatiale des points mesurés sur les profils et les sondages pour un coût similaire. Ainsi, la méthode spectroscopique peut contribuer de manière décisive à l'augmentation de la qualité d'une carte des sols.

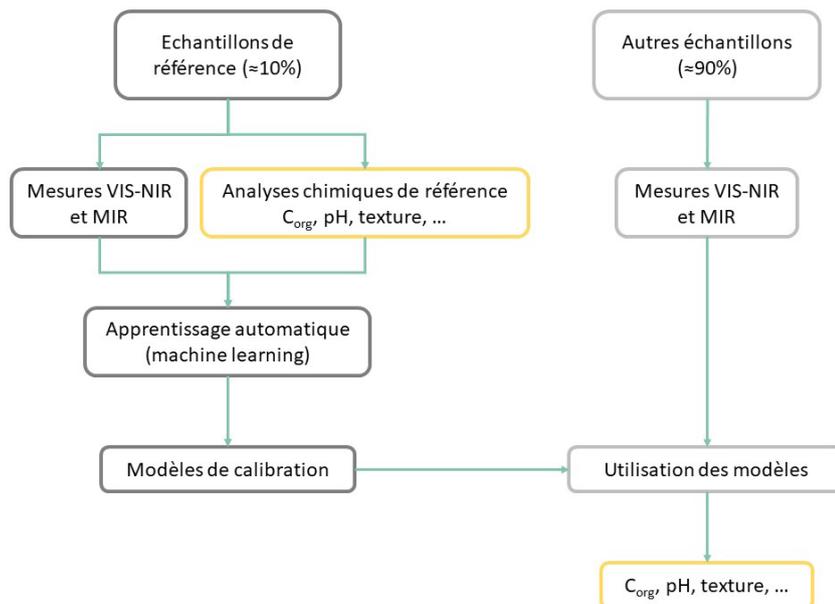


Figure 33 : Déroulement de la spectroscopie à infrarouge.

La modélisation des spectres a été réalisée avec Cubist (Quinlan 1993 ; Kuhn et al. 2020). Cubist est une approche par arbre de décision combinée à une régression linéaire.

L'élaboration des cartes de base a lieu après la préparation des géodonnées, le contrôle qualité des données pédologiques et le traitement des données spectrales. Des cartes des propriétés des sols ont d'abord été établies, puis utilisées comme base supplémentaire pour la régionalisation des paramètres pédologiques. Comme pour la spectroscopie (Viscarra-Rossel et Behrens 2010), les procédés d'apprentissage automatique les plus divers peuvent être utilisés (Behrens et Scholten 2006a ; Behrens et Scholten 2006b ; Behrens et al. 2005 ; Grimm et al. 2008 ; Behrens et al. 2018). Pour la modélisation spatiale des propriétés et des caractéristiques des sols à Chamblieux-Bertigny, une combinaison de différentes méthodes non linéaires a été utilisée en raison de la complexité et de la non-linéarité des relations entre la formation et l'expression des sols et les variables géologiques et environnementales. De telles

combinaisons, appelées méthodes d'ensemble, fournissent en général des résultats plus stables (Breiman 1996). Certaines de ces méthodes ne conviennent qu'aux classifications (par exemple le type de sol), d'autres qu'aux régressions (par exemple la profondeur utile PU). Tous les modèles ont été créés avec le package statistique R (R Core Team 2022). Tous les modèles ont été optimisés et validés par une validation croisée 10 fois 10 fois. Dans le projet Chamblieux-Bertigny, le  $R^2$  (coefficient de détermination, variance expliquée) et le RMSE (racine de la somme moyenne des carrés des erreurs) ont été utilisés pour la validation des régressions, et la valeur Kappa (Cohen 1960) pour les classifications. Comme pour la spectroscopie, les coefficients de détermination des modèles se situaient pour la plupart dans une fourchette de 0.6 à 0.7, c'est-à-dire qu'ils étaient globalement bons à très bons.

## 7.1 Cartes de propriétés des sols

Lors de la modélisation spatiale, les propriétés des sols sont régionalisées pour différentes profondeurs sur la base des résultats des étapes précédentes de la modélisation spatiale et spectrale. Pour la modélisation, la profondeur d'échantillonnage a été utilisée comme variable prédictive. Des profondeurs fixes peuvent aussi être choisies pour l'établissement des cartes de base. Des modèles sont alors appliqués pour des profondeurs spécifiques (voir chapitre 7.1.1, 7.1.2, 7.1.3).

### 7.1.1 Teneur en carbone organique

La teneur en carbone organique des sols (Figure 34) est une propriété centrale qui influence de nombreuses fonctions pédologiques, comme notamment le cycle des nutriments et de l'eau ainsi que l'activité biologique. Les teneurs en carbone organique des horizons de surface varient entre 2 et 4.4 % environ. Les zones ayant la teneur en Corg la plus haute (>4 %) dans les premiers 20 cm du sol sont des pâturages. Les prairies permanentes à l'extrême nord du périmètre et celles au l'ouest de l'autoroute contiennent majoritairement entre 3 et 4 % de Corg. Les prairies temporaires et les terres ouvertes (cultures) contiennent, quant à elles, les plus faibles taux de carbones organiques. Les teneurs en Corg diminuent drastiquement avec la profondeur et sont comprises entre 0.3 et 2 %.

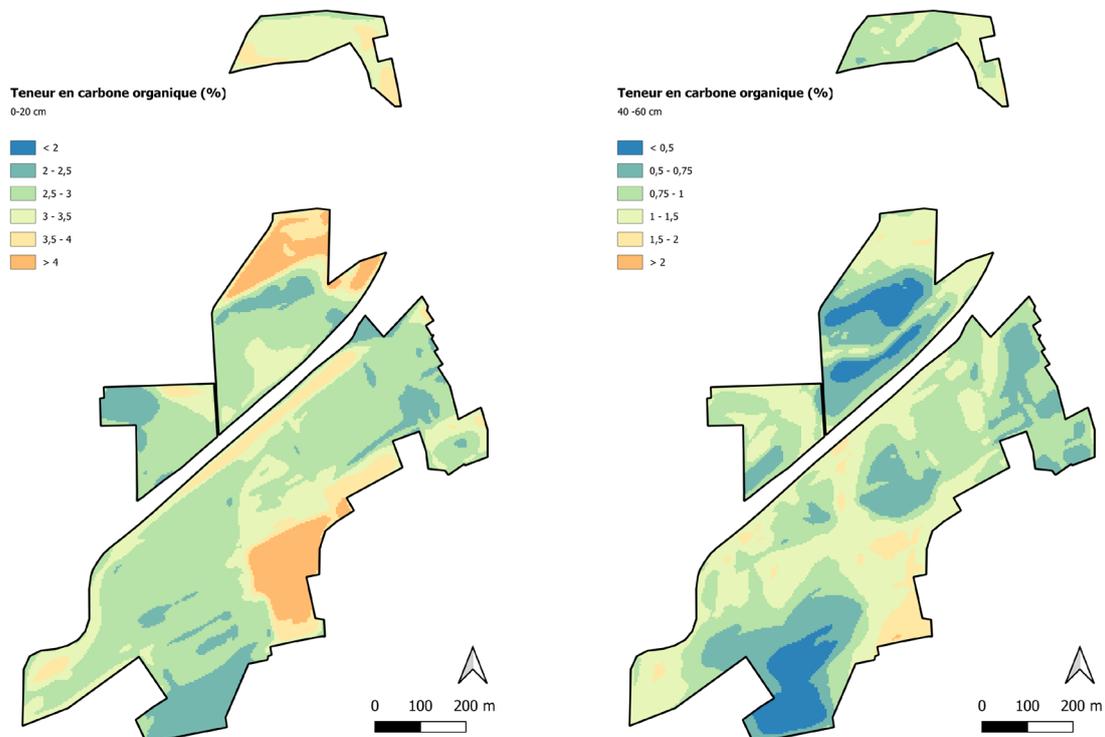


Figure 34 : Carte des propriétés des sols régionalisées des teneurs en carbone organique pour 2 profondeurs : 0 - 20 cm et 40 - 60 cm (remarque : les valeurs des catégories sont différentes entre les deux cartes).

### 7.1.2 Teneur en argile (texture)

L'argile est un matériau minéral fin et cohésif ( $< 0.002$  mm) qui influence de manière déterminante la circulation de l'air, de la chaleur et de l'eau dans le sol. La teneur en argile de la couche arable se situe principalement entre 14 et 18 % (Figure 35), il s'agit donc de couches arables légères à moyennement lourdes. Les teneurs en argile dans les horizons plus profonds (40-60 cm) se situent entre 0,25 et 1,5 %. Cette nette diminution ainsi que le manque de cohérence entre les horizons de surfaces et sous-jacents est très probablement dû au fait que la quasi-totalité du périmètre a été remaniée et remblayée plus ou moins profondément depuis plus de 100 ans.

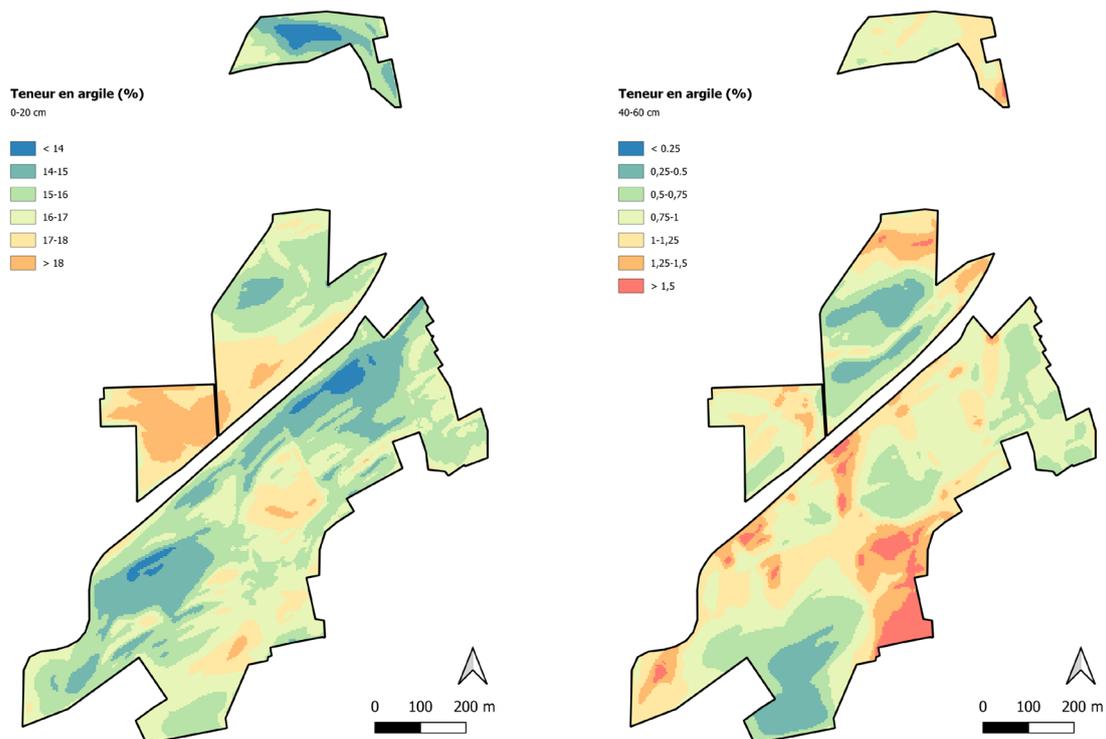


Figure 35 : Carte des propriétés des sols régionalisées des teneurs en argile pour 2 profondeurs : 0 - 20 cm et 40 - 60 cm (remarque : les valeurs des catégories sont différentes entre les deux cartes).

### 7.1.3 pH

Le pH est la mesure de l'acidité des sols et détermine entre autres la disponibilité des éléments nutritifs dans les sols (Figure 36). Les sols arables sont régulièrement chaulés afin d'assurer leur entretien, c'est pour cette raison que leur pH varie entre 5,75 et 7 (neutre - basique à faiblement acide). C'est également pour cette raison que les pH les plus élevés se situent dans ces zones. Dans la prairie permanente isolée tout au nord du périmètre, les valeurs pH sont proches de l'état naturel (pH 5-5,75).

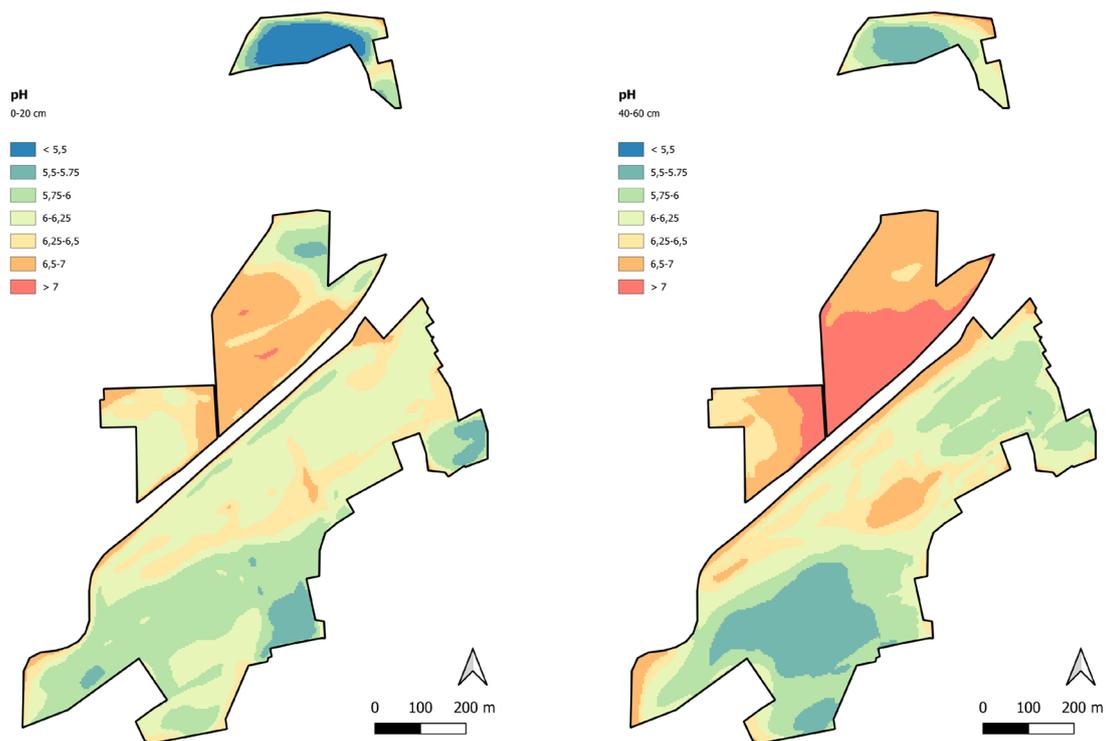


Figure 36 : Carte des propriétés des sols régionalisées des pH pour 2 profondeurs : 0 - 20 cm et 40 - 60 cm.

Vous trouverez des informations plus détaillées sur ce sujet dans le « Rapport CCSols n° 3 » (Nouvelles méthodes dans la cartographie des sols - projet pilote Diemerswil).

## 8 Cartes thématiques

L'une des étapes importantes de la cartographie des sols est l'élaboration des cartes thématiques. Elles illustrent, des informations pertinentes spécifiques à certains groupes d'utilisateurs. Dans celles-ci, les informations extraites des cartes de base sont représentées sous une forme interprétée. De manière optimale, les cartes thématiques mettent en lumière des options de gestion ou des mesures directement applicables permettant d'assurer une utilisation durable des sols au sens large. L'utilisation des cartes thématiques devrait permettre d'élargir fortement le cercle des utilisateurs d'informations pédologiques par rapport à la situation actuelle. En effet, grâce à celles-ci, les informations pédologiques pourront être plus utiles et faciles d'accès aux utilisateurs concernés par les domaines thématiques de la sylviculture, de l'agriculture, de l'aménagement du territoire, de la protection du climat et de la protection contre les crues et la sécheresse. Elles offrent également une possibilité de construire un pont entre les pédologues et de nombreux autres utilisateurs potentiels d'informations pédologiques (Keller et al. 2018). De cette manière, les cartes thématiques produites grâce à la cartographie des sols offrent une valeur ajoutée importante à une grande partie de la société.

Afin de répondre au mieux aux questions posées par le projet originel de construction de la zone Chamblieux-Bertigny, l'accent, dans le présent projet, a été mis sur le développement de cartes thématiques orienté vers une utilisation durable des sols dans l'aménagement du territoire. Dans le cadre d'un atelier en février 2022 intitulé « Gestion durable des sols Chamblieux-Bertigny » (Urbaplan 2022), une sélection de cartes thématiques pertinentes pour le contexte et potentiellement réalisables a été effectuée par les communes, les services cantonaux et les responsables des projets de construction. Les intérêts des acteurs se situaient surtout au niveau du régime hydrique du sol, d'une part au niveau du ruissellement de surface et d'autre part au niveau de la fonction de régulation du climat. L'accent a été mis sur la capacité de rétention en eau et l'eau potentiellement disponible pour l'évapotranspiration qui est centrale pour la capacité des sols à réguler le climat. En outre, des estimations de l'épaisseur de l'horizon supérieur et de l'horizon sous-jacent du sol, du stockage du carbone organique, du rapport carbone organique sur argile ainsi que des zones possibles de stockage intermédiaire des terres ont été réalisées.

Les méthodes utilisées pour cette sélection sont, en premier lieu, décrites ci-dessous (chapitre 8.1), puis les résultats des cartes thématiques sont présentés plus loin (chapitre 8.2).

### 8.1 Méthode

#### 8.1.1 Capacité de rétention en eau

Les sols sont un élément important du cycle de l'eau et, du fait de leur structure et de leurs propriétés, ils régulent de manière décisive le régime de l'eau dans l'environnement, l'infiltration, le ruissellement de surface et la capacité de rétention en eau essentielle pour que les plantes puissent avoir de l'eau. La quantité d'eau dans les sols disponibles pour les plantes varie selon les propriétés de ceux-ci. L'importante fonction de régulation des sols peut faire une différence décisive pour la production végétale, surtout pendant des étés secs, qui seront probablement plus fréquents en Suisse dans les années à venir (NCCS 2018). La structure, la composition, la texture et la teneur en matières organiques des sols influencent leur capacité à fournir de l'eau aux plantes. La réserve utile (RU en mm) est la quantité maximale d'eau que les sols peuvent stocker et procurer aux plantes. Un millimètre correspond à un litre d'eau par m<sup>2</sup>.

Si la perméabilité du sol est entravée, par exemple en raison d'un horizon bloquant l'eau à très faible conductivité hydraulique, le sol peut être saturé d'eau de manière permanente ou temporaire. Les conditions réductrices qui en résultent perturbent fortement la faune du sol, entravent la croissance des plantes ou rendent parfois difficile la praticabilité des sols. Toutefois, les sols ayant des nappes profondes permanentes stables ou à battements présentent un grand avantage lors d'années très sèches, comme ce

fût le cas en 2015, 2018 ou 2022 : ils disposent sur une longue période d'eau disponible pour les plantes à enracinement profond, et ce même en période de sécheresse.

### 8.1.2 Fonction de Régulation du climat

Les villes et les zones urbaines sont des îlots de chaleur, et ce principalement à cause du haut degré d'imperméabilisation de leurs sols. Néanmoins, les surfaces non imperméabilisées et végétalisées se réchauffent moins pendant la journée et, par conséquent, emmagasinent moins de chaleur et en redistribuent moins pendant la nuit. En outre, les surfaces imperméables freinent les flux d'air froid soufflant en direction des zones urbaines (ville de Zurich 2020). Les sols non imperméabilisés présentent des capacités différentes de régulation du climat. Plus les sols peuvent stocker d'eau disponible pour les plantes, plus ils peuvent approvisionner ceux-ci lors de périodes de faibles précipitations et plus l'évapotranspiration est importante. L'évapotranspiration refroidit l'air.

Le guide de Feldwisch (2016) évalue la capacité de régulation des sols selon ce mécanisme. Il illustre la capacité potentielle de régulation du climat des sols grâce à la quantité d'eau pouvant être stockée par les plantes. La capacité de réguler le climat ne dépend pas seulement de l'eau disponible pour les plantes, mais aussi de la végétation. Plus l'eau disponible pour les plantes est importante, plus le potentiel de régulation du sol est élevé (Feldwisch 2016). La réserve utile (RU) a été calculée telle que décrite dans le chapitre précédent « capacité de rétention en eau ». Les échelles d'évaluation ont été scindées en 4 classes selon la répartition des données de la zone cartographiée à Chamblieux-Bertigny (régulation du climat faible : <170 mm, moyenne : 170-220 mm, haute : 220-243 mm, très haute : >243 mm) et selon la répartition des données de la zone d'étude de la région de la Hesse en Allemagne (faible : <100 mm, moyenne : 100-200 mm, haute : 200-300 mm, très haute : >300 mm). Les sols situés dans le quartile inférieur selon leur PU reçoivent la plus mauvaise évaluation, les sols situés dans le quartile supérieur la meilleure. Ainsi, la représentation de la fonction de régulation des sols échelonnée avec les données des sols de la région de Chamblieux-Bertigny peut être comparée à celle réalisée grâce à l'échelle adaptée aux sols de la région de la Hesse.

### 8.1.3 Epaisseurs de l'horizon Ah et B

L'épaisseur de l'horizon Ah a été modélisée à partir des relevés de terrain et des données environnementales disponibles. La limite avec le sous-sol a été définie de la même façon. L'épaisseur de l'horizon B a été calculée grâce à la différence entre la limite de la profondeur de l'horizon Ah et celle du commencement du sous-sol.

### 8.1.4 Stockage du carbone organique et rapport carbone organique sur argile

La matière organique joue un rôle central dans la régulation de l'eau, des nutriments et du climat. Les données collectées ont permis d'estimer le stockage du carbone organique et le rapport carbone organique sur argile des sols. Le stockage du carbone organique a été calculé avec la teneur en matière organique, la masse volumique apparente de la terre fine (en utilisant les fonctions de pédotransferts (FPT), Nussbaum et Papritz 2015) et la teneur en squelette (estimée en utilisant la profondeur utile pour les plantes) et estimé pour les 30 premiers centimètres du sol.

Les sols suisses avec une bonne structure pédologique ont un rapport optimal carbone organique sur argile de 1/8 (~0.13). Il a été postulé qu'une teneur en matière organique correspondant à ce rapport et fluctuant avec la teneur en argile est la teneur maximale en matière organique stable à long terme pouvant être atteinte (Johannes et al. 2017 ; Keel et al. 2021). Sur cette base, le rapport entre la teneur en carbone organique et la teneur en argile a été calculé pour Chamblieux-Bertigny jusqu'à une profondeur de 30 cm. Ce rapport est utilisé comme indicateur du potentiel d'enrichissement en matière organique. Pour plus de détails sur la méthode de calcul et le contexte des évaluations, voir le rapport KOBONr. 3 (Keller et al. 2023).

## 8.2 Résultats

### 8.2.1 Capacité de rétention en eau

La capacité de rétention en eau des sols de Chamblieux-Bertigny a été illustrée en utilisant la réserve utile en eau pour les plantes (RU). Elle varie entre le nord et le sud de l'autoroute. Alors que les sols au sud présentent une capacité de rétention en eau de moyenne à élevée (RU supérieure à 150 mm), les sols au nord de l'autoroute, principalement des remblais, ont une capacité de rétention en eau plus faible, inférieure à 150 mm (voir Figure 37). La limitation de la RU causée par la compaction et la mauvaise structure des horizons apparaît clairement au nord, comme le montre également la carte de la profondeur utile pour les plantes (voir Figure 38). La médiane de la RU dans la région, estimée grâce à une méthodologie propre au projet, est de 220 mm. Cette valeur paraît trop élevée. Par exemple, elle se situe dans le quart supérieur par rapport à la RU des sols de l'Observation nationale des sols (NABO), déduite de la même fonction de pédotransfert (FPT) selon la KA5 (2005). L'estimation réalisée grâce aux données NABO permet d'estimer la variabilité des sols suisses. Selon le guide cartographique allemand (KA5 2005), cette valeur est très élevée. Dans la KA5, les valeurs de 50 à 90 mm sont considérées comme faibles, celles de 90 à 140 mm comme moyennes et celles de 140 à 200 mm comme élevées pour une profondeur de 1 mètre ou jusqu'à un horizon limitant. Les valeurs supérieures à 270 mm sont considérées comme extrêmement élevées.

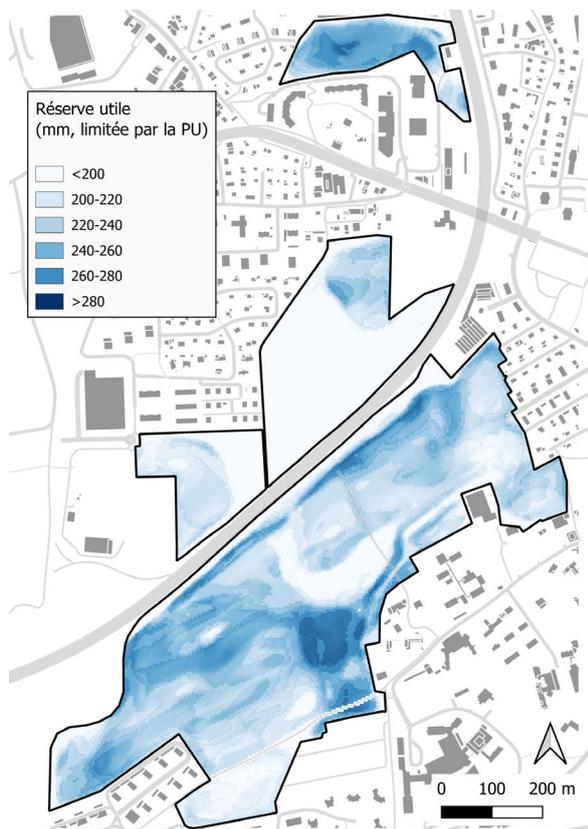


Figure 37 : La réserve utile dans le périmètre de Chamblieux-Bertigny (profondeur maximale de : 85 cm ou jusqu'à la limite supérieure d'un horizon gg ou r ou jusqu'à la limite supérieure de la profondeur utile).

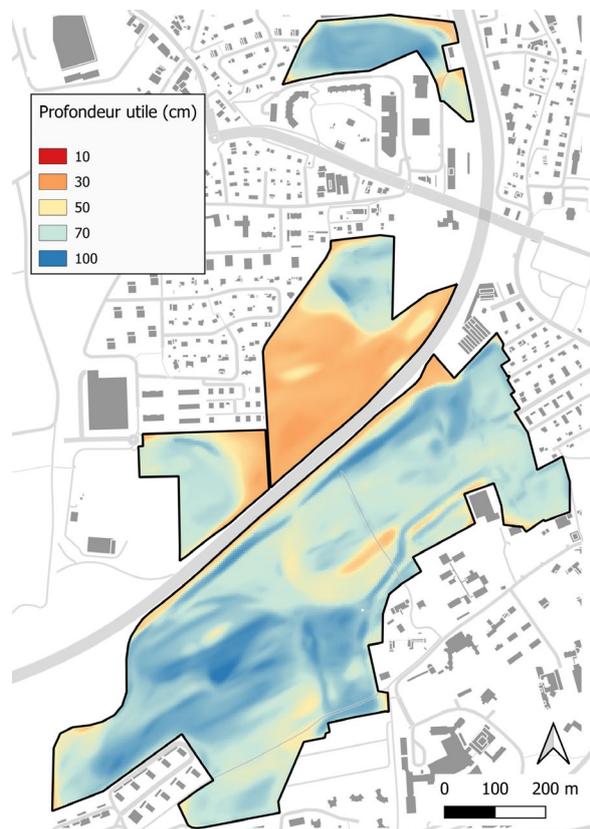


Figure 38 : Profondeur utile dans le périmètre de Chamblieux-Bertigny.

A Chamblieux-Bertigny, la profondeur utile médiane est d'environ 70 cm (voir Figure 38). Selon les indications cartographiques de l'ancienne station de recherche en agroécologie et agriculture de 1997 (Station fédérale de recherches en agroécologie et agriculture, Zurich-Reckenholz 1997), une profondeur utile de 70 cm devrait correspondre à une quantité d'eau facilement disponible pour les plantes d'environ 70 mm.

Les raisons de l'estimation probablement trop élevée de la RU pourraient provenir d'une part des FPT utilisées pour la masse volumique apparente de la terre fine, de la RU elle-même et de l'appréciation de la teneur en squelette. De plus, la région comporte de nombreux remblais et par conséquent il est possible que l'estimation de la réserve utile avec la méthode décrite ne soit pas probante.

### 8.2.2 Fonction de régulation du climat

La fonction de régulation du climat est exprimée grâce à la réserve utile et équivaut à une classification des valeurs de celle-ci. Au nord de l'autoroute, la capacité de régulation du climat potentielle est faible en raison de la quantité d'eau pouvant être stockée pour les plantes (selon l'échelle d'évaluation de Chamblieux-Bertigny, Figure 39) ou se situe dans une zone moyenne (selon l'échelle d'évaluation de Feldwisch (2016), Figure 40). Au sud de l'autoroute, la capacité de régulation du climat est plus élevée. En période de sécheresse, les sols au sud stockent plus longtemps l'eau disponible pour les plantes. Comme les valeurs de la réserve utile ont probablement été surestimées, les cartes de la fonction de régulation du climat doivent également être considérées avec la prudence nécessaire. En partant du principe que la surestimation a eu lieu de la même manière pour tous les sols, l'évaluation basée sur l'échelle de Chamblieux-Bertigny ne peut pas fournir d'informations absolues, mais tout de même relatives.

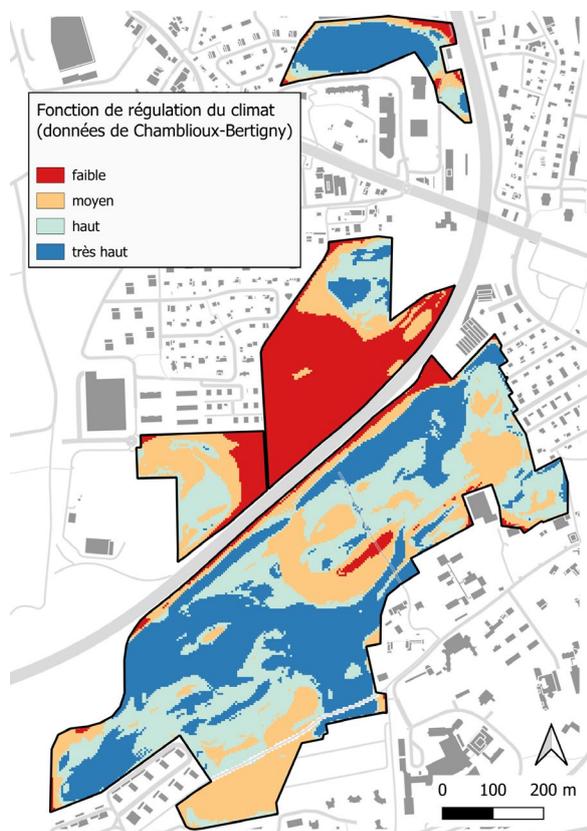


Figure 39 : Fonction de régulation du climat dans le périmètre de Chamblieux-Bertigny, l'échelle a été basée uniquement sur les données de Chamblieux-Bertigny.

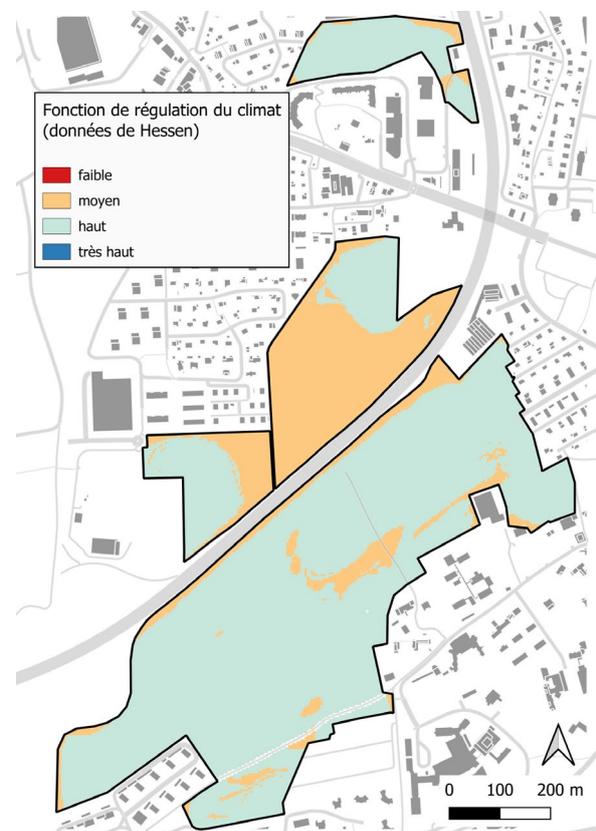


Figure 40 : Fonction de régulation du climat dans le périmètre de Chamblieux-Bertigny, l'échelle est basée sur l'évaluation originale des sols de Feldwisch (2016).

### 8.2.3 Epaisseur de l'horizon Ah et B

L'épaisseur de l'horizon Ah dans le périmètre de Chamblieux-Bertigny varie environ entre 7 et 40 cm, voir Figure 41. La profondeur de cet horizon de surface a tendance à être plus importante au nord de l'autoroute qu'au sud. L'épaisseur des horizons B est entre 42 et 104 cm (Figure 42), avec des sous-sols qui ont tendance à être moins épais au nord de l'autoroute. Ces constatations sont probablement dues à la différence de structure des remblais. Par exemple, le profil 2, dont le type de sol est un remblai, est

composé d'horizons supérieurs (OB) de 41 cm d'épaisseur posés sur des couches de sous-sol (UG), sans couche sous-jacente du sol (UB).

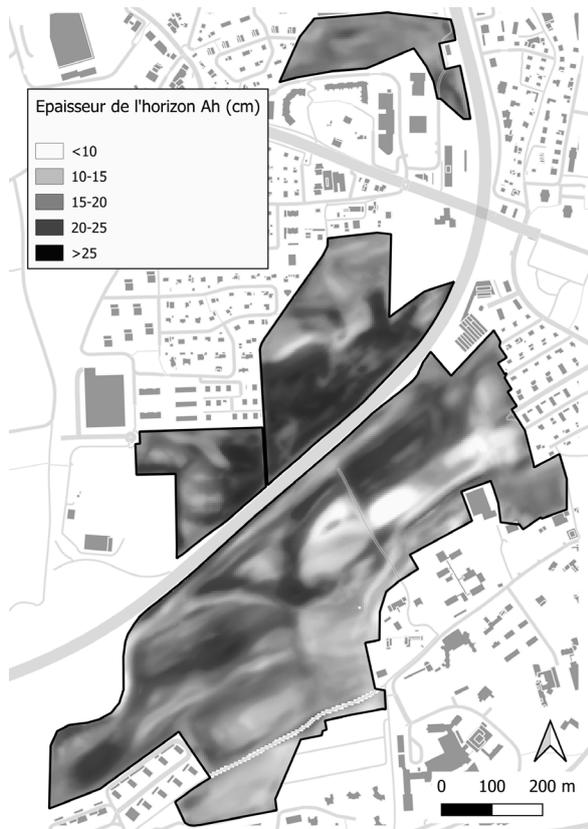


Figure 41 : Epaisseur de l'horizon Ah dans le périmètre de Chamblieux-Bertigny.

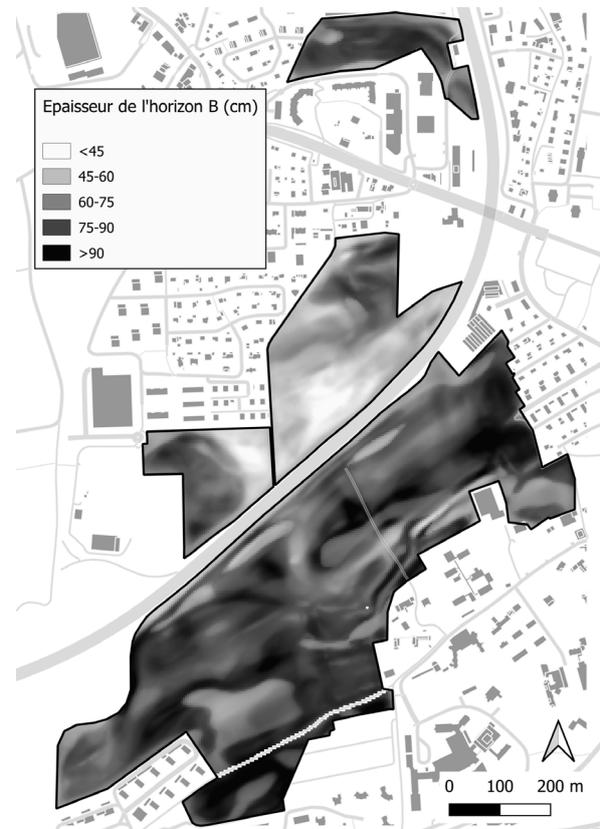


Figure 42 : Epaisseur de l'horizon B.

#### 8.2.4 Stockage du carbone organique et rapport carbone organique sur argile

Le stockage médian du carbone organique estimé pour les sols de Chamblieux-Bertigny est d'environ 80 tonnes par hectare (t/ha) dont un quart des sols ont un stock estimé à plus de 90 t/ha (Figure 43). Les teneurs en argile dans la région varient entre 10 et 20 % et les teneurs en carbone organique sont comprises entre 1.3 et 4.1 %. Les teneurs en carbone organique modélisées sont assez élevées par rapport aux teneurs en argile (en moyenne de 0.16 fois). Selon la méthode de Johannes et al. (2017), le potentiel d'enrichissement en carbone organique de ces sols est limité. Les quelques surfaces présentant des réserves de carbone organique plus faibles ont un rapport carbone sur argile plus bas et donc un potentiel d'enrichissement en carbone plus élevé (Figure 44).

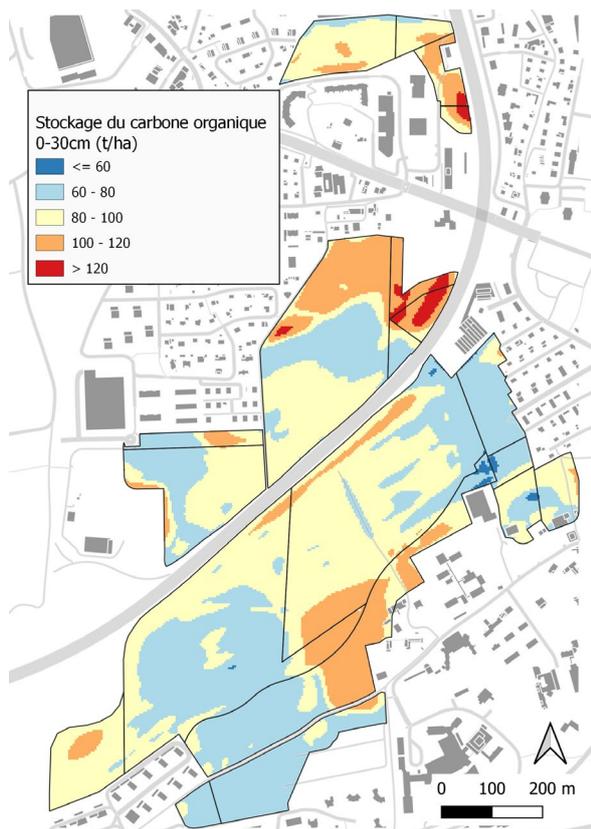


Figure 43 : Stockage du carbone organique dans les premiers 30 cm du sol en t/ha dans le périmètre de Chamblieux-Bertigny.

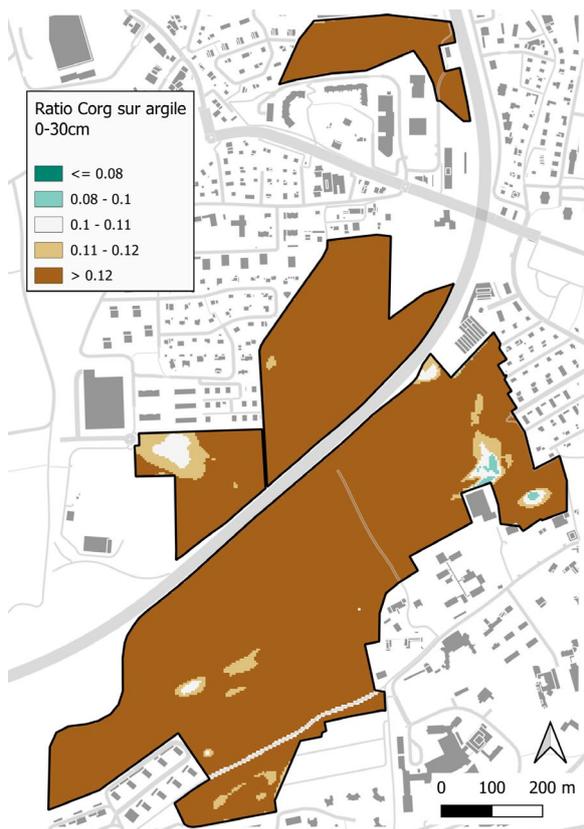


Figure 44 : Rapport carbone organique sur argile dans les premiers 30 cm du sol dans le périmètre de Chamblieux-Bertigny.

### 8.3 Perspectives

Le projet dans le périmètre de Chamblieux-Bertigny est un des premiers projets de cartographie du CCSols. Les prochains projets auront un panel d'offre de cartes thématiques élargi. Il est prévu de définir des priorités thématiques dans ces futurs projets et d'élaborer des cartes pour différents groupes d'utilisateurs.

Outre l'élargissement quantitatif de la gamme de cartes thématiques, l'amélioration qualitative des cartes existantes est également un thème important. Les expériences acquises grâce à ce projet ainsi que les feedbacks reçus sur les cartes thématiques seront utilisés pour améliorer les cartes thématiques similaires dans les futurs projets du CCSols.

## 9 Conclusion et perspectives

### Conclusion

Le CCSols a comme objectif d'aider à accélérer le développement technique de la cartographie des sols. A cette fin, il coordonne et standardise les méthodes, les appareils et les outils utilisés pour relever, évaluer et mettre à disposition les informations pédologiques en Suisse. Afin de tester des innovations pour la cartographie des sols et de les optimiser pour le travail pratique sur le terrain, le CCSols réalisera dans les années à venir, en collaboration avec les cantons, les offices fédéraux et des bureaux d'ingénieurs, des projets pilotes dans différentes régions de Suisse sur des zones d'environ 200 à 300 ha.

La phase d'exploitation du CCSols a débuté en 2021, à la suite de la phase de démarrage et de déploiement, qui s'est achevée fin 2020. Le projet d'aménagement du territoire de Chamblieux-Bertigny a permis de tester et d'utiliser concrètement sur une surface d'environ 50 hectares, pour la première fois, plusieurs innovations dans le cadre d'une cartographie des sols. Ce projet a été un prétest qui a donné l'occasion au CCSols de développer, en collaboration avec le canton de Fribourg, les bases des projets pilotes qui lui ont succédé. Les expériences acquises se sont révélées extrêmement utiles pour la planification et la réalisation du premier projet pilote dans la commune de Diemerswil (canton de Berne).

L'un des principaux objectifs de ce projet était de concevoir et de développer un système de sondage léger et facilement maniable reposant sur un véhicule porteur. Les véhicules de sondage ne sont pas récents, ils ont déjà été utilisés dans les années 1980 afin d'améliorer l'efficacité de la cartographie des sols. Leur utilisation a été abandonnée pour diverses raisons au fil du temps. En Suisse et au niveau international, différents types de systèmes de sondage sont développés et testés. Le CCSols a évalué plusieurs systèmes de sondage pouvant satisfaire aux exigences posées par la cartographie des sols et a finalement développé un système innovant en collaboration avec l'entreprise GreenGround AG. Il permet de réaliser des sondages et des prélèvements d'échantillons volumétriques avec un diamètre de 5 ou 8 cm jusqu'à une profondeur maximale de 1.20 mètre. En août 2021, le véhicule de sondage a été mis en service pour la première fois sur les terrains de Chamblieux-Bertigny. Cette innovation technique a ouvert de nouvelles possibilités permettant une cartographie efficace de zones plus étendues.

De plus, le projet a permis de rassembler les premières expériences sur l'analyse spectroscopique des propriétés des sols en laboratoire (NIR et MIR). L'étalonnage des spectres a montré le potentiel de la spectroscopie pour déterminer les propriétés des sols à moindre coût dans les cartographies des sols. La qualité de l'étalonnage des spectres était globalement bonne. Cependant, certaines optimisations sont encore nécessaires en ce qui concerne la logistique et la préparation des échantillons. Le concept d'échantillonnage hiérarchique ainsi que la modélisation spatiale à l'aide de méthodes mathématiques et statistiques ont été utilisés de façon innovante dans cette cartographie des sols. Ainsi, il a été possible de générer des cartes de propriétés des sols pour différents niveaux de profondeur.

De plus, ce projet a permis, pour la première fois dans le cadre d'une cartographie des sols, de représenter sous forme de cartes des propriétés des sols et de cartes thématiques utiles au projet d'aménagement du territoire cantonal en cours, les résultats obtenus grâce aux nouvelles méthodes. Les cartes thématiques ont été développées en collaboration avec les différents groupes d'utilisateurs afin de répondre au mieux à leurs besoins dans le cadre du projet d'aménagement urbain.

### Perspectives

D'autres projets pilotes sont nécessaires pour optimiser les processus de travail, les interactions, la gestion des données et les synergies entre le travail sur le terrain, le travail en laboratoire et le traitement des données. Afin d'assurer le succès de la cartographie des sols, une étroite collaboration entre la Confédération, les cantons, l'économie privée et le CCSols est indispensable.

Le développement de la cartographie des sols est orienté pour qu'à l'avenir, la durée et les coûts de la cartographie de grandes zones puissent être réduits. Afin d'obtenir ces résultats grâce aux développements techniques, la taille des zones à cartographier joue un rôle central. En effet, plus les zones à cartographier sont grandes, plus les effets d'échelle sont importants et plus la plus-value obtenue grâce aux nouvelles méthodes sera probablement importante.

Le projet d'aménagement de Chamblieux-Bertigny, quant à lui, suit son cours avec, entre autres, des projets architecturaux et des projets IQS menés par différentes institutions. Bien que le secteur sera majoritairement construit dans les prochaines années, conformément au plan d'urbanisme, il devrait représenter un projet pionnier prenant en compte la gestion des ressources et les fonctions des sols. Ce projet marque le début d'un échange pluriannuel visant à mettre en relation les informations pédologiques produites par le Centre de compétences sur les sols avec les besoins des autres acteurs et les différents intérêts en jeu dont notamment les fonctionnalités du sol et l'indice de qualité des sols (IQS).

## 10 Annexes

L'annexe se compose de deux parties : Annexe A (méthodes de laboratoire) et Annexe B (description des profils pédologiques) et peut être téléchargé en cliquant sur le lien suivant : [Projet Fribourg-Chamblioux - Centre de compétences sur les sols \(ccsols.ch\)](http://Projet.Fribourg-Chamblioux-Centre.de.compétences.sur.les.sols.ccsols.ch).

## 11 Tableaux

Tableau 1 : Rôles et réalisations clés dans l'organisation du projet Chamblieux-Bertigny.	13
Tableau 2 : Aperçu des différents niveaux hiérarchiques du concept d'échantillonnage	24
Tableau 3 : Illustration du nombre d'analyses chimiques mesurées avec des analyses de référence.	31

## 12 Figures

Figure 1 : Projet d'agglomération Chamblieux-Bertigny. Le périmètre du projet est représenté en rouge. Carte de fond : zone urbaine de Fribourg [online], 46°47'43"N 7°07'27"E, altitude 746 m, Google Earth pour Chrome, © Google 30/5/2023, URL : <a href="http://www.google.com/earth">http://www.google.com/earth</a>	10
Figure 2 : Déroulement de la cartographie des sols en 3 phases : 1) préparation du projet et phase conceptuelle, 2) campagne de terrain et réalisation des cartes de bases, 3) Evaluation et produits.	11
Figure 3 : Vue de la zone d'étude prise depuis un champ de la partie sud du périmètre.	14
Figure 4 : Autoroute N12 séparant la zone d'étude.	14
Figure 5 : Champs de la partie sud du périmètre.	14
Figure 6 : Extrait de l'Atlas géologique de la Suisse 1:25000 (Office fédéral de topographie swisstopo). Le périmètre du projet est représenté en rouge.	15
Figure 7 : Illustration de la pente classée selon l'échelle de la FAL24+.	16
Figure 8 : Illustration du périmètre du projet Chamblieux-Bertigny du CCSols (fond de carte : carte nationale (couleur) 1:10'000, swisstopo).	18
Figure 9 : Réalisation d'un concept d'échantillonnage hiérarchisé : a) emplacements des profils (H1) ; b) emplacements des sondages (H2) ; c) emplacements des échantillonnages destinés aux analyses spectroscopiques (NIR et MIR) dans le laboratoire (H3) ; d) emplacements des sondages avec traitements supplémentaires (H4).	20
Figure 10 : Véhicule de sondage utilisé à Chamblieux-Bertigny.	22
Figure 11 : Drapeau utilisé pour marquer les emplacements des sites H1, H2 et H4 avant le passage du véhicule de sondage.	22
Figure 12 : Sondages prélevés à l'aide du véhicule de sondage. Le matériel a été sorti de la cartouche et préparé.	22
Figure 13 : Préparation de la carotte pour la description pédologique dans une boîte spécialement conçue à cet effet.	22
Figure 14 : Interface de saisie de Soildat.	23
Figure 15 : Aperçu de l'emplacement des profils H1 (SP=Site, Profil).	26
Figure 16 : Aperçu de l'emplacement des sondages H2 (SB=Site, Bohrung).	27
Figure 17 : Description d'un sondage.	27
Figure 18 : Aperçu de l'emplacement des échantillonnages H3 (SN=Site, NIR).	28
Figure 19 : Aperçu de l'emplacement des sondages H4 (SB=Site, Bohrung).	29
Figure 20 : Tri manuel de l'échantillon de sol fraîchement prélevé sur le terrain.	30
Figure 21 : Concasseur à mâchoires permettant de broyer les agrégats.	30
Figure 22 : Moulin à billes de 5 étages.	31
Figure 23 : Stade final de la préparation des échantillons : flacons en plastique contenant les échantillons pédologiques finement broyés (<100mm).	31
Figure 24 : Aperçu de l'emplacement des sites sur lesquels des analyses ont été réalisées (les sites analysés à l'aide de la spectroscopie ne sont pas illustrés).	32

Figure 25 : Cylindres munis d'une surface minutieusement préparée de sorte qu'elle soit la plus plate possible afin de maximiser les contacts.	33
Figure 26 : Phase de saturation en eau des cylindres avant leur passage dans la marmite à pression ou le HYPROP.	33
Figure 27 : Installation des échantillons dans la marmite à pression.	34
Figure 28 : Echantillon en cours d'analyse sur le HYPROP.	34
Figure 29 : Mesure de la courbe de rétention en eau pour trois profondeurs différentes pour le profil pédologique 1 situé dans une prairie permanente. Le système de mesure HYPROP permet de mesurer le potentiel de succion (potentiel matriciel) jusqu'à pF 3.5 (zone humide à gauche), le WP4C mesure la plage pF 4.0 à 6.5 (zone sèche à droite). Le point de flétrissement permanent se situe à pF 4.2 (T1 : couche supérieure du sol, T2 et T3 : couche sous-jacente du sol, T = Tiefe = profondeur).	34
Figure 30 : Büchi NIRFlex-N500 spectromètre infrarouge proche (NIR) avec ustensiles de mesure et ordinateur portable.	35
Figure 31 : Bruker INVENIO équipé d'un module à haut débit (HTS-XT).	35
Figure 32 : Remplissage de la plaque de mesure multi-échantillon avant la mesure MIR (© Susanne Goldschmid/OFEV).	35
Figure 33 : Déroulement de la spectroscopie à infrarouge.	36
Figure 34 : Carte des propriétés des sols régionalisées des teneurs en carbone organique pour 2 profondeurs : 0 - 20 cm et 40 - 60 cm (remarque : les valeurs des catégories sont différentes entre les deux cartes).	37
Figure 35 : Carte des propriétés des sols régionalisées des teneurs en argile pour 2 profondeurs : 0 - 20 cm et 40 - 60 cm (remarque : les valeurs des catégories sont différentes entre les deux cartes).	38
Figure 36 : Carte des propriétés des sols régionalisées des pH pour 2 profondeurs : 0 - 20 cm et 40 - 60 cm.	39
Figure 37 : La réserve utile dans le périmètre de Chamblieux-Bertigny (profondeur maximale de : 85 cm ou jusqu'à la limite supérieure d'un horizon gg ou r ou jusqu'à la limite supérieure de la profondeur utile).	42
Figure 38 : Profondeur utile dans le périmètre de Chamblieux-Bertigny.	42
Figure 39 : Fonction de régulation du climat dans le périmètre de Chamblieux-Bertigny, l'échelle a été basée uniquement sur les données de Chamblieux-Bertigny.	43
Figure 40 : Fonction de régulation du climat dans le périmètre de Chamblieux-Bertigny, l'échelle est basée sur l'évaluation originale des sols de Feldwisch (2016).	43
Figure 41 : Epaisseur de l'horizon Ah dans le périmètre de Chamblieux-Bertigny.	44
Figure 42 : Epaisseur de l'horizon B.	44
Figure 43 : Stockage du carbone organique dans les premiers 30 cm du sol en t/ha dans le périmètre de Chamblieux-Bertigny.	45
Figure 44 : Rapport carbone organique sur argile dans les premiers 30 cm du sol dans le périmètre de Chamblieux-Bertigny.	45

## 13 Liste des abréviations

Terme	Explication
<b>DSM</b>	Digital Soil Mapping
<b>KA</b>	Manuel de cartographie FAL24 : Cartographie et estimation des sols agricoles. Station fédérale de recherches en agroécologie et agriculture, Zurich-Reckenholz (FAL) (Station fédérale de recherches en agroécologie et agriculture, Zurich-Reckenholz 1997)
<b>ksat</b>	Conductivité hydraulique à saturation
<b>Site H1</b>	1 <sup>e</sup> niveau hiérarchique du concept d'échantillonnage : profil pédologique
<b>Site H2</b>	2 <sup>eme</sup> niveau hiérarchique du concept d'échantillonnage : sondages pédologiques décrits réalisés majoritairement à l'aide du véhicule de sondage
<b>Site H3</b>	3 <sup>eme</sup> niveau hiérarchique du concept d'échantillonnage : échantillons prélevés à la main pour les mesures spectroscopiques
<b>Site H4</b>	4 <sup>eme</sup> niveau hiérarchique du concept d'échantillonnage : sondages pédologiques décrits avec prélèvements d'échantillon volumétriques destinés aux analyses des propriétés physiques et chimiques des sols
<b>CCSols / KOBO</b>	Centre de compétences sur les sols / Kompetenzzentrum Boden
<b>CEC</b>	Capacité d'échange cationique
<b>MIR</b>	Spectroscopie dans l'infrarouge moyen. La spectroscopie MIR utilise la longueur d'onde de la lumière d'une comprise entre 5 et 25 $\mu\text{m}$
<b>NABODAT</b>	Système national d'information pédologique (est pris en charge par le «Centre de services NABODAT»)
<b>NIR</b>	Spectroscopie dans l'infrarouge proche. La spectroscopie NIR utilise la longueur d'onde de la lumière d'une comprise entre 0.7 – 1.4 $\mu\text{m}$ environ.
<b>RU</b>	Réserve utile
<b>PU</b>	Profondeur utile
<b>Soildat</b>	Soildat est une application web permettant la saisie de données pédologiques ponctuelles (profils & sondages) utilisable directement sur le terrain avec des appareils mobiles ou dans un bureau

## 14 Références

- Afu Solothurn, 2020. Projekthandbuch Kanton Solothurn. KARTIERMETHODIK, Teil III, Kartiermethode FAL24+ (6. Auflage), 45 p.
- Behrens T, Förster H, Scholten T, Steinrücken U, Spies ED, Goldschmitt M, 2005. Digital soil mapping using artificial neural networks. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 168, p. 21–33.
- Behrens T, Hertzog M, Schmidt K, Keller A, 2023. TerraPoly - Karten zu multiskaligen Reliefableitungen zur Unterstützung der Konzeptphase und Feldarbeiten in Bodenkartierungen, Service du CCSols, 11 p.
- Behrens T, Schmidt C, Keller A, 2017a. Digital Soil Mapping, Factsheets. OFEV (Soilution GbR et l'Observatoire national des sols (NABO), Mandant : Office fédéral de l'Environnement, Zurich.
- Behrens T, Schmidt K, MacMillan RA, Viscarra Rossel RA, 2018. Multi-scale digital soil mapping with deep learning. *Scientific reports*, 8 (1), 15244.
- Behrens T, Scholten T, 2006a. Digital soil mapping in Germany - A review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 169 (3), p. 434–443.
- Behrens T, Scholten T, 2006b. A Comparison of Data-Mining Techniques in Predictive Soil Mapping, p. 353–617
- Breiman L, 1996. Bagging predictors. *Machine learning*, 24, p. 123–140.
- Centre de services NABODAT, 2022. Système national d'information pédologique (NABODAT). Page internet du Centre de services de NABODAT. Consulté le 10.07.2022, <https://www.nabodat.ch/index.php/fr/>
- Cohen J, 1960. A Coefficient of Agreement for Nominal Scales.
- ESA, 2022. Sentinel-2. The European Space Agency, 17.01.2023. Consulté le 17.01.2023, [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Sentinel-2](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2)
- Feldwisch N, 2016. Planung mit Tiefgang. Vorsorgender Bodenschutz: Wissen für die Praxis. Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.
- Google Earth pour Chrome, 2024. Zone urbaine de Fribourg [online], 46°47'43"N 7°07'27"E, altitude 746 m, Google Earth pour Chrome, © Google 30/5/2023, URL : <https://earth.google.com/web/@46.80333725,7.12938105,679.37055408a,2543.83201508d,35y,23.56784598h,63.60993576t,0r>. Consulté le 04.01.2024 à 9:20.
- Grimm R, Behrens T, Märker M, Elsenbeer H, 2008. Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island - Digital soil mapping using Random Forests analysis. *Geoderma*, 146 (1-2), p. 102–113.
- 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, p.14–21.
- KA5, 2005. Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Staatliche Geologische Dienste der Bundesrepublik Deutschland
- Keel SG, Johannes A, Boivin P, Burgos S, Charles R, Hagedorn F, Kulli B, Leifeld J, Saluz A, Zimmermann S, 2021. Soil carbon sequestration in Switzerland: analysis of potentials and measures (Postulate Bourgeois 19.3639). Report by Agroscope, 129 p.
- Keller A, Franzen J, Knüsel P, Papritz A, Zürrer Z, 2018. Plateforme d'information des sols suisse (pis-ch). Informations du sol, méthodes et instruments pour une utilisation durable de la ressource sol Synthèse thématique 4 du programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68), Berne, 132 p.

- Keller A, Grob U, Herzog M, Zahner D, Greiner L, Stumpf F, Petter G, Wallner M, Sprafke T, Racine S, Carrera E, Baumann P et Behrens T, 2023. Neue Methoden in der Bodenkartierung - Pilotprojekt Diemerswil. KOBO-Bericht Nr. 3, BFH-HAFL, CH-3052 Zollikofen-Bern, 99 p.
- Kennard RW, Stone LA, 1969. Computer aided design of experiments. *Technometrics*, 11 (1), p. 137–148.
- Kuhn M, Weston S, Keefer C, Coulter C, Quinlan R, 2020. Cubist: Rule- And Instance-Based Regression Modeling
- Marugg D, Schmidhauser AS, 2020. Guide pour la révision du manuel de cartographie des sols de Suisse. Révision de la classification des sols de Suisse et du manuel de cartographie des sols (rév. KLABS/KA) Module B : Représentation spatiale. BFH-HAFL, Zollikofen, 85 p.
- Minasny B, 2016. Digital soil mapping: a brief history and some lessons. *Geoderma*, 264, p. 301–311,
- Mosimann T, 2013. Flächenhafte Modellierung von Waldbodeneigenschaften in der Nordwestschweiz. *Schweiz Zeitschrift Forstwesen*, 164, p. 10–22.
- Nussbaum M, 2018. Evaluation of digital soil mapping approaches with large sets of environmental covariates. *SOIL*, 4 (1), p. 1–22
- Nussbaum M, Papritz A, 2015. Transferfunktion Dichte. Einfache PTF für PMSoil. Dokumentation Analyse
- NCCS (National Centre for Climate Services), 2018. CH2018. Klimaszenarien für die Schweiz. National Centre for Climate Services, Zürich. ISBN-Nummer 978-3-9525031-0-2, 24 p.
- Oechslin S, 2022. Bodenkartierung St. Galler Rheintal, unveröffentlicht. Berner Fachhochschule BFH-HAFL. Forschungsgruppe Bodennutzung und Bodenschutz, Länggasse 85, CH-3052 Zollikofen. 84 p. plus Annexes.
- Office fédéral de la topographie swisstopo, 2021. swissALTI3D. consulté le 18.01.2023, <https://www.swisstopo.admin.ch/fr/geodata/height/alti3d.html>
- Quinlan JR, 1993. Combining Instance-Based and Model-Based Learning. In: *International Conference on Machine Learning*.
- Ramirez-Lopez L, Schmidt K, Behrens T, van Wesemael B, Demattê J am, Scholten T, 2014. Sampling optimal calibration sets in soil infrared spectroscopy. *Geoderma*, 226, p. 140–150.
- R Core Team, 2022. R: A Language and Environment for Statistical Computing. version 4.2.1. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Schmidt K, Behrens T, Daumann J, Ramirez-Lopez L, Werban U, Dietrich P, Scholten T, 2014. A comparison of calibration sampling schemes at the field scale. *Geoderma*, 232, p. 243–256.
- Schindler U, Doerner J, Müller L, 2015. Simplified method for quantifying the hydraulic properties of shrinking soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 178 (1), p. 136–145.
- SSP (Société suisse de pédologie), 2010. Classification des sols de Suisse. Examen du profil, système de classification, définition des termes, exemples d'utilisation (3. édition), 97 p.
- Station fédérale de recherches en agroécologie et agriculture, Zurich-Reckenholz, 1997. Manuel de cartographie et estimation des sols agricoles, traduction 2016, 175 p.
- Stumpf F, Behrens T, Schmidt K, Keller A, 2023. Hinweiskarten für Bodeneigenschaften Landesweit modellerte - Karten für Bodeneigenschaften für drei Tiefenstufen, Service du CCSols, 39 p.

- Urbaplan, 2022. Gestion durable des sols - Concept directeur pour le secteur Chamblieux - Bertigny, 13 p.
- USGS, 2022. Landsat Data Products. U.S. Geological Survey, 17.01.2023. Consulté le 17.01.2023, <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products>
- Ville de Zurich, 2020. Fachplanung Hitzeminderung. <https://www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/gsz/planung-und-bau/fachplanung-hitzeminderung.html>
- Viscarra-Rossel RA, Behrens T, 2010. Using data mining to model and interpret soil diffuse reflectance spectra. *Geoderma*, 158 (1-2), p. 46–54.
- Viscarra Rossel RA, Behrens T, Ben-Dor E, Chabrillat S, Dematté J, Ge Y, Gomez C, Guerrero C, Peng Y, Ramirez-Lopez L, Shi Z, Stenberg B, Webster R, Winowiecki L, Shen Z, 2022. Diffuse reflectance spectroscopy for estimating soil properties: A technology for the 21st century. *Journal of Soil Science*, 73 (4).
- Weiss L, Lutz S, Keller T, Weiskopf P, 2021. Propriétés physiques des sols : recherche sur l'état de la technique des méthodes de détermination et des appareils. Agroscope, Forschungsgruppe Bodenqualität und Bodennutzung. Rapport du CCSols n° 1, BFH-HAFL, CH-3052 Zollikofen-Berne