



Description, classification et cartographie des sols de Suisse : partie III Manuel de cartographie (KA23)

Julia Siegrist et Daniela Marugg

Avec l'aide et l'accompagnement de Nicolas Ballesteros, Karin Baumgartner, Marco Carizzoni, Thomas Gasche, Urs Grob, Markus Günther, Armin Keller, Madlene Nussbaum, Stefan Oechslin, Daniela Oriet, Anna Plotzki, Andreas Ruef, Anina Schmidhauser, Brigitte Suter, Teresa Steinert, Gaby von Rohr, Michael Wernli, Martin Zürrer ;

ainsi que :

- du groupe de travail *Cartographie des sols* de la Société suisse de pédologie ;
- du comité d'experts du projet de révision KLABS/KA ;
- du comité du projet de révision KLABS/KA ;
- du mandant du projet de révision KLABS/KA (OFEV, Ruedi Stähli) ;
- de la gestion de la qualité et des risques du projet de révision KLABS/KA (Basler & Hofmann AG, Bruno Grünenfelder, Matias Laustela).

Traduction : Stéphane Cuennet

Révision : Stéphane Burgos, Dylan Tatti, Roxane Tuchs Schmid, Catherine Fischer

30 juin 2023

Table des matières

1	Introduction	5
1.1	Objectifs du KA23	5
1.2	Public cible	6
1.3	Spécificité et relations avec les manuels de projet	6
1.4	Déroulement général d'une cartographie des sols	6
1.5	Structure	7
1.6	Genèse du manuel	7
1.7	Évolution du manuel KA23	8
1.8	Domaines d'application du manuel KA23	8
2	Phase préparatoire	9
2.1	Étapes de travail de la phase préparatoire	9
2.2	Planification du projet	9
2.2.1	Parties impliquées	9
2.2.2	But de la cartographie	10
2.2.3	Contrôle qualité (CQ)	11
2.2.4	Communication	11
2.3	Analyse du projet	12
2.3.1	Choix de l'échelle	12
2.3.2	Périmètre	13
2.3.3	Aspects juridiques	14
2.3.4	Données pédologiques déjà disponibles	15
2.4	Coûts	15
2.4.1	Estimation des coûts	15
2.4.2	Coûts fixes	15
2.4.3	Coûts variables	15
2.5	Calendrier	16
2.5.1	Cartographie en zone de prairie permanente	17
2.5.2	Cartographie en zone de terres cultivées	17
2.5.3	Cartographie en forêt	18
2.5.4	Cartographie en altitude	18
2.6	Appel d'offres et adjudication	18
2.7	Obtention des données de référence	19
2.8	Séance de démarrage	20
3	Phase conceptuelle	21
3.1	Étapes de travail de la phase conceptuelle	21
3.2	But de la phase conceptuelle	21
3.3	Étude des documents de référence	21
3.3.1	Préparation des données de référence	22
3.3.2	Produits dérivés	22
3.3.3	Passage en revue et sélection	22
3.3.4	Cas spécial : périmètres pour lesquels on dispose déjà de données pédologiques	23
3.4	La formulation d'hypothèses comme fondement conceptuel	23
3.4.1	Formulation d'hypothèses et d'unités conceptuelles	23
3.4.2	Visite de reconnaissance	23
3.4.3	Élaboration de l'inventaire des sols	24
3.5	Élaboration conceptuelle	25
3.5.1	Concept de cartographie	25
3.5.2	Établissement de la carte conceptuelle	25
3.6	Choix provisoire des sites des profils représentatifs	26
3.6.1	Critères pour le choix des sites des profils représentatifs	26
3.6.2	Densité des profils représentatifs	26
3.6.3	Procédure de choix provisoire des sites	26

3.7	Remarques concernant le contrôle qualité	27
3.7.1	Contrôle qualité interne	27
3.7.2	Contrôle qualité externe	27
4	Phase des profils	28
4.1	La phase des profils dans le déroulement du projet	28
4.1.1	Procédure standard	28
4.1.2	Phase des profils en deux temps	28
4.1.3	Phase des profils différée après la cartographie	28
4.2	Étapes de travail de la phase des profils	29
4.3	Choix définitif des sites des profils représentatifs	29
4.3.1	Relevé des conduites	29
4.3.2	Consultation de l'exploitant de la parcelle	30
4.3.3	Organisation de l'ouverture du profil	30
4.4	Ouverture des fosses pédologiques	30
4.4.1	Profils représentatifs	30
4.4.2	Exécution	31
4.5	Description des profils	33
4.5.1	Matériel utilisé pour la description des profils	33
4.5.2	Préparation et documentation photographique de la paroi du profil	34
4.5.3	Description et documentation du profil	34
4.5.4	Prélèvement d'échantillons	34
4.5.5	Mesure du niveau d'eau	34
4.6	Fermeture des profils pédologiques	34
4.7	Remarques concernant le contrôle qualité	35
4.7.1	CQ interne	35
4.7.2	CQ externe	35
4.7.3	Première journée de calibration : journée de calibration des profils	35
5	Phase de cartographie	37
5.1	Étapes de travail de la phase de cartographie	37
5.2	Préparation de la cartographie	37
5.3	Matériel de cartographie	37
5.3.1	Matériel de terrain pour la cartographie	38
5.3.2	Plan de terrain	38
5.4	Sondages	40
5.4.1	Types de sondages	40
5.4.2	Localisation	40
5.4.3	Profondeur de sondage	41
5.4.4	Sélection des sites des sondages par la formulation d'hypothèses	41
5.5	Délimitation d'unités cartographiques	42
5.5.1	Définition de l'unité cartographique	42
5.5.2	Procédure de délimitation des unités cartographiques	43
5.5.3	Représentation des unités cartographiques	47
5.5.4	Désignation de l'unité cartographique	47
5.5.5	Constitution du jeu de données surfaciques	47
5.6	Enregistrement des informations pédologiques (structure des données et jeu de données)	47
5.6.1	Définitions	47
5.6.2	Structure des données ponctuelles et surfaciques	48
5.6.3	Jeu de données des sondages standard et des unités cartographiques	49
5.6.4	Produits de la cartographie : variantes	51
5.7	Variabilité spatiale dans les unités cartographiques	53
5.7.1	Formes de sol différentes dans une unité cartographique	53
5.7.2	Partie étrangère	53
5.7.3	Unité complexe	53
5.7.4	Traitement des parties étrangères et des unités complexes	53

5.8	Remarques concernant le contrôle qualité	54
5.8.1	CQ interne	54
5.8.2	CQ externe	55
5.8.3	Seconde journée de calibration : journée de calibration des unités cartographiques	55
6	Traitement et contrôle des données	57
6.1	Étapes de travail du traitement et du contrôle des données	57
6.2	Mise au net de la carte de terrain	57
6.3	Harmonisation et mise au net des limites	57
6.3.1	Harmonisation pendant la cartographie	57
6.3.2	Harmonisation après la cartographie	57
6.4	Contrôle et mise au net des données des profils	57
6.5	Numérisation des données ponctuelles et surfaciques	58
6.5.1	Numérisation des plans de terrain	58
6.5.2	Entrée dans une base de données	58
6.6	Vérification des données ponctuelles et surfaciques par le CQ interne	59
6.6.1	Vérification formelle	59
6.6.2	Vérification du contenu	59
6.7	Vérification de tous les produits par le CQ externe	60
6.8	Rapports finaux	60
6.8.1	Rapport final du CQ externe	60
6.8.2	Rapport final des organismes de cartographie mandatés	60
6.9	Remise des données	60
7	Liste des figures	61
8	Liste des tableaux	61
9	Glossaire	62
10	Bibliographie	62
11	Annexes	64
12	Contrôle des versions	65

1 Introduction

Le présent manuel de cartographie (« Manuel de cartographie 2023 » ; « KA23 ») constitue la troisième partie de l'ouvrage complet intitulé « Description, classification et cartographie des sols de Suisse » (tableau 1), qui est prévu en quatre parties et sera publié en 2025/2026 par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Dans l'intervalle, certains modules seront publiés séparément, selon le calendrier présenté au tableau 1.

Tableau 1 : Vue d'ensemble de l'ouvrage « Description, classification et cartographie des sols de Suisse ». Sur fond bleu, la présente version du KA23 ; en caractères gris, la date approximative de la première publication des différents modules.

Ouvrage complet : Description, classification et cartographie des sols de Suisse	Partie I	Guide pour la description des sols sur le terrain (dès 2023)	
	Partie II	Classification	Module « Classification des sols » (2025)
			Classification des formes d'humus (2024)
	Partie III	Manuel de cartographie	Module de base (2023)
			Module « forêt » (2023)
			Modules supplémentaires (après 2025)
	Partie IV	Interprétations	Interprétations préliminaires (PU et régime hydrique) (2025)
			Classes d'aptitude (CA) (2023)

Le présent manuel KA23 se fonde sur les deux publications « Cartographie et estimation des sols agricoles » (Brunner et al. 1997), abrégée FAL 24, et « Cartographie des sols forestiers » (Ruef et Peyer 1996), ainsi que sur un grand nombre de documents et de manuels de projet provenant de divers cantons. Sa rédaction est le fruit d'un processus long de plusieurs années. Le KA23 doit être vu comme le produit d'un travail collectif mené par les pédologues et spécialistes des sols de Suisse. Basé sur leur longue expérience et sur le standard de cartographie élaboré et établi à partir des années 2000, il est issu de discussions et de compromis « typiquement suisses » et propose une conception commune du déroulement d'une cartographie des sols. Les offices fédéraux (OFEV, ARE et OFAG) le considèrent comme une recommandation méthodologique pour la réalisation de cartographies des sols. Grâce à sa structure modulaire, il pourra encore être adapté et étendu.

1.1 Objectifs du KA23

Les objectifs principaux du présent manuel peuvent être résumés comme suit :

- permettre des relevés comparables de tous les sols de Suisse dans toutes les régions et pour des utilisations variées ;
- décrire le processus de cartographie de manière structurée et compréhensible pour le public cible, afin de garantir la qualité des produits qui en sont issus ;
- favoriser la compréhension du travail pratique de cartographie des sols, ainsi que des cartes pédologiques qui en découlent ;
- mettre l'accent sur le travail de terrain et être donc autant que possible adapté à un tel emploi.

1.2 Public cible

Le présent manuel est destiné aux

- responsables de services spécialisés communaux, cantonaux et nationaux qui planifient des cartographies des sols, les confient à des mandataires et les dirigent,
- bureaux d'ingénieurs qui proposent et exécutent des travaux de cartographie des sols
- novices en matière de cartographie des sols.

1.3 Spécificité et relations avec les manuels de projet

Le KA23 traite avant tout les aspects méthodologiques, techniques et pratiques de la cartographie des sols et fournit des recommandations sur la manière de mener à bien les projets. Les questions d'organisation ou d'administration liées spécifiquement à un processus ou à un canton ne sont pas abordées, ou uniquement de manière superficielle. Elles doivent être décrites et traitées individuellement dans les manuels spécifiques du projet ou du canton (voir la section correspondante du chap. 1.5).

Au besoin, le KA23 inclut dans certaines sections des remarques destinées à la direction de projet mandante (DPM), lorsque des spécifications correspondantes sont requises dans un manuel de projet. L'Annexe 2 peut être utilisée comme résumé et aide pratique pour la DPM.

1.4 Déroulement général d'une cartographie des sols

La structure du KA23 reflète les cinq phases suivantes d'une cartographie des sols (figure 1) :



Figure 1 : Phases de la cartographie des sols selon le KA23

1.5 Structure

Le KA23 décrit le déroulement d'une cartographie des sols selon les cinq phases de la figure 1 :

- la phase préparatoire au chapitre 2,
- la phase conceptuelle au chapitre 3,
- la phase des profils au chapitre 4,
- la phase de cartographie au chapitre 5,
- le traitement et contrôle des données au chapitre 6.

À la fin de chacun de ces chapitres figurent des remarques concernant le contrôle qualité.

Variantes de procédure

Des variantes de procédure sont parfois décrites. C'est notamment le cas au chapitre 4.1 (situation de la phase des profils dans le déroulement du projet), au chapitre 5.3.2 (plan de terrain), au chapitre 5.4.2 (localisation des sondages) ou au chapitre 5.6.4 (variantes de produit). Lors de la phase préparatoire, la direction de projet mandante (la DPM détermine quelles variantes doivent être exécutées (voir les remarques et le résumé de l'Annexe 2).

Texte sur fond coloré

Les passages signalés par un fond coloré ne s'appliquent qu'à certaines zones de cartographie (voir ci-dessous). Le texte sur fond blanc concerne toutes les zones cartographiées.

Les étapes de travail ou éléments de texte qui sont spécifiques à la cartographie des surfaces forestières sont signalés par un fond vert (étapes de travail propres à la forêt ; « module forestier »).

Les étapes de travail ou éléments de texte qui sont spécifiques à la cartographie des zones utilisées à des fins agricoles sont signalés par un fond brun.

1.6 Genèse du manuel

La genèse du manuel de cartographie original (FAL 24) est étroitement liée à la création d'un service national spécialisé à l'institut devenu aujourd'hui le site Agroscope de Reckenholz. Ce Service national de cartographie des sols, créé à l'initiative d'Erwin Frei, a été mis en place à partir de 1959 (Sticher 2001, p. 64 ss). Dès 1993, toutefois, la Confédération s'est progressivement retirée de la cartographie des sols et a procédé à diverses restructurations, qui ont notamment abouti à la suppression du service de cartographie à la fin 1996, sans qu'aucune institution similaire ne prenne le relais (Société Suisse de Pédologie (SSP) 2000, 7).

Le rapport de Borer et Knecht (2014) propose une histoire des manuels suisses de cartographie des sols dans son chapitre 2.1 (à partir de la page 10), ainsi que dans sa fiche 1 (annexée au rapport) : « La mise au point d'une méthode de cartographie des sols pour la Suisse a véritablement débuté en 1955 à la FAP (Station de recherches agronomiques de Reckenholz). [...] Un premier manuel de cartographie a vu le jour en 1963 [un second en 1986, aucun des deux n'a été publié]. Le manuel utilisé jusqu'à aujourd'hui [désormais dépassé] est la deuxième édition datant de 1997. Le manuel de cartographie des sols forestiers, qui date de 1996, se fonde sur les mêmes bases : il est en grande partie identique, avec toutefois des compléments pour ce qui est des formes d'humus et des interprétations spécifiquement forestières » (traduit de Borer et Knecht 2014, p. 61)

La méthodologie a ensuite été appliquée par divers acteurs et affinée progressivement dans la pratique, mais sans se différencier grandement de la méthode originale de la FAL 24. Son évolution a notamment été influencée de manière déterminante – mais pas uniquement – par les travaux de cartographie menés dans le canton de Soleure.

Les spécialistes ont toutefois demandé que la méthodologie soit harmonisée à l'échelle de la Suisse : c'est le but que poursuit le projet de révision (*Révision de la classification et du manuel de cartographie des sols de Suisse*, 2019-2025).

Dans ce cadre, on ne s'est pas contenté de comparer les méthodologies de divers acteurs et de réunir leurs points communs : on s'est aussi efforcé de développer les contenus en mettant en évidence et en thématissant les différences entre les diverses manières de procéder. Les propositions les mieux acceptées lors des discussions ont été retenues et intégrées au manuel KA23. Ce dernier présente ainsi, pour la première fois depuis les années 1990, des solutions uniformes pour toute la Suisse.

1.7 Évolution du manuel KA23

Le manuel KA23 doit encore évoluer, mais ses développements ultérieurs ne sont pas encore définis. Suivant la décision du Conseil fédéral du 8 mai 2020, un plan de cartographie des sols à l'échelle de la Suisse a été rédigé. Actuellement, la mise au point des méthodes est en cours. Il est prévu d'intégrer les enseignements tirés de ces travaux au manuel KA23 après 2025.

1.8 Domaines d'application du manuel KA23

Le présent manuel KA23 se fonde sur des expériences réalisées avec des cartes à grande échelle – 1:5000, en particulier – et avec des tailles de lots comprises entre 300 et 500 hectares.

Dans le manuel FAL 24 (Brunner et al. 1997, § 1.2-1) et dans celui destiné à la cartographie des sols forestiers (Ruef et Peyer 1996), l'accent était mis sur la réalisation de cartes des sols à grande échelle (1:1000 à 1:10 000) et à l'échelle moyenne de 1:25 000. La méthode de cartographie du canton de Soleure (FAL 24+) est conçue pour une échelle de 1:5000 (Fachstelle Bodenschutz Kanton Solothurn 2020, p. 25). Le plan sectoriel des surfaces d'assolement clarifie désormais la question en précisant que la délimitation des surfaces d'assolement (SDA) requiert aussi une cartographie à l'échelle 1:5000 (Office fédéral du développement territorial ARE 2020, p. 12).

Le manuel KA23 est conçu pour une échelle de 1:5000, mais la procédure décrite peut être appliquée dans un domaine compris entre 1:1000 et 1:25 000. Le chapitre 2.3.1 fournit des valeurs de référence pour le nombre de sondages par hectare et d'unités cartographiques en fonction de l'échelle, pour le nombre de profils par hectare et pour le nombre approximatif de journées de travail.

2 Phase préparatoire

2.1 Étapes de travail de la phase préparatoire

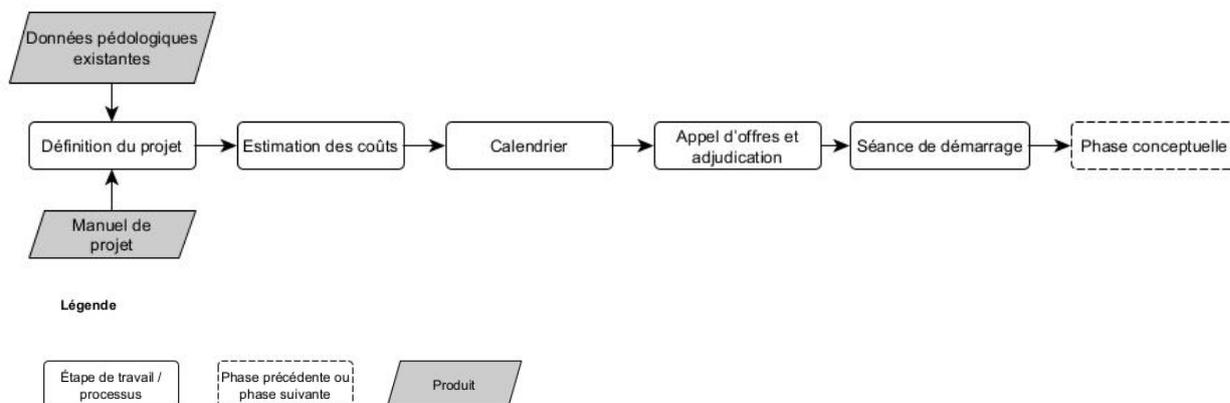


Figure 2 : Déroulement de la phase préparatoire

2.2 Planification du projet

Avant le démarrage du projet, il convient d'en déterminer le but, puis de définir son organisation, les rôles ainsi que les tâches, et enfin, en planifier la communication. La direction de projet mandante (DPM) définit des consignes et exigences spécifiques au projet, qui complètent le manuel KA23, dans un **manuel de projet (MP)**.

2.2.1 Parties impliquées

La **DPM** est à l'organisme qui mandate le projet de cartographie et en dirige la réalisation. Il peut s'agir par exemple d'un service de protection de l'environnement ou des sols, d'une commune, d'un syndicat d'amélioration foncière, d'un propriétaire forestier, etc. La DPM peut également nommer une direction de projet externe pour la soutenir.

Le **contrôle qualité (CQ)** désigne les processus destinés à garantir la qualité, ainsi que les personnes qui en sont responsables.

Les **organismes de cartographie mandatés (OM)** sont des entreprises ou des consortiums de soumissionnaires qui ont été mandatés pour la réalisation des travaux de cartographie. En règle générale, le mandat recouvre les cinq phases principales d'une cartographie des sols, avec toutes les étapes de travail qui s'y rapportent. À distinguer des cartographes, qui sont les personnes qui cartographient sur le terrain.

Le tableau 2 présente également d'autres acteurs possibles, ainsi que leur rôle.

Tableau 2 : Acteurs possibles et leur rôle dans un projet de cartographie

Acteurs possibles	Rôle, tâches
Services cantonaux de l'environnement, de l'aménagement du territoire, des ponts et chaussées, de l'agriculture, ainsi que services forestiers Autorités communales Syndicats d'amélioration foncière Bureaux d'ingénieurs et bureaux d'aménagement Maîtres d'ouvrage	DPM (éventuellement en coopération avec une direction de projet externe).
Pédologues dans des bureaux d'ingénieurs, des écoles professionnelles et des hautes écoles spécialisées.	Cartographie (OM)
Laboratoires privés Hautes écoles spécialisées et instituts de recherche	Analyse d'échantillons
Entreprises de génie civil, entreprises horticoles ou autres pour les travaux d'excavation Entreprises spécialisées en technique de sondage, p. ex. dans le prélèvement de carottes à la machine	Exécution de sondages mécaniques
Personnes disposant d'une grande expérience en cartographie des sols et/ou en pédologie	Contrôle qualité externe
Bureaux d'ingénieurs Instituts de recherche, écoles professionnelles et hautes écoles spécialisées Centre de compétences sur les sols (CCSols)	Soutien au projet, direction externe du projet
Propriétaires fonciers ou exploitants : entreprises agricoles, exploitations viticoles, pépinières, etc.	Propriété et exploitation en terrain agricole
Propriétaires forestiers: cantons, communes et leurs exploitations forestières, bourgeoisies, corporations, coopératives, institutions religieuses, propriétaires forestiers privés.	Propriété et exploitation en forêt
Service cantonal d'archéologie Fédérations et sociétés de chasse Riverains Grand public	Autres parties impliquées

2.2.2 But de la cartographie

Le point de départ de toute cartographie des sols consiste à se poser la question de son but : à quoi la carte pédologique doit-elle servir, pourquoi en a-t-on besoin et à quelles exigences doit-elle répondre ? Voici quelques exemples de motifs qui sont ou ont été à l'origine de cartographies :

- Relevé des caractéristiques de tous les sols agricoles et forestiers en dehors des surfaces bâties afin d'obtenir des données utilisables pour l'affectation des sols, l'exécution en matière de protection des sols et d'autres applications dans le canton de Soleure (p. ex. Hauert et al. 2017).
- Relevé des SDA conformément au plan sectoriel des surfaces d'assolement de l'ARE : p. ex. stratégies de cartographie des cantons de LU et NW (p. ex. Suter 2018; Amt für Umwelt des Kantons Nidwalden 2021).
- Estimation de surfaces agricoles (Office fédéral de l'agriculture 2004) ou de surfaces forestières, lors de remaniements parcellaires ou de regroupements forestiers (p. ex. Güterregulierung Büsserach-Breitenbach Kt. Solothurn (Gasche et Lazzini 2018)).
- Identification de surfaces de compensation pour les SDA dans le cadre de projets spécifiques (p. ex. Verzeichnis Aufwertung Fruchtfolgeflächen im Kanton Aargau (Mösch 2022)).
- Relevé de l'état initial et contrôle après achèvement d'un projet de construction (p. ex. Directives pour la remise en culture du sol, Direction des constructions du canton de Zurich, Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich 2003).
- Évaluation du succès d'une remise en culture (p. ex. Interpretationshilfe der Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich 2019).
- Mise à jour de données pédologiques existantes (p. ex. Aufarbeitung von Nutzungseignungskarten zu Bodenkarten im Kanton St.Gallen (Amt für Umwelt und Energie des Kantons St.Gallen 2015)).
- Problématiques spécifiques, p. ex. cartographie de sols forestiers acides dans le canton de Zurich (p. ex. Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich 2015).
- Cartes pédologiques générales (p. ex. la carte d'aptitude des sols (Frei et al. 1980)).

- Évaluation de processus hydrologiques pour élaborer des plans de fertilisation et réduire les transferts de substances nutritives et de polluants vers les eaux de surface et souterraines (p. ex. Gemeindeverband Sempachersee 1992).
- Autres problématiques relatives à l'aménagement du territoire et à l'écologie, telles que la délimitation de zones humides (p. ex. dans le canton de Zurich).

Il convient en outre de décider s'il faut envisager d'autres buts dépassant le but initial de la cartographie, par exemple s'il faut anticiper des problématiques qui ne sont pas encore prioritaires lors du lancement du projet.

2.2.3 Contrôle qualité (CQ)

« Le contrôle qualité (CQ) correspond à l'ensemble des dispositions qui garantissent que le niveau de qualité exigé ou visé sera atteint en fonction des possibilités. [...] Le but final du CQ d'une cartographie des sols est que les données pédologiques soient comparables sur l'ensemble du secteur [NdT : du périmètre du projet], qui soient applicables pour les mêmes buts et permettent de tirer des conclusions comparables en ce qui concerne l'utilisation, les atteintes, les mesures de protection, etc. » (traduction de Fachstelle Bodenschutz Kanton Solothurn 2017, p. 6). Pour les projets de grande ampleur, de longue durée et impliquant de nombreuses personnes il est en particulier recommandé d'accorder une grande importance au CQ, qui examine les produits de toutes les phases de projet et contrôle la mise en œuvre des exigences correspondantes. Il convient aussi de veiller à la continuité des exigences par rapport aux cartographies antérieures. Le CQ constitue une tâche à long terme. Il s'appuie sur les réglementations de cartographies antérieures et essaie d'y intégrer de nouveaux éléments tenant compte des évolutions futures.

Le CQ comprend deux volets : le CQ interne et le CQ externe. Ils sont détaillés ci-après.

Contrôle qualité interne

Les organismes de cartographie mandatés pour un projet de cartographie désignent un-e responsable du CQ interne. La plupart du temps, cette nomination est prescrite explicitement par la DPM dans le manuel de projet. Le CQ interne doit veiller à ce que « le travail soit bien fait », c.-à-d. qu'il est responsable de la remise d'un produit correct et cohérent en ce qui concerne les exigences de qualité et les consignes méthodologiques. La responsabilité couvre toutes les phases du projet et tous les produits. Les exigences définies aux chapitres 5.8.1 et 6.6 s'appliquent.

Contrôle qualité externe

Un CQ externe indépendant vérifie l'homogénéité et la qualité des produits et de la méthodologie appliquée, tout en veillant à leur continuité dans l'espace et dans le temps. D'entente avec la DPM, le CQ externe fixe des exigences en ce qui concerne l'organisation, la classification et la méthodologie (voir aussi les chapitres 5.8.2 et 6).

Impliqué dès le début, le CQ externe accompagne chaque phase du projet. Il peut également participer plus tôt au projet et être chargé de rédiger le manuel de projet ou d'y collaborer. Pour les projets de cartographie qui s'étendent sur plusieurs années, il est préférable d'intégrer le CQ externe sur la plus longue période possible.

Si la DPM souhaite surveiller le processus de CQ, elle peut demander que les CQ interne et externe confirment l'exécution des diverses étapes à l'aide de formulaires signés. Ces formulaires doivent être prévus dans les manuels de projet cantonaux sous des formes spécifiques aux projets.

2.2.4 Communication

Tout projet de cartographie touche un grand nombre de groupes d'acteurs, ce qui engendre un fort besoin de communication. Le tableau 2 fournit une vue d'ensemble des acteurs possibles et de leurs rôles. Avant le démarrage du projet, il convient de clarifier quels acteurs seront impliqués au cours de celui-ci et comment l'on compte communiquer avec eux :

- Lettre d'information : rédigée par la DPM, elle s'adresse en premier lieu aux exploitants et aux propriétaires fonciers.
- Évènement d'information : organisé et réalisé par la DPM et/ou les organismes de cartographie mandatés, il est important pour donner aux exploitants et propriétaires fonciers la possibilité de

- s'informer et ainsi atténuer leurs éventuelles réserves à l'égard du projet. Toutes les personnes impliquées peuvent ainsi nouer d'importants contacts personnels.
- Articles dans le bulletin communal ou journal local, rédigés par la DPM en coopération avec les autorités locales, afin d'informer le grand public.
 - Séance de démarrage : pour la DPM, les organismes de cartographie mandatés et le CQ externe, voir chapitre 2.8.
 - Communication standardisée à l'aide de formulaires et de rapports : doit être spécifiée dans le manuel de projet.
 - Communication et accords individuels oraux ou écrits (entre la DPM, les OM et toutes les autres parties impliquées).

L'Annexe 1 fournit des détails supplémentaires sur la communication, ainsi que des informations concernant les indemnités versées en lien avec la mise en place des profils.

2.3 Analyse du projet

L'analyse du projet de cartographie permet de clarifier et définir d'autres éléments de son cadre général. En font notamment partie le choix de l'échelle avec la densité de sondage, la délimitation du périmètre, les conditions générales juridiques et la manière de traiter les données pédologiques déjà disponibles.

2.3.1 Choix de l'échelle

Il convient de faire une distinction claire entre l'échelle visée et l'échelle de visualisation de la carte pédologique. Par « échelle », on entend généralement l'échelle visée, qui détermine la densité spatiale des informations pédologiques relevées et représentées (une carte produite à l'aide d'un seul sondage par hectare peut être représentée aussi bien à l'échelle 1:1000 qu'à l'échelle 1:10 000). Il est déconseillé de choisir une échelle de visualisation supérieure à l'échelle visée, car cela suggère à l'utilisateur de la carte une densité d'information qui n'existe pas.

Divers facteurs influencent le choix de l'échelle, qui à son tour exerce un impact significatif sur l'utilisation finale des informations pédologiques (figure 3) :

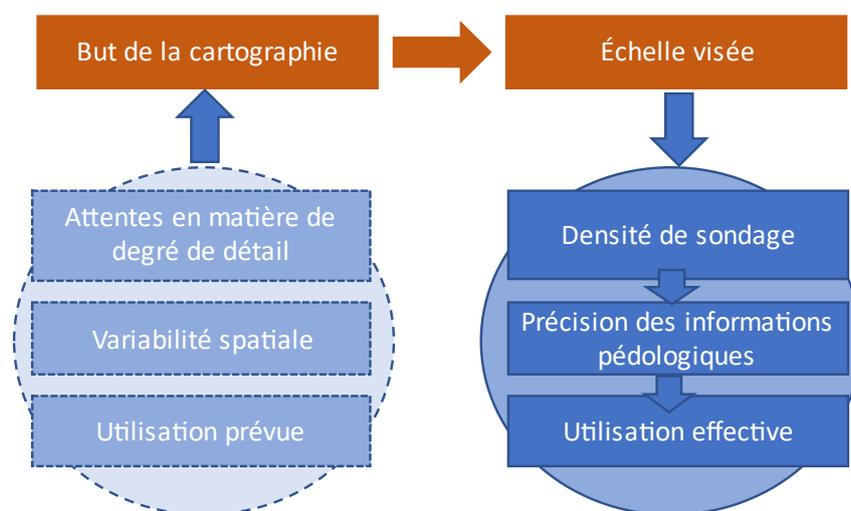


Figure 3 : Facteurs affectant le choix de l'échelle

Fondamentalement, le but de la cartographie détermine son échelle. Le tableau 3 présente un choix de buts possibles, avec les échelles correspondantes. La variabilité spatiale (qui ne peut être qu'estimée au préalable), les utilisations prévues et les attentes en matière de degré de détail déterminent le but de la cartographie. L'échelle visée influence de manière prépondérante la densité des sondages, avec laquelle elle est corrélée (elle influence aussi les travaux de cartographie). La densité des sondages et la précision des informations obtenues au sujet des unités spatiales déterminent la résolution des informations pédologiques et donc les utilisations effectives.

Tableau 3 : Buts possibles d'une cartographie et échelles recommandées

But de la cartographie	Échelle
Projets de construction : état initial et état final Remaniements parcellaires Diverses problématiques à périmètre très réduit	1:1000 ou 1:2500
Projets de construction : état avant et après la remise en culture Cartes des sols détaillées Relevé des SDA (échelle exigée actuellement selon le plan sectoriel des SDA) Rarement : remaniements parcellaires	1:5000
Cartes des sols détaillées	1:10 000
Cartes des sols générales Diverses problématiques à large périmètre	1:25 000

Densité de sondage et estimation du travail de terrain en fonction de l'échelle

La densité de sondage dépend de l'échelle : en se fondant sur la plus petite surface représentable, on peut déduire la densité de points minimale requise pour les informations ponctuelles¹. Sur une carte physique, la plus petite surface représentable correspond à 1 cm² (Brunner et al. 1997, § 8.1-1). En partant d'une surface de forme carrée, on peut en déduire la distance moyenne adéquate entre les sondages (tableau 4). Des sondages plus clairsemés entraînent une réduction de l'échelle. L'Annexe 1 fournit des indications sur l'estimation de la durée du travail de terrain en fonction de l'échelle et sur la densité des informations ponctuelles dans les terrains en pente.

Tableau 4 : Densité de sondage en fonction de l'échelle, modifié d'après Brunner et al. (1997, § 8.1-1) et Legros (1996, p. 50)

Échelle	Échelle de relevé	Plus petite unité représentable sur le terrain*	Écart moyen entre sondages*	Nombre de sondages pour 100 ha**
1:1000		1 a (0,01 ha)	10 m	10 000
1:2500		6,25 a (0,0625 ha)	25 m	1600
1:5000	≥ échelle	25a (0,25 ha)	50 m	400
1:10 000		100 a (1 ha)	100 m	100
1:25 000		625 a (6,25 ha)	250 m	16

* Adapté de FAL 24 (Brunner et al. 1997, § 8.1-1)

** Adapté de FAL 24 (Brunner et al. 1997, § 8.1-1) et Legros (1996, p. 50s.)

2.3.2 Périmètre

Le périmètre correspond à la surface à cartographier lors du projet. Sa délimitation est l'affaire de la DPM. Il est soit défini comme un tout, soit divisé en lots. Lors de l'appel d'offres, les divers lots peuvent être attribués à différents organismes de cartographie mandatés. On tiendra compte des points suivants pour déterminer le périmètre :

- Plus le périmètre est réduit, plus les coûts fixes sont élevés. Ces coûts fixes correspondent aux tâches qui ne dépendent pas de la surface (p. ex. obtention des données de référence, séances, rédaction des rapports).

¹ Ce terme doit se comprendre au sens large : profils de sols, sondages standard (voir Glossaire), sondages cartographiques (voir Glossaire), et même sondages exploratoires (voir Glossaire) pour autant qu'ils aient été interprétés/analysés a posteriori.

- Les périmètres avec une faible variabilité de facteurs pédogénétiques sont plus simples à cartographier que ceux où la variabilité est grande.
- Les périmètres fragmentés ou très ramifiés (avec de longs bords pour une petite surface) demandent plus de travail de cartographie que les périmètres entiers de forme compacte, car ils exigent une densité de sondages plus élevée et davantage de travail d'harmonisation à leurs limites.
- Le travail de coordination augmente avec le nombre de parties impliquées.
- La manière de traiter les infrastructures au sein d'un périmètre, en particulier les surfaces imperméabilisées, doit être définie avant le début de la cartographie.
- L'obtention des données de référence est plus simple lorsque le périmètre et les lots sont délimités en tenant compte des unités administratives.

2.3.3 Aspects juridiques

Divers aspects juridiques doivent être pris en compte au cours d'un projet de cartographie. Les sections qui suivent en abordent quelques-uns.

Obligation de renseigner

Les travaux de cartographie menés sur mandat d'autorités publiques sont règlementés de manière indirecte par la loi fédérale du 7 octobre 1983 sur la protection de l'environnement (LPE, RS 814.01, 1983). Selon son art. 46, chacun est tenu de fournir aux autorités les renseignements nécessaires à l'application de la loi et, s'il le faut, de procéder à des enquêtes ou de les tolérer. Le non-respect de l'art. 46 LPE est punissable (en vertu de l'art. 61, al. 1, let. o, LPE). Cette obligation de renseigner couvre notamment les relevés à la tarière et l'ouverture de fosses pédologiques.

Adjudication

Les dispositions légales concernant les marchés publics ainsi que le code des obligations s'appliquent à l'adjudication des mandats et aux contrats correspondants. Il s'agit notamment des textes suivants :

- loi fédérale du 21 juin 2019 sur les marchés publics (LMP, RS 172.056.1, 2019),
- ordonnance du 12 février 2020 sur les marchés publics (OMP, RS 172.056.11, 2020),
- accord intercantonal sur les marchés publics (AIMP, 2019),
- lois et ordonnances cantonales sur les marchés publics.

Autorisations de circuler

S'il est nécessaire de circuler sur des chemins agricoles ou forestiers pour réaliser les travaux de terrain, il convient d'obtenir des dérogations appropriées auprès de l'autorité compétente. En fonction du canton, ces autorisations sont octroyées par la police ou par la commune.

Travaux d'excavation

L'ordonnance du 18 juin 2021 sur les travaux de construction (OTConst, RS 832.311.141, 2021) contient diverses dispositions qui s'appliquent au creusement de profils de sols, puisqu'elle concerne notamment « les travaux dans les fouilles, les puits et les terrassements » (art. 2). Ses articles règlementent l'obligation de porter un casque, les protections contre les chutes, l'étagage et le blindage des fouilles, la largeur et la profondeur de celles-ci, ainsi que l'accès aux profils de sols. L'Annexe 1 fournit des détails supplémentaires.

On tiendra compte des points suivants pour le creusement de profils de sols :

- afin d'éviter d'endommager des conduites, il convient de réunir au préalable des renseignements sur leur tracé ;
- une assurance responsabilité civile d'un montant suffisant doit être conclue afin que les organismes de cartographie mandatés soient assurés de manière appropriée en cas de dommages (dégâts aux conduites, mais également chute ou ensevelissement de personnes ou d'animaux) ;
- outre la détermination de la responsabilité civile, il faut s'attendre à des poursuites pénales si une personne subit des dommages.

Éviter les atteintes portées au sol et aux cultures

Les travaux de terrassement (en particulier le creusement et le remplissage de fosses pédologiques, la gestion des dépôts terreux) doivent être réalisés conformément à l'aide à l'exécution « Construire en préservant les sols » (Office fédéral de l'environnement 2022). Les travaux doivent être réalisés en conditions sèches et les couches de sol être extraites, entreposées et remises en place séparément. Lors de tous travaux de terrain, il faut veiller à éviter les dégâts aux cultures ou à les limiter autant que possible. Cela s'applique en particulier aux cultures permanentes telles que les vergers ou pour la forêt (pertes de rendement, questions de responsabilité).

2.3.4 Données pédologiques déjà disponibles

Si l'on dispose déjà de données pédologiques issues de cartographies antérieures, celles-ci doivent être consultées pour toute planification d'un nouveau projet de cartographie – qu'elles aient déjà été intégrées à NABODAT ou non. Avant même l'appel d'offres (chap. 2.6), il faut avoir défini si le projet est une nouvelle cartographie (dans ce cas la carte existante servira uniquement de référence pour la phase conceptuelle), ou s'il consiste en une révision totale ou partielle de la carte existante. Fondamentalement, lorsque des cartes pédologiques existent, il faut examiner dans quelle mesure les anciennes données peuvent être intégrées dans des cartographies actuelles. Les expériences faites par certains cantons (SO et LU, mais aussi SG) montrent qu'il n'est pas possible de définir une procédure applicable en toutes circonstances : la manière de procéder dépend de la qualité des cartes existantes.

2.4 Coûts

2.4.1 Estimation des coûts

L'estimation des coûts d'un projet, un des éléments de sa planification, est une base essentielle pour assurer un apport suffisant de ressources financières et le choix de la procédure d'adjudication correcte. Cette estimation doit donc être effectuée avec soin. Elle doit tenir compte non seulement de la situation du marché, mais également des facteurs suivants, qui peuvent influencer fortement les coûts d'une cartographie :

- caractéristiques du périmètre, telles que taille, relief, accessibilité, utilisation,
- prestations exigées (en fonction du but de la cartographie, de l'échelle, de la méthode, etc.).

Une estimation fiable des coûts doit donc être faite au cas par cas, sur la base d'indicateurs quantitatifs ou d'informations comparables. En règle générale, il faut, à cet effet, déjà répartir approximativement les prestations et estimer leurs coûts lors de la planification du projet.

L'Annexe 2 présente des éléments et des décisions qui exercent une influence sur les coûts d'une cartographie des sols. De manière générale, on distingue des coûts fixes et des coûts variables.

2.4.2 Coûts fixes

Les coûts fixes recouvrent toutes les rubriques du budget qui ne dépendent pas ou seulement en partie de la taille et des caractéristiques du périmètre à cartographier. On peut citer :

- les travaux préparatoires et l'appel d'offres²,
- l'obtention et la préparation des données de référence,
- l'établissement de cartes conceptuelles, de plans de terrain et d'autres bases d'information pour le travail de terrain,
- le contrôle des données, les procédures de contrôle de qualité.

2.4.3 Coûts variables

En font partie toutes les rubriques du budget pour lesquelles le travail à effectuer augmente en fonction de certains facteurs, en particulier ceux liés à la taille ou aux caractéristiques du périmètre à cartographier, à l'échelle visée ou à des exigences spécifiques de la DPM.

² Selon le type de procédure d'adjudication, les coûts peuvent varier fortement.

Facteurs liés au périmètre à cartographier

- Taille du périmètre
- Longueur des limites du périmètre³
- Praticabilité du terrain⁴
- Longueur des itinéraires entre les points de relevé (complexité de la logistique)
- Variabilité au sein du périmètre⁵
- Complexité de la texture du sol⁶
- Variation et intensité de l'utilisation des terres⁷

Facteurs liés à l'échelle visée

- Nombre de sondages/profils de sols à réaliser (y c. indemnisations à payer, etc.)

Facteurs liés à d'autres exigences

- Nombre de personnes impliquées dans le projet
- Étendue des informations pédologiques à relever
- Autres exigences définies par la DPM dans le manuel de projet

2.5 Calendrier

Un calendrier approximatif doit en principe être établi lors de l'appel d'offres. Le calendrier détaillé est établi par la DPM et les organismes de cartographie mandatés après la séance de démarrage.

Le calendrier est influencé de manière déterminante par l'utilisation qui est faite des terres du périmètre et la nécessité de protéger les sols. Dans des conditions optimales (aussi bien météorologiques que d'utilisation des terres), chaque étape de travail est possible à n'importe quel moment de l'année. Il est toutefois déconseillé de cartographier en hiver (les taches de gley sont par exemple difficiles à repérer lorsque la lumière est mauvaise, et on ne perçoit pas bien la granulométrie avec des doigts froids). Seules les cartographes expérimentés disposant de bonnes connaissances locales des sols travaillent parfois dans des conditions défavorables. La figure 4 fournit un cadre de référence indicatif pour la planification des diverses étapes de travail au cours de l'année. Les chapitres 2.5.1 à 2.5.4 contiennent aussi des indications importantes à ce sujet.

³ Souvent, le nombre d'hectares est le seul paramètre utilisé pour estimer les coûts, mais la forme du périmètre joue aussi un rôle : l'expérience montre que les surfaces morcelées ou ramifiées nécessitent plus de travail que les périmètres compacts.

⁴ En raison des caractéristiques du terrain, de la végétation, du manque de desserte, de la présence de clôtures, etc.

⁵ Pour les périmètres plus variés, par exemple, il faut plutôt délimiter des unités de cartographie (voir glossaire) plus petites.

⁶ Les textures de sols peu favorables accroissent le travail requis pour chaque sondage (forte pierrosité, p. ex., ou également processus morphologiques très dominants, tels que les laves torrentielles).

⁷ Exemples : plus la mosaïque des formes d'utilisation est fine, plus le travail de cartographie s'accroît ; les cultures qui compliquent l'accès ou le restreignent à certaines périodes ont le même effet.

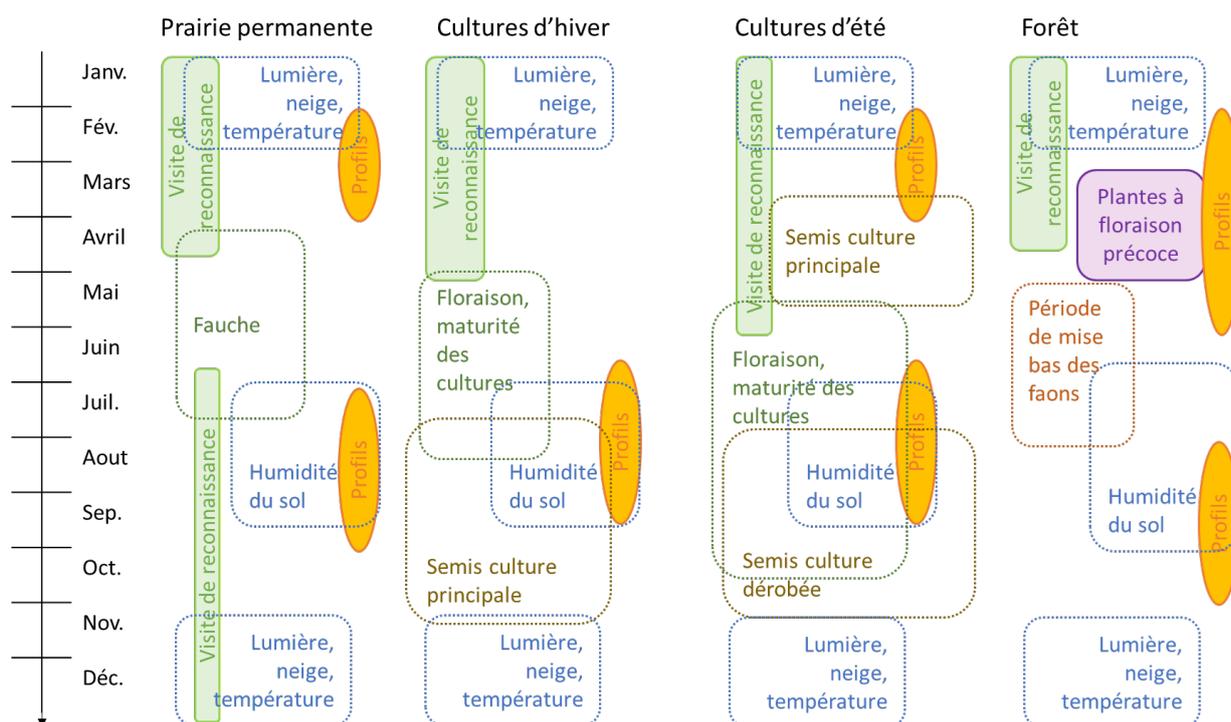


Figure 4 : Aide à la planification d'une cartographie des sols en fonction de divers types de végétation. Les plages entourées de lignes continues indiquent des périodes particulièrement favorables et celles entourées de pointillés des périodes potentiellement défavorables pour parcourir des surfaces et y effectuer des sondages à l'aide d'une tarière à main. Les ovales orange signalent des périodes qui se prêtent particulièrement bien à la réalisation de profils pédologiques.

2.5.1 Cartographie en zone de prairie permanente

Les travaux de cartographie doivent être menés après la période de végétation principale, parce que de grands secteurs peuvent alors être parcourus et cartographiés en une seule fois. À ce moment de l'année, les clôtures des pâturages ont déjà été enlevées.

Pour les prairies de fauche, c'est le moment de la fauche qui est déterminant :

- ne pas parcourir le site immédiatement avant la première fauche (par égard pour les exploitants) ;
- le cas échéant, cartographier par parcelle ;
- réaliser les profils après la fauche (tenir compte des dates de fauche des prairies extensives ou peu intensives : en fonction de l'altitude, il peut s'agir du 15 juin, du 1^{er} juillet ou du 15 juillet ; (Ordonnance sur les paiements directs versés dans l'agriculture OPD, RS 910.13 2013, annexe 4, ch 1.1) ;
- réaliser éventuellement les profils avant la période de végétation, mais alors, il faut faire particulièrement attention de ne pas compacter le sol.

2.5.2 Cartographie en zone de terres cultivées

En principe, il faut choisir le début ou la fin de la période de végétation principale pour la visite de reconnaissance et pour la cartographie : dans bien des cultures, à partir d'un certain stade de développement, il n'est plus possible d'acquies une vue d'ensemble du terrain (maïs, tournesol et colza, surtout) et les parcelles ne sont plus accessibles que par les voies de circulation des machines (céréales, etc.) ou sont même difficilement pénétrables (jachère florale, p. ex.). Les cultures de faible hauteur et les prairies artificielles restent en revanche accessibles toute l'année.

Cultures d'hiver : la fenêtre comprise entre la récolte et le semis en été est appropriée pour la phase des profils, mais elle peut être relativement courte en fonction du type de culture qui suit (du colza d'hiver après du blé, p. ex.).

Cultures d'été : on peut profiter de la fenêtre supplémentaire qui précède le semis/la plantation au printemps pour prévoir la phase des profils.

Prairies artificielles : il faut tenir compte des dates de fauche. Ces surfaces sont bien adaptées au creusement de profils (elles sont bien carrossables et les irrégularités de terrain dues au profil sont aplanies lors du travail du sol subséquent).

2.5.3 Cartographie en forêt

Contrairement aux zones agricoles, la cartographie des forêts n'est pas soumise aux mêmes restrictions temporelles, mais certains facteurs sont néanmoins limitants : le manque de lumière en hiver, la mauvaise visibilité due au feuillage touffu, la difficulté d'accès à cause des ronces, ou encore la sécheresse. Il faut aussi tenir compte des coupes de bois prévues et des périodes de chasse.

- Le printemps convient le mieux aux visites de reconnaissance et à la phase de cartographie, car l'humidité du sol est bonne, la visibilité excellente car le feuillage est encore absent et les plantes indicatrices à floraison précoce sont déjà visibles.
- Dans l'idéal, voici comment pourraient se dérouler les cinq phases de la cartographie :
 - phase préparatoire en hiver,
 - phase conceptuelle avec visites de reconnaissance au printemps,
 - phase des profils entre la fin du printemps et le début de l'été,
 - pause estivale en raison de la sécheresse,
 - phase de cartographie de l'automne au printemps suivant (avec une pause en hiver),
 - et enfin, traitement et contrôle des données en été.
- En forêt, les profils peuvent en général rester ouverts pendant toute la phase de cartographie : on peut donc s'y référer en permanence et observer les niveaux d'eau afin de préciser le régime hydrique des sols.

2.5.4 Cartographie en altitude

En altitude, la forte déclivité du terrain, la brièveté de la période de végétation et la grande variabilité des sols compliquent la planification. Les travaux de cartographie devraient commencer en automne dans les lieux les plus élevés puis se poursuivre en direction de la plaine, afin d'éviter les éventuelles chutes de neige précoces (en particulier sur les versants nord).

2.6 Appel d'offres et adjudication

La DPM est responsable de la procédure d'appel d'offres et d'adjudication des projets de cartographie. Avant l'élaboration des documents d'appel d'offres, on détermine le cadre financier pour les diverses tâches à acquérir, en se fondant sur l'estimation des coûts. Pour les marchés publics, ce cadre financier détermine en grande partie le type de procédure (Accord intercantonal sur les marchés publics révisé ; AIMP 2019).

On définit en outre quels sont les destinataires de l'appel d'offres, quels sont les critères d'aptitude et d'adjudication qui s'appliquent et si les tâches sont mises au concours en un bloc ou par étapes.

Typiquement, l'appel d'offres inclut les tâches suivantes :

- direction de projet externe : externalisation de diverses tâches, p. ex. dans le domaine de la communication, de la coordination et de l'obtention des documents de référence,
- contrôle de qualité externe : pour garantir une méthodologie uniforme,
- exécution de travaux de cartographie, y c. relevé de profils, sondages cartographiques et sondages standard (chap. 5.4.1),
- analyses de laboratoire.

Seules les personnes au bénéfice de la formation suivante sont aptes à mener des travaux de cartographie :

- formation de base en pédologie et
- « certificate of advanced studies » (CAS) en cartographie des sols et
- Encadrement, actuel ou passé, durant une période relativement longue par un-e cartographe expérimenté-e (chap. 5.8.1).

Les critères d'adjudication varient selon la tâche et le but de la cartographie, mais comprennent typiquement au moins :

- le prix,
- l'expérience des spécialistes impliqués,
- la compréhension des tâches,
- la disponibilité temporelle.

La procédure d'appel d'offres se conforme aux règles des marchés publics (chap. 2.3.3). Les cantons disposent de manuels spécifiques sur lesquels doit s'appuyer la DPM : ces derniers couvrent toute la procédure d'adjudication et ne sont pas repris ici.

2.7 Obtention des données de référence

Les données de référence requises peuvent généralement être obtenues auprès des services cantonaux chargés de la géoinformation. La DPM est responsable de veiller à ce que les organismes de cartographie mandatés reçoivent toutes ces données. Les diverses tâches (sélection, obtention et compilation des données) peuvent être discutées et réparties entre la DPM et les cartographes.

Le tableau 5 présente une sélection de données de référence, classées par facteur pédogénétique. Les jeux de données requis pour la phase conceptuelle et la phase des profils y sont mis en évidence. Le secteur à étudier détermine quels autres jeux de données vont être utilisés.

Outre les services cantonaux de géoinformation, d'autres organismes peuvent fournir des données :

- service du cadastre : propriété foncière ;
- archives de l'État : interventions déjà anciennes dans les sols, notamment projets d'amélioration foncière (drainages, défrichements) ;
- Swisstopo : cartes historiques chronologiques (« voyage dans le temps ») ;
- Armasuisse : plans d'installations et conduites militaires ;
- corporations, communes, propriétaires fonciers : drainages et captages d'eau privés ;
- usines, exploitants de réseaux, communes, géomètres et autres : conduites ;
- Centre de compétence sur les sols (CCSols) : informations tirées du modèle numérique de terrain (MNT) ;
- service de l'agriculture : informations concernant les formes juridiques des exploitations agricoles ;
- service des forêts : cartes des associations forestières⁸, cartes des peuplements, cartes de la desserte fine (chemins pour machines, layons de débardage).
- associations nationale et régionales de course d'orientation : cartes de course d'orientation.

L'obtention des plans des conduites peut être particulièrement ardue (chap. 4.3.1).

⁸ Par souci de simplicité, nous utilisons le terme «carte des associations forestières » pour désigner les associations phytosociologiques forestières selon (Ellenberg et Klötzli 1972). Dans beaucoup de cantons, de telles cartes sont disponibles auprès du service de la géoinformation ou de celui des forêts. Elles servent souvent de base pour la cartographie en milieu forestier. À défaut, on utilise les cartes NaiS sur les types de stations et de forêts selon Frehner et al. 2009 (NaiS – Gestion durable des forêts de protection). Dans les régions pour lesquelles aucune de ces bases cartographiques n'existe, il est possible de déterminer le type de station/de forêt NaiS selon (Frehner et al. 2009) ou d'utiliser d'éventuelles cartes de peuplements disponibles auprès des services des forêts (= peuplements forestiers actuels dans la zone à cartographier).

Tableau 5 : Données de référence pour la cartographie des sols (complété à partir de Brunner et al. 1997; Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich 2015; Fachstelle Bodenschutz Kanton Solothurn 2017). Les jeux de données en gras doivent être utilisés pour la phase conceptuelle et la phase des profils.

Facteurs pédogénétiques	Données
Matériau parental	Cartes géologiques (voir aussi chap. 3.3.2), cartes géotechniques, cartes des matières premières, cartes hydrogéologiques.
Hydrologie / régime hydrique	Cartes des eaux souterraines (zones et périmètres de protection des eaux souterraines, secteurs de protection des eaux), captages d'eau, carte de l'aléa ruissèlement.
Climat	Cartes des aptitudes climatiques , séries de température, quantités de précipitations.
Relief	Modèles numériques de terrain (MNT), cartes des pentes, cartes topographiques avec courbes de niveau , ombrage du relief, exposition, cartes géomorphologiques, fonds de carte plus détaillés (p. ex. cartes de course d'orientation), diverses autres données dérivées du MNT (voir aussi chap. 3.3.2).
Impact humain et histoire	Cartes Siegfried (surtout 1880)⁹ , cartes anciennes/historiques des terres et des eaux, plans des conduites, sites archéologiques , lieux d'extraction et mines, modification du terrain, carte indicatrice des anthroposols, cadastre des sites pollués, plans de drainage, informations concernant les propriétaires et les exploitants , mensuration officielle.
Végétation	Cartes des associations végétales forestières , cartes des peuplements. Aires de protection de la nature , constatation de la nature forestière.
Divers	Photos aériennes/orthophotos (diverses années) pour les surfaces non boisées. Cartes pédologiques de zones voisines, anciennes cartes pédologiques, informations sur les profils d'autres projets. Images satellites, images infrarouges, cartes d'aptitude des sols, cartes des rendements, cartes des SDA, cartes de pointage des sols agricoles. Cartes de la desserte fine (chemins pour machines, layons de débardage).

2.8 Séance de démarrage

Il revient à la DPM d'évaluer si une séance de démarrage doit avoir lieu, et le cas échéant sous quelle forme. Plus le nombre de personnes impliquées dans un projet de cartographie est important, plus il est judicieux de prévoir une séance commune pour coordonner le déroulement des travaux au début du projet. La séance de démarrage poursuit avant tout les buts suivants :

- donner la possibilité aux personnes impliquées de faire connaissance ;
- remettre des documents de référence sur papier et autres aides ;
- présenter la procédure de contrôle qualité ;
- établir le calendrier définitif.

⁹ Les cartes Siegfried sont surtout utilisées pour identifier les anciennes zones humides ou surfaces forestières, ainsi que des bâtiments et routes aujourd'hui disparus. En zone forestière, elles sont nécessaires pour reconnaître les zones qui étaient autrefois des terres agricoles.

3 Phase conceptuelle

3.1 Étapes de travail de la phase conceptuelle

La phase conceptuelle dans son ensemble constitue un processus itératif d'apprentissage et d'abstraction, à la fin duquel les cartographes ont développé une compréhension approfondie de la pédogenèse du secteur.

La figure 5 résume les étapes de travail de la phase conceptuelle. Il s'agit là de la procédure standard, qui est respectée sauf si le type, la taille et la situation du périmètre permettent une procédure simplifiée. Celle-ci est possible pour des périmètres de projet qui

- présentent des caractéristiques pédogénétiques homogènes ;
- sont de petite taille ;
- bordent directement un secteur déjà cartographié, bien connu et dont la pédogenèse est comparable.

La DPM décide si une procédure simplifiée se justifie, en se fondant sur les propriétés du périmètre citées ci-dessus. Elle fixe dans le manuel de projet les éventuels écarts par rapport à la procédure standard.

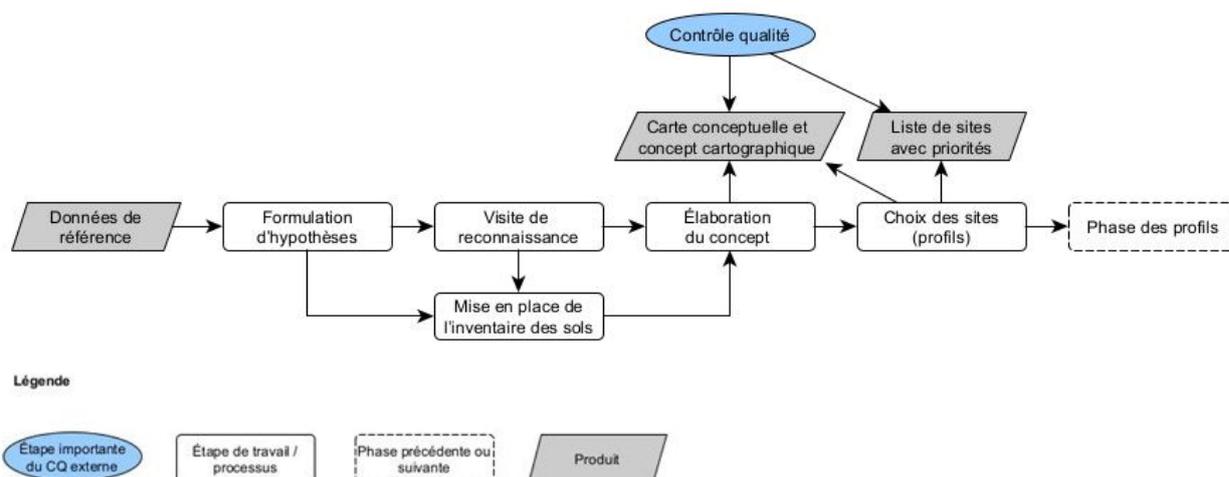


Figure 5 : Déroulement de la phase conceptuelle.

3.2 But de la phase conceptuelle

Le but fixé pour la phase conceptuelle, tout comme la procédure suivie, dépendent en grande partie du but de la cartographie. La phase conceptuelle sert à :

- obtenir un aperçu des conditions géographiques, pédologiques et morphologiques du périmètre ;
- comprendre comment, dans le périmètre, les interactions entre les facteurs pédogénétiques s'observe dans les formes de sols (voir glossaire) locales ;
- permettre aux cartographes de se préparer à la phase des profils et à la phase de cartographie ;
- choisir les sites des profils (établissement d'un inventaire des sols, chap. 3.4.3) ;
- procéder à une première subdivision du secteur fondée sur les données de référence (p. ex. en fonction de la pente) ;
- transmettre aux cartographes des renseignements sur le périmètre obtenus durant la visite de reconnaissance (p. ex. influences humaines, informations recueillies auprès des exploitants, conditions d'humidité des sols, ruissèlement, etc.).

3.3 Étude des documents de référence

L'étude des documents de référence – qui consiste à se pencher en détail sur les données et documents disponibles – peut comprendre plusieurs étapes, qui sont expliquées dans les

paragraphes ci-après. Il n'est pas nécessaire de suivre rigide-ment l'ordre présenté : ces étapes sont le plus souvent effectuées en parallèle ou se complètent. Ainsi par exemple, il faut souvent avoir commencé à passer en revue les données pour savoir quelles informations manquent encore.

3.3.1 Préparation des données de référence

Si certains jeux de (géo)données mentionnés au tableau 5 manquent encore, il faut les obtenir maintenant. Il en va de même des autres documents tels que photographies, rapports, publications scientifiques, etc. Certaines informations doivent parfois encore faire l'objet d'une préparation particulière¹⁰. Par ailleurs, les données de référence doivent impérativement porter sur une aire plus étendue que le périmètre du projet. En effet, il se peut que des zones externes au périmètre influencent certains processus pédogénétiques au sein de celui-ci. Certains des secteurs à cartographier peuvent aussi être desservis par un réseau de chemins extérieur au périmètre. Ces informations devraient être visibles sur les plans d'ensemble.

3.3.2 Produits dérivés

Deux jeux de données font typiquement l'objet de traitements plus poussés : le MNT et la carte géologique.

Modèle numérique de terrain (MNT)

Si l'on ne dispose pas encore de données dérivées du MNT (chap. 2.7), celles-ci doivent être produites. En font partie :

- les pentes du terrain, classées par formes de terrain, et si nécessaire selon des critères SDA ;
- les courbes de niveau (en fonction de la déclivité de la zone et de l'échelle choisie, des équidistances situées entre 5 m et 0,5 m sont appropriées) ;
- l'ombrage du relief (« hillshade »), qui se prête particulièrement bien à l'identification des éléments marquants du terrain ou des interventions humaines (p. ex. anciens sites d'extraction ne figurant sur aucun plan d'ensemble) ;
- le microrelief, obtenu en soustrayant des MNT lissés différemment, afin de représenter des différences de relief très fines en terrain plat, par exemple des anciens bras dans les alluvions ;
- des données hydrologiques, selon la zone, l'accumulation des flux d'eau ou l'indice d'humidité (« wetness index ») peuvent fournir des informations supplémentaires utiles.

Ce sont surtout les deux premiers produits dérivés cités ci-dessus qui sont nécessaires, les autres sont élaborés selon les besoins.

Cartes géologiques

Les cartes géologiques ne subissent pas de traitement à proprement parler, mais une nouvelle classification. Pour cela, on crée une nouvelle colonne dans la légende et on y traduit les unités géologiques en matériaux parentaux selon la classification. Cette étape est particulièrement importante lorsque le périmètre de projet examiné s'étend sur plusieurs feuilles de cartes géologiques, qui ont à chaque fois leur propre légende. On peut encore ajouter une colonne supplémentaire avec les caractéristiques (supposées) du matériau parental. Il faut alors impérativement tenir compte du fait que les cartes géologiques ne contiennent guère d'indications sur la couche de couverture, qui est pourtant particulièrement intéressante du point de vue pédologique.

3.3.3 Passage en revue et sélection

Une fois que toutes les informations sont disponibles sous la forme désirée, elles sont passées en revue et une première sélection est effectuée pour la carte conceptuelle. Ces opérations se font dans un SIG qui permet de lire, modifier et représenter aussi bien des données vectorielles que des données raster, et cela pour plusieurs jeux de données en même temps. Dans la perspective de la phase des profils, le jeu de données de référence regroupera des informations relevant de deux champs thématiques :

¹⁰ Par préparation, on entend ici la transformation de ces données pour que leur format soit compatible avec le SIG et qu'elles puissent être bien représentées sur la carte conceptuelle. Exemple : numérisation à partir de cartes Siegfried d'éléments physiques tels que des cours d'eau.

- des informations sur les facteurs pédogénétiques dans le secteur étudié ;
- des informations pertinentes pour les travaux de fouille qui seront menés (exemples typiques : protection des eaux, zones archéologiques).

On tiendra compte de l'échelle des données pour les interpréter : si les données sont à une échelle plus petite que celle visée pour la cartographie, leur échelle ne peut pas être agrandie sans autre.

3.3.4 Cas spécial : périmètres pour lesquels on dispose déjà de données pédologiques

S'il existe déjà des données pédologiques ou même des cartes pédologiques pour un périmètre, celles-ci influencent de manière prioritaire l'élaboration conceptuelle. Une carte à l'échelle 1:25 000 peut par exemple être directement utilisée comme fond d'une carte conceptuelle pour une cartographie à l'échelle 1:5000. Les données pédologiques disponibles recouvrent notamment :

- les cartes des sols existantes avec les rapports et informations de profils qui s'y rattachent ;
- les profils de l'observation nationale et cantonale des sols ;
- les données et expertises pédologiques liées à des projets de construction.

3.4 La formulation d'hypothèses comme fondement conceptuel

3.4.1 Formulation d'hypothèses et d'unités conceptuelles

En se fondant sur le but de la cartographie et sur les données de référence disponibles, on formule des hypothèses sur les unités pédologiques (voir glossaire) attendues dans le périmètre (Soil Science Division Staff et al. 2017, p. 237). L'élaboration des hypothèses se fait pour de grands espaces : on distingue entre elles de grandes formes de paysage, le petit relief ne jouant qu'un rôle secondaire. Le périmètre est alors divisé en unités conceptuelles sur la base de la géologie, du terrain et d'autres facteurs pédogénétiques. En d'autres termes, on regroupe des zones dont on suppose qu'elles sont homogènes – ou au moins liées – sur le plan pédogénétique (-> les unités conceptuelles sont des surfaces qui présentent la même combinaison de facteurs pédogénétiques, p. ex. en ce qui concerne le matériau parental et la morphologie (Ad-hoc Arbeitsgruppe Boden 2005, p. 28). Les hypothèses correspondent à des suppositions sur la taille et le nombre d'unités conceptuelles d'un périmètre. La formation de ces unités est réalisée sur la base de l'expérience des cartographes, elle peut encore être adaptée à un stade plus avancé de la phase conceptuelle. Elle relève d'un processus d'apprentissage continu des cartographes en rapport avec le périmètre étudié. Ni la représentation écrite et graphique concrète, ni les moyens techniques utilisés ne sont prédéfinis. Il est possible de combiner les approches suivantes :

- croquis à la main,
- recoupement de données de référence dans le SIG,
- analyses géostatistiques.

L'Annexe 1 contient des informations complémentaires sur la formulation d'hypothèse ainsi que des exemples.

3.4.2 Visite de reconnaissance

Une fois les hypothèses formulées, la visite de reconnaissance qui suit sert les à tester de manière ciblée grâce à des sondages de reconnaissance. On accorde alors une attention particulière aux formes de sol nouvelles ou inattendues. On apprend ainsi :

- a) comment certaines combinaisons de facteurs pédogénétiques s'expriment dans l'aspect du sol ;
- b) quels sont les facteurs pédogénétiques particulièrement significatifs dans le périmètre étudié.

Lors de cette reconnaissance, les facteurs pédogénétiques « relief » et « matériau parental » sont toujours pris en compte (Blume et al. 2011, p. 4 et p. 64, complété) :

- Relief : les hypothèses portant sur le relief sont vérifiées et affinées. Le terrain est ainsi déjà structuré en éléments paysagers et – là où c'est possible – en formes de terrain. Les petites formes qui ne sont pas visibles sur les cartes topographiques peuvent justement présenter de nettes différences pédologiques ou résulter elles-mêmes de la pédogenèse.
- Matériau parental : les ouvertures telles que les carrières, les gravières, les talus et les zones de chablis avec des souches renversées, tout comme les murgiers, peuvent fournir de précieuses informations sur le type de matériau parental et la pierrosité du périmètre.

La visite de reconnaissance offre en outre une première occasion de rencontrer les exploitants agricoles et forestiers sur place, et de leur poser des questions sur le cycle annuel de manière à se faire une idée du périmètre allant au-delà des impressions obtenues le jour de la reconnaissance (Legros 1996, p. 138).

L'Annexe 1 contient des informations complémentaires sur la visite de reconnaissance ainsi que des exemples.

Choix des sites et documentation des sondages de reconnaissance

Au moment de choisir les sites des sondages de reconnaissance, on observe en particulier si le site envisagé se prête à la réalisation d'un profil de sol ou d'un sondage mécanisé. Le nombre de sondages de reconnaissance est deux à trois fois supérieur à celui des profils représentatifs (chap. 3.6.2). Les sondages de reconnaissance permettent de déterminer et prioriser les sites des profils (l'identification de sites de remplacement et des informations sur les cultures prévues à cet endroit peuvent simplifier la suite de la procédure). Pour documenter les sondages de reconnaissance, les cartographes peuvent choisir entre diverses variantes équivalentes :

- sur des plans de reconnaissance *ad hoc*,
- sur les plans de terrain,
- de manière entièrement numérique,
- par une combinaison des possibilités ci-dessus.

Les organismes de cartographie mandatés remettent au CQ externe la liste des sondages de reconnaissance avec toutes les informations recueillies.

L'Annexe 1 contient une synthèse des avantages et inconvénients des variantes de documentation ainsi que d'autres indications utiles.

3.4.3 Élaboration de l'inventaire des sols

L'inventaire des sols est créé pendant la visite de reconnaissance, puis étendu au cours du projet de cartographie. Il décrit l'éventail des sols présents dans le périmètre étudié, autrement dit l'intégralité des formes de sol (voir glossaire) qui existent dans un secteur. Les cartographes utilisent l'inventaire des sols comme instrument pour :

- choisir et justifier les sites des profils (figure 6) ;
- vérifier la plausibilité des sondages dans la phase de cartographie (tableau 11).

À la fin de la phase conceptuelle, l'inventaire des sols est remis au CQ externe sous une forme abrégée pour justifier le choix des sites des profils représentatifs. À cet effet, on regroupe par unités conceptuelles plusieurs entrées de l'inventaire des sols. L'exemple imaginaire de la figure 6 présente une forme abrégée d'inventaire des sols, dans laquelle plusieurs formes de sols ont été réunies en unités conceptuelles. Les numéros des sondages de reconnaissance qui se prêtent comme sites de profils représentatifs sont mentionnés pour chaque unité, les sites privilégiés étant signalés en gras. Ces informations sont complétées par une indication de la pertinence (en termes de surface) des unités conceptuelles pour le périmètre étudié.

Forme de sol	Unité conceptuelle	Sondages de reconnaissance et priorité	Pertinence pour le périmètre cartographié
tV, wW	Alluvions (AL), gravier (SC) en bord de lac	7, 9, 10	grande
bb, kB, IB	Alluvions (AL) et colluvions (KO) dans un paysage de moraine de fond	12, 24	moyenne
gB, oY	Drumlin dans de la moraine (de fond)	2, 6, 14, 26, 27, 32	grande
fB, IB	Moraine de fond	15, 16, 18, 34	grande
IB, tV	Cuvettes à colluvions dans de la moraine	3, 21, 22, 33	moyenne
gB, fB, bb, IB	Moraine de fond sur molasse	1, 36, 39, 42	grande
gB, fB, bb, kB	Moraine sur molasse dans un versant	4, 5, 17, 19, 20, 28, 30, 31	grande
fB, IB, kB	Moraine dans un versant	8, 11, 37, 38, 40, 41	grande
cB	Molasse	13, 25	faible
gO	Cordon morainique	23, 43	faible
fB	Roche moutonnée	29, 35	faible

Figure 6 : Exemple fictif de liste avec des propositions de sites pour les profils représentatifs. Les numéros en gras désignent les sites de sondages de reconnaissance qui se prêtent le mieux à la réalisation d'un profil représentatif.

Au moment de choisir le site des profils représentatifs, on essaie de couvrir tout l'inventaire des sols (Brunner et al. 1997, § 7.1-1). Le choix des sites de ces profils est décrit plus précisément au chapitre 4.3.

3.5 Élaboration conceptuelle

3.5.1 Concept de cartographie

Les renseignements tirés de l'étude des données de référence et de la visite de reconnaissance sont réunis en un concept de cartographie, formulé ou non par écrit. Ce concept correspond à une compilation d'hypothèses concernant les formes de sol et la pédogenèse dans le périmètre examiné. Il constitue un fondement important pour la phase de cartographie, et doit être connu des cartographes avant le début des travaux. Un concept écrit plutôt que juste facilite la transmission d'informations entre les parties prenantes au projet, en particulier dans les cas suivants :

- projet de grande ampleur avec un nombre élevé de cartographes ;
- long intervalle entre la phase conceptuelle et la réalisation des profils ou la cartographie ;
- composition différentes des équipes qui réalisent les différentes phases ;
- pour les échanges entre le CQ externe et la DPM.

Les points suivants peuvent être traités dans le concept de cartographie :

- bases déterminantes de la pédogenèse (matériau parental, relief, climat, végétation, durée de la pédogenèse, hydrologie) ;
- influences humaines dominantes ;
- description de l'inventaire des sols (ou d'extraits de celui-ci) et de sa répartition spatiale ;
- caractéristiques spécifiques des sols, particularités propres au périmètre ;
- documents de référence spécifiques au projet ;
- exigences spécifiques au projet.

3.5.2 Établissement de la carte conceptuelle

La carte conceptuelle visualise le concept de cartographie. Elle contient les sondages de reconnaissance (voir glossaire) et tous les sites envisagés pour les fosses pédologiques. Ces sites sont déterminés à l'aide des sondages de reconnaissance. La carte conceptuelle est une représentation très

simplifiée du concept de cartographie : pour qu'elle reste lisible, on doit renoncer à y intégrer certains aspects. Ce qui est représenté sur la carte conceptuelle est très spécifique à chaque périmètre. Il n'est donc pas possible de définir une forme de représentation uniforme. L'Annexe 1 en présente deux exemples. Typiquement, la carte conceptuelle contient cependant au moins les éléments suivants :

- sondages de reconnaissance avec indication de leur adéquation comme site pour un profil représentatif ;
- surfaces délimitées en se fondant sur les hypothèses, p. ex. unités conceptuelles ;
- restrictions dans le choix des sites pour les profils représentatifs (chap. 4.3) ;
- structuration/coloration en fonction du régime hydrique attendu et de la profondeur utile estimée (selon les enseignements obtenus lors de la visite de reconnaissance).

Si la carte conceptuelle est imprimée, on peut produire plusieurs cartes avec des contenus différents, pour en améliorer la lisibilité. L'échelle de la carte conceptuelle est plus petite que celle de la carte pédologique que l'on souhaite produire : si la carte pédologique est au 1:5000, l'échelle des cartes conceptuelles sera comprise entre 1:10 000 et 1:15 000. Sous forme numérique, en revanche, toutes les informations peuvent être représentées sur la même carte, mais il est tout de même recommandé de les grouper en plusieurs couches distinctes.

La carte conceptuelle s'avère utile tant pour les échanges au sein d'une équipe ou entre équipes travaillant en parallèle dans des secteurs voisins que pour discuter avec le CQ du concept de cartographie et de la plausibilité des sites choisis pour les profils représentatifs (Fachstelle Bodenschutz Kanton Solothurn 2020, p. 3). Elle constitue un fondement important pour la phase de cartographie (Brunner et al. 1997, § 6.2-1). Certaines informations fiables de la carte conceptuelle (sites de sondage, extension des surfaces anthropisées, zones mouillées, etc.) peuvent être transposées directement sur la carte de terrain.

3.6 Choix provisoire des sites des profils représentatifs

Le chapitre 4.4.1 présente le but des profils représentatifs et en fournit une définition.

3.6.1 Critères pour le choix des sites des profils représentatifs

Les profils représentatifs doivent couvrir toutes les formes de sol qui existent dans le périmètre de cartographie (Brunner et al. 1997, § 7.1-1). Concrètement, cela signifie que lors du choix de leur site il faut pondérer les deux objectifs suivants :

- représentativité des surfaces : les profils doivent être représentatifs des sols qui occupent les plus grandes surfaces dans le périmètre étudié (on les choisit d'abord en fonction des unités conceptuelles et des formes de sol qu'ils représentent, puis également en fonction d'autres caractéristiques pédologiques) ;
- représentation de l'inventaire des sols : les profils représentatifs doivent si possible mettre en évidence l'intégralité de l'inventaire des sols présent dans le périmètre. On choisit donc aussi délibérément des sites « extrêmes », de manière à couvrir tout le spectre de variation des formes de sol.

L'Annexe 1 fournit encore des critères de choix complémentaires.

3.6.2 Densité des profils représentatifs

En principe, pour les échelles jusqu'à 1:10 000, on creuse un profil représentatif tous les 10 à 15 ha (ce qui correspond à une densité de 10 à 7 profils pour 100 ha). Pour les échelles jusqu'à 1:25 000, il faut compter un profil représentatif tous les 100 à 150 ha (soit entre 1 et 0,7 profil pour 100 ha) (Brunner et al. 1997, § 7.1-2). On peut déroger à ces prescriptions lorsqu'un périmètre à cartographier est particulièrement vaste et/ou homogène du point de vue pédogénétique et qu'on peut y trouver des profils particulièrement représentatifs des surfaces et/ou de l'inventaire des sols.

3.6.3 Procédure de choix provisoire des sites

Le ou la cartographe choisit les sites en se fondant sur les informations à sa disposition, et en particulier sur la visite de reconnaissance. Lorsqu'un site n'est pas approprié, on définit un site de

substitution en partant des autres propositions faites suite à la visite de reconnaissance (sondages de reconnaissance, chap. 3.4.2).

Si plusieurs personnes participent au choix des sites, il faut procéder à une harmonisation (CQ interne). C'est le cas en particulier lorsque ces personnes traitent divers sous-secteurs de manière autonome. Une telle harmonisation est également judicieuse entre lots voisins d'un même périmètre ou avec des cartographies antérieures de périmètres voisins. Le CQ externe évalue ensuite la sélection retenue : si nécessaire, des corrections sont apportées (chap. 3.7). Si les cartographes disposent déjà des plans des conduites durant la phase conceptuelle, ceux-ci sont pris en compte très tôt dans le choix des sites (chap. 4.3.1). Ce n'est qu'ensuite que l'on sait pour quels sites il faut prendre contact avec l'exploitant (chap. 4.3.2).

3.7 Remarques concernant le contrôle qualité

3.7.1 Contrôle qualité interne

Si plusieurs personnes travaillent de manière indépendante au relevé des sondages de reconnaissance, le CQ interne s'assure que leurs descriptions des sols sont comparables et respectent le concept de cartographie. Les écarts significatifs sont examinés et corrigés si nécessaire. Le CQ interne vérifie aussi que les produits remis au CQ externe sont complets.

3.7.2 Contrôle qualité externe

Le concept de cartographie écrit, la carte conceptuelle et les sites proposés pour les profils représentatifs avec leur ordre de priorité sont soumis au CQ externe, qui en vérifie et évalue la plausibilité. Cet examen porte en particulier sur :

- la répartition des profils représentatifs dans le périmètre (la qualité de la cartographie diminue lorsqu'aucun profil représentatif ne sert de référence dans des zones étendues et que l'on doit se contenter de travailler par analogie) ;
- la coordination entre lots voisins, y compris la prise en compte mutuelle des formes de sol attendues ;
- le respect des critères de choix propres au projet.

La DPM définit les exigences qui s'appliquent au CQ et aux organismes de cartographie mandatés :

- elle définit les étapes de travail qui concernent le concept et le choix des sites des profils représentatifs ;
- par l'intermédiaire du manuel de projet, elle met à disposition des aides telles que des listes de contrôle et des formulaires (exemple : Fachstelle Bodenschutz Kanton Solothurn 2017, p. 33 ss).

4 Phase des profils

4.1 La phase des profils dans le déroulement du projet

Il y a trois options possibles pour cette phase, présentées ci-après. Les réflexions quant au calendrier et à l'utilisation des terres (chap. 2.5) ainsi que les critères mentionnés ci-dessous sont déterminants pour le choix de l'option.

4.1.1 Procédure standard

En temps normal, et dès que plusieurs cartographes sont mandatés, la phase des profils suit la phase conceptuelle et précède la phase de cartographie. Cela permet aux cartographes d'harmoniser autant que possible leur procédure de description des sols avant la phase de cartographie.

Alternativement (options 2 et 3), la phase des profils peut être en partie reportée pendant la phase de cartographie ou après celle-ci.

Les descriptions des chapitres 4.2 à 4.7 se fondent sur la procédure normale.

4.1.2 Phase des profils en deux temps

Cette option est surtout appropriée pour les projets de cartographie qui concernent des surfaces très grandes et/ou très complexes. On entend par là des périmètres qui présentent une variété et une hétérogénéité élevées des sols, si bien que la densité usuelle de sondages de reconnaissance de la phase conceptuelle ne suffit pas pour se faire une vue d'ensemble satisfaisante. Avec cette option, une partie des profils est creusée avant la cartographie et l'autre pendant celle-ci (exemple : Amt für Umwelt des Kantons Solothurn 2020).

Avantages :

- Il est ainsi possible de mieux gérer un très grand nombre de profils (voir également le chap. 4.3.3).
- Les nouveaux enseignements sur les sols du périmètre, obtenus grâce à la cartographie, peuvent être intégrés de manière optimale.
- Au début de la phase de cartographie, on a déjà procédé à une harmonisation sommaire de la méthodologie.

Inconvénients :

- Demande un peu plus de travail (presque toutes les étapes de travail de la phase des profils doivent être répétées).
- Les cartographes et spécialistes du CQ risquent de se disperser un peu plus (du fait que ces personnes mènent plusieurs tâches en parallèle).

4.1.3 Phase des profils différée après la cartographie

Cette option a été utilisée par Murisier et Briguët (2004) pour une partie de leur cartographie à l'échelle 1:15 000 des vignobles vaudois. Elle convient également aux projets de cartographies de petites surfaces par une seule personne (ou un très petit nombre de personnes), avec une phase conceptuelle très réduite. Les cartographies menées en lien avec un projet de construction en constituent des exemples typiques. Pour relever l'état initial ou évaluer une remise en culture, on se contente d'étudier les données de référence. On n'effectue pas de visite de reconnaissance, mais on cartographie directement. Les fosses pédologiques ne sont creusées que vers la fin de la cartographie ou même après celle-ci, en des points particulièrement représentatifs.

Avantages :

- Le projet peut avancer rapidement.
- La flexibilité dans le temps est accrue.

Inconvénients :

- Il n'y a pas d'harmonisation sommaire de la méthodologie au début de la phase de cartographie. Il faut donc corriger à posteriori des unités pédologiques en fonction des renseignements tirés des profils.

- La description des sondages est entachée d'incertitudes, parce qu'on ne peut pas s'appuyer sur des informations venant des profils (pas de calibration sur des valeurs de laboratoire).

4.2 Étapes de travail de la phase des profils

Les sites potentiels de profils représentatifs ont été choisis durant la phase conceptuelle. La phase des profils, quant à elle, inclut toutes les étapes ultérieures qui servent à déterminer les sites définitifs, de l'ouverture des profils jusqu'à leur fermeture. La description des profils et la journée de calibration constituent des jalons importants, qui sont accompagnés par les contrôles qualité interne et externe (figure 7). La phase des profils est suivie de la phase de cartographie (chap. 5).

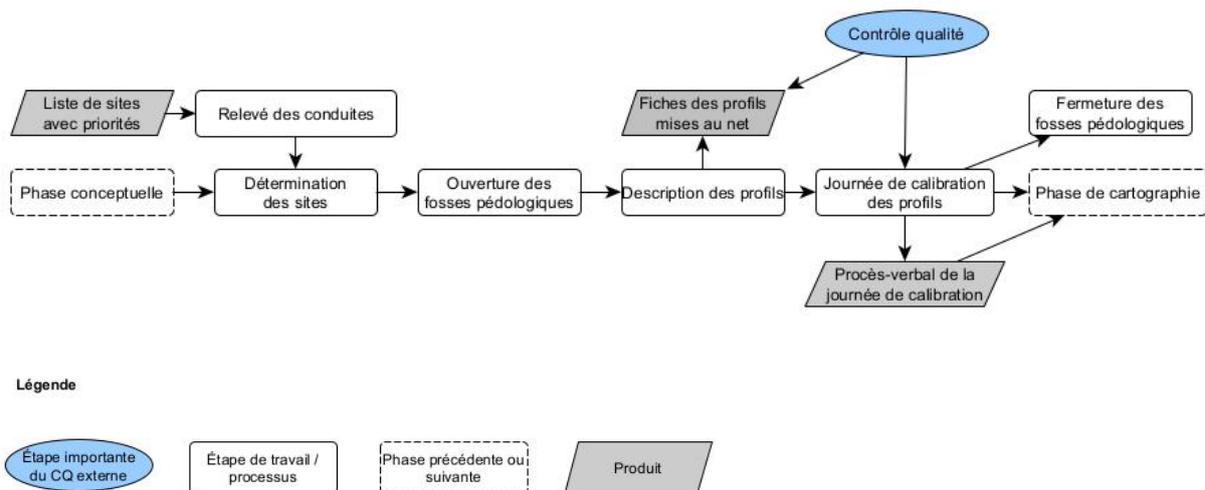


Figure 7 : Déroulement de la phase des profils (procédure standard).

4.3 Choix définitif des sites des profils représentatifs

4.3.1 Relevé des conduites

Pour procéder au choix définitif des sites des profils représentatifs, il est impératif de clarifier le tracé des conduites souterraines. On vérifiera le tracé des types de conduites mentionnés au tableau 6 (qui précise aussi où ces informations peuvent être obtenues). Ce contrôle est effectué soit par la DPM, soit par les OM (à définir dans le manuel de projet).

Remarque : la plupart du temps, on effectue cette vérification uniquement sur les sites de profils potentiels retenus à l'issue de la phase conceptuelle, car la collecte, l'examen et la distribution de ces informations aux cartographes est très laborieuse.

Tableau 6 : Liste des conduites souterraines possibles, avec les sources des informations les concernant (selon (Fachstelle Bodenschutz Kanton Solothurn 2017, p. 35). La source primaire est à chaque fois l'exploitant de l'infrastructure.

Conduite	Source des informations
Eau, eaux usées	Commune
Conduites de gaz à haute ou moyenne pression	Vue d'ensemble auprès de Swissgas, exploitants de réseau régionaux
Électricité	Entreprises électriques régionales, communes, associations, Armasuisse, Swissgrid
Télécommunication (câbles)	Exploitants de réseau nationaux et régionaux, Armasuisse
Chauffage à distance	Commune
Drainages	Archives de l'État, corporations, communes, propriétaires fonciers, autorités cantonales d'amélioration foncière, exploitant de la parcelle
Conduites militaires	Armasuisse
Autres conduites privées (p. ex. lisier, eau)	Propriétaires fonciers

4.3.2 Consultation de l'exploitant de la parcelle

Avant d'ouvrir un profil, il faut obtenir le consentement des personnes concernées (exploitant de la parcelle et éventuellement son propriétaire) pour le site définitif de la fosse pédologique. Les étapes sont les suivantes :

- accord oral (par téléphone/sur place),
- remise du plan avec indication du profil prévu dans le terrain,
- visite des lieux.

Points à aborder ou expliquer :

- site du profil,
- moment et déroulement de l'ouverture du profil,
- dimensionnement de la fosse,
- sécurisation de la fosse,
- indemnisation financière,
- moment et déroulement de la fermeture du profil,
- remise en culture (p. ex. mélange de semences).

4.3.3 Organisation de l'ouverture du profil

Les facteurs suivants rendent la planification de la phase des profils exigeante et ardue :

- coordination d'un très grand nombre d'acteurs;
- contraintes restreignant le choix de la fenêtre temporelle au cours de l'année (chap. 2.5) ;
- temps disponible limité pour l'exécution (facteurs météorologiques, utilisation optimale des capacités de l'entreprise chargée de l'excavation, calendrier coordonné avec l'exploitant du site) ;
- la description des profils et les visites de reconnaissance par le CQ doivent avoir lieu à brève échéance.

L'Annexe 1 fournit encore d'autres indications sur l'organisation de l'ouverture des profils.

4.4 Ouverture des fosses pédologiques

4.4.1 Profils représentatifs

Par « profils représentatifs », on entend les profils qui servent de sols de référence d'une cartographie et permettent de calibrer le travail des cartographes (voir aussi le glossaire). Sans profils représentatifs soigneusement relevés, la qualité de la cartographie sera insuffisante, car ceux-ci en constituent le fondement pédologique.

Ce sont les fosses pédologiques qui se prêtent le mieux à la description d'un profil représentatif. À défaut, on peut utiliser des sondages et des carottes de forage, mais ceux-ci devraient avoir la plus

grande section transversale possible (Blume et al. 2011, p. 5 s). Remplacer une fosse pédologique par un autre type d'ouverture n'est admis que si ce choix est motivé, car seules les fosses pédologiques ou d'autres ouvertures larges (talus, gravière, p. ex.) permettent de décrire le sol de manière complète. Le tableau 3 de l'Annexe 1 compare la description des caractéristiques d'un sol dans une fosse pédologique avec d'autres types d'ouvertures.

4.4.2 Exécution

La fosse pédologique (figure 8) doit mesurer au moins 60 cm de large. Elle doit avoir une longueur égale à environ une fois et demie sa profondeur, et des escaliers pour y descendre. Si possible, on creuse jusqu'à une profondeur de 1,6 m, afin de pouvoir décrire le sol pertinent sur un mètre et demi. Dans les terrains inclinés, la fosse pédologique est creusée parallèlement à la ligne de pente, sa paroi frontale étant située vers l'amont. En terrain plat, elle est orientée vers le nord ou vers le sud (Blume et al. 2011, p. 6); voir également les indications complémentaires à l'Annexe 1). Un-e représentant-e des organismes de cartographie mandatés accompagne les travaux d'excavation (Fachstelle Bodenschutz Kanton Solothurn 2017, p. 31). Afin d'éviter tout dommage au sol ou aux infrastructures par les machines, on respectera les dispositions de protection des sols en vigueur, ainsi que d'autres exigences (chap. 2.3.3 et section correspondante à l'Annexe 1). En particulier :

- n'effectuer les travaux que si le sol est suffisamment ressuyé ;
- entreposer les couches de sol séparément les unes des autres et les remettre en place dans le bon ordre à la fermeture du profil ;
- dans les surfaces écologiques, d'entente avec les services cantonaux compétents et l'exploitant, il peut être nécessaire de prélever la couche herbeuse par plaques et de la remettre en place à la fermeture du profil ;
- signaler les fosses pédologiques au moyen de rubalise (ruban de chantier) résistante et d'un panneau d'information.

Pour plus de détails concernant la réalisation des fosses pédologiques, voir Annexe 1.

Compléments pour les fosses en forêt :

- le choix du site et de l'orientation du profil est déterminé avant tout par la place disponible entre les arbres et la nécessité de le situer à bonne distance des layons de débardage ;
- lors de la mise en place de la paroi du profil, on veillera à conserver soigneusement tous les horizons, y c. les horizons O (important pour la détermination des formes d'humus) ;
- en fonction de la densité de la végétation, il peut être judicieux de baliser l'accès (avec des rubans attachés aux branches, p. ex.) et si nécessaire de le dégager ;
- placer une branche dans la fosse pour aider les insectes et autres petits animaux à en sortir.

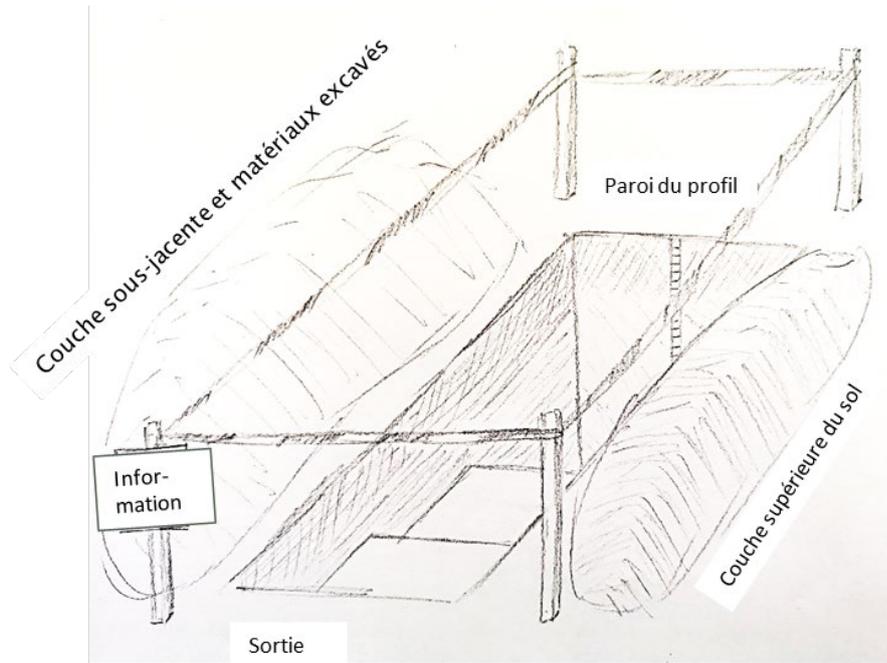


Figure 8 : Schéma d'une fosse pédologique avec clôture, dépôts de sol et panneau d'information. Figure d'après Brunner et al. (1997, fig. 2.1 b).

4.5 Description des profils

4.5.1 Matériel utilisé pour la description des profils

Le tableau 7 présente le matériel pour la phase des profils (adapté de Legros (1996, p. 68 ss)).

Tableau 7 : Matériel pour la phase des profils. En **gras**, le matériel impératif.

Tâche	Instrument avec explications
Creusement	On utilise souvent une pelle mécanique pour creuser les fosses pédologiques. À défaut, on creuse à la main, avec une bêche/pelle et une pioche. Divers outils de creusement servent aussi à préparer la paroi du profil : <ul style="list-style-type: none"> • bêche, pour dégager la paroi du profil, préparer la face lisse, décrire la structure et effectuer le test à la bêche, comme surface de réception pour le test de chute ; • grande pelle, pour évacuer les déblais, pour le test de chute ; • petite pelle, pour prélever des échantillons, décrire la structure ; • spatule, pour préparer la face rugueuse, décrire la structure ; • bêche pliante, pour préparer la face lisse.
Détermination de la teneur en carbonates (effervescence)	Solution d'acide chlorhydrique à 10 % en flacon avec compte-gouttes Éventuellement calcimètre avec accessoires
Détermination du pH	Solution indicatrice telle que Hellige, avec coupelle et échelle colorimétrique de référence, chiffon ou papier de nettoyage <i>ou</i> Appareil de mesure de terrain avec accessoires.
Prise d'échantillons	Récipients (au moins 5 pièces), sacs en plastique, cylindres pour échantillons volumétriques, matériel de marquage tel que feutres indélébiles et étiquettes.
Saisie des données	Formulaire de saisie sur appareil électronique <i>ou</i> Fiche de profil imprimée, de quoi écrire (crayon à papier, crayon ou stylo rouge résistant à l'eau, feutre indélébile, gomme, taille-crayon), support (sous-main à pince ou table de terrain)
Positionnement par satellite	GNSS mobile avec ou sans cinématique temps réel (RTK) (un smartphone peut aussi servir de GNSS mobile)
Description du profil	<ul style="list-style-type: none"> - Parasol - Double mètre ou mètre ruban - Étiquettes pour profils - Marquages pour les horizons - Loupe - Bouteille pulvérisatrice avec eau de réserve - Nuancier munsell - Pompe aspirante (optionnel) - Génératrice (optionnel) - Feuilles de plastique pour couvrir la paroi du profil et entreposer du matériel pédologique - Appareil photo, réflecteur pliable - Petit cadre (1x1 dm) pour déterminer la densité racinaire - Classification des sols suisse (KLABS) - Classeur pour évaluer la structure des sols (Nievergelt et al. 2004); - Piquets et ruban de chantier - Inclinomètre - Tarière - Tamis à 1 mm et 4 mm pour la forme d'humus - Balance - Cartes de référence
Autres mesures sur le terrain	<ul style="list-style-type: none"> - Solution de dipyridyle - Humidimètre - Solution de H₂O₂ à 3 % pour la détermination du Mn - Conductimètre.

4.5.2 Préparation et documentation photographique de la paroi du profil

La paroi du profil est préparée de haut en bas afin d'enlever tout matériel qui aurait coulé des horizons supérieurs vers ceux inférieurs et pourrait fausser la description. Lorsque tout est préparé, on fait trois photographies, en veillant à ce qu'aucune ombre projetée ne soit visible sur la paroi du profil :

- une photo de la paroi du profil sans flash ;
- une photo de la paroi du profil avec flash, parce que la moitié inférieure de la fosse est forcément un peu plus sombre que la moitié supérieure ;
- une photographie avec le contexte : elle doit montrer la situation de la fosse pédologique dans le terrain et fournir des renseignements sur le site. En forêt, on prend une « photographie du peuplement » incluant les arbres ainsi que la strate herbacée et/ou muscinale. Le peuplement forestier et les strates herbacée et muscinale peuvent aussi être photographiés séparément.

L'Annexe 1 fournit d'autres indications concernant la préparation et la documentation photographique.

4.5.3 Description et documentation du profil

La description du sol se fonde sur la Partie I de l'ouvrage complet (chap. 1). Elle est documentée dans le formulaire de relevé ad hoc, sur papier ou sous forme numérique. En l'absence de consigne dans l'appel d'offres ou le manuel de projet, les cartographes sont libres de choisir le mode de saisie. À la fin de la phase de cartographie, la DPM veille à ce que les données des profils soient saisies dans NABODAT.

4.5.4 Prélèvement d'échantillons

De manière générale, le prélèvement d'échantillons se fait de bas en haut, afin d'éviter les contaminations entre horizons. Ce prélèvement est noté dans la documentation du profil. Les échantillons sont prélevés en plusieurs prises sur tout un horizon, et mélangés dans un sachet afin d'obtenir des échantillons composites. La DPM formule déjà des consignes sur le type et le nombre d'échantillons dans l'appel d'offres ou dans le manuel de projet.

4.5.5 Mesure du niveau d'eau

Si de l'eau stagne dans la fosse pédologique au moment de la description du sol, on mesurera le niveau de l'eau à partir du bord supérieur du profil. La fosse est ensuite vidée à l'aide d'une pompe. Le niveau d'eau peut ensuite être contrôlé à plusieurs reprises, afin d'obtenir des indications sur le régime hydrique. Lorsqu'on évalue le régime hydrique en se fondant sur des niveaux d'eau, il convient de toujours comparer les conditions météorologiques actuelles aux valeurs moyennes pluriannuelles, et considérer également la variation annuelle. L'Annexe 1 fournit d'autres indications concernant le niveau d'eau.

4.6 Fermeture des profils pédologiques

Une fois que la description pédologique de la paroi du profil et le prélèvement des échantillons sont terminés, que le processus de CQ est achevé et que le travail des cartographes a été calibré, les fosses peuvent être refermées avec l'aval du JCQ externe.

Afin d'éviter tout dommage, il faut observer les points suivants :

- réparer les conduites (de drainage) qui ont été endommagées lors de l'ouverture ;
- remettre en place le matériel du sol correctement, couche par couche ;
- pour les sols à forte pierrosité en zone agricole, veiller à placer les pierres de grande taille tout au fond et à enlever toute pierre en surface une fois le profil refermé, afin d'éviter les dommages aux machines ;
- déblayer entièrement les dépôts de sol ;
- une fois le profil refermé, veiller à ce que le terrain soit bombé et en aucun cas creux (tassement du sol).

La végétalisation et la remise en culture se font en coordination avec le propriétaire, selon les indications de l'Annexe 1.

4.7 Remarques concernant le contrôle qualité

4.7.1 CQ interne

Le CQ interne vérifie les éléments suivants de la description du profil :

- Exhaustivité : tous les paramètres, sachets d'échantillons et photographies doivent être disponibles. Si tel n'est pas le cas, ils sont complétés lors du contrôle final sur le terrain.
- Cohérence : les paramètres enregistrés doivent être cohérents entre eux et avoir été relevés conformément à la Partie I de l'ouvrage complet. La description et l'interprétation des sols doivent être faites de manière homogène dans tout le périmètre étudié.
- Plausibilité : la description est comparée au concept de cartographie. Si l'on constate de nettes divergences, on en recherche l'explication et on vérifie s'il faut modifier le concept de cartographie ou la description du profil, ou s'il existe des lacunes dans la classification.

Les deux approches suivantes permettent de vérifier très simplement la plausibilité et la cohérence :

- Constitution de séries : les fiches des profils sont triées en fonction de critères sélectionnés. On peut par exemple les classer par ordre décroissant de pointage du sol et les comparer avec le concept. Ou l'on peut former une série d'engorgement croissant et contrôler si l'accroissement de ce paramètre a été décrit correctement.
- Comparaison croisée : on compare des descriptions de profils classés de la même manière ou des paramètres identiques. On sélectionne par exemple tous les gleys-sols bruns pour comparer la description de leur horizon -gg. On se fonde pour cela non seulement sur la description du profil, mais aussi sur la photographie.

Le CQ interne est en outre responsable de faire apporter les corrections requises à la description des profils en se fondant sur les retours du CQ externe, sur les conclusions de la journée de calibration et sur les résultats de laboratoire.

4.7.2 CQ externe

Le CQ externe a pour tâche de veiller à la cohérence – dans le temps et dans l'espace – des relevés de sols et de l'évaluation des caractéristiques pédologiques. À cet effet, il contrôle sur place la manière dont les cartographes décrivent les profils. Il met le doigt sur des lacunes ou sur des interprétations différentes des phénomènes. Ces remarques incitent le ou la cartographe seul-e ou en équipe, à examiner la description du profil et à l'adapter le cas échéant. Une visite sur place en compagnie du CQ externe peut s'avérer nécessaire pour éliminer les divergences.

4.7.3 Première journée de calibration : journée de calibration des profils

Une journée de calibration se passe sur le terrain. Elle sert à harmoniser la méthodologie de description des sols au sein d'un projet de projet cartographie, entre les cartographes et avec la classification des sols de Suisse (KLABS) (Amt für Umwelt des Kantons Solothurn, Fachstelle Bodenschutz 2017, pp. 39 et 42).

Il y a deux types de journée de calibration : la journée de calibration des profils, présentée ci-dessous, et la journée de calibration des unités cartographiques, qui est détaillée au chapitre 5.8.3.

Buts de la journée de calibration des profils

La journée de calibration des profils a les buts suivants :

- harmoniser l'évaluation pédologique des sols présents dans le périmètre à cartographier ;
- harmoniser la méthodologie de description des sols en se fondant sur une sélection de profils représentatifs ;
- fonder la phase de cartographie subséquente et permettre l'élaboration d'un produit final homogène ;
- favoriser les échanges personnels directs entre tous les participant-e-s au projet ;
- contribuer à la formation continue des personnes impliquées ;
- développer la classification des sols et la méthode de cartographie.

Justification de la journée de calibration des profils

La journée de calibration des profils est nécessaire parce, d'une part, tant la description des sols que leur évaluation laissent une certaine marge d'appréciation subjective aux cartographes. D'autre part,

des points nécessitant clarification, spécifiques au périmètre donné apparaissent souvent lors de la description des sols. Enfin, sans journée de calibration, des divergences systématiques pourraient se manifester entre les cartographes lors de la cartographie. En l'absence de calibration, ces différences ne peuvent être que difficilement identifiées et corrigées. La journée de calibration des profils contribue donc de manière importante à assurer la qualité du projet de cartographie.

Réalisation

D'entente avec la DPM et les cartographes, le CQ externe choisit les thèmes abordés et veille à ce que des décisions soient prises sur ceux faisant débat. Les discussions menées et des décisions prises sont consignées dans un procès-verbal. Outre les cartographes, la journée réunit aussi le CQ externe, la DPM et éventuellement d'autres personnes impliquées ou intéressées.

La journée de calibration des profils est organisée avant la phase de cartographie ou juste au début de celle-ci. Dans l'idéal, tous les résultats de laboratoire sont alors disponibles. La carte conceptuelle et une sélection de profils représentatifs y sont également présentées. La journée permet, d'une part, de transmettre les enseignements de la phase conceptuelle aux cartographes qui n'ont pas participé à l'élaboration du concept, d'autre part, de discuter des divergences par rapport à des périmètres voisins ou entre parties du périmètre (lots).

Le procès-verbal de la journée de calibration sert d'instructions aux cartographes. Il peut être nécessaire de corriger la description de certains profils en fonction des décisions prises lors de cette journée. L'adaptation du concept de cartographie et de la carte conceptuelle peut aussi être requise, mais cela représente beaucoup de travail. C'est à la DPM de décider en amont si le concept et la carte peuvent être modifiés et de le stipuler dans le manuel de projet.

5 Phase de cartographie

5.1 Étapes de travail de la phase de cartographie

Une fois la phase des profils achevée, c'est la phase de cartographie qui démarre (figure 9). Avant la phase de cartographie, certains préparatifs sont nécessaires. Il faut réunir les documents de référence issus de la phase conceptuelle et de la phase des profils pour les travaux de terrain et se procurer les outils et les produits consommables. Pendant la cartographie proprement dite, la délimitation des unités cartographiques constitue un processus itératif mêlant structuration du paysage, formulation d'hypothèses sur les sols présents et vérification au moyen de sondages. La structuration du paysage et les hypothèses sont adaptées en permanence en se fondant sur les renseignements tirés des sondages et sur l'observation des environs. Les CQ interne et externe surveillent ce processus et vérifient le produit obtenu dans sa forme et dans son contenu. Durant cette phase, une journée de calibration des unités cartographiques favorise l'harmonisation de la démarche. Là où c'est nécessaire, les limites sont harmonisées avec les lots voisins ou avec les cartes pédologiques plus anciennes.

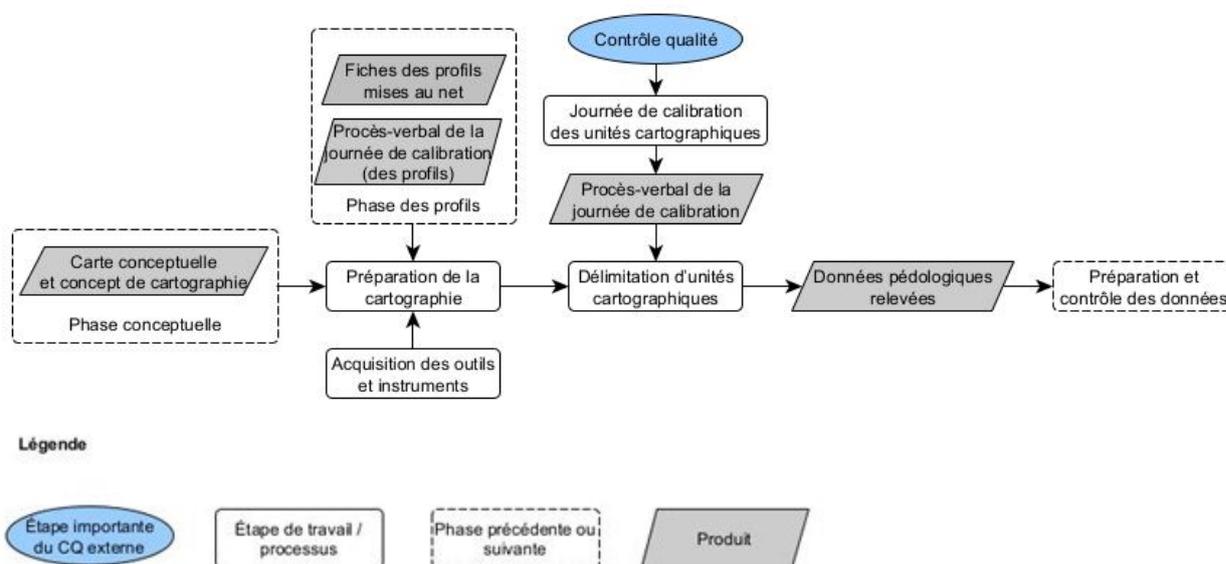


Figure 9 : Vue d'ensemble de la phase de cartographie.

5.2 Préparation de la cartographie

Il est crucial d'assurer un bon flux de l'information de la phase conceptuelle et la phase des profils vers la phase de cartographie, en particulier pour les cartographies de grande ampleur impliquant beaucoup de personnes. Dans cette optique, il faut remettre les documents de référence suivants aux cartographes, avec des explications si nécessaire :

- carte conceptuelle et concept de cartographie : contiennent les principales références pédologiques, les hypothèses, l'inventaire des sols, les influences anthropiques et tous les sondages de reconnaissance (chap. 3) ;
- informations sur les profils représentatifs (fiches de profils, y compris données d'analyse et photographies disponibles).

5.3 Matériel de cartographie

Durant les travaux de cartographie, on emportera toujours avec soi la carte conceptuelle avec l'indication des sondages de reconnaissance, ainsi que les informations concernant les profils représentatifs. Les autres données de référence devraient aussi être consultables sur le terrain dans la mesure du possible. Le recours à un logiciel SIG pour tablette ou smartphone est recommandé : il

permet d'afficher ou de masquer les informations selon les besoins individuels et de gérer aisément un grand nombre de jeux de données.

5.3.1 Matériel de terrain pour la cartographie

Pendant la phase de cartographie, les outils et instruments mentionnés dans le tableau 8 sont utilisés (Legros 1996, p. 68 ss, adapté).

Tableau 8 : Matériel de terrain utilisé durant la phase de cartographie. En **gras**, le matériel impératif.

Tâche	Instrument et explication
Sondage	Pour décrire le sol et délimiter des unités cartographiques : tarière Edelman, tarière gouge, tarière gouge de type Pürckhauer (le plus souvent en cas de forte pierrosité ou de sècheresse, y compris son maillet et levier d'extraction) Pour délimiter des unités cartographiques : mini-gouge Pour déterminer les formes d'humus : petite pelle ou bêche pliante et tamis (1 mm / 4 mm)
Détermination de la teneur en carbonates (effervescence)	Solution d'acide chlorhydrique à 10 % en flacon avec compte-gouttes
Détermination de la valeur de pH	Solution indicatrice telle que Hellige, avec coupelle et échelle colorimétrique de référence, chiffon ou papier de nettoyage <i>ou</i> Appareil de mesure de terrain avec accessoires
Mesure de la pente	Inclinomètre, pour mesurer sur place la pente caractéristique de l'unité cartographique. Avec les appareils mécaniques, on mesure sur toute la longueur de l'unité cartographique ; avec les appareils numériques, en des points représentatifs à une hauteur de tarière au-dessus du sol (pour éviter les irrégularités locales)
Saisie des données	Plan de terrain, formulaires de saisie / procès-verbaux de terrain, matériel de dessin (réglette cartographique*, crayon à papier, crayon ou stylo rouge résistant à l'eau, gomme) et support (sous-main à pince ou table de terrain), ou formulaire de saisie sur un appareil électronique.
Positionnement par satellite	GNSS avec ou sans cinématique temps réel (RTK) (un smartphone peut aussi servir de GNSS mobile).
Description du sondage	<ul style="list-style-type: none"> - Mètre - Couteau, spatule - Loupe - Bouteille pulvérisatrice - Nuancier munsell - Classification des sols suisses (KLABS), manuel de cartographie, classeur pour évaluer la structure des sols (Nievergelt et al. 2004), manuel du projet - Gouttière (graduée) pour déposer et observer les carottes - Petits récipients pour y placer des échantillons de sol
Solutions indicatrices ou appareils de mesure de terrain	<ul style="list-style-type: none"> - Solution de dipyridyle - Humidimètre

* Petite règle portant plusieurs échelles et permettant de lire directement les distances en mètres sur une carte imprimée, sans devoir les convertir.

5.3.2 Plan de terrain

Sur le terrain, les données surfaciques peuvent être saisies soit sur des plans imprimés (puis être numérisées ultérieurement), soit directement sous forme numérique. Les paragraphes qui suivent définissent certaines exigences en fonction de la variante retenue. L'Annexe 1 propose une comparaison de ces méthodes. La saisie sur des plans imprimés correspond au standard de cartographie établi.

Plan de terrain sur papier

Les plans de terrain sur papier devraient présenter au moins les propriétés suivantes :

- Échelle : dans l'idéal, l'échelle du plan de terrain est deux fois plus grande que celle de la carte des sols terminée (Dienststelle Umwelt und Energie (uwe) Kanton Luzern 2013, p. 66) ; elle ne doit en aucun cas être plus petite que celle-ci.
- Durabilité : impression en couleurs résistante aux intempéries sur du papier résistant. On y écrit aussi avec des instruments résistants à l'eau, au soleil, à la chaleur et au froid (crayon à papier).
- Taille minimale : pour garantir une bon vue d'ensemble, les plans de terrain devraient montrer des extraits suffisamment grands du périmètre. Si plusieurs plans sont nécessaires, on veillera à ce qu'ils se chevauchent assez : cela veut dire que chaque parcelle (ou sole culturale) doit figurer entièrement sur un feuillet de carte, avec sa desserte.
- Arrière-plan : pour les terrains ouverts, on utilise des orthophotographies comme arrière-plan. Là où la végétation recouvre entièrement le sol, les plans de la mensuration officielle ou les cartes de course d'orientation sont plus judicieux (p. ex. en forêt, dans les cultures permanentes, etc.).
- Informations complémentaires : pour des questions de lisibilité, seules les informations essentielles devraient figurer sur les plans imprimés. En fonction des problématiques, il peut s'agir du site des profils représentatifs, d'autres sites de profils plus anciens, des conduites souterraines, des captages d'eau, du cadastre des sites pollués, des associations végétales forestières, du réseau de desserte forestière fine, des limites de périmètre ou de parcelle, etc.
- Localisation : les plans de terrain doivent présenter des éléments permettant de localiser facilement des extraits scannés (p.ex. points d'ajustage, grille).
- Éléments essentiels d'une carte : flèche indiquant le nord, courbes de niveau, représentation de l'échelle avec texte, légende, titre, év. carte encartée (carte accessoire), date, auteurs.

Les notes concernant les sondages et les unités cartographiques sont prises soit directement sur le plan de terrain, soit dans des procès-verbaux de terrain séparés. Si on utilise des plans de terrain imprimés, la numérisation fait l'objet d'une étape ultérieure (chap. 6.5.1). Fréquemment, la DPM définit dans le manuel de projet si (et comment) les données et les notes sont saisies et numérisées, et sous quelle forme elles lui sont remises par la suite.

Plan de terrain numérique

Si des données surfaciques – autrement dit aussi bien les données vectorielles que le contenu des unités cartographiques – doivent être saisies sous forme numérique directement sur le terrain, l'appareil et le modèle de saisie devraient répondre aux exigences suivantes :

- On doit pouvoir faire la distinction entre les limites esquissées/hypothétiques et les limites définitives des unités cartographiques.
- Les limites des unités cartographiques doivent pouvoir être modifiées simplement et rapidement.
- La représentation des données de référence doit être optimisée pour l'échelle d'enregistrement.
- L'échelle de tous les jeux de données doit pouvoir être modifiée (l'extrait visible est limité par la taille de l'écran, il faut donc pouvoir zoomer).
- La saisie et la sauvegarde des données doivent être simples et fonctionner même sans réseau (en forêt, la couverture réseau est souvent lacunaire).
- La consommation d'énergie doit être faible.
- Toutes les informations pertinentes sont saisies dans le même modèle (tous les types de données vectorielles, toutes les notes, etc.).

Remarque : la localisation spatiale de sondages et d'unités pédologiques, le dessin d'unités cartographiques et la saisie d'informations sur un plan de terrain numérique sont des fonctionnalités en développement constant qui sont proposées par différentes plateformes (p. ex. QGIS, ArcGIS).

5.4 Sondages

5.4.1 Types de sondages

Le tableau 9 présente et définit les divers types de sondage.

Les sondages de reconnaissance ne peuvent être utilisés comme sondages standard qu'après avoir été vérifiés au cours de la phase de cartographie, car au moment de la reconnaissance on ne disposait pas encore des informations issues des profils. Tous les sondages peuvent être relevés aussi bien par couches que par horizons, mais le relevé par couches correspond au standard de cartographie établi (voir aussi la figure 14).

Tableau 9 : Comparaison de divers types de sondages.

	Sondage de reconnaissance	Sondage cartographique	Sondage standard
Définition	Sondage préalable effectué durant la phase conceptuelle	Sondage effectué durant la phase de cartographie pour relever le jeu de données surfaciques et délimiter les unités cartographiques	Sondage effectué durant la phase de cartographie en tant que produit cartographique autonome
Set de paramètres	Libre	Libre	Standardisé (par la DPM)
Géoréférencé	Oui	Libre	Oui
Connaissance du périmètre par là ou le cartographe	Faible	Bonne	Bonne
Contrôle qualité	CQ interne uniquement	CQ interne uniquement	CQ interne et externe

5.4.2 Localisation

La position des sondages sur le terrain peut être localisée à l'aide de différentes méthodes. Celles-ci sont plus ou moins exactes et indiquées en fonction de la nature du terrain. En principe, une précision de 3 à 5 mètres suffit. L'Annexe 1 propose une aide à la décision quant à l'aptitude et l'exactitude des méthodes de localisation.

Localisation à l'aide d'un instrument GNSS

La localisation à l'aide d'appareils disposant d'une fonction GNSS, exige de faire une pondération entre le coût, le travail requis et la précision obtenue. Les expériences faites avec des appareils GNSS simples, sans correction du signal par une station de référence (cinématique temps réel ou RTK), montrent que la localisation de points est parfois imprécise, par exemple en forêt ou en terrain très accidenté. Ces appareils sont toutefois bon marché et aisément. En comparaison, les appareils munis d'une antenne externe – et notamment ceux équipés du système RTK – permettent, certes, une localisation plus exacte, mais actuellement, ils coûtent plus cher, consomment plus d'énergie et leur emploi est plus chronophage.

Parallèlement à la localisation GNSS, les points relevés doivent être localisés directement sur des plans de terrain. Un contrôle visuel permet d'éliminer des erreurs.

Localisation par comptage de pas

La localisation par comptage de pas exige une calibration préalable (Blume et al. 2011, p. 65). Les points de sondage peuvent ensuite être localisés en comptant les pas à partir de certains points fixes qui peuvent être identifiés de manière univoque tant sur le terrain que sur le plan de terrain (p. ex. bâtiments, intersections de chemins ou éventuellement arbre). Les instruments suivants peuvent être utilisés :

- podomètre,
- réglette cartographique¹¹.

5.4.3 Profondeur de sondage

Plus un sondage est profond, plus il coûte cher et demande du travail : le forage et la description du sol durent plus longtemps et il faut le cas échéant se munir d'une rallonge de l'outil de sondage. Une profondeur de 1 m correspond au standard de cartographie établi et constitue une exigence minimale pour la cartographie.

Dans les exemples suivants, une profondeur de moins de 1 m est acceptable :

- sols fortement érodés,
- roche déjà présente à moins de 1 m,
- sols peu développés.

Une profondeur de sondage allant jusqu'à 2 m voire plus peut être nécessaire dans les cas suivants :

- sols organiques épais,
- sols dont certaines caractéristiques sont situées en profondeur (p. ex. limite du calcaire, horizons d'altération).

5.4.4 Sélection des sites des sondages par la formulation d'hypothèses

La cartographie des sols fournit des informations surfaciques, alors que les sondages eux-mêmes ne mettent en évidence qu'une fraction des surfaces concernées (Legros 1996, p. 129 ss). Il est donc crucial de choisir leur site avec soin et de manière ciblée, car la qualité des informations pédologiques et l'efficacité du travail en dépendent. La démarche cartographique adoptée est ici prépondérante (chap. 5.5.2, tableau 11). Sur le fond, comme durant la phase conceptuelle, on formule des hypothèses concernant les caractéristiques du sol et on les vérifie grâce à des sondages effectués en des points les plus représentatifs possibles. Dans ce contexte, « représentatif » se rapporte à l'hypothèse à vérifier, et non au contenu de l'unité cartographique. Les cartographes vérifient les hypothèses à l'aide de sondages et décident de la marche à suivre ultérieure en suivant les instructions du tableau 10.

Au fur et à mesure que l'on connaît mieux le périmètre – autrement dit, à partir du moment où on a identifié les relations entre les facteurs pédogénétiques et leur expression sur place – on peut également travailler par analogie (Brunner et al. 1997, § 7.3-6). Cela simplifie et accélère la formulation des hypothèses. Chaque sondage est comparé à l'inventaire des sols et au concept de cartographie.

On trouvera d'autres explications utiles dans Legros 1996 p. 131 ss; Ruef et Peyer 1996 chap. 3.3.4; Soil Science Division Staff et al. 2017, p. 237.

¹¹ Petite règle portant plusieurs échelles et permettant de lire directement les distances en mètres sur une carte imprimée, sans devoir les convertir.

Tableau 10 : Relations entre les informations du sondage, le concept de cartographie et l'inventaire des sols.

	<i>Le sondage correspond à l'inventaire des sols</i> <i>(cette forme de sol a déjà été observée en un autre lieu du périmètre).</i>	<i>Le sondage ne correspond pas à l'inventaire des sols</i> <i>(cette forme de sol est observée pour la première fois dans le périmètre).</i>
<i>Le sondage est plausible</i> <i>(Il est compatible avec le concept de cartographie dans le lieu concerné).</i>	Le concept de cartographie et l'inventaire des sols sont confirmés, le sondage est enregistré sans réserve.	Le concept de cartographie est confirmé, l'inventaire des sols est complété, le sondage est enregistré sans réserve.
<i>Le sondage n'est pas plausible</i> <i>(Il ne correspond pas au concept).</i>	Enregistrement du sondage sous réserve : à l'aide d'autres sondages, soit on l'intègre au concept de cartographie, soit on le considère comme une valeur extrême ; il peut être nécessaire d'adapter le concept.	Enregistrement du sondage sous réserve : à l'aide d'autres sondages, on recherche des erreurs/lacunes dans le concept de cartographie ou on considère le sondage comme une valeur extrême (exemple typique : anthroposol).

5.5 Délimitation d'unités cartographiques

5.5.1 Définition de l'unité cartographique

Durant la phase de cartographie, on délimite des unités cartographiques et on détermine leurs propriétés (Brunner et al. 1997, § 7.3-1). Une unité cartographique décrit un corps tridimensionnel. La variance des caractéristiques pédologiques doit être la plus faible possible au sein d'une unité et la plus élevée possible entre les unités. Une unité cartographique se distingue des unités voisines par au moins un paramètre (Soil Science Division Staff et al. 2017, p. 248). Les critères de distinction sont définis au chapitre 5.5.2. Comme les propriétés d'un sol changent généralement de manière progressive, les limites entre unités cartographiques sont tracées dans les zones de transition (Brunner et al. 1997, § 7.3-5). Un continuum se retrouve donc divisé en plusieurs entités qui ne se chevauchent pas (figure 10). Plus rarement, on peut observer une limite claire, par exemple lorsque le sol est anthropisé, que son utilisation change, que le terrain présente de nettes ruptures de pente ou que le matériau parental change brusquement (voir aussi Legros (1996, p. 131)).

Une unité cartographique est constituée d'une ou de plusieurs unités pédologiques (figure 11 et chap. 5.7).

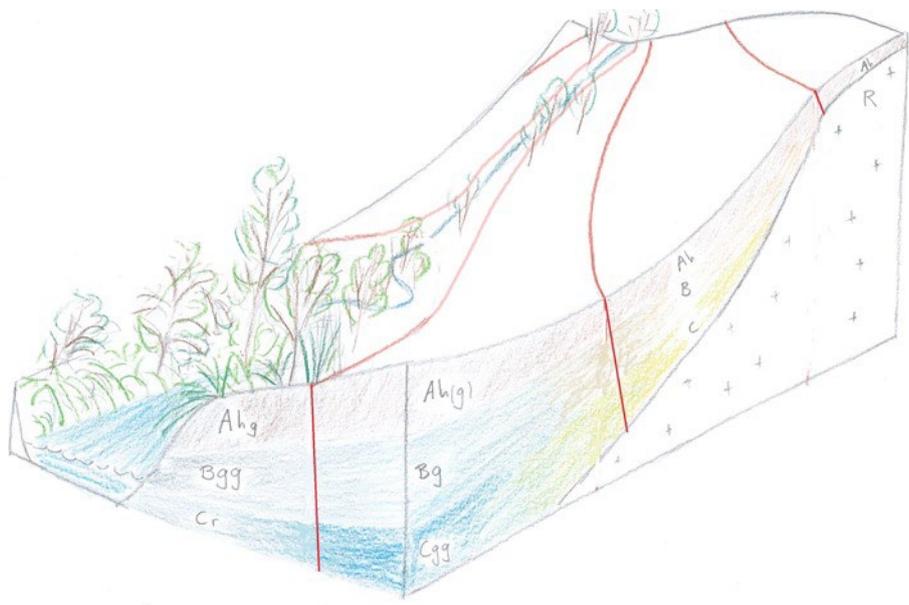


Figure 10 : Dans le terrain, les sols varient de manière continue : les catégories de types de sol changent le plus souvent progressivement. Lors de la cartographie, les limites des unités cartographiques sont tracées dans les zones de transition. Dans la figure, ces limites sont dessinées sous la forme de lignes rouges à la surface du sol et en profondeur.

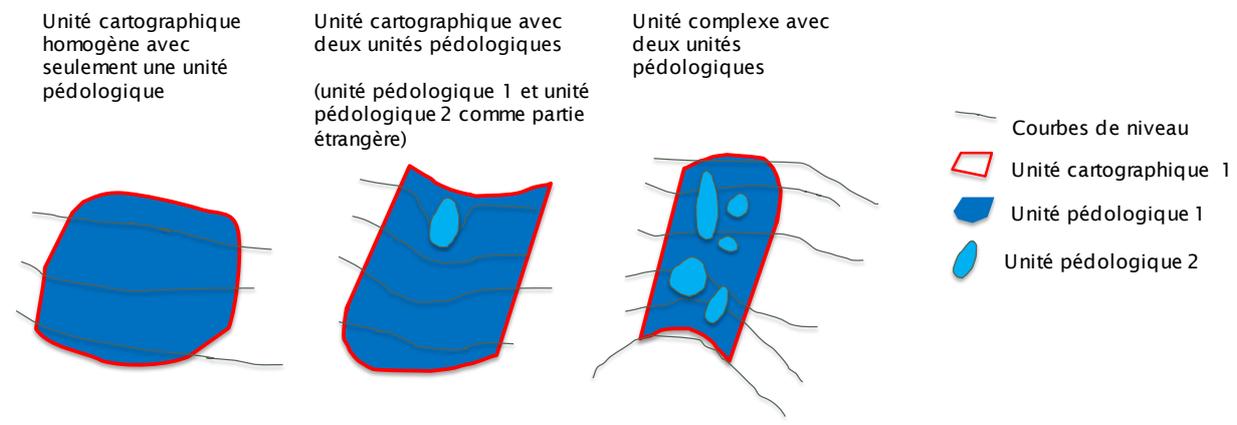


Figure 11 : Relation entre unité cartographique et unité(s) pédologique(s).

5.5.2 Procédure de délimitation des unités cartographiques

Fondamentalement, pour délimiter les unités cartographiques, on procède comme durant la phase conceptuelle (chap. 3.4) : on formule des hypothèses sur les propriétés du sol et on les vérifie à l'aide de sondages. On décide ensuite si une délimitation est judicieuse ou possible. La procédure est représentée à la figure 12.

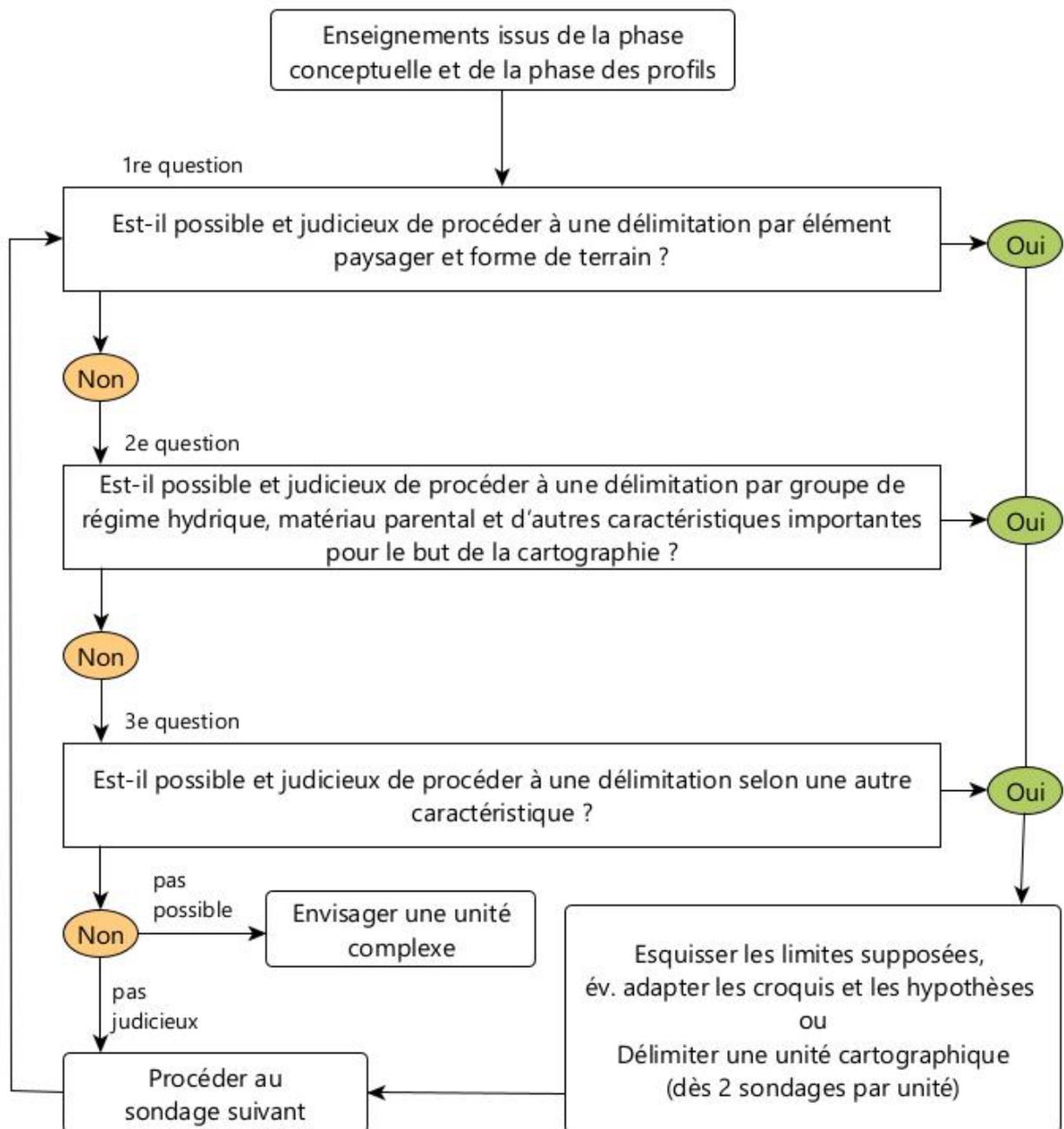


Figure 12 : Procédure de délimitation des unités cartographiques pour les sondages cartographiques et les sondages standards.

- Une délimitation est judicieuse lorsque les caractéristiques du sol observables dans la tarière varient d’au moins une unité de classification entre sondages/unités cartographiques et que les règles concernant les parties étrangères ont été prises en compte (chap. 5.7).
- Une délimitation est possible lorsque la taille minimale de l’unité cartographique prescrite par l’échelle est respectée.

Les renseignements issus de la phase conceptuelle et de la phase des profils sont esquissés sur le plan de terrain ou les unités conceptuelles sont digitalisées sous la forme d’une couche SIG. En partant des unités conceptuelles de la carte conceptuelle, on vérifie et on confirme ou rejette les hypothèses à l’aide de sondages. Si l’hypothèse est rejetée, une nouvelle hypothèse adaptée doit être formulée :

1. Les propriétés du sol changent avec l'élément paysager et la forme de terrain qui lui est associée (les différences de forme sont plus importantes que les différences de pente).
2. Les différences dans les propriétés du sol peuvent être attribuées à des changements du groupe de régime hydrique, du matériau parental ou d'autres caractéristiques importantes pour le but de la cartographie
3. Une autre propriété du sol diffère de manière déterminante.

Les sondages similaires sont regroupés et délimités sur tous les côtés par rapport à des groupes qui présentent des propriétés divergentes. C'est ainsi que sont constituées les unités cartographiques. Chaque fois que cela est possible, leurs limites sont définies directement sur le terrain, mais elles sont au moins documentées sous forme d'esquisse à la fin de chaque journée de terrain. Parfois une délimitation définitive n'est possible qu'après plusieurs journées de terrain et l'adaptation des hypothèses.

Si la délimitation :

- n'est pas possible, il faut examiner si l'on peut constituer une unité complexe (chap. 5.7.4) ;
- n'est pas judicieuse, on procède à de nouveaux sondages jusqu'à ce qu'une délimitation soit judicieuse ; ce cas se présente lorsque deux sondages ou plus sont classés exactement de la même manière et ne diffèrent pas plus que la variabilité naturelle (chap. 5.7.1).

La figure 13 montre un exemple de processus de délimitation en continu.

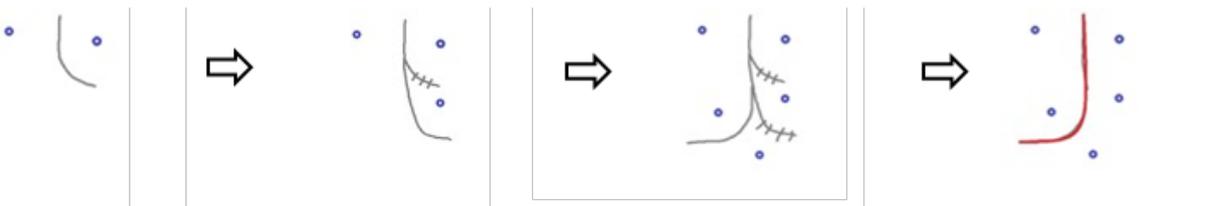
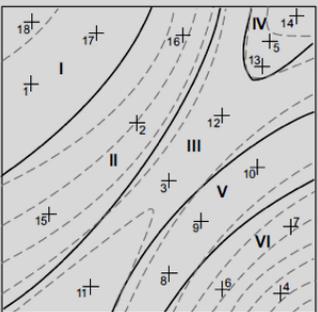
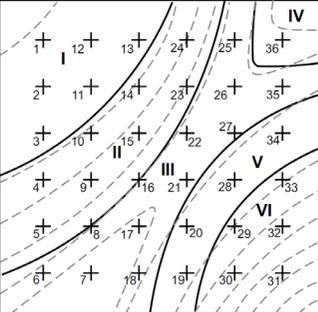
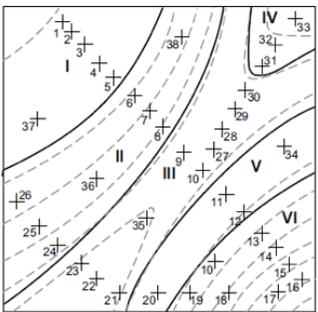
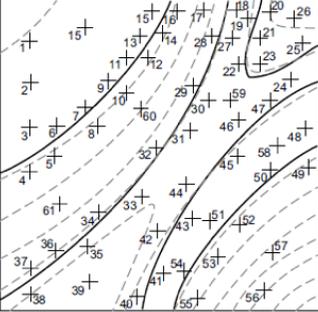


Figure 13 : Processus itératif de délimitation d'unités cartographiques. Le tracé supposé de la limite est esquissé sur le plan de terrain (en gris) puis confirmé en couleur (rouge) une fois que l'unité cartographique est terminée ; les sondages sont indiqués sous la forme de points bleus (d'après la Fig. 5.3 de Legros (1996, p. 134)).

Il existe quatre variantes de procédure pour déterminer le site des sondages sur le terrain : elles sont décrites dans le tableau 11. De manière standard, c'est la « cartographie ponctuelle assistée par télédétection » qui est utilisée. En fonction du terrain et des conditions du sol, elle est combinée à d'autres approches. L'Annexe 1 propose des explications complémentaires au sujet de certains critères de délimitation.

Tableau 11 : Méthodes de délimitation des unités cartographiques à l'aide de sondages sur le terrain (modifié d'après Blume et al. (2011, p. 69).

Méthode	Cartographie ponctuelle assistée par télédétection et analyse du relief Des photographies aériennes, des images satellites et surtout les formes du relief permettent d'esquisser des surfaces supposées pour ensuite les sonder de manière ciblée et vérifier leurs limites.	Cartographie à l'aide d'une grille de points Les sondages sont effectués sur une grille définie au préalable et les limites sont ensuite dessinées.	Cartographie par transects Les sondages sont placés le long de transects. Si des lois régissant la pédogenèse sont identifiées, des surfaces peuvent être esquissées puis sondées de manière ciblée.	Cartographie axée sur les limites Des sondages sont délibérément placés de part et d'autre de limites de sols, pour les mettre clairement en évidence.
Schéma				
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Moins de sondages nécessaires. - De très petites surfaces sont parfois aussi identifiables sur les photographies aériennes ou grâce aux formes du relief. 	<ul style="list-style-type: none"> - Très simple. - Adéquat pour les novices ou lorsqu'on ne dispose encore que de peu d'information sur les sols dans la partie du périmètre concerné. 	<ul style="list-style-type: none"> - Peu de sondages nécessaires. - Orientation facile. 	<ul style="list-style-type: none"> - Opportun dans les secteurs présentant des transitions abruptes entre formes de sols. - Permet de tracer des limites précises.
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Les photographies montrent plutôt des phénomènes superficiels. - Les différences de couleurs sur les photographies aériennes ne sont pas toujours liées au sol. - Selon sa couverture, le sol n'est pas toujours visible sur les photographies aériennes. - Applicabilité limitée en forêt. - Il est très difficile de délimiter automatiquement des formes de relief, le choix des bons paramètres n'est souvent possible que pendant ou après la cartographie. 	<ul style="list-style-type: none"> - Les limites doivent être interpolées. - Si l'on se tient trop strictement à la grille, risque d'effectuer des sondages au mauvais endroit. - Si l'on se tient trop strictement à la grille, on tend à omettre de petites unités. 	<ul style="list-style-type: none"> - Peu judicieux dans les secteurs mal connus. - Risque de manquer de petites inclusions entre les transects. 	<ul style="list-style-type: none"> - Laborieux, requiert plus de sondages que normalement (car à côté des limites, il faut aussi sonder l'intérieur des unités cartographiques). - Risque de manquer des inclusions à l'intérieur des unités cartographiques. - Difficile de s'orienter.
Application	En conditions normales toujours.	Lorsqu'il n'y a aucun point de référence superficiel visible, en terrain plat (alluvions, plateaux, p. ex.) ou pour les anthroposols. La grille doit être adaptée aux caractéristiques du terrain.	Lorsqu'on dispose déjà de bonnes connaissances du secteur et qu'on voit donc clairement dans quelle direction doit passer le transect. Souvent aussi utilisée au début des travaux pour obtenir une vue d'ensemble. Fréquemment utilisée en terrain pentu.	Lorsque les limites sont marquées par des points de référence clairs (végétation, ruptures de pente, changement de substrat, p. ex.).

5.5.3 Représentation des unités cartographiques

Les cartographes sont libres de représenter les unités cartographiques à leur goût, mais devraient respecter trois principes : la lisibilité, la mise en contexte et la réduction des ambiguïtés. L'Annexe 1 détaille ces principes.

5.5.4 Désignation de l'unité cartographique

L'unité cartographique se voit attribuer un code de sol. Il s'agit d'une désignation abrégée qui décrit l'unité pédologique et la forme de sol (voir glossaire). L'usage établi reprend les trois éléments « groupe de régime hydrique », « type de sol » et « forme de terrain » (dans cet ordre).

5.5.5 Constitution du jeu de données surfaciques

Pour constituer un jeu de données surfaciques, on agrège par paramètre les propriétés pédologiques déterminées grâce aux sondages (sondages cartographiques et sondages standard). La documentation qui s'y rapporte dépend de la variante choisie dans le tableau 13 pour la cartographie.

5.6 Enregistrement des informations pédologiques (structure des données et jeu de données)

5.6.1 Définitions

Remarque : les définitions suivantes sont basées sur la classification révisée des sols de Suisse (rKLABS) en cours d'élaboration. Elles pourront encore subir des modifications d'ici 2025.

Couche de sol

Terme générique désignant une partie du sol généralisé dans le plan horizontal, qui est décrit dans le cadre de la cartographie des sols. La variabilité des sols dans l'espace est forte dans les trois dimensions. Les informations variables sont réunies et généralisées dans une carte des sols. À la surface, cela se fait comme décrit plus haut à l'aide d'unités pédologiques (ou d'unités cartographiques). En profondeur, la succession verticale des propriétés du sol est généralisée à l'aide de couches de sol. La « couche supérieure du sol » correspond souvent aux horizons organominéraux. Les deuxièmes et troisièmes couches correspondent en général à la couche sous-jacente du sol et au sous-sol colonisable par les racines.

Couche supérieure du sol (OB, pour « Oberboden »)

Désigne la partie supérieure du sol, constituée d'un ou plusieurs horizons. Pour les sols classifiés, il s'agit concrètement, des horizons organiques ou organominéraux suivants, à partir de la cote zéro vers le bas : tous les horizons A.. dominants (Ai, Ah, Aho, Aa) ainsi que des horizons Of et Oh (exceptés s'ils sont enterrés).

Dans les sols qui présentent des horizons T en surface, on ne peut pas attribuer de symbole d'horizon exclusivement à cette couche. En règle générale, l'horizon ou les horizons T.. supérieurs sont désignés ainsi (dans les marais en croissance, il s'agit des horizons T.. avec néoformation de tourbe, dans les marais en dégradation (drainés) il s'agit d'horizons présentant une évolution pédogénétique très avancée, donc en général des horizons Ts,d).

Couche sous-jacente du sol (UB, pour « Unterboden »)

Couche de sol située sous la couche supérieure du sol ; il y peut y en avoir plusieurs, en général 2. Pour les sols classifiés, il s'agit concrètement des zones du sol situées entre la couche supérieure et le sous-sol, qui présentent des caractéristiques pédogénétiques et, en général, une colonisation racinaire. D'un point de vue pédogénétique, dans les sols minéraux, la couche sous-jacente du sol comprend les horizons dominants B.., E.., I.., K.., Go, S.. et Z...

Remarque : les horizons Cv (pédogenèse initiale) et les horizons Gr (saturés d'eau en permanence et réduits) ne sont pas compris dans la couche sous-jacente. Dans les sols avec des horizons T.., il n'est pas possible d'attribuer un symbole d'horizon univoque à la couche sous-jacente. En règle générale, on y inclut les horizons T.. dont les structures pédogénétiques sont primaires à avancées et qui sont tout au plus saturés par intermittence (T..,w). La plupart du temps, ces horizons présentent une structure fissurée ou (sub)polyédrique (horizons Ts,a ou T..,t).

Sous-sol (UG, pour « Untergrund »)

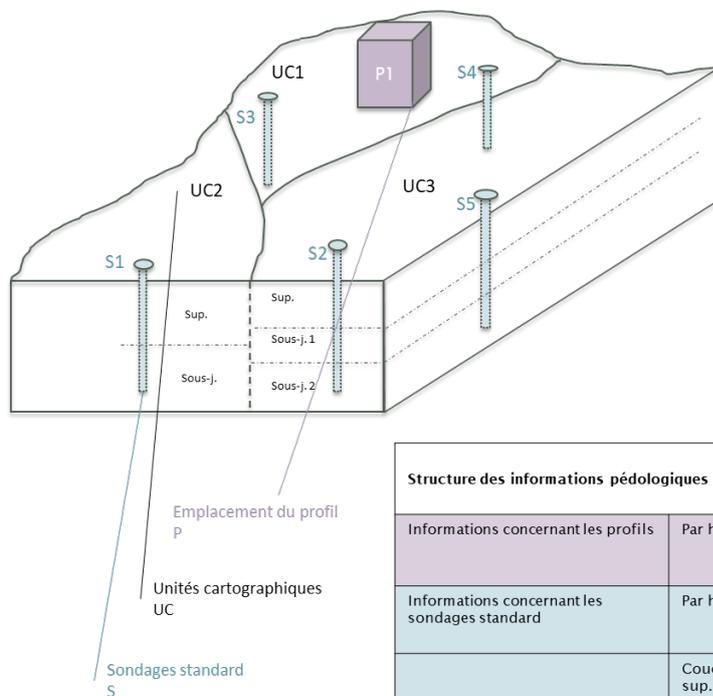
Couche n'appartenant pas au sol, située sous de la couche sous-jacente et qui n'a pas encore été affectée par les processus pédogénétiques et ne présente pas de structures pédogénétiques.

Pour les sols classifiés, il s'agit concrètement, dans le cas normal, de roches géologiques meubles ou dures. D'un point de vue pédogénétique, on y inclut aussi les horizons CY, Dn et Gr.

Dans les sols avec des horizons T., on n'attribue jamais au sous-sol les horizons qui présentent des structures pédogénétiques (donc pas d'horizon T., d, T.,a ou T.,t). En général les horizons T du sous-sol sont saturés sur de longues périodes ou en permanence (T.,r).

5.6.2 Structure des données ponctuelles et surfaciques

Les informations concernant les profils sont saisies par horizon. Les sondages standard sont saisis par couche ou par horizon (tableau 13). Les informations enregistrées pour les unités cartographiques portent sur deux ou trois couches : la couche supérieure du sol et une ou deux couches sous-jacentes. La DPM définit dans le manuel de projet s'il faut saisir une ou deux couches sous-jacentes. La figure 14 fournit un aperçu schématisé de cette approche. Les sondages standard saisis par couche correspondent au standard de cartographie établi. L'Annexe 1 fournit des explications supplémentaires concernant le choix de la structure des données.



Structure des informations pédologiques			
Informations concernant les profils	Par horizon		« Données ponctuelles » « Jeu de données ponctuelles »
Informations concernant les sondages standard	Par horizon	Ne correspond pas au standard de cartographie établi	
	Couches sup. / sous-j. ou sup. / sous-j. 1 / sous-j. 2	Standard de cartographie établi	
Informations concernant les unités cartographiques	Couches sup. / sous-j. ou sup. / sous-j. 1 / sous-j. 2		« Données surfaciques » « Jeu de données surfaciques »
Données vectorielles des unités cartographiques			

Figure 14 : Structure des informations pédologiques.

5.6.3 Jeu de données des sondages standard et des unités cartographiques

Remarque : les explications qui suivent se rapportent pour la plupart à des paramètres de relevé selon FAL24+. Leur révision est en cours et les paramètres révisés seront décrits et expliqués de manière exhaustive dans le guide pour la description des sols (partie I de l'ouvrage complet « Description, classification et cartographie des sols de Suisse »). Le tableau 12 a valeur de solution transitoire, jusqu'à ce que la partie I de l'ouvrage complet soit plus avancée, puis il sera remplacé. En outre, la partie I expliquera plus en détail quels paramètres doivent être relevés sous quelle forme pour les relevés ponctuels et les unités cartographiques.

Les paramètres à relever doivent être définis par la DPM durant la phase préparatoire (voir Annexe 2). On relèvera au moins les paramètres mentionnés comme obligatoires dans le tableau 12, et cela aussi bien pour les sondages standard que pour les unités pédologiques.

L'Annexe 1 contient des indications concernant le jeu de données à utiliser lors du relevé de SDA selon le plan sectoriel de la Confédération.

Tableau 12 : Jeu de données pour sondages standard et unités pédologiques. Les indications concernant la saisie par horizon se réfèrent exclusivement aux sondages (les données surfaciques ne sont pas relevées par horizon). Police normale : paramètres obligatoires. *Italiques* : paramètres facultatifs (pouvant être inclus dans des jeux de données de certains projets spécifiques).

Groupe	Type de saisie	Paramètres
Propriétés du sol	Général	<ul style="list-style-type: none"> - Teneurs (%) en argile et en limon, classe texturale - Limite des carbonates (cm) - Classe d'effervescence (HCl) - Classe de pierrosité - pH (Hellige) - Teneur en humus (%) (au moins couche supérieure du sol) - Structure et taille de la structure - Forme d'humus - <i>Type et degré de décomposition des couches de tourbe</i>
	Par couche	<ul style="list-style-type: none"> - Épaisseur de la couche - <i>Épaisseur de la couche prise en compte pour le calcul de la profondeur utile (avant la déduction de la correction)</i> - Désignation des couches (p. ex. OB, UB1, UB2) - <i>Désignation de l'horizon déterminant</i>
	Par horizon (sondages uniquement)	<ul style="list-style-type: none"> - Épaisseur de l'horizon - Désignation de l'horizon (p. ex. Ahp, Bcn, Bg)
Classification	Général	<ul style="list-style-type: none"> - Sous-types - Type de sol - Groupe de régime hydrique - Profondeur utile
Informations supplémentaires/site	Général	<ul style="list-style-type: none"> - ID/numéro d'objet - Coordonnées - Forme de terrain - Pente pour les formes de terrain autour de 18 % ; - Numérotation des complexes - Part de surface que représente le complexe - <i>Information sur la représentativité de la surface</i> - Cartographié par (personne ou entreprise) - Remarques - Spécifications du projet (p. ex. numéro de lot, commune, etc.) - <i>Hétérogénéité de l'unité pédologique</i> - <i>Peuplement forestier</i> - <i>Association végétale forestière</i> - <i>Végétation/culture</i>
Interprétations/données dérivées	Général	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Aptitude à la valorisation (au sens de l'OLED)</i> - <i>Pointage du sol/valeur du profil</i> - <i>Classe d'aptitude (CA)</i> - <i>Limitation de la classe d'aptitude</i> - <i>Aptitude comme SDA</i> <ul style="list-style-type: none"> - <i>Capacité de production (classe/pointage)</i>

5.6.4 Produits de la cartographie : variantes

Les produits de la cartographie (tableau 13) peuvent être configurés selon plusieurs variantes. Lors du choix de la variante il faut tenir compte des remarques et principes suivants :

- Les jeux de données surfaciques sont relevés de manière standard en deux couches.
- La saisie de jeux de données de sondages standard n'est pas indispensable pour constituer un jeu de données surfaciques. Toutefois, la saisie supplémentaire de sondages standard – en particulier s'il sont enregistrés par horizon – permettra ultérieurement d'autres analyses des données pédologiques et accroît donc explicitement leur valeur. Cette procédure ne correspond pas au standard de cartographie établi, mais en raison du gain d'information qu'elle apporte, il est recommandé d'enregistrer un sondage standard par horizon pour chaque hectare cartographié.
- Pour les analyses et interprétations de données, on n'utilisera de manière générale que des jeux de données (points et surfaces) ayant subi les procédures de CQ interne et externe.
- Seuls les jeux de données de sondages standard représentatifs des surfaces (et désignés comme tels) peuvent être utilisés pour procéder à la délimitation d'unités cartographiques. Or ce n'est que rarement le cas des sondages standard. Si des sondages standard sont utilisés pour d'autres analyses que la délimitation des unités cartographiques, il convient de tenir compte des incertitudes que présentent les résultats d'un unique sondage de petit diamètre.

Tableau 13 : Variantes de produits de la cartographie : jeux de données surfaciques et jeux de données de sondages standard.

Variante	Produits avec CQ	Avantages	Inconvénients	Remarques
1	<p>Jeu de données surfaciques, le cas échéant avec désignation de sondages standard représentatifs des surfaces, 2 ou 3 couches ; le jeu de données surfaciques a autant de couches que les sondages standards :</p> <ul style="list-style-type: none"> - jeu de données vectorielles des unités cartographiques ; - table attributaire identique pour les unités pédologiques et les sondages standard. 	<ul style="list-style-type: none"> - Gestion simple des données (une seule table de données pour le CQ). - Standard de cartographie établi. - Travail de cartographie réduit. 	<ul style="list-style-type: none"> - La constitution du jeu de données surfaciques n'est pas évidente (sauf pour les sondages représentatifs de surfaces). - Pas d'informations documentées numériquement sur les sondages de la zone. 	<p>Méthode standard FAL 24. Exemples : cartographies des sols des cantons de Soleure et de Lucerne depuis les années 2000. Les notes des sondages de cartographie, si elles existent, sont remises à la DPM à sa demande.</p>
2	<p>Jeu de données surfaciques avec un nombre défini de sondages standard, 2 ou 3 couches ; le jeu de données surfaciques a autant de couches que les sondages standard :</p> <ul style="list-style-type: none"> - jeu de données vectorielles des unités cartographiques ; - Informations identiques pour les unités pédologiques et les sondages standards. 	<ul style="list-style-type: none"> - Le jeu de données des sondages peut être réutilisé de manière indépendante et servir à des applications et développements futurs. - Gestion simple des données (une seule table de données pour le CQ). - Le jeu de données des sondages est utilisable pendant la cartographie pour constituer le jeu de données surfaciques. - Prélèvement d'échantillons possible. 	<ul style="list-style-type: none"> - Presque pas d'indications quant à la constitution du jeu de données surfaciques. - Les sondages représentatifs des surfaces ne sont pas identifiables automatiquement. 	<p>Exemple : cartographie des sols forestiers acides à Zurich dans les années 2010. Les notes des sondages de cartographie, si elles existent, sont remises à la DPM à sa demande.</p>
3	<p>Jeu de données surfaciques avec 2 ou 3 couches ; nombre défini de sondages standard saisis par horizon ou avec plus de couches que le jeu de données surfaciques (les données surfaciques ont moins de couches que les sondages standard) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - jeu de données vectorielles des unités cartographiques ; - Informations séparées pour les unités pédologiques et les sondages standard 	<ul style="list-style-type: none"> - Le jeu de données des sondages peut être réutilisé de manière indépendante et servir à des applications et développements futurs (plus le nombre de sondages standard est élevé, plus cette utilité est grande). - Prélèvement d'échantillons possible. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas encore établi comme standard de cartographie. - Presque pas d'indications pour constituer le jeu de données surfaciques. - Les sondages représentatifs des surfaces ne sont pas identifiables automatiquement. - Travail à double pour les contrôles de qualité interne et externe (deux tables de données séparées). 	<p>Exemple : cartographie des SDA à Lucerne dès 2023. Les notes des sondages de cartographie, si elles existent, sont remises à la DPM à sa demande.</p>

5.7 Variabilité spatiale dans les unités cartographiques

Durant les travaux de cartographie et lors de l'évaluation des diverses formes de sol dans l'espace, les cartographes se trouvent dans un champ d'incertitude : il leur incombe de décider si une différence dans les formes de sol doit se traduire par la délimitation d'une unité cartographique (chap. 5.5), s'il faut tolérer une unité cartographique avec une partie étrangère (chap. 5.7.2) ou si une unité complexe doit être dessinée (chap. 5.7.3). Leur décision est influencée par les renseignements à leur disposition au sujet de la pédogenèse dans la surface à cartographier, ainsi que par l'interprétation des informations pédologiques obtenues en lien avec le but de la cartographie (figure 15).

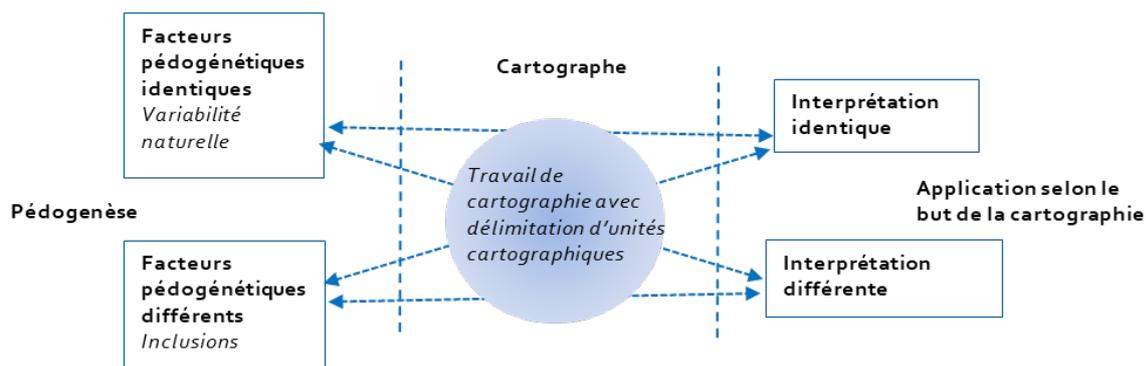


Figure 15 : Champ d'incertitude décisionnel la délimitation d'unités cartographiques.

5.7.1 Formes de sol différentes dans une unité cartographique

Des différences de formes de sol peuvent survenir en raison de l'influence de facteurs pédogénétiques différents (**inclusions**), mais elles apparaissent aussi lorsque ces facteurs sont homogènes : dans ce cas, on a affaire à la **variabilité naturelle** (voir remarques à l'Annexe 1).

5.7.2 Partie étrangère

Une partie étrangère correspond à une unité pédologique au sein d'une unité cartographique dont la forme de sol a une classification différente de celle de la forme dominante (Brunner et al. 1997, § 7.3-6). Il s'agit d'une unité qui ne peut être inscrite sur la carte à l'échelle visée. Une partie étrangère peuvent avoir deux origines :

- inclusion due à des facteurs pédogénétiques différents ;
- variabilité naturelle.

5.7.3 Unité complexe

Une unité complexe constitue un cas spécial d'unité cartographique. Elle se compose d'au moins deux unités pédologiques qui diffèrent quant à leur classification et sont décrites chacune avec leur propre jeu d'attributs. Ces unités sont triées en fonction de leur importance et la part de surface qu'elles occupent est documentée. En principe, on ne forme une unité complexe que lorsqu'il est impossible, à l'échelle visée, de délimiter des parties étrangères dans une unité cartographique propre (figure 13).

Comme les unités complexes sont difficiles à interpréter et à analyser, elles ne doivent être utilisées qu'avec retenue. Certaines stratégies décrites à l'Annexe 1 permettent de les éviter. Mais il n'est pas toujours possible de s'en passer.

5.7.4 Traitement des parties étrangères et des unités complexes

Pour déterminer s'il faut délimiter une unité cartographique, une unité complexe ou une unité cartographique avec partie étrangère, on tiendra compte des facteurs et des règles qui suivent.

Facteurs :

- Divergences faibles ou marquées des propriétés pédologiques par rapport à l'unité pédologique dominante. Plus la divergence est grande, moins on pourra tolérer de partie étrangère dans une

unité cartographique (FAL 24, 1997, 7.3-6). Ce facteur laisse aux cartographes la marge d'appréciation nécessaire.

- Lien entre la divergence et les limites de paramètres. Les écarts au sein d'une classe ont moins de poids que ceux qui enjambent des limites entre classes.
- Interprétation de la partie étrangère par rapport à l'unité dominante. C'est ici le but de la cartographie qui est déterminant. Une petite différence dans la profondeur utile entre deux unités pédologiques peut par exemple avoir pour conséquence qu'une est attribuée aux surfaces d'assolement et l'autre pas. L'interprétation de ces deux unités varie ainsi fortement et influence la décision en conséquence.

Règles :

1. Une partie étrangère dont les propriétés s'écartent fortement ou dont l'interprétation diverge par rapport à l'unité pédologique dominante ne doit pas représenter plus de 10 % de la surface de l'unité cartographique.
2. Si l'interprétation de diverses unités pédologiques varie peu et que l'écart est faible, on tolère des parties étrangères constituant jusqu'à 20 % de la surface de l'unité cartographique.
3. Si les proportions de surface ci-dessus sont dépassées, il convient d'examiner la constitution d'une unité complexe :
 - a) si l'on peut appliquer une stratégie permettant de l'éviter conformément à l'Annexe 1, on n'en constitue pas;
 - b) à défaut de stratégie n'est opportune, il faut constituer une unité complexe.

Dans le champ destiné aux remarques, on décrit si possible le type et l'extension spatiale de la variabilité naturelle et de la partie étrangère à l'intérieur de l'unité cartographique. La répartition est estimée à l'aide de sondages et en s'appuyant sur les signes distinctifs présents en surface. Cette estimation est d'autant meilleure que :

- le nombre de sondages disponibles est élevé ;
- les signes distinctifs présents en surface sont clairs (ce qui peut être le cas notamment lorsque des interventions humaines ont eu lieu).

Pour saisir plus systématiquement les parties étrangères, on pourrait exiger un paramètre surfacique correspondant qui renseignerait sur l'hétérogénéité de l'unité cartographique. On ne dispose toutefois pas encore d'expérience pratique en la matière.

5.8 Remarques concernant le contrôle qualité

5.8.1 CQ interne

La personne responsable du CQ interne doit garantir que pendant la phase de cartographie, tous les cartographes respectent les exigences méthodologiques et pédologiques définies dans l'appel d'offres, dans le manuel de projet, dans la classification KLABS et dans le présent manuel. Elle doit aussi veiller à ce que la cartographie soit réalisée de manière uniforme. Ses tâches recouvrent notamment les points suivants :

- Avant le début de la cartographie, elle s'assure que tous les cartographes disposent des mêmes informations.
- Elle instruit les cartographes et clarifie avec eux les questions liées à la classification et à la technique de cartographie, si nécessaire sur place.
- Elle contacte le CQ externe lorsque des problèmes à résoudre concernent plusieurs lots.
- Elle est l'interlocutrice de premier recours des cartographes.
- Elle est responsable du contrôle des données.
- Elle est responsable du contrôle de la formation et de l'accompagnement des cartographes, et notamment des cartographes novices qui ne sont pas encore autonomes :
 - pour les 20 premiers hectares au moins : accompagnement permanent (soit les novices accompagnent une personne expérimentée, soit ils sont accompagnés étroitement par celle-ci dans leurs travaux de cartographie) ;
 - jusqu'à environ 100 hectares : accompagnement régulier, vérification d'une sélection d'unités cartographiques ;

- par la suite : accompagnement au démarrage de la cartographie, réponses aux questions et contrôle par sondages d'une sélection d'unités cartographiques.

5.8.2 CQ externe

Le CQ externe accompagne sur le terrain chaque cartographe (indépendant ou non) pendant quelques heures de travaux de cartographie. La personne responsable de ce contrôle évalue si les cartographes :

- possèdent bien les compétences pédologiques et les connaissances locales spécifiques requises par la DPM et par le projet ;
- utilisent une technique de travail est adaptée au périmètre et au projet, et font un usage approprié des références et travaux préalables spécifiques au périmètre (fiches des profils, carte conceptuelle) ;
- appliquent correctement la méthodologie (classification KLABS, présent manuel de cartographie, manuel de projet, autres exigences méthodologiques) ;
- mettent en œuvre adéquatement les décisions prises lors de la journée de calibration ;
- se consultent pour harmoniser les diverses limites.

Le CQ externe est responsable de l'organisation et de la sélection des thèmes principaux de discussion pour les journées de calibration (calibration des profils et des unités cartographiques).

En outre, les cartographes peuvent profiter de l'accompagnement du CQ externe pour résoudre certains problèmes spécifiques apparus durant la phase de cartographie. Il est donc judicieux que cet accompagnement ait lieu au milieu de la phase de cartographie.

L'Annexe 1 fournit encore d'autres indications concernant le CQ, en lien avec diverses variantes de produit (tableau 13).

5.8.3 Seconde journée de calibration : journée de calibration des unités cartographiques

Comme déjà expliqué plus haut, il y a deux types de journées de calibration : la journée de calibration des profils (chap. 4.7.3) et la journée de calibration des unités cartographiques, qui est présentée ci-après.

Buts de la journée de calibration des unités cartographiques

Les buts de la journée de calibration des unités cartographiques sont les suivants :

- harmonisation de l'approche méthodologique pour les travaux de cartographie ;
- clarification de questions liées au secteur étudié et à la technique de cartographie ;
- classification de nouvelles formes de sol et de spécialités du périmètre ;
- échange personnel direct entre toutes les personnes impliquées dans le projet ;
- formation continue de ces personnes ;
- développement de la méthodologie de cartographie.

Justification de la journée de calibration des unités cartographiques

La journée de calibration des unités cartographiques renforce l'efficacité de la journée de calibration des profils (chap. 4.7.3) et aide les cartographes à limiter la marge d'appréciation subjective nécessaire et à identifier les divergences systématiques. Elle est particulièrement utile dans les régions et espaces naturels suisses encore peu cartographiés jusqu'ici. Bien souvent, il faut attendre que la cartographie ait commencé pour voir apparaître des problématiques locales et des questions techniques spécifiques. C'est pourquoi cette journée est-elle tout aussi importante pour la cartographie proprement dite que ne l'est la journée de calibration des profils pour la préparation et le fondement de cette cartographie. Sa contribution au CQ du projet est cruciale.

Réalisation

D'entente avec la DPM et les cartographes, le CQ externe définit les thèmes à aborder durant la journée de calibration des unités cartographiques et veille à ce qu'on parvienne à des décisions sur ces thèmes. Les discussions et les décisions prises font l'objet d'un procès-verbal. Outre les

cartographes, le CQ externe, la DPM et éventuellement d'autres personnes impliquées ou intéressées prennent part à cette journée. Celle-ci est agendée quand environ un tiers des travaux de cartographie ont été effectués. Ainsi, de premières expériences auront déjà été récoltées, et les décisions prises pourront être appliquées directement sur la plus grande partie non cartographiée, les correctifs a posteriori n'affectant qu'une petite surface. Les procès-verbaux de la journée de calibration sont considérés comme des instructions destinées aux cartographes, qui appliquent les décisions dans leur sous-secteur et, si nécessaire, corrigent les unités déjà cartographiées.

Exemples de sujets pour la journée de calibration des unités cartographiques :

- délimitation de formes de terrain (p. ex. : les hauts-plateaux doivent-ils être cartographiés comme des plaines ou comme des bosses ?) ;
- description du type d'engorgement (p. ex. : une unité cartographique sur une pente doit-elle être classée comme « mouillée par nappe perchée » ou « mouillée par nappe permanente » ?) ;
- traitement des particularités locales (p. ex. sols très pierreux et leur forabilité, ou variabilité à petite distance) ;
- taille des unités cartographiques (p. ex. : en terrain ondulé, faut-il distinguer les plus petits reliefs ou les réunir en unités de plus grande taille ?) ;
- test de nouveaux instruments de cartographie ;
- utilisation de sous-types, en particulier de ceux qui ne sont pas détectables directement dans le profil, mais dans le milieu environnant (p. ex. « drainé ») ;
- particularités qui n'étaient pas encore connues au moment de la journée de calibration des profils ou dont on ne pouvait pas encore définir le traitement (p. ex. : si un certain substrat peut être cartographié ou non à l'aide d'une tarière) ;
- discussions concernant l'harmonisation des limites.

6 Traitement et contrôle des données

6.1 Étapes de travail du traitement et du contrôle des données

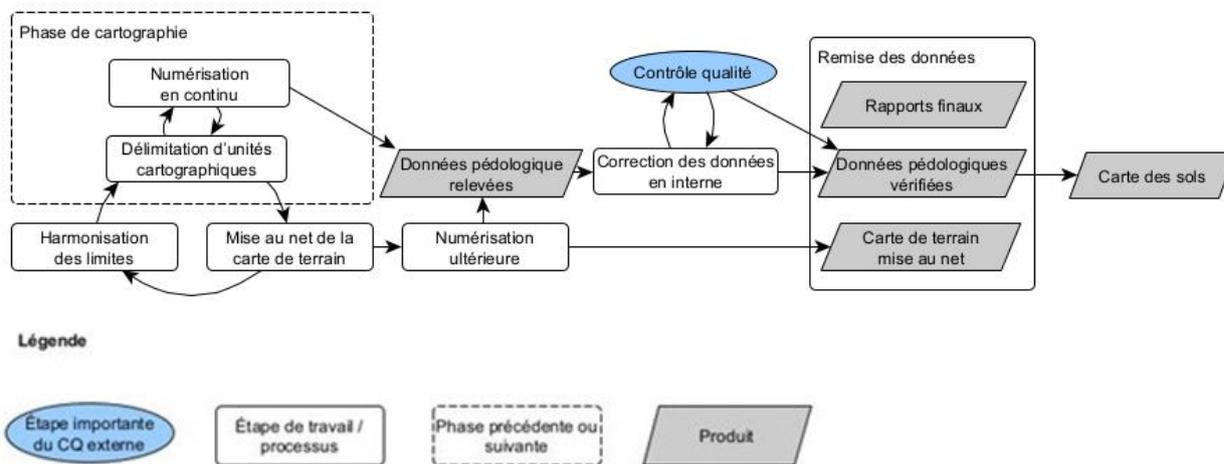


Figure 16 : Déroulement du traitement et du contrôle des données.

6.2 Mise au net de la carte de terrain

Les cartographes doivent contrôler et mettre au net à brève échéance les données saisies sur le terrain. Cela consiste à vérifier que les données ponctuelles et surfaciques relevées sont complètes plausibles et compatibles avec le concept de cartographie. Si des lacunes ou des incohérences sont identifiées, elles sont traitées lors des journées de terrain suivantes. Les limites des unités cartographiques dont le tracé est définitif sont signalées comme telles.

6.3 Harmonisation et mise au net des limites

À la fin de la phase de cartographie, au plus tard, il faut aussi procéder à une harmonisation définitive avec les cartographes d'autres secteurs/périmètres ou avec les cartes pédologiques existantes (modifié à partir de Fachstelle Bodenschutz Kanton Solothurn 2017, p. 49).

6.3.1 Harmonisation pendant la cartographie

Si un grand nombre de questions ou d'incohérences persistent, certains secteurs limitrophes sont cartographiés en commun. Si tel n'est pas le cas, les données relevées sont échangées et harmonisées, le cas échéant en procédant à des contrôles ponctuels sur le terrain. Si des données pédologiques sont déjà disponibles, leurs limites sont normalement reprises et leur contenu est vérifié avec des sondages de contrôle dans les secteurs avoisinants. L'adaptation *a posteriori* de données pédologiques existantes doit être discutée suffisamment tôt avec la DPM.

6.3.2 Harmonisation après la cartographie

Si les cartographies n'ont pas lieu en même temps et que l'harmonisation n'a donc pas pu être effectuée pendant la cartographie, elle doit avoir lieu après coup. Pour cela, on échange les données pédologiques et on les harmonise. Si des conflits ou incohérences ne peuvent être éliminés, on consulte le CQ externe.

6.4 Contrôle et mise au net des données des profils

C'est le CQ interne qui est responsable de veiller à ce que la documentation des profils soit complète cohérente et exacte. Le contrôle des données de la description des profils se fait principalement durant la phase des profils (chap. 4.7), sur les fiches des profils ou sur les données entrées. À l'issue de la phase de cartographie, les données des profils sont soumises à un contrôle final, qui intègre en

particulier les derniers enseignements obtenus lors de la cartographie. Sont mises au net toutes les documentations de profils qui constituent des produits selon l'appel d'offres. Contenu de la mise au net et du contrôle :

- contrôle d'exhaustivité : toutes les indications exigées sont fournies (y c. report des résultats de laboratoire et la mise à jour des schémas) ;
- harmonisation avec la carte des sols : comparaison de la description des profils avec l'unité pédologique du profil représentatif ; les divergences doivent être motivées auprès du CQ externe ;
- contrôle d'exactitude : la classification et tous les paramètres dérivés concordent avec les propriétés pédologiques saisies ;
- vérification que les décisions prises lors de la journée de calibration ont été intégrées dans la description des profils.

6.5 Numérisation des données ponctuelles et surfaciques

6.5.1 Numérisation des plans de terrain

Les plans de terrain élaborés sur papier doivent être géoréférencés et numérisés. La DPM décide si elle s'occupe elle-même de cette numérisation ou si elle en charge les organismes de cartographie mandatés (p. ex. Fachstelle Bodenschutz Kanton Solothurn 2018). Lorsque les unités cartographiques sont saisies sous forme numérique sur le terrain, cette étape n'est pas nécessaire. Pour obtenir des produits uniformes sur le plan géométrique, la DPM a avantage à régler dans le détail les exigences qui s'y rapportent (indépendamment du lieu et du moment de la numérisation). Les principes suivants s'appliquent :

- lors de la numérisation, l'échelle de visualisation doit être au moins trois fois plus grande que l'échelle visée pour la carte des sols (pour des cartes à l'échelle 1:5000, l'échelle de visualisation sélectionnée doit donc être de 1:1500 ou plus grande) ;
- les sommets des polygones doivent être placés de manière à ce que les formes rondes paraissent aussi arrondies dans le produit final et que les droites ne soient pas courbées inutilement. Une règle approximative indique que la distance entre deux sommets de polygone doit être d'au moins 3 mètres ;
- la topologie des données vectorielles doit être contrôlée (elle doit être valide), en particulier il faut pour vérifier s'il y a des chevauchements, des surfaces saisies à double ou regroupées (*multipart features*) ou si des sommets de polygone manquent (Amt für Landschaft und Natur, Fachstelle Bodenschutz, Kanton Zürich 2018, p. 20) ;
- les angles aigus doivent être évités dans la mesure du possible (voir aussi à l'Annexe 1, le chap. 4.5 sur la représentation des unités cartographiques et la réduction des ambiguïtés).

6.5.2 Entrée dans une base de données

Dès que les cartographes ont terminé les relevés de terrain, voire avant, la DPM saisit les informations sur les données des profils (chap. 4.5.3 et 6.4), les sondages standard et les unités cartographiques (chap. 5.6.2) dans une base de données, soit directement, soit en les entrant d'abord dans un tableur. Les consignes de saisie doivent figurer dans les manuels de projet. Les données sont entrées dans des bases de données propres au canton, dans NABODAT ou dans Soildat. Toutes les tables qui correspondent à des produits de la cartographie sont contrôlées pour vérifier que leurs données sont complètes, cohérentes et plausibles (chap. 6.6 et 6.7).

6.6 Vérification des données ponctuelles et surfaciques par le CQ interne

6.6.1 Vérification formelle

L'exactitude formelle et l'exhaustivité des données vectorielles et des tables de données est contrôlée manuellement ou automatiquement (p. ex. conformément à Amt für Umwelt und Energie des Kantons St.Gallen 2015 listes de contrôle 10.2, 10.3, 10.4, 10.5; Fachstelle Bodenschutz Kanton Solothurn 2017, F16). Exemples de points à contrôler :

- les jeux de données sont complets, numérotés correctement et identifiables ;
- les polygones peuvent être reliés correctement à des entrées des tables de données (et inversement) ;
- à chaque sondage standard correspond une unité cartographique ;
- correction des fautes de frappe, contrôle des majuscules et minuscules dans les codes ;
- absence de vides ou de chevauchements entre les données vectorielles des unités cartographiques, pas de chevauchement entre polygones enclavés et le polygone extérieur.

6.6.2 Vérification du contenu

Contrôle de la cohérence et de la plausibilité

Le tableau 14 aide à vérifier l'emploi correct de la classification, ainsi que la cohérence et la plausibilité des données. Si les tables de données contiennent aussi des paramètres dérivés telles les classes d'aptitude, il faut aussi en contrôler l'utilisation correcte.

Tableau 14 : Exemples pour la vérification de la cohérence des tables de données, de leur plausibilité et de l'application correcte de la classification KLABS (complété à partir de Dienststelle Umwelt und Energie (uwe) Kanton Luzern 2013, C 23).

Paramètre	Comparé avec	Remarque
Valeur de pH de UB, de UB1 ou du premier horizon après OB	Sous-types E et K, type de sol	KLABS, plausibilité
Classes d'effervescence	Sous-type K, type de sol	KLABS
Teneur en argile et en silt	Classes texturales, type de sol	KLABS
Teneur en gravier et en pierres	Classe de pierrosité	KLABS
Teneurs en matière organique de la couche supérieure du sol	Sous-types O et M	KLABS, plausibilité
Teneurs en matière organique de la couche sous-jacente du sol (sols organiques)	Sous-types O et P, matériau parental	KLABS
Épaisseur des horizons A et O	Forme d'humus	KLABS
Sous-type	Type de sol	KLABS
Groupe de régime hydrique	Profondeur utile	KLABS
Groupe de régime hydrique	Sous-type	KLABS, cohérence
Forme de terrain	Groupe de régime hydrique et type de sol	Cohérence, plausibilité
Groupe de régime hydrique	Matière organique d'OB	Cohérence, plausibilité
Classes texturales	Matériau parental	Plausibilité

Vérification à l'aide de cartes thématiques

Après le contrôle formel des tables de données et la vérification de leur contenu, on utilise les jeux de données pour établir des cartes thématiques de certains paramètres. C'est la DPM qui décide si elle crée ces cartes thématiques elle-même ou si elle confie cette tâche au CQ externe.

À l'aide de ces cartes thématiques, on examine la répartition spatiale des propriétés du sol pour y déceler des valeurs aberrantes ou des écarts systématiques. On contrôle en outre si la forme des unités cartographiques est plausible. Le choix des paramètres vérifiés se fonde sur le but de la cartographie et sur les particularités du périmètre cartographié. Typiquement, on examine le type de sol, les groupes de régime hydrique, les formes de terrain, le matériau parental, les classes texturales, la pierrosité, la profondeur utile, ainsi qu'un choix de sous-types (d'après Amt für Umwelt und Energie des Kantons St.Gallen 2015 liste de contrôle 10.4; Fachstelle Bodenschutz Kanton Solothurn 2017

p. 57) par exemple). Les organismes de cartographie mandatés sont ensuite informés des résultats de la vérification. Les éventuelles corrections sont discutées, puis appliquées par les cartographes.

6.7 Vérification de tous les produits par le CQ externe

Après le CQ interne, tous les produits de la cartographie sont remis au CQ externe. Ce dernier procède fondamentalement de la même manière que le CQ interne. Il contrôle en particulier la cohérence des données entre les lots. Dans cet examen, il met aussi l'accent sur la cohérence temporelle entre relevés d'années différentes. Le contrôle terminé, les données sont remises encore une fois aux organismes de cartographie mandatés pour qu'ils les corrigent. Le CQ externe indique les vérifications effectuées et détaille l'intégralité du processus de contrôle dans un rapport final à l'intention de la DPM (chap. 6.8.1).

6.8 Rapports finaux

6.8.1 Rapport final du CQ externe

Le rapport final du CQ externe contient les informations suivantes (Fachstelle Bodenschutz Kanton Solothurn 2017, C20B) :

- situation initiale,
- déroulement (étapes de travail),
- carte conceptuelle et choix des profils représentatifs,
- profils représentatifs,
- journée(s) de calibration,
- phase de cartographie,
- contrôle des données,
- plausibilité des résultats,
- propositions d'amélioration,
- questions et points en suspens,
- formulaires du CQ et autres annexes.

6.8.2 Rapport final des organismes de cartographie mandatés

Buts du rapport final des organismes de cartographie mandatés :

- expliquer la cartographie et le périmètre concerné en tenant compte de toutes les particularités rencontrées dans le périmètre ;
- garantir que le travail soit compréhensible effectué pour les personnes externes au projet de cartographie puissent comprendre le travail effectué, notamment lorsque la carte est utilisée après l'achèvement du projet .

Contenus du rapport final des organismes de cartographie mandatés (Fachstelle Bodenschutz Kanton Solothurn 2017, C20A) :

- mandat, problématique, périmètre de projet,
- organisation et déroulement,
- documents de référence concernant l'espace naturel et rural,
- procédure et méthodologie,
- résultats,
- questions particulières (p. ex. particularités de la procédure liées aux spécificités locales),
- questions en suspens, ainsi que propositions et suggestions concernant le projet ou d'autres cartographies.

6.9 Remise des données

Les organismes de cartographie mandatés remettent à la DPM sous forme numérique tous les produits de la cartographie mentionnés dans l'appel d'offres ou dans le manuel du projet (tableau 13), ainsi que tous les plans et notes de terrain dans leur version originale. À ce moment, tous ces éléments ont subi un contrôle des données (CQ).

7 Liste des figures

Figure 1 : Phases de la cartographie des sols selon le KA23	6
Figure 2 : Déroulement de la phase préparatoire	9
Figure 3 : Facteurs affectant le choix de l'échelle	12
Figure 4 : Aide à la planification d'une cartographie des sols en fonction de divers types de végétation. Les plages entourées de lignes continues indiquent des périodes particulièrement favorables et celles entourées de pointillés des périodes potentiellement défavorables pour parcourir des surfaces et y effectuer des sondages à l'aide d'une tarière à main. Les ovales orange signalent des périodes qui se prêtent particulièrement bien à la réalisation de profils pédologiques.	17
Figure 5 : Déroulement de la phase conceptuelle.	21
Figure 6 : Exemple fictif de liste avec des propositions de sites pour les profils représentatifs. Les numéros en gras désignent les sites de sondages de reconnaissance qui se prêtent le mieux à la réalisation d'un profil représentatif.	25
Figure 7 : Déroulement de la phase des profils (procédure standard).	29
Figure 8 : Schéma d'une fosse pédologique avec clôture, dépôts de sol et panneau d'information. Figure d'après Brunner et al. (1997, fig. 2.1 b).	32
Figure 9 : Vue d'ensemble de la phase de cartographie.	37
Figure 10 : Dans le terrain, les sols varient de manière continue : les catégories de types de sol changent le plus souvent progressivement. Lors de la cartographie, les limites des unités cartographiques sont tracées dans les zones de transition. Dans la figure, ces limites sont dessinées sous la forme de lignes rouges à la surface du sol et en profondeur.	43
Figure 11 : Relation entre unité cartographique et unité(s) pédologique(s).	43
Figure 12 : Procédure de délimitation des unités cartographiques pour les sondages cartographiques et les sondages standards.	44
Figure 13 : Processus itératif de délimitation d'unités cartographiques. Le tracé supposé de la limite est esquissé sur le plan de terrain (en gris) puis confirmé en couleur (rouge) une fois que l'unité cartographique est terminée ; les sondages sont indiqués sous la forme de points bleus (d'après la Fig. 5.3 de Legros (1996, p. 134)).	45
Figure 14 : Structure des informations pédologiques.	48
Figure 15 : Champ d'incertitude décisionnel la délimitation d'unités cartographiques.	53
Figure 16 : Déroulement du traitement et du contrôle des données.	57

8 Liste des tableaux

Tableau 1 : Vue d'ensemble de l'ouvrage « Description, classification et cartographie des sols de Suisse ». Sur fond bleu, la présente version du KA23 ; en caractères gris, la date approximative de la première publication des différents modules.	5
Tableau 2 : Acteurs possibles et leur rôle dans un projet de cartographie	10
Tableau 3 : Buts possibles d'une cartographie et échelles recommandées	13
Tableau 4 : Densité de sondage en fonction de l'échelle, modifié d'après Brunner et al. (1997, § 8.1-1) et Legros (1996, p. 50)	13
Tableau 5 : Données de référence pour la cartographie des sols (complété à partir de Brunner et al. 1997; Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich 2015; Fachstelle Bodenschutz Kanton Solothurn 2017). Les jeux de données en gras doivent être utilisés pour la phase conceptuelle et la phase des profils.	20
Tableau 6 : Liste des conduites souterraines possibles, avec les sources des informations les concernant (selon (Fachstelle Bodenschutz Kanton Solothurn 2017, p. 35). La source primaire est à chaque fois l'exploitant de l'infrastructure.	30
Tableau 7 : Matériel pour la phase des profils. En gras , le matériel impératif.	33

Tableau 8 : Matériel de terrain utilisé durant la phase de cartographie. En gras , le matériel impératif.	38
Tableau 9 : Comparaison de divers types de sondages.	40
Tableau 10 : Relations entre les informations du sondage, le concept de cartographie et l'inventaire des sols.	42
Tableau 11 : Méthodes de délimitation des unités cartographiques à l'aide de sondages sur le terrain (modifié d'après Blume et al. (2011, p. 69).	46
Tableau 12 : Jeu de données pour sondages standard et unités pédologiques. Les indications concernant la saisie par horizon se réfèrent exclusivement aux sondages (les données surfaciques ne sont pas relevées par horizon). <i>Police normale</i> : paramètres obligatoires. <i>Italiques</i> : paramètres facultatifs (pouvant être inclus dans des jeux de données de certains projets spécifiques).	50
Tableau 13 : Variantes de produits de la cartographie : jeux de données surfaciques et jeux de données de sondages standard.	52
Tableau 14 : Exemples pour la vérification de la cohérence des tables de données, de leur plausibilité et de l'application correcte de la classification KLABS (complété à partir de Dienststelle Umwelt und Energie (uwe) Kanton Luzern 2013, C 23).	59

9 Glossaire

Voir document séparé

10 Bibliographie

- Accord intercantonal sur les marchés publics révisé ; AIMP, 2019.
<https://www.bpuk.ch/fr/dtap/concordats/aimp/aimp-2019>
- Ad-hoc Arbeitsgruppe Boden, 2005. Bodenkundliche Kartieranleitung 5. Auflage, KA5. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- Amt für Landschaft und Natur, Fachstelle Bodenschutz, Kanton Zürich, 2018. Technische Merkblätter für die Bodenkartierung: Bodenkundliche Kartierung der Wälder mit sauren Böden / RRB 622/2013.
- Amt für Umwelt des Kantons Nidwalden, 2021. Konzept Bodenkartierung 2021.
- Amt für Umwelt des Kantons Solothurn, Fachstelle Bodenschutz, 2017. Projekthandbuch Teil I: Einführung. Solothurn.
- Amt für Umwelt und Energie des Kantons St.Gallen, 2015. Handbuch Umwandlung der Eignungskarten in Bodenkarten: Bodeninformationssystem des Kantons St.Gallen.
- Blume H-P, Stahr K, Leinweber P, 2011. Bodenkundliches Praktikum: Eine Einführung in pedologisches Arbeiten für Ökologen, insbesondere Land- und Forstwirte, und für Geowissenschaftler (3., neubearbeitete Auflage.). Spektrum.
- Borer F, Knecht M, 2014. Bodenkartierung Schweiz Entwicklung und Ausblick.
http://www.soil.ch/cms/fileadmin/Medien/Arbeitsgruppen/Bodenkartierung/Bericht_BoKa_2014_Schlussfassung_BGS_Web.pdf
- Brunner J, Jäggi F, Nievergelt J, Peyer K, 1997. Cartographie et estimation des sols agricoles: Manuel de cartographie.

- Dienststelle Umwelt und Energie (uwe) Kanton Luzern, 2013. Projekthandbuch, Teil 0 Einleitung und Teil I Abläufe.
- Ellenberg H, Klötzli F, 1972. Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz.
- Fachstelle Bodenschutz Kanton Solothurn, 2017. Projekthandbuch, Teil II: Abläufe. Solothurn.
- Fachstelle Bodenschutz Kanton Solothurn, 2018. Projekthandbuch Teil IV, Datenverarbeitung. Solothurn.
- Fachstelle Bodenschutz Kanton Solothurn A für U, 2020. Projekthandbuch Teil III: Kartiermethodik: Kartiermethode FAL 24+. Solothurn.
- Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich, 2003. Richtlinien für Bodenrekultivierungen.
- Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich, 2019. Bodenkundliche Bewertung von anthropogenen Böden: Interpretationshilfe.
- Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich B des KZ, 2015. Bodenkundliche Kartierung der Wälder mit sauren Böden - Submission der Kartierlose 2015: Offenes Verfahren. TID 28025.
- Frehner M, Burnand J, Carraro G, Frey H-U, Lüscher P, 2009. Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald, Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion: Anhang 2A: Bestimmen des Standortstyps (revidiert und ergänzt; Stand März 2009). Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, 180 p.
- Frei E, Vökt U, Flückiger R, Brunner H, Schai F, Bundesamt für Landwirtschaft, Bundesamt für Raumplanung, Bundesamt für Forstwesen, 1980. Bodeneignungskarte der Schweiz.
- Gasche T, Lazzini M, 2018. Bodenkartierung Breitenbach-Büsserach Schlussbericht Bezugsgebiet Güterregulierung.
- Gemeindeverband Sempachersee, 1992. Konzept frü Schutzmassnahmen im einzugsgebiet der grossen AA, Grundlagen, Teil Boden.
- Huert C, von Rohr G, Margreth S, Schmidhauser A, Gasche T, 2017. Böden im Kanton Solothurn. 130 p.
- Legros J-P, 1996. Cartographie des sols: De l'analyse spatiale à la gestion des territoires. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.
- Loi fédérale sur les marchés publics (RS 172.056.1; LMP), 2019.
- Loi sur la protection de l'environnement (RS.814.01, LPE), 1983.
- Mösch DA, 2022. Erstes Fruchtfolgeflächen-Kompensationsprojekt erfolgreich umgesetzt. Umwelt Aargau, 2022.
- Murisier F, Briguet C, 2004. Etude des terroirs viticoles vaudois. Revue suisse Vitic Arboric Hortic, Vol. 36 (4), 14-20.
- Nievergelt J, Petrsek M, Weisskopf P, 2004. Observer et évaluer la structure du sol. 92 p.
- Office fédéral de l'agriculture (OFAG), 2004. Grundlagen zur Bewertung von Kulturland und naturnahen Flächen bei Landumlegungen.

- Office fédéral de l'environnement (OFEV), 2022. Gestion respectueuse des sols lors de travaux de génie civil; Sols et chantiers. Un module de l'aide à l'exécution « Construire en préservant les sols ».
- Office fédéral du développement territorial ARE, 2020. Plan sectoriel des surfaces d'assolement. Berne.
- Ordonnance sur la sécurité et la protection de la santé des travailleurs dans les travaux de construction (RS 832.311.141, OTConst), 2021.
- Ordonnance sur les marchés publics (RS 172.056.11, OMP), 2020.
- Ordonnance sur les paiements directs versés dans l'agriculture OPD, RS 910.13, 2013.
- Ruef A, Peyer K, 1996. Manuel Cartographie des sols forestiers. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Zürich Reckenholz, 123 p.
- Société Suisse de Pédologie (SSP), 2000. Umfrage Bodenkartierung, Bedarfsabklärung Bodenkarten und Bodeninformation Aufgaben im Zusammenhang mit der Bodenkartierung, Ideen zu einer Bodeninformationsstelle.
- Soil Science Division Staff, Ditzler C, Scheffe K, Monger HC (éd.), 2017. Soil Survey Manual, USDA Handbook 18. Government Printing Office, Washington, D.C.
- Sticher H, 2001. Bodenkunde und Bodenkundler in der Schweiz 1855-1962.
file:///C:/Users/mud2/Downloads/bgs_dokument_11.pdf
- Suter B, 2018. Konzept Bodenkartierung zur Fruchtfolgeflächenerhebung im Kanton Luzern: Kartierung entlang der „Y-Achse“ (entlang Nationalstrassen).

11 Annexes

Annexe 1 : Indications pratiques complémentaires

Annexe 2 : Indications pour la direction de projet mandante (DPM)

12 Contrôle des versions

Version KA23	Version rKA	Date	Description	Auteur
-	0.1	22.6.21	Uniquement variantes de sondage	js
-	0.2	23.6.21	Compilation à partir de la structure brute, rapport intermédiaire	js
-	0.3	5.7.2021	Élaboration de certains chapitres	js, mw
-	0.4	11.10.2021	Projet pour consultation préliminaire et traduction	js, mw
-	1.0	4.5.2022	Projet modifié avec commentaires issus de la consultation préliminaire	js
-	1.1	5.5.2022	Version mise au net après consultation préliminaire	js
-	1.2	7.7.22	Projet modifié avec commentaires concernant les apports pour le LT 11.5 (exigences SDA), apports GQR (Bruno Grünenfelder) et apports du groupe de travail « Cartographie » de la SSP (rencontre du 2.6.2022)	js, dm
-	2.0	15.9.2022	Version entièrement mise au net et adaptée pour la consultation, mise en page adaptée, intégration des passages concernant les sols forestiers	dm
-	2.0	6.10.2022	Contrôles de suivi par M. Wernli, T. Steinert, K. Baumgartner, R. Ruef ; mise au net et préparation pour la consultation	dm
-	2.1	23.1.23	Version avec commentaires et corrections issues de la consultation	dm, mw
1.0	-	30.6.2023	Première version du KA23 (en allemand)	dm, js
1.0f		26.11.2024	Version française	sc, cf, dm