

> Sols et constructions

Etat de la technique et des pratiques



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'environnement OFEV

> Sols et constructions

Etat de la technique et des pratiques

Impressum

Editeur

Office fédéral de l'environnement (OFEV)

L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Auteur

Enrico Bellini, sanu future learning sa, Bienne et IC Infraconsult SA, Berne

Accompagnement à l'OFEV

Corsin Lang, Jean-Pierre Clément
Division Sols et biotechnologie, Section Sols

Référence bibliographique

OFEV (éd.) Bellini E. 2015: Sols et constructions. Etat de la technique et des pratiques. Office fédéral de l'environnement, Berne.

Connaissance de l'environnement n° 1508: 113 p.

Graphisme, mise en page

Valérie Fries, 3063 Ittigen

Page de couverture

Jean-Pierre Clément, OFEV

Commande de la version imprimée et téléchargement au format PDF

OFCL, Diffusion des publications fédérales, CH-3003 Berne

Tél. +41 (0)58 465 50 50, Fax +41 (0)58 465 50 58

verkauf.zivil@bbl.admin.ch

Numéro de commande: 810.300.133f

www.bafu.admin.ch/uw-1508-f

Impression neutre en carbone et faible en COV sur papier recyclé

Cette publication est également disponible en allemand.

© OFEV 2015

> Tables des matières

Abstracts	5		
Préface	7		
Introduction	8		
<hr/>			
1 Bases, principes et typologie de chantiers	15		
1.1 Propriétés et définition du sol	15		
1.2 Terminologie	17		
1.3 Pourquoi protéger les sols?	21		
1.4 Les atteintes portées aux sols	23		
1.5 Principes et objectifs de la gestion des sols sur les chantiers	23		
1.6 Types de chantiers et modes d'utilisation des sols	26		
1.6.1 Chantiers en milieux forestiers	26		
1.6.2 Chantiers en milieux subalpins et alpins	29		
1.6.3 Chantiers en zone de montagne du Jura	31		
1.6.4 Chantiers en milieux urbains	32		
1.7 Contraintes sol pouvant découler d'un projet	35		
<hr/>			
2 Planification des mesures de protection des sols	38		
2.1 Intégration des mesures de protection des sols	39		
2.1.1 Phase 1: Définition des objectifs	39		
2.1.2 Phase 2: Etudes préliminaires	40		
2.1.3 Phase 3: Etude du projet	40		
2.1.4 Phase 4: Appel d'offres	43		
2.1.5 Phase 5: Réalisation	45		
2.1.6 Phase 6: Exploitation	47		
2.2 Rôle et tâches du spécialiste de la protection des sols sur les chantiers (SPSC)	48		
<hr/>			
3 Mesures générales de protection des sols	50		
3.1 Concept de gestion des sols	50		
3.2 Description de l'état initial et du degré de sensibilité des sols	51		
3.3 Planification des travaux et formulation d'objectifs	54		
3.4 Réduction des emprises et des surfaces décapées	55		
3.5 Enherbement préalable des emprises	56		
3.6 Mesure de l'humidité des sols	57		
<hr/>			
3.7 Choix des machines et des procédés de décapage	60		
3.7.1 Machines de chantier – critères de sélection pour l'appel d'offre	62		
3.7.2 Procédés de décapage des emprises terrassées	64		
3.8 Accès et pistes de chantier	66		
3.9 Procédés d'entreposage provisoire des matériaux terreux	68		
3.10 Procédés de reconstitution ou de remise en place des sols après travaux («ouvrage sol»)	70		
3.10.1 Réalisation et réception du remblai nivelé	72		
3.10.2 Reconstitution du sol	72		
3.10.3 Réception de l'ouvrage sol	74		
3.11 Remise en état des emprises sur sols non décapés, sur fouilles linéaires ou sur surfaces reconstituées	75		
<hr/>			
4 Cas-types avec des recommandation pour la protection des sols	78		
4.1 Chantier avec emprise temporaire en forêt	78		
4.2 Chantiers en milieux alpins	83		
4.3 Chantiers en milieu urbain	90		
4.4 Chantiers linéaires de pose de conduites et de câbles enterrés	95		
4.5 Projet de protection contre les crues – Hochwasserschutz Linth 2000: «Une amélioration qualitative du sol au lieu d'un remplacement quantitatif des surfaces»	99		
<hr/>			
Annexe	106		
Liste des participants aux ateliers thématiques et régionaux, et personnes consultées	106		
<hr/>			
Répertoire	110		

> Abstracts

This publication shows the current level of technology for soil conservation on building sites. The currently applicable environmental legislation protects all soils from contamination, independent of their use, their properties and climatic zones. The development of soil conservation on building sites is based largely on the conservation of good arable land in the Swiss Central Plateau. That is why the mandate was intended to treat building sites in forest, alpine and mountainous regions as well as in settlement areas. With regard to agricultural areas, the special position of land for crop rotation is made clear. This publication aims to ensure a better integration of the standards for soil conservation during the phases of project development and building site planning.

Keywords:**Soil, building, soil conservation**

Diese Publikation soll den Stand der Technik für den Bodenschutz auf Baustellen festhalten. Die geltende Umweltgesetzgebung schützt alle Böden vor Belastungen, unabhängig von ihrer Nutzung, ihren Eigenschaften und den Klimazonen. Der heute praktizierte Bodenschutz auf Baustellen ist vorwiegend aus dem Schutz der guten Ackerflächen im Schweizer Mittelland hervorgegangen. Daher ging der Auftrag u. a. dahin, auch Baustellen in Wald-, Alpen- und Berggebieten sowie in Siedlungsgebieten zu berücksichtigen. In Bezug auf landwirtschaftliche Flächen wird die Sonderstellung der Fruchtfolgeflächen (FFF) verdeutlicht. Schliesslich soll diese Arbeit einen besseren Einbezug der Anforderungen des Bodenschutzes in den Phasen der Projektentwicklung und der Baustellenplanung gewährleisten.

Stichwörter:**Boden, Bauen, Bodenschutz**

Cette publication vise à actualiser l'état des connaissances en matière de protection des sols sur les chantiers. La législation environnementale en vigueur protège tous les sols contre les atteintes, quelles que soient leurs utilisations, caractéristiques et zones climatiques. Or la pratique de la protection des sols sur les chantiers est principalement issue de la protection des bonnes terres labourables du Plateau suisse. Ce mandat avait donc, entre autres, pour objectif de traiter également des situations en milieux forestiers, alpins et montagnards, ainsi qu'en zone urbaine. Dans le cadre des terres agricoles, le statut particulier des surfaces d'assolement (SDA) est précisé. Enfin, ce travail vise également à assurer une meilleure intégration des exigences de la protection des sols dans les phases développement du projet et planification du chantier.

Mots-clés:**Sols, chantiers,
protection des sols**

La presente pubblicazione ha lo scopo di illustrare lo stato attuale delle conoscenze in materia di protezione del suolo nei cantieri. La legislazione ambientale vigente protegge tutti i suoli dal deterioramento, indipendentemente dal loro utilizzo, dalle loro caratteristiche e dalle zone climatiche. La protezione del suolo nei cantieri risale in primo luogo alla protezione dei terreni coltivabili di buona qualità dell'Altipiano svizzero, che aveva come obiettivo anche quello di trattare i cantieri nelle zone forestali, alpine e montane nonché nelle aree urbanizzate. Il testo precisa inoltre il ruolo particolare delle superfici per l'avvicendamento delle colture (SAC) nel quadro delle superfici agricole. La pubblicazione vuole infine garantire una migliore integrazione delle esigenze di protezione del suolo nelle fasi sviluppo del progetto e pianificazione del cantiere.

Parole chiave:
suolo, cantieri,
protezione del suolo

> Préface

Les sols constituent la base physique et fonctionnelle des milieux terrestres, qu'ils soient naturels ou aménagés par l'homme. Leurs fonctions, en particulier celles de production, de régulation et de maintien de la biodiversité, dépendent principalement de leur activité biologique et ne peuvent pas être substituées par des moyens techniques. Il convient donc de les préserver au plus haut point. Les fonctions des sols englobent également la fonction de support, notamment pour les surfaces d'habitat et d'infrastructure. Durant les activités liées aux chantiers de construction, les sols subissent des impacts qu'il est nécessaire et possible de minimiser afin de conserver cette ressource limitée.

Au cours des vingt dernières années, la protection des sols sur les chantiers s'est imposée comme une pratique courante en Suisse, tant pendant les phases de planification que celles de réalisation des constructions et de remise en culture. Durant cette période, de nouvelles expériences pratiques ont été acquises, qui permettent d'affiner et d'approfondir les recommandations publiées en 2001 dans le guide «Construire en préservant les sols». Par ailleurs, certains types de chantiers qui, en raison de manque de connaissances, avaient été quelque peu négligés lors des débuts de la mise en œuvre de la protection des sols sur les chantiers ont été inclus dans la présente publication. En effet, une extrême hétérogénéité des sols, ainsi que des conditions topographiques ou climatiques contraignantes posent des exigences spécifiques aux chantiers en milieu alpin ou forestier ou encore au sein des zones urbaines. En se fondant sur les expériences et le savoir rassemblés durant les deux dernières décennies, des mesures adaptées et des solutions appropriées peuvent maintenant être proposées également pour ce type de chantier.

En raison de l'évolution des pratiques et de l'acquisition de nouveaux savoirs, la Section Sols de l'OFEV a jugé nécessaire de faire le point sur les connaissances actuelles en matière de protection des sols sur les chantiers. A cette fin, elle a souhaité recueillir des expériences pratiques faites au cours des vingt dernières années auprès de tous les acteurs et milieux concernés par la protection des sols sur les chantiers. Elle a initié un projet qui a permis de réunir les avis et les expériences auprès des administrations, des directions de travaux, des entreprises et des bureaux privés, ainsi qu'auprès des spécialistes de la protection des sols sur les chantiers eux-mêmes. Les acquis et les développements les plus récents, qui prennent également en compte les normes publiées par des associations ou des institutions professionnelles depuis 2000, sont présentés ici, dans une publication technique destinée à établir l'état actuel de la technique et des pratiques dans le domaine des sols et chantiers. Une attention particulière a été portée au processus allant de la phase de développement jusqu'à celle de la restitution finale des emprises provisoires et des surfaces reconstituées.

Gérard Poffet
Sous-directeur
Office fédéral de l'environnement (OFEV)

> Introduction

La protection des sols sur les chantiers en Suisse s'est développée et concrétisée au cours de la période 1960–2000¹. Le boom de la construction de bâtiments et d'installations de transports enregistré dans les années 1960 et 1970 a entraîné l'ouverture de nombreuses gravières (cf. fig. 1) dans des terres agricoles (p.ex. dans le canton d'Argovie, 1 million de m³ de gravier en 1955, 4 millions de m³ en 1975) et leur remise en état après remplissage avec des «matériaux d'excavation». Quelques documents, comme le «Merkmale zur Erstellung von Humusdeponien und zur Rekultivierung von Deponie- und Auffüllflächen» de Fritz Jäggi et Erwin Frei (1977), ont tenté d'introduire une bonne pratique de la protection des sols. Au vu des résultats souvent décevants des remises en culture des anciennes gravières, des agronomes et des ingénieurs du génie rural se sont saisis de cette problématique en 1981 et ont incité la Société Suisse de Pédologie (SSP/BGS) à dépasser le caractère purement scientifique de ses activités pédologiques et agronomiques pour s'intéresser à la protection pratique des sols. Le Document SSP/BGS N° 1 (Exploitation du gravier et agriculture – Kiesabbau und Landwirtschaft), paru en 1984 et traitant de la remise en culture des gravières, témoigne de ces efforts, et certains de ses auteurs, comme Jean-Auguste Neyroud et Christoph Salm, se manifesteront par la suite tout au long de l'évolution de la problématique générale des sols et chantiers (cf. Directive de l'Association Suisse de l'industrie des Gravieres et du Béton, ASGB 2001).

L'ère des gravières

Fig. 1 > Gravières: premier plan en reconstitution, arrière plan en exploitation



Source: J.-P. Clément, OFEV

¹ Roland Bono, Nina von Albertini, Jean-Pierre Clément, Gregor Klaus, Markus Vogt: Bodenkundliche Baubegleitung: der Schweizer Weg. Dans: Bodenschutz 01/14, 6–12.

L'approbation de la loi sur la protection de l'environnement (LPE) en 1983 et de l'ordonnance sur la protection des sols (OSol) en 1998, et le Programme National de Recherches 22 SOL 1983–1991 peuvent être considérés comme des étapes importantes dans la prise de conscience de ce problème et des mesures à prendre. En 1989, l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) crée au sein de la Section Sols une place d'adjoint scientifique chargé des atteintes physiques portées aux sols. Un des objectifs inscrits dans son cahier des charges consiste à développer la protection des sols sur les chantiers.

En 1992, des projets de redimensionnement des conduites de gaz qui traversent la Suisse (réseau Transitgas établi dans les années 1970, cf. fig. 2) incitent l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) à faire appel à l'OFEV, aux services cantonaux concernés responsables de la mise en œuvre de l'OSol (FABO) avec Urs Vökt (BE), Franz Borer (SO), Roland Bono (BL) et Matthias Achermann (LU), ainsi qu'à Christoph Salm pour rédiger une Directive de l'OFEN pour la protection des sols lors de la création de conduites souterraines de transport de combustibles (1993, révisée en 1997). C'est le début officiel de l'activité des spécialistes de la protection des sols sur les chantiers (SPSC) en Suisse (mis à part le cas particulier des inspecteurs des gravières de l'ASGB). Cette même année 1992, Christoph Salm, depuis 1988 premier conseiller indépendant en matière de protection des sols sur les chantiers, établit sur mandat de la Section Sols de l'OFEV un inventaire de tous les documents traitant de la thématique sols et chantiers disponibles en Suisse. Ce travail débouchera sur la publication du Manuel protection des sols et génie civil (1996, rév. 2001).

L'ère des conduites des gaz

Fig. 2 > La fouille est excavée – Conduite de gaz Transitgas de Walbach (AG) à Däniken (SO) en 1994



Source: Office de la protection de l'environnement et de l'énergie, Bâle Campagne

En 1999, sanu future learning sa à Bienne étudie la faisabilité d'une liste de SPSC et élabore un premier plan de formation des SPSC sur la base du cahier des charges décrit dans les normes SN-VSS 640 582 et 640 583 (Stephan Häusler, 1999–2001). En 2000, la SSP/BGS crée une commission composée de représentants des milieux concernés chargée de proposer une procédure de reconnaissance des SPSC, et suggère au sanu de proposer dès 2001 un cours de formation complémentaire «chantiers» pour des spécialistes du sol. Le 13 juin 2002, la première liste SSP/BGS des SPSC est présentée lors d'une conférence de presse par Mme Catherine Strehler, présidente de la SSP/BGS, accompagnée de M. Bruno Oberle de l'OFEV. Selon l'état de la liste SSP/BGS au 19 janvier 2015, sur les 96 SPSC répertoriés, la moitié ont plus de dix ans d'expérience, un quart y ont été inscrits au cours des trois dernières années. En outre, 10 % des SPSC travaillent dans l'administration et des institutions.

L'ère des normes

Fig. 3 > Excursion annuelle SSP/BGS 2013 – Dix ans de la surveillance de la protection des sols sur les chantiers (SPSC)

Au centre Reto G. Meuli, président SSP/BGS



Source: J.-P. Clément, OFEV

La publication de la norme SN-VSS 640610a «Suivi environnemental de la phase de réalisation» en 2002 et du document «Suivi environnemental en phase de réalisation de chantier (SER)» de l'OFEV en 2007 ont fait évoluer la fonction du SPSC vers le conseil à la direction des travaux sur les grands chantiers dans le cadre d'une équipe d'experts environnementaux. Divers entretiens menés avec les milieux concernés (cf. fig. 3) montrent que les interventions directes des SPSC auprès des entreprises et des exécutants ont diminué.

Les administrations chargées de la mise en œuvre de l'OSol sur les chantiers considèrent, si l'on résume l'état de la situation en 2014, que six points nécessitent des améliorations pratiques au niveau de la planification ou de la réalisation des projets ayant un impact sur des sols:

Six points à améliorer

- > Choix du tracé:** *pour les tracés de conduites enterrées en zone agricole (conduites électriques, fibres optiques, câbles, conduites d'eau potable, etc.), il faut tenir compte des exigences de la protection des sols et de l'utilisation agricole.*
- > Notice protection des sols:** *les mesures de protection des sols doivent être anticipées et intégrées dans une notice de protection des sols. Cette dernière doit contenir une présentation détaillée des sols et de leurs caractéristiques ainsi que des contraintes qui en résultent pour le chantier. Reproduire des normes ou aides à la décision n'est plus suffisant, le SPSC doit prescrire des mesures concrètes spécifiquement adaptées au chantier concerné à l'intention du maître d'ouvrage, de la direction des travaux et des entreprises.*
- > Valorisation des matériaux terreux:** *les qualités, caractéristiques et volumes des matériaux terreux décapés à valoriser hors du périmètre du chantier doivent être établis au stade de planification du projet. Il faut également planifier en détail les étapes de leur réutilisation, et notamment le calendrier de ces travaux hors chantier.*
- > Appels d'offres:** *les documents à la base des appels d'offres et soumissions devraient être beaucoup plus précis quant aux systèmes et machines préconisés pour la circulation sur les sols en place et la maniement des sols.*
- > Accompagnement SPSC:** *dès la phase de planification, le SPSC devrait être associé à la définition des mesures de protection des sols telles que délimitation des emprises, organisation du chantier, installations et pistes, choix des machines. Pour le suivi des interventions présentant un risque d'atteinte au sol (p. ex. décapages, entreposage, reprise au tas et mise en place), le SPSC devrait être présent sur place.*
- > Restitution:** *la définition des objectifs de remise en place du sol, l'établissement d'un protocole de réception du remblai nivelé et de l'ouvrage sol, la définition précise des mesures durant la phase de transition culturelle, et l'établissement d'un protocole de l'état du sol avant la remise en culture normale, devraient également être assurés. La rédaction d'une notice sur la reconstitution/remise en état des sols et la phase transitoire de remise en culture devrait être envisagée.*

Cette publication est le fruit d'une démarche de consultation d'experts, des milieux de la recherche et des autorités responsables de la protection des sols sur les chantiers ainsi que des parties prenantes concernées par la protection des sols en Suisse. Celle-ci s'est faite au travers de quatre ateliers thématiques et de quatre ateliers régionaux réalisés en 2013 (cf. fig. 4), ainsi que d'un atelier réunissant les principaux milieux intéressés². En outre, l'auteur a consulté la littérature et les publications techniques sur cette question et effectué des interviews avec des personnes-clés du domaine. Cette synthèse des connaissances et des pratiques a été complétée par la recherche d'exemples de chantiers illustrant la problématique de la protection du sol. Ces exemples ont

² Cette première partie du mandat a été effectuée par sanu future learning sa. Une liste des participants aux ateliers et des experts consultés se trouve dans l'annexe à la publication (cf. annexe 1). Le texte final a été réalisé par IC Infraconsult SA. L'entier du mandat a été assuré par Enrico Bellini.

ensuite été présentés et commentés par des experts externes et intégrés à titre d'information dans le module 4 de la présente publication.

Fig. 4 > Journée de perfectionnement et d'échanges pour SPSC, organisée par la SSP/BGS et le sanu



Source: V. Parrat, sanu future learning sa

Cette publication s'adresse en premier lieu aux planificateurs et aux directions de travaux. Elle peut également se révéler utile aux maîtres d'ouvrage, aux différents utilisateurs du sol (agriculteurs, forestiers) et aux spécialistes de la protection du sol sur les chantiers (SPSC). Les rôles, tâches, et responsabilités des acteurs y sont précisés et expliqués en vue d'améliorer le processus de gestion et de protection des sols. Le langage de cette publication a donc été adapté à un public n'étant pas constitué de spécialistes des sols.

Destinataires de cette publication

Les destinataires de cette publication sont:

- > les bureaux d'ingénieurs et d'architectes chargés de l'assistance aux maîtres d'ouvrage (BAMO), des études et de la planification des travaux de décapage et de terrassement, des appels d'offres (description du projet, conditions générales et particulières, devis descriptif, plans d'exécution qui seront intégrés dans le contrat d'entreprise après adjudication);
- > la direction des travaux (ingénieur ou architecte) responsable du contrôle de l'exécution des travaux de construction sur la base du contrat d'entreprise (contrat entre maître d'ouvrage et entreprise de construction);
- > les bureaux d'études environnementales chargés des études d'impact sur l'environnement (EIE) et de la rédaction des chapitres «sols» et «gestion des matériaux terreux» du rapport d'impact (RIE);

- > les entreprises de construction – cadres techniques des entreprises (conducteurs de travaux, chefs de chantier et/ou chefs d'équipe) – impliquées dans les offres, la calculation, ainsi que la préparation et l'exécution des travaux de décapage, de terrassement et excavation, et de reconstitution des sols, selon le contrat d'entreprise (choix des machines et méthodes de travail).

Les interventions ou mesures particulières, comme la remise en état des sols après des catastrophes naturelles, la couverture définitive de décharges, la réhabilitation de sols dégradés par les activités humaines, ou encore les travaux visant à améliorer ou préserver la qualité d'un site du point de vue de la nature et du paysage, ne sont pas développées ici. On se référera en l'occurrence à la documentation spécialisée traitant de ces thèmes particuliers.

La problématique des gravières et carrières n'est pas abordée dans cette publication, car il s'agit d'un type particulier d'installation qui est traité en détail dans les directives de l'Association Suisse de l'industrie des Gravières et du Béton (ASGB) et est supervisé par un inspectorat de la branche. Ce système est reconnu comme un accord sectoriel au sens de l'art. 12, al. 2, OSol.

Avertissement

Cette publication est structurée en quatre modules (chapitres) pouvant être lus et consultés indépendamment les uns des autres.

Module 1: Bases, principes et typologie de chantiers

Ce module précise les notions importantes utilisées dans la protection des sols sur les chantiers. Il propose une terminologie commune à tous les types d'intervenants et rappelle les objectifs prioritaires qu'il faudrait intégrer dans tous les projets. Il s'achève par une présentation de différentes situations de chantiers (forestiers, alpins, urbains, etc.), avec leurs enjeux, leurs particularités pédologiques et les conséquences qui en découlent en termes de planification et de réalisation des projets.

Message principal: se poser les bonnes questions dès la phase de l'avant-projet afin de pouvoir adapter ensuite les mesures de protection des sols à la situation particulière du projet.

Module 2: Planification des mesures de protection des sols

Ce module basé sur les normes SIA 112 et VSS 610026 montre comment intégrer les mesures de protection des sols dans les différentes phases de construction de grands chantiers. Il clarifie les rôles des acteurs respectifs et en particulier du spécialiste responsable de la protection des sols sur les chantiers (SPSC).

Message principal: la protection des sols est une affaire de spécialistes qui doivent être associés suffisamment tôt au projet. L'efficacité de la protection des sols se décide lors de la planification. Dans la phase de réalisation, seul un réglage fin pourra encore être effectué.

Module 3: Mesures générales de protection des sols

Ce module présente les mesures générales de protection des sols en tenant compte de l'évolution des connaissances et des pratiques. Les planificateurs y trouveront des explications permettant de mieux comprendre leur contenu et leur fondement pédologique. Les directeurs de travaux y trouveront essentiellement des indications et des précisions utiles pour la coordination des tâches durant la phase de réalisation des travaux.

Module 4: Cas-types avec des recommandations pour la protection des sols

Les exemples présentés dans ce module – chantiers en milieux forestiers, alpins et en zones urbaines, conduites enterrées hors des zones à bâtir et une amélioration qualitative du sol d'un projet de recultivation – représentent des types de chantiers et d'infrastructures qui sont actuellement en fort développement et posent de nouveaux défis aux planificateurs et aux autorités concernées. Les avis des auteurs visent à faire progresser la réflexion sur la protection des sols.

1 > Bases, principes et typologie de chantiers

Ce module précise les notions importantes utilisées dans la protection des sols sur les chantiers. Il propose une terminologie commune à tous les types d'intervenants et rappelle les objectifs prioritaires qu'il faudrait intégrer dans tous les projets. Il s'achève par une présentation de différentes situations de chantiers (forestiers, alpins, urbains, etc.), avec leurs enjeux, leurs particularités pédologiques et les conséquences qui en découlent en termes de planification et de réalisation des projets.

1.1 Propriétés et définition du sol

L'ingénieur en génie civil, le contremaître, l'horticulteur-paysagiste, le pédologue ou le législateur n'utilisent pas les mêmes termes pour désigner la structure en couches du sol. C'est pourquoi il est important de définir de quoi on parle et de préciser les notions utilisées selon l'état actuel des connaissances.

Communément, le sol est considéré à la fois comme une surface, un support et une matière meuble où poussent les plantes et où se déroulent diverses fonctions utiles à l'environnement. Le sol n'est qu'une minuscule couche superficielle et meuble de l'écorce terrestre qui permet la vie. Plus précisément, le sol est un milieu complexe et hétérogène, car il est non seulement constitué de minéraux issus de l'altération des roches et de matières organiques résultant de la décomposition de plantes, mais aussi d'eau, d'air et de milliers d'organismes vivants. En résumé, le sol n'est pas simplement une surface, c'est un volume habité, fonctionnel et structuré.

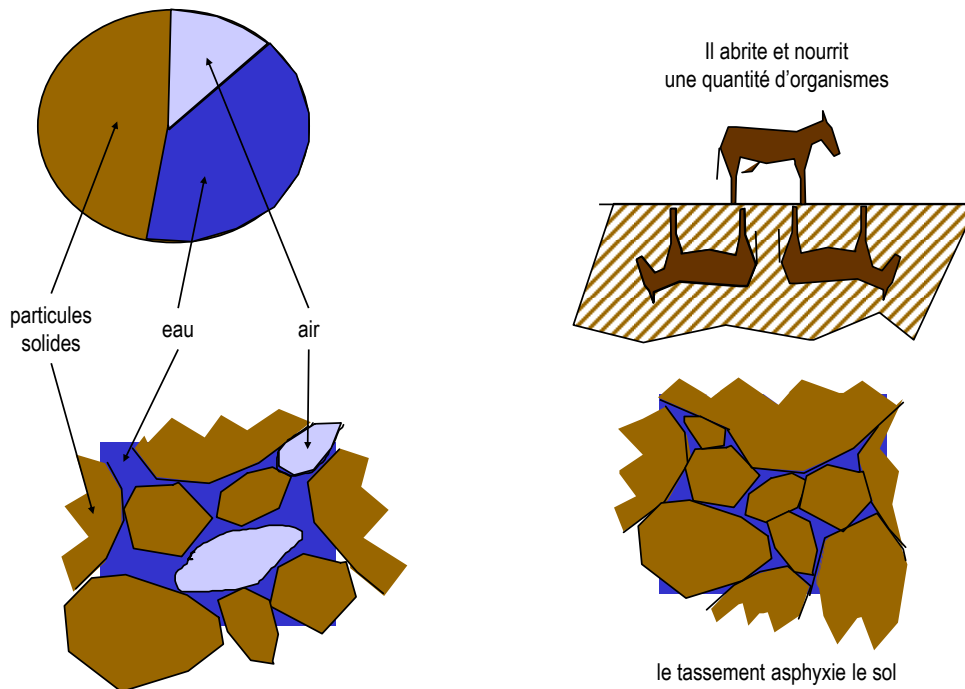
Les agrégats caractérisent la structure «interne» du sol, par opposition à la structure en couche qui décrit quant à elle les différents horizons du sol (cf. tab. 1). Les agrégats sont donc en quelque sorte le «mode d'assemblage» des constituants solides du sol³. On parle aussi de «mottes» dans le langage courant⁴. Ces agrégats peuvent être de différentes tailles et confèrent au sol sa stabilité structurale. L'assemblage des éléments solides laisse des vides dans lesquels circulent l'eau et l'air. C'est la *porosité* du sol (cf. fig. 5). Cette propriété fondamentale définit la perméabilité d'un sol et sa capacité à retenir l'eau. Le maintien d'une structure «interne» intacte est donc primordial pour que le sol puisse conserver sa fertilité et remplir toutes ses fonctions.

Agrégats, structure en couches du sol et porosité

³ Jean-Michel Gobat, Michel Aragno, Willy Matthey. Le sol vivant. Bases de pédologie – Biologie des sols. 2010.

⁴ Service romand de vulgarisation agricole (SRVA). Le sol, cet inconnu. 2001.

Fig. 5 > La porosité du sol est essentielle au maintien de ses fonctions



Source: Office des eaux et des déchets (OED), Canton de Berne

La définition scientifique du sol évolue selon l'époque et les auteurs. Celle proposée ci-après par la Société suisse de pédologie (SSP/BGS) résume de manière synthétique les différentes visions scientifiques actuelles du sol.

«Le sol est la couche externe de la croûte terrestre caractérisée par la présence de nombreux êtres vivants. Il est le siège d'un échange intense de matière et d'énergie entre l'air, l'eau et les roches. Le sol, en tant que partie de l'écosystème terrestre, occupe une position clé dans les cycles globaux des matières.» (SSP/BGS 1998)

Définition du sol

La formation d'un sol, appelée pédogénèse, est un processus généralement long et lent. Un sol se développe à partir de l'altération d'un matériel minéral parental sous l'influence de nombreux facteurs. Les principaux d'entre eux sont:

- > la *roche mère*, soit le matériel minéral à partir duquel le sol se forme (sa composition influence p. ex. le pH du sol);
- > le *climat*, c'est-à-dire le régime hydrique et la température;
- > la *topographie*, le relief conditionnant les mouvements gravitaires;
- > les *organismes vivants*, dont l'activité modifie la chimie et la physique du sol;
- > le *temps*. La formation des sols est très lente: par exemple, il faut de 1000 à 10000 ans pour obtenir un sol de 30 cm d'épaisseur.

La combinaison de ces facteurs produit de nombreux processus qui peuvent, à leur tour, engendrer un nombre quasi illimité de types de sols. En Suisse, la grande variété

de roches et les différences climatiques ont donné naissance à des terres très diversifiées (cf. fig. 6)⁵.

1.2 Terminologie

Le sol est protégé qualitativement en vertu de la loi sur la protection de l'environnement (LPE). Dans la législation, il est défini comme «la couche de terre meuble de l'écorce terrestre où peuvent pousser les plantes» (art. 7, al. 4^{bis}, LPE). La LPE s'applique donc à tous les sols dans lesquels les racines des plantes peuvent pousser, y compris les sols bruts sur cailloux ou sur dalles, dès lors que de la végétation – même maigre – s'y développe ou pourrait s'y développer. L'ordonnance sur la protection des sols (OSol) concerne aussi bien les sols formés naturellement que ceux reconstitués ou créés «artificiellement» (sols appelés anthropiques ou technogènes). En revanche, la roche-mère, c'est-à-dire la partie de l'assise rocheuse ou sédimentaire où ne poussent pas les racines, n'entre pas dans la définition du sol selon la LPE. Il en va de même pour les sols imperméabilisés en surface.

Bases légales

Qu'entend-on par sol anthropique⁶? *Ce sont des sols, appelés aussi anthroposol, sol technogène ou technosol, dont la structure, les horizons ou la profondeur ont été fortement modifiés par l'action de l'homme, par exemple à la suite d'interventions comme le décapage, la reconstitution de couches pédologiques, des apports massifs de terreau, le nivellement de surface ou le labour profond. Une grande partie des sols urbains sont des sols artificialisés ou reconstitués (voir aussi chapitre 1.6.4 «chantiers en milieux urbains»). Au niveau légal, tous les sols sont protégés au même degré, qu'il s'agisse de sols naturels ou anthropiques. Dans la pratique, les mesures de gestion peuvent différer, mais leur finalité est toujours la même: conserver durablement la fertilité des sols (cette notion est précisée ci-après).*

Sol anthropique

La séquence type des horizons d'un sol peut être décrite de manière simplifiée. La présente publication se réfère à la «couche supérieure» et à la couche «sous-jacente» du sol (cf. fig. 7 et fig. 8).

Terminologie utilisée dans cette publication

- > **Couche supérieure:** le plus souvent de couleur foncée, riche en humus et en organismes, densément colonisée par les racines, meuble et structurée par des agrégats. Elle est appelée dans le langage pédologique «horizon A» ou sur les chantiers «terre végétale».
- > **Couche sous-jacente:** de couleur plus claire, moins riche en humus et en organismes. Sa structure est en général plus compacte que la celle de la couche supérieure. Elle est appelée dans le langage pédologique, «horizon B» ou sur les chantiers «terre minérale⁷».
- > **Couches minérales plus profondes:** constituées de roches ou de matériaux peu ou pas altérés. Elle est appelée dans le langage pédologique «roche mère», «sous-sol» ou «horizon C» ou sur les chantiers «matériaux d'excavation».

⁵ Magazine «environnement» – Irremplaçable sol, OFEV. 4/2011.

⁶ Définition adaptée par l'auteur d'après «Bodenkundliche Bewertung von anthropogen Böden. Interpretationshilfe» Fachstelle Bodenschutz. Kanton Zürich. 2013.

⁷ Sols: ça vit sous nos pieds! Société Suisse des Entrepreneurs (SSE). 2014. p. 38.

Fig. 6 > Illustration de la diversité des sols en Suisse

Très profonds

*Sol sur un dépôt silteux d'une ancienne plaine d'inondation
(type: sol brun calcaire alluvial)*

**Profonds**

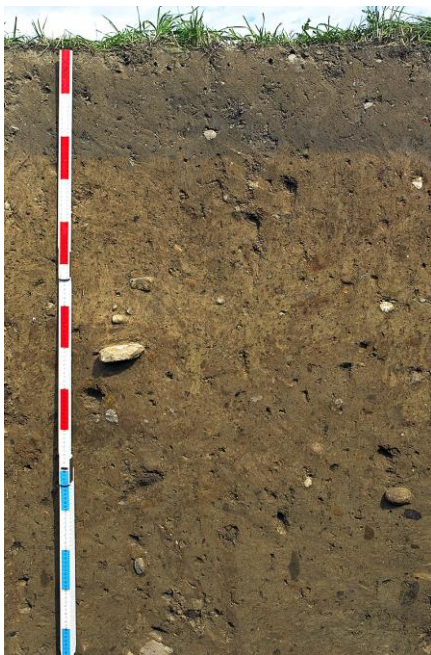
*Sol dans une plaine de graviers fluvio-glaciaires
(type: sol brun lessivé)*

**Modérément profonds**

*Sol sur roche calcaire du Jura
(type: sol brun)*



Sol sur une moraine de fond dans une région ondulée (type: sol brun)



Sol sur loess (dépôts éoliens postglaciaires) dans une faible pente (type: sol brun)



Sol sur graviers fluvio-glaciaires (type: sol brun lessivé)



Les sols bruns et les sols bruns lessivés profonds sont les terres agricoles les plus répandues en Suisse. Ils sont dominants sur le Plateau suisse dans les plaines à graviers fluvio-glaciaires ainsi que dans les régions morainiques et molassiques. Ils se trouvent aussi sur des dépôts silteux d'anciennes plaines d'inondation ainsi que sur des dépôts de loess.

Les sols modérément profonds sont présents sur des dépôts fluvio-glaciaires ou sur des éboulis.

Modérément profonds

Sol drainé sur limon alluvial dans un fond de vallée (type: gley oxydé)

**Modérément profonds**

Sol sur dépôts argileux dans une plaine (ancien fond lacustre, type: pseudogley)

**Assez superficiels**

Sol sur éboulis calcaires (type: rendzine)

**Modérément profonds**

Sol tourbeux (marais), drainé, sur moraine de fond imperméable, dans une cuvette

**Superficiels**

Sol sur une terrasse de marne dans le Jura (type: pseudogley)

**Assez superficiels**

Sol sur une butte morainique (type: regosol)



Les sols modérément profonds sont marqués par une nappe permanente de fond ou de pente (gleys et sols tourbeux). Présents avant tout dans des dépressions et dans des zones avec des apports d'eau de pente.

Source: G. Brändle et U. Zihlmann, Agroscope, M. Müller, HAFL.

Ces sols sont marqués par une humidité stagnante due à une couche imperméable (pseudogleys). Sur des roches mères riches en argile; pour cette raison, ils sont plus répandus dans le Jura que sur le Plateau suisse.

Les sols assez superficiels se rencontrent ponctuellement sur des buttes morainiques et molassiques sensibles à l'érosion et partiellement déjà érodées, sur des veines graveleuses de dépôts fluvioglaciers ou sur des jeunes dépôts alluviaux riches en sable.

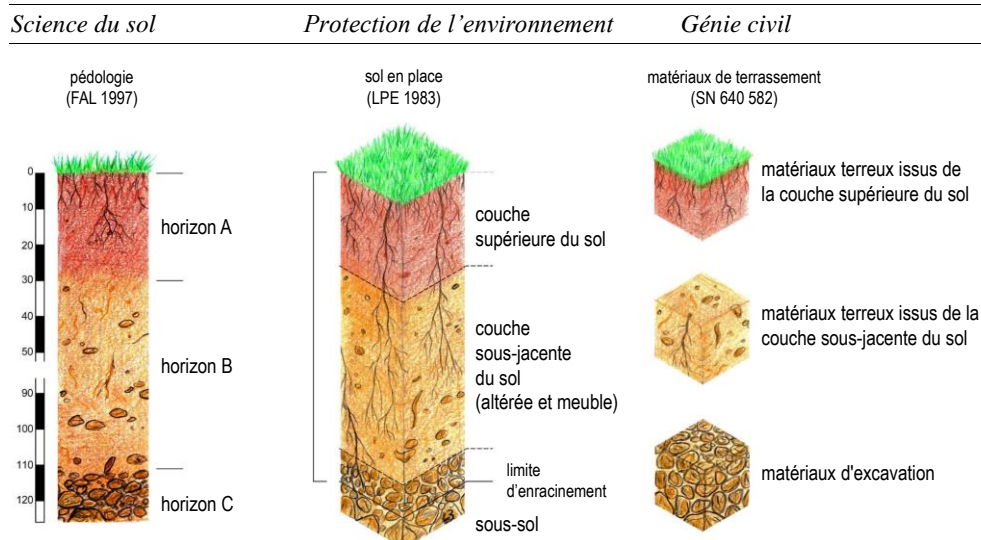
Dans la pratique des chantiers, la terminologie peut varier fortement, d'où l'importance de savoir à quoi on se réfère. Un sol intact, si possible couvert de végétation, sur lequel on roulera, travaillera ou entreposera est appelé *sol en place*. Le sol est décapé, le sous-sol est *excavé* ou *terrassé*. Après un décapage, on parlera de matériaux terreux issus de la couche supérieure du sol pour l'horizon A (terre végétale), et de matériaux terreux issus de la couche sous-jacente du sol pour l'horizon B (terre minérale). Après excavation de l'horizon C (= le sous-sol) on parlera de «matériaux d'excavation» (cf. tab. 1). Ces deux types de matériaux sont traités dans des documents distincts de la Confédération: la valorisation ou l'élimination des matériaux terreux sont réglées dans les Instructions matériaux terreux, celles des matériaux d'excavation dans la Directive sur les matériaux d'excavation.

En langue française, la terminologie utilisée pour dénommer les couches du sol n'est malheureusement pas encore standardisée. Il y a, par exemple, confusion avec le terme sous-sol, qui peut définir soit l'horizon B soit l'horizon C. Il est donc préférable d'éviter d'employer ce terme pour l'horizon B.

Tab. 1 > Résumé de la terminologie utilisée selon la situation et la langue

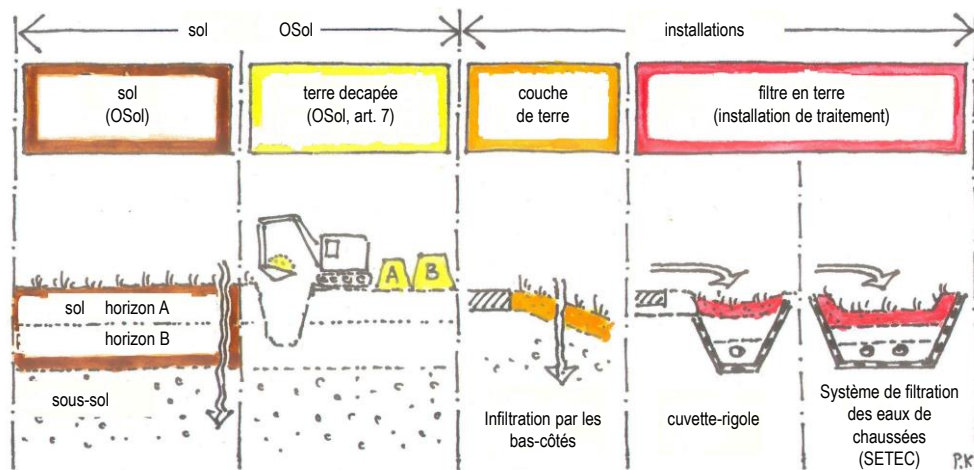
Pédologie	Chantier	français	allemand	italien	anglais
Horizons organo-minéraux (horizon A)	Terre végétale	Couche supérieure du sol	Oberboden	Strato superiore del suolo	Topsoil
Horizons minéraux (horizon B)	Terre minérale (sous-couche, terre végétale B, couche intermédiaire)	Couche sous-jacente du sol	Unterboden	Strato inferiore del suolo	Subsoil
Horizon C	Matériaux d'excavation	Sous-sol (géologie)	Untergrund	Sottosuolo	Underground

Fig. 7 > Les différentes définitions du sol et le champ d'application de la LPE



La terminologie utilisée pour la mise en place de matériaux terreux sur les talus routiers ou les bas-côtés qui assurent l'épuration des eaux des chaussées lors de l'infiltration est illustrée à la figure 8.

Fig. 8 > Terminologie utilisée pour les talus routiers ou les bas-côtés – filtre en terre



Source: P. Kaufmann, Aquawet. OFROU, 2013

1.3 Pourquoi protéger les sols?

«Qui connaît vraiment le sol et son importance pour la vie, quelle qu'elle soit? Bien peu de monde en réalité, alors que le sol est à la base de nos civilisations et de notre alimentation»⁸. Le sol remplit des fonctions essentielles à la survie de notre société. Support des activités humaines, il nourrit la population, produit des matières renouvelables (comme le bois), filtre et recycle les effluents, préserve la qualité des eaux potables (fonction de filtre et de protection pour les sources d'eau potable), et stocke des nutriments essentiels (azote, carbone, etc.). Le sol est à la source de la biodiversité animale et végétale, et, avec tous ses vestiges archéologiques enfouis et ses formations pédologiques particulières, il est aussi une mémoire culturelle vivante (les spécialistes parlent également de «pédotopes»).

Les différentes fonctions écologiques d'un sol peuvent être considérées sous l'angle de leur utilité pour les populations humaines. On parle alors de services ou de bénéfices que les hommes peuvent en retirer (cf. tab. 2).

Les fonctions du sol

⁸ Jean-Michel Gobat, Michel Aragno, Willy Matthey. Le sol vivant. Bases de pédologie – Biologie des sols. 2010.

Tab. 2 > Principales fonctions écologiques, économiques et sociales du sol

Fonction	Service
Habitat	Base des habitats terrestres, biotope
Régulatrice	Cycle naturel du carbone, de l'azote, du phosphore, du soufre et autres éléments nutritifs, fixation et décomposition de polluants, stockage et transformation de la matière organique, épuration et rétention de l'eau, influence climatique (puits de carbone), filtre des polluants atmosphériques
Production	Production alimentaire, bois, biomasse, etc.
Support	Fondation des constructions et installations
Source de matière première	Gisements minéraux, énergie
Archivage	Traces du climat et des écosystèmes passés, vestiges archéologiques

Source: Plan de mesures pour la protection des sols 2014-2017. Auteurs: Ch. Keimer et B. Guex. Département de l'intérieur, de la mobilité et de l'environnement (DIME). République et canton de Genève. (modifié par l'auteur)

Le législateur a pris soin de définir *la fertilité du sol*. Ainsi, l'ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol) fixe les propriétés que doit posséder un sol fertile:

La fertilité et la qualité du sol

- > une biocénose diversifiée et biologiquement active;
- > une structure typique pour sa station;
- > une capacité de décomposition intacte;
- > un développement des plantes non perturbé;
- > une production végétale de bonne qualité;
- > une absence de menace pour l'homme et les animaux.

Cette définition de la fertilité ne se limite donc pas aux notions de productivité ou de capacité de production au sens agronomique ou sylvicole. Elle tient aussi compte des différentes fonctions du sol, des utilisations agricoles et sylvicoles, des espaces verts et des surfaces naturelles.

Cette publication s'appuie également sur la notion de «qualité des sols», qui a pour ambition de juger si un sol donné est capable de réaliser l'ensemble des fonctions dont il est le garant (p. ex. la protection de la qualité des eaux de surface et souterraines, la protection de l'air, la résistance à l'érosion). En résumé, la qualité du sol représente la «capacité du sol à fonctionner»⁹.

Les sols doivent être protégés afin de garantir leur fertilité à long terme au sens légal du terme, et de pérenniser leur capacité de fonctionner, c'est-à-dire leur aptitude à fournir régulièrement l'ensemble des services dont ils sont les garants.

⁹ Jean-Michel Gobat, Michel Aragno, Willy Matthey. Le sol vivant. Bases de pédologie – Biologie des sols. 2010.

1.4 Les atteintes portées aux sols

Les atteintes aux sols (en sens de l'OSol) peuvent être d'ordre chimique, physique ou biologique. Le tableau 3 résume les principaux processus de ces atteintes. Dans le domaine de la construction, p. ex. les atteintes dues à la compaction et à la manipulation des matériaux terreux doivent être prévenues par des mesures préventives appropriées.

Tab. 3 > Atteintes, sources et effets

	Sources principales	Effets
Atteintes chimiques <ul style="list-style-type: none"> • Métaux lourds et le fluor • Substances organiques difficilement dégradables 	Retombées diffuses de polluants provenant: <ul style="list-style-type: none"> • d'activités industrielles • du trafic • des chauffages • Engrais, produits phytosanitaires • Sites pollués, déchets 	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution durable de la fertilité du sol • Accumulation de polluants dans la chaîne alimentaire • Perturbation de l'activité biologique • Pollution des eaux de surface et souterraines
Atteintes physiques <ul style="list-style-type: none"> • Erosion • Compactage des sols 	<ul style="list-style-type: none"> • Pratiques agricoles inadaptées • Manipulations inadéquates des terres sur les chantiers 	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution de la fertilité du sol (diminution de l'épaisseur) • Baisse des rendements agricoles • Dégâts aux cultures, aux infrastructures (canalisation, etc.) • Apports de fertilisants dans les cours d'eau et les biotopes • Modification de la structure du sol • Blocage de fonctions importantes du sol (p. ex. infiltration de l'eau) • Augmentation des risques de crues et de la sévérité des étiages
Atteintes biologiques	<ul style="list-style-type: none"> • Introduction d'organismes étrangers, p. ex. OGM aux effets inconnus, néophytes 	<ul style="list-style-type: none"> • Déstabilisation éventuelle de l'écosystème «sol» • Diminution de la biodiversité
Perte quantitative de sol	<ul style="list-style-type: none"> • Développement du milieu bâti • Construction de routes, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Destruction des sols • Perte des fonctions du sol • Augmentation des risques de crues

Source: Service de l'environnement. Canton de Fribourg. Etat de l'environnement. 2006

1.5 Principes et objectifs de la gestion des sols sur les chantiers

Les principes de base de la protection des sols visent à prévenir les pertes en sol (quantité) et préserver leur fertilité (qualité).

Principe de prévention, prévenir étant toujours plus facile qu'assainir ultérieurement des sols qui ont été traités de manière inappropriée. Ce principe de prévention vaut autant au niveau quantitatif que qualitatif: il faut veiller à limiter les pertes de sol et à préserver leur fertilité.

Principe de réduction des emprises et des décapages au minimum indispensable pour la réalisation du projet (pistes, installations, décapages limités aux surfaces excavées

Principes généraux de la gestion des sols sur les chantiers¹⁰

¹⁰ République et canton de Genève. Concevoir un plan de gestion des sols. Projet de brochure. (adapté par l'auteur).

ou terrassées), sachant que la meilleure protection du sol est toujours d'éviter de circuler dessus et de le décaper.

Principe de valorisation des matériaux terreux. Par valorisation, on entend une réutilisation (ou un recyclage) appropriée des matériaux terreux en fonction de leur qualité. Elle peut se faire soit sur place, soit sur un autre site, par exemple dans le cadre de la remise en état de terres agricoles ou d'une réhabilitation de sols dégradés.

Une sollicitation modérée des sols:

- > réduire au strict minimum les emprises sur les sols;
- > utiliser les sols déjà atteints: si possible des sols imperméabilisés ou des sols qui ont déjà subi d'importantes modifications en raison d'interventions antérieures;
- > préserver les sols favorables à l'agriculture, à la sylviculture, à la protection de la nature et du paysage, à la protection des eaux souterraines et de surface.

La préservation et la réhabilitation des sols:

- > préservation de la fertilité des sols en observant les mesures générales de protection des sols (voir sous module 3);
- > l'amélioration de sols artificiels et la réhabilitation de sols agricoles dégradés. Pour cela, il faut veiller à ce que des projets de réhabilitation des sols agricoles soient disponibles suffisamment tôt dans la phase de planification, afin qu'ils puissent être intégrés dans le dossier de mise à l'enquête.

Les *objectifs prioritaires* en termes de protection des sols peuvent se résumer ainsi:

- > les agrégats du sol doivent rester intacts après chaque emprise ou mouvement de terres;
- > les pores doivent être préservés, tant dans leur diversité que dans leur continuité (drainage et aération du sol, cf. mesure de la densité apparente comme grandeur physique);
- > l'épaisseur et l'ordre des couches doivent être respectés;
- > la réutilisation des matériaux terreux non pollués et de bonne qualité texturale hors du chantier doit être assurée.

Objectifs prioritaires de la gestion des sols sur les chantiers

Un thème en devenir: les surfaces d'assolement (SDA)

L'un des principes régissant l'aménagement du territoire est de réserver à l'agriculture suffisamment de bonnes terres cultivables (LAT, art. 3, al. 2, lettre a). A cet effet, un plan sectoriel de la Confédération a été adopté et arrêté en 1992. Il définit une surface minimale d'assolement de 438 560 ha à conserver dans toute la Suisse, et répartit cette surface entre les cantons. Chaque canton dispose d'un quota de surface d'assolement. Les surfaces d'assolement représentent les meilleures terres agricoles du pays et répondent à des critères définis de qualité pédologique et de situation climatique. Comme le précise l'OAT, «elles se composent des terres cultivables comprenant avant tout les terres ouvertes, les prairies artificielles intercalaires et les prairies naturelles arables». Elles sont garanties par des mesures d'aménagement du territoire.¹¹

Devoir de compensation des SDA: les cantons doivent garantir de façon durable leur surface minimale d'assolement (art. 30, al. 2, OAT)¹². Certains cantons (comme Lucerne, Zurich et Vaud), ont inscrit l'obligation de compensation dans leurs plans directeurs cantonaux ou leurs lois cantonales d'aménagement. Des directives cantonales complètent ce principe et concrétisent les démarches à entreprendre. Ce devoir de compensation touche tous les projets de classement en zone à bâtir et de construction, et il s'applique également aux projets hors des zones à bâtir. La consommation de SDA est soumise à l'approbation du service cantonal de l'aménagement du territoire compétent. La compensation fait partie intégrante du projet et est une condition au permis de construire. Il est donc nécessaire que les maîtres d'ouvrage tiennent compte du plan sectoriel SDA dès les premières phases de planification.

Conséquences pour la planification de projets touchant des SDA:

- > Éviter dans la mesure du possible de toucher à des SDA. Il faut à cet effet consulter les inventaires SDA cantonaux et les plans d'affectation des communes concernées.
- > Peser soigneusement les intérêts en présence: si le projet ne peut pas être réalisé ailleurs que sur des SDA, il faudra le justifier et le démontrer.
- > Si un impact sur des SDA est inévitable, prévoir un projet de compensation dès la phase d'élaboration du projet de détail, sachant que ce dernier nécessitera aussi une autorisation et un suivi. Il s'agit dans la plupart des cas de projet de réhabilitation de sols dégradés.
- > Prendre contact le plus tôt possible avec les services cantonaux en charge de la protection des sols et de l'aménagement du territoire, afin de trouver une surface de compensation adéquate.
- > Lors du choix d'un tracé linéaire, il faut éviter de traverser en diagonale des SDA. L'option à privilégier est de passer en bordure des parcelles. Ce qui permettra aussi de prévenir des risques supplémentaires de compaction des sols pendant la phase d'exploitation, par exemple lors de travaux de réparation de conduites.

¹¹ Art. 26, al. 1, OAT.

¹² Art. 26 ss, OAT.

1.6 Types de chantiers et modes d'utilisation des sols

Les activités de construction d'infrastructures et de bâtiments n'ont cessé de se développer ces dernières années, les chantiers s'étendent de plus en plus en régions de montagnes même à haute altitude, et touchent des zones forestières ou urbaines. Un choix de situations de chantiers en précisant chaque fois leurs enjeux, leurs caractéristiques pédologiques particulières et leurs conséquences pour la planification et la réalisation des projets sera présenté ci-après. Les principes, objectifs et mesures générales de protection des sols restent valables dans tous les cas de figure présentés.

1.6.1 Chantiers en milieux forestiers

Comme dans tous les autres cas, il importe de réduire au strict minimum les emprises du chantier sur les sols tout en limitant les défrichements forestiers. La place disponible étant souvent très restreinte, il est possible que cette situation entraîne un conflit d'objectifs et amène à privilégier la protection de la forêt au détriment d'autres aspects environnementaux comme les sols.

Enjeux de la protection des sols forestier

Les principaux enjeux pour les planificateurs de chantiers en milieux forestiers sont résumés ci-après:

- > limitation au strict minimum des emprises sur la forêt tout en prévoyant suffisamment de place pour l'entreposage conforme des matériaux terreux et pour les pistes d'accès et les installations de chantier, en particulier pour les chantiers linéaires (cf. fig. 9);
- > le déplacement du sol forestier, que ce soit lors de la mise en dépôt ou de la remise en état, est une opération délicate qui doit être effectuée sans pertes de matière organique et sans désagrégation de la structure;
- > traitement des souches, en sachant que les mesures et les procédés vont fortement varier en fonction de la durée et de la grandeur des emprises du chantier;
- > remise en état et objectif de replantation à fixer en étroite collaboration avec les exploitants forestiers concernés.

Il est donc primordial de prévoir les mesures spécifiques au stade de la planification du projet, en prenant contact avec le propriétaire forestier, le chef d'exploitation et le service forestier cantonal concerné. Les conséquences concrètes pour la planification sont décrites dans le tableau 4.

Fig. 9 > Chantier en milieu forestier – A16 «Transjurane» de Boncourt (JU) à Bienne (BE)

Décapage après broyage des souches



Source: P. Studer

Ils possèdent des caractéristiques pédologiques particulières, comme un pH acide, une litière importante, des structures meubles (agrégats) fragiles. Ils sont donc plus difficiles à manier et à entreposer. Les possibilités de valorisation et de réutilisation hors milieu forestier restent en outre plus limitées, même s'il existe aujourd'hui des techniques de compostage performantes rendant le mélange terre/racines/bois broyés réutilisable en tant qu'amendement agricole.

Particularités

Pour les travaux de terrassement dans des sols forestiers, la présence des souches constitue par ailleurs une contrainte supplémentaire, et la manière de les traiter sera déterminante dans les différentes étapes du suivi du chantier. Les méthodes de dessouchage vont déterminer par exemple le choix des machines forestières utilisées lors du défrichage, l'épaisseur des couches qui seront décapées, la qualité de la litière, et la quantité des copeaux en surface. Par ailleurs, les terrains engorgés en permanence sont plus fréquents en milieux forestiers que dans les terres agricoles labourées.

Le droit forestier (loi sur les forêts LFo et ordonnance sur les forêts OFo) protège la forêt en tant que biocénose dans son état initial. Le sol étant une ressource indispensable aux associations végétales qui y poussent, les propriétés pédologiques nécessaires à la vie doivent également être conservées. En vertu de l'art. 28 de l'ordonnance sur les forêts, les cantons sont tenus de prendre des mesures pour réduire les charges physiques du sol.

Dispositions légales applicables aux sols forestiers

Tab. 4 > Recommandations pour la planification et la réalisation en milieux forestiersRecommandations –
Chantiers en milieux forestiers

Caractéristiques pédologiques et particularités	Principales contraintes et conséquences pour des travaux de génie civil
Limitation des surfaces de défrichement, place disponible pour le chantier et l'entreposage des matériaux terreux très restreinte	Pesée d'intérêts entre les ressources «bois» et «sol» à réaliser lors de la phase d'avant-projet. Mieux vaut prévoir des défrichements ponctuellement plus importants afin de garantir une place suffisante pour les dépôts de matériaux terreux.
Suivi des travaux de défrichement	Les entreprises forestières doivent intervenir avec des machines adéquates dans des sols forestiers suffisamment ressuyés et faire appel, en cas de besoin, à un spécialiste de la protection des sols.
Plus grande variabilité de la profondeur des couches du sol, topographie mouvementée (souvent en pente), et présence récurrente de zones d'alimentation de sources	Relevé du peuplement forestier et de ses fonctions. Cartographie des sols. Une échelle plus détaillée que 1:5000 s'avère parfois nécessaire.
Couche supérieure (horizon humifère) de constitution très variable, on observe souvent un horizon B/C avec roches et cailloux et de grosses racines	La recommandation générale est de séparer au moins la couche supérieure de la couche sous-jacente des sols si l'horizon humifère supérieur est suffisamment important (horizon Ah). Si cela n'est pas le cas, il faut décaper la couche sous-jacente avec la mince couche supérieure.
Sols forestiers fréquemment acides avec des structures (agrégats) fragiles, risque de lessivage	Prévoir suffisamment de surfaces de défrichements temporaires, afin de respecter les hauteurs maximales des dépôts. Ensemencement recommandé pour des dépôts de longue durée, avec des mélanges garantissant un enracinement profond. Attention: les mélanges pour sols agricoles ne sont pas tous adaptés aux sols forestiers.
Desserte forestière plus ou moins développée avec accès au chantier pouvant être fortement limité	Pour accéder aux surfaces de défrichement et à celles prévues pour les installations de chantier, il faut veiller à utiliser la desserte forestière en place (layons). Si celle-ci n'existe pas, elle doit être planifiée avec les exploitants. En milieu forestier, on privilégiera des pistes de copeaux de bois d'une épaisseur minimale de 50 cm.
Présence et gestion des souches	Ne dessoucher que l'emprise de la fouille. Eviter si possible de dessoucher l'emprise pour l'entreposage des matériaux, les accès et la place de chantier. Il existe plusieurs méthodes d'extraction des souches, mais la variante la plus adaptée à la protection des sols et celle qui utilise un engin à chenilles avec bras articulé porte-agrégat (pince d'extraction, puis broyeur à marteaux). Les souches sont extraites comme avec un «tire-bouchon», puis reposées sur le sol où elles sont ensuite réduites en copeaux.
Replantation/repeuplement de la station	Définir l'objectif final «d'utilisation» forestière lors de la planification. Si les conditions sont favorables, on peut planter directement des essences «définitives» et économiquement intéressantes comme le chêne, le hêtre ou le sapin. Si ce n'est pas le cas, il est recommandé de planter tout d'abord des essences pionnières comme le pin, le bouleau ou l'aulne.
Acteurs forestiers à associer	Prévoir suffisamment de réserve de temps pour les tâches de planification et de négociations avec tous les acteurs concernés (propriétaires forestiers, chef d'exploitation et services forestiers).

1.6.2 Chantiers en milieux subalpins et alpins

Sont considérés ci-après comme chantiers alpins les chantiers compris entre 1000 et 3000 m d'altitude. Les sols en milieux alpins sont soumis à une dynamique plus importante qu'en plaine (phénomènes d'érosion et d'altération physique plus rapides, essentiellement en raison du climat et de la topographie). Ces conditions rendent particulièrement difficiles les mouvements de terre, la remise en état et la végétalisation (cf. fig. 10).

Particularités

Fig. 10 > Chantier en milieu subalpin – amélioration du sol à Château d'Oex (VD), 1450 m d'altitude

Entreposage des matériaux terreux: végétalisation et pose de clôtures



Source: V. Maître, pEaudeSol

Les contraintes de la remise en état nécessitent des techniques particulières, comme le prélèvement par plaque du gazon alpin ou une végétalisation adaptée à l'altitude. Une autre contrainte souvent oubliée dans la phase de planification est la gestion des matériaux d'excavation et leur valorisation sur place, qui doivent être prévues et intégrées dans un concept paysager.

Contraintes

Les principales contraintes sont liées (cf. tab. 5):

- > au climat rigoureux et changeant, qui limite la période d'intervention;
- > à l'éloignement et à l'accessibilité;
- > aux dangers naturels, qui rendent les conditions de travail difficiles et pénibles;
- > aux milieux naturels fragiles et difficiles à reconstituer;
- > à l'impact paysager élevé des travaux;
- > à la forte hétérogénéité des sols à petite échelle.

Cas particulier des sols influencés par la présence de métaux d'origine géogène (comme le cadmium, le plomb ou le sélénium, non seulement dans la couche supérieure mais aussi dans les couches sous-jacentes). Ces métaux nécessitent des analyses supplémentaires et limitent les possibilités de valorisation.

Tab. 5 > Recommandations pour la planification et la réalisation en milieux subalpins et alpins

Recommandations – Chantiers
en milieux subalpins et alpins

Caractéristiques pédologiques et particularités	Principales contraintes et conséquences pour des travaux de génie civil
Sols jeunes, peu évolués, se distinguant fréquemment par une couche supérieure mince, une couche sous-jacente parfois inexistante, et une forte variabilité des épaisseurs à faible distance	Risque élevé de pertes de sols, d'érosion et de lessivage des composants fins des couches supérieures. Il faut manier avec précaution les matériaux terreux fins.
Période de végétation limitée	Période de construction réduite à 3 à 5 mois dans l'année. D'où la nécessité d'une parfaite coordination et planification des travaux.
Productivité et activité biologique limitées, milieux naturels fragiles et difficiles à reconstituer, climat rigoureux	Remise en état accélérée des sols, de la végétation et des milieux naturels. Organiser de courtes étapes de travail. Opter si possible pour une remise en état directe par le procédé des plaques de gazon alpin. En cas d'ensemencement utiliser des semences adaptées à la station. Attention au coût élevé de la remise en état des milieux: prévoir un budget suffisant (3 à 4 fois plus élevé qu'en plaine!).
Grande hétérogénéité des sols, de la végétation et des milieux naturels à petite échelle (mosaïque de milieux)	Il est plus pertinent de faire un relevé de végétation et de la diversité à petite échelle des milieux naturels, avec les données pédologiques nécessaires à la gestion des sols, car la cartographie selon la méthode FAL n'est souvent pas adaptée aux objectifs visés.
Chantiers souvent isolés et difficiles d'accès, gradient d'altitude parfois important, topographie accidentée	Valorisation des matériaux d'excavation sur place. Chercher des solutions compatibles avec la protection de la nature et du paysage, en collaboration avec les services concernés.
Nombreux intervenants avec des intérêts divergents et des temps de traitement de dossier très différents: propriétaire foncier, promoteurs (ou maître d'ouvrage), agriculteurs, autorités, milieux touristiques, chasseurs, organisation de protection de la nature	Prévoir suffisamment de réserve de temps pour les tâches de planification et de négociations avec tous les acteurs impliqués, y compris d'éventuelles visites de terrain. Si l'on veut pouvoir démarrer le chantier tout de suite après la fonte de la neige, le dossier d'autorisation de construire devrait être déposé l'année précédant les travaux.

1.6.3 Chantiers en zone de montagne du Jura

Sont considérés ci-après comme chantiers en zone de montagne du Jura, les chantiers réalisés dans des zones de pâturages boisés et de pâturages de l'étage montagnard du Jura (de 800–1000 m jusqu'à 1700 m d'altitude.)

Les situations rencontrées à ces altitudes ne sont pas aussi extrêmes que dans les zones alpines, mais présentent des particularités et des facteurs géologiques et climatiques dont il faut tenir compte (cf. tab. 6):

Particularités

- > *Présence de sols karstiques et de grottes souterraines:* ces sols étant très filtrants, les conséquences de pollutions par des chantiers situés sur la nappe phréatique peuvent être très rapides et importantes. Les vibrations générées par des chantiers peuvent aussi causer des dégâts aux formations souterraines (grottes).
- > *Présence de dolines:* ces formations géologiques protégées nécessitent une attention particulière. Si ces zones se trouvent dans les emprises définitives du chantier, elles permettent une récupération importante de matériaux de la couche sous-jacente (les matériaux terreux faisant souvent défaut pour les remises en état sur ces chantiers).
- > *Sols pâturés et pâturages boisés:* dans ces zones, les matériaux terreux sont souvent mélangés avec du bois et des pierres qui rendent leur valorisation et réutilisation plus difficiles. Pour cette raison, ils sont couramment employés pour la restitution de surfaces forestières ou mis en décharge. Les remises en état sont plus exigeantes et la phase de convalescence demande plus de temps et une étroite collaboration avec les exploitants du pâturage, les syndicats et les bourgeoisies. Lors de la reconstitution des terrains, il arrive fréquemment que l'on procède à des gyrobroyages des pierres en surface en vue de faciliter l'exploitation ultérieure des pâturages. Ces opérations ont toutefois un effet dévastateur sur la structure des sols.

Fig. 11 > Chantier en zone de montagne du Jura – pose d'une ligne électrique souterraine appartenant à la BKW Berne SA

Pose avec trancheuse



Source: B. Wuthrich, FRI Courtételle

- > *Sols peu profonds et très caillouteux*: la présence de couches de sol très caillouteuses rend le décapage avec une pelle rétro quasi impossible. Pour la pose de conduites linéaires, on fait donc souvent appel à des trancheuses. Ces machines ont l'avantage de limiter les emprises et d'être très performantes, mais elles présentent l'inconvénient de mélanger les couches du sol (cf. fig. 11). Ce type de sol peut être également très sensible à la compaction.
- > *Sols influencés par la présence de métaux d'origine géogène* (p. ex. le cadmium, non seulement dans la couche supérieure mais aussi dans les couches sous-jacentes): ces métaux lourds nécessitent des analyses supplémentaires et limitent les possibilités de valorisation.

Tab. 6 > Recommandations pour la planification et la réalisation dans des pâturages de l'arc jurassien

Recommandations – Chantiers en zone de montagne du Jura

Caractéristiques pédologiques et particularités	Principales contraintes et conséquences pour des travaux de génie civil
Sols souvent peu profonds, avec un horizon A superficiel (5–10 cm), pierrosité élevée. Alternance de différents types de sols sur de petites distances, topographie mouvementée, mélange de bois, de pierres et de terre, marais, etc.	Pour la pose de conduites linéaires, procéder au décapage préalable de la couche supérieure avec une pelle rétro. La terre est mise en dépôt temporaire le long du tracé. En fonction des besoins du chantier (conduites lourdes, etc.), une emprise supplémentaire peut être décapée pour servir de piste provisoire (horizon C) sur laquelle circuleront les engins lourds. Puis, dans une deuxième étape, effectuer le restant des travaux de décapage avec une trancheuse.
Présence de sols sur karst	En raison de la capacité de filtration du sol en place, il faut éviter de mettre à nu des surfaces où le karst affleure. Ces zones doivent être clairement délimitées avant le début des travaux et ne pas être utilisées pour les installations de chantier.
Adaptation de la végétalisation des dépôts	Des mélanges à base de trèfle rouge sont recommandés, car l'utilisation de la luzerne n'est souvent pas possible en raison des types de sols et de l'altitude, de la période de semis plus restreinte et de la problématique des campagnols. Au printemps, une incorporation de 20 % d'avoine dans le mélange garantit une couverture plus rapide.
Problématique du pacage	Restitution et remise en état plus difficiles à gérer. Dans les pâturages d'estivage communautaires, les secteurs de chantier restitués devraient être clôturés. Le contexte ne le permet toutefois pas toujours.
Multiples acteurs concernés (commune, bourgeoisies, syndicats d'exploitants, exploitants, forestiers)	Bien définir avec chaque partie les rôles respectifs à remplir durant les différentes étapes du chantier.

1.6.4

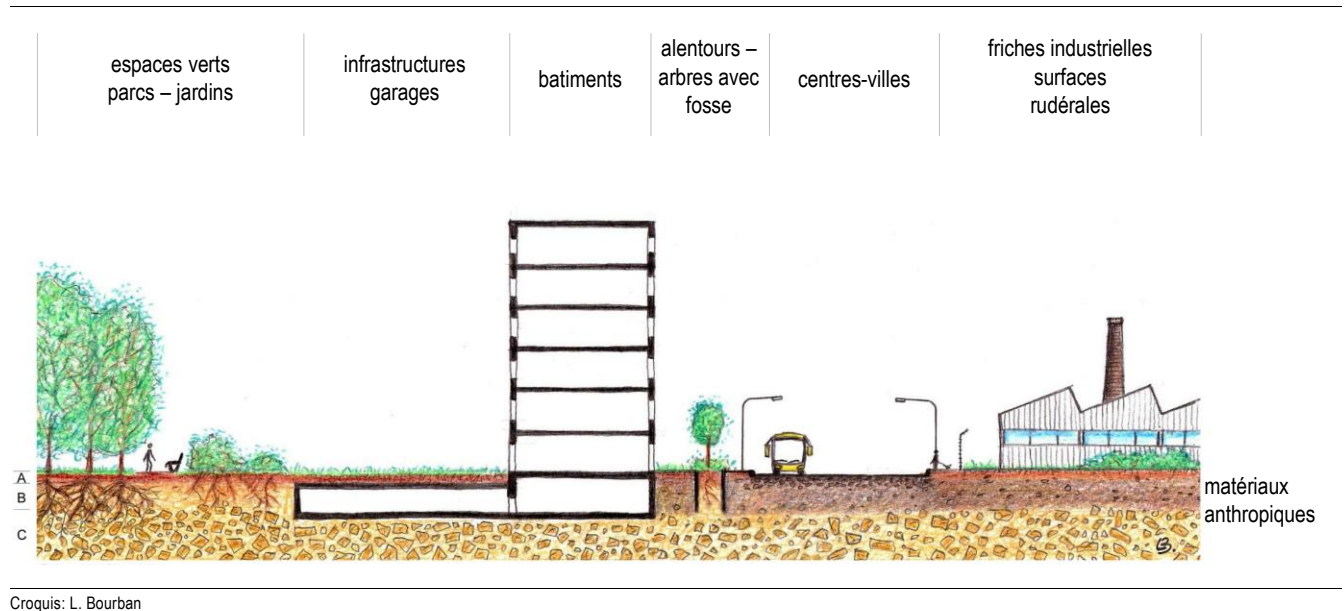
Chantiers en milieux urbains

Les sols urbains sont des sols qui ont été plus ou moins modifiés par les activités humaines non agricoles, par opposition aux sols naturels situés hors des zones urbanisées. On parle de sols anthropiques (cf. définition dans le module 1, chapitre 1.2 «Terminologie»).

Suivant leur âge et leur histoire, on distingue parmi eux des sols urbains naturels, quasi naturels (sols transformés) ou majoritairement formés par l'homme – *sols archéologiques, reconstitués, construits, anthropiques (technosols) ou imperméabilisés*. Cette grande diversité de situations urbaines avec son corollaire de profils de sols est l'une des caractéristiques des milieux urbains (cf. fig. 12). Ils composent une mosaïque spatiale horizontale, pouvant s'étendre de quelques m² à plusieurs hectares pour des parcs publics.

Particularités

Fig. 12 > Illustration de différentes situations urbaines caractéristiques avec des profils et des natures de sols très variables



Autant il est important pour les sols agricoles de conserver leur fertilité à des fins de production, autant il est essentiel chez les sols urbains de préserver une multitude de fonctions régulatrices nécessaires au bon fonctionnement de l'écosystème urbain. On se réfère ici non plus seulement à la qualité du sol, mais à la notion de sols sains (les pays anglo-saxons parlent de «healthy soils»¹³). Par conséquent, la gestion des sols en milieu urbain se fera sur la base d'objectifs de maintien des fonctions premières définies selon les situations urbaines considérées.

Les sols urbains permettent notamment d'assurer:

- > une régulation thermique (microclimat influencé par l'évaporation);
- > l'épuration des eaux pluviales et la pérennité des nappes d'eaux souterraines;
- > une fonction de production qui garantit le maintien et la qualité des plantations en milieu urbain (arbres, gazons, haies, potagers et parcs urbains, etc.);
- > le maintien du cycle des matières organiques et des éléments nutritifs du sol;
- > une contribution au maintien de la nature en ville et de la biodiversité dans les environnements urbains;

¹³ Natural Resources Conservation Service (NRCS), United States Department of Agriculture (USDA).

- > une mémoire culturelle (vestiges archéologiques enfouis dans les sols);
- > une contribution à la qualité de vie et à l'esthétique des milieux bâtis.

Les chantiers en milieux urbains doivent faire face à des contraintes particulières (cf. tab. 7 et fig. 13):

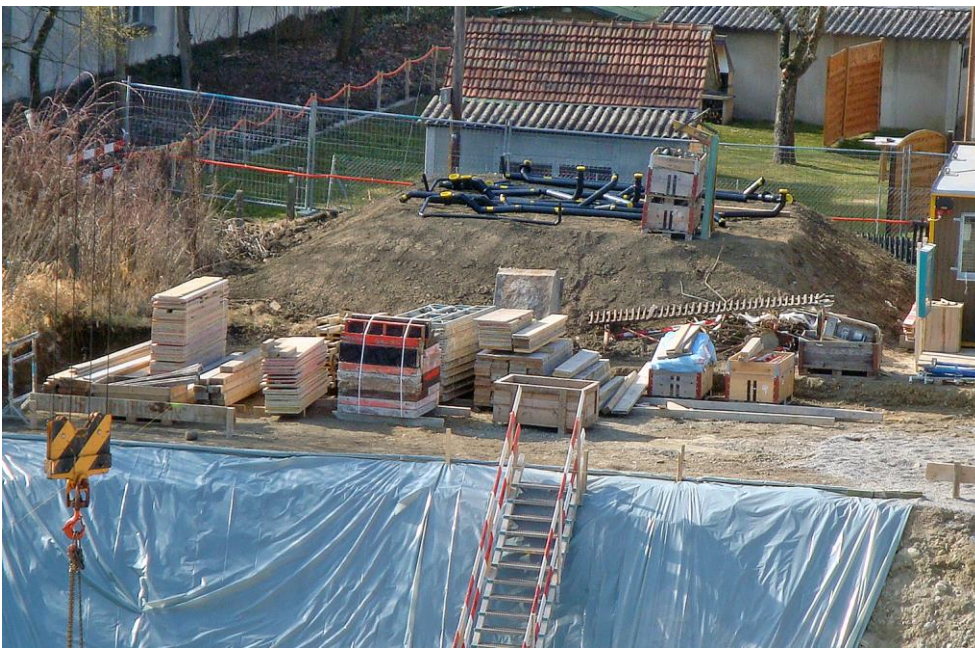
Contraintes

- > la place disponible pour l'entreposage temporaire des matériaux terreux est souvent très limitée;
- > la traçabilité des mouvements de terres doit être assurée, en particulier si des matériaux terreux doivent être entreposés provisoirement hors du chantier;
- > les matériaux terreux à gérer présentent souvent une pollution diffuse, avec des matériaux «pollués» ou «peu pollués» ne pouvant pas toujours être réutilisés sur place.

En résumé, les contraintes concernent: la gestion des volumes de terres, les surfaces d'entreposage et les solutions de *valorisation*.

Fig. 13 > Chantier en milieu urbain – chantier du bâtiment de l'ARE à Ittigen (BE)

Dépôt de matériaux terreux (à arrière-plan) utilisé pour entreposer des matériaux!



Source: R. von Arx, OFEV

Tab. 7 > Recommandations pour la planification et la réalisation en sols urbains

Caractéristiques pédologiques et particularités	Principales contraintes et conséquences pour des travaux de génie civil
Fonctions régulatrices des sols urbains prépondérantes	Définir les fonctions prioritaires à maintenir/créer pour les sols touchés par le projet et formuler des objectifs de remise en état (profondeur des couches du sol à reconstituer par exemple).
Sols perturbés ou dégradés Le profil pédologique ne présente pas une succession naturelle des horizons (horizon A, B, C). Par exemple faible épaisseur de terre végétale directement posée sur un remblai	Simplification des mesures de protection des sols admissible pour les décapages, mais soigner particulièrement la remise en état. Apports de matière organique (ou plantations améliorantes). Reconstituer un sol à deux couches (couche supérieure et couche sous-jacente du sol) de meilleure qualité qu'à l'état initial (améliorer la situation). Élimination de la terre polluée (y compris déchets de chantier) ou dont la structure est détruite.
Sols souvent pollués (Cu, Pb ou Zn issus des toitures métalliques ou des routes voisines), polluants organiques, salinisation	Ces matériaux terreux doivent être si possible valorisés sur place (cf. Instruction Matériaux terreux). Prévoir une stratégie de réutilisation et de valorisation pour les matériaux non pollués et peu pollués dès la phase d'étude du projet, puis un plan de gestion des sols pour la phase de réalisation. En ce qui concerne les matériaux pollués, il faut planifier leur élimination en décharge (stockage définitif).
Présence de déchets de chantier (p. ex. débris de béton, briques, plastique)	Ces matériaux exogènes doivent être récupérés et éliminés.
Espace restreint pour le mouvement et l'entreposage des sols ainsi que pour les installations de chantier	Planifier une surface suffisante pour l'installation de chantier, y compris les dépôts, dans le cadre de la demande d'autorisation de construire (ne pas attendre la phase de réalisation). En cas de dépôts temporaires de matériaux terreux hors de la zone à bâtir, sur des parcelles agricoles par exemple, planifier les mesures de protections des sols et de remise en culture et prévoir un projet d'indemnisation pour les dépôts temporaires (selon les directives de l'Union Suisse des Paysans). Garantir la traçabilité des matériaux terreux exportés et importés sur le chantier.

Pour rappel, les contraintes usuelles pour les autres types de sol s'appliquent également aux sols urbains.

Recommandations –
Chantiers en milieux urbains

1.7 Contraintes sol pouvant découler d'un projet

Selon les types de sols rencontrés sur le chantier et leur utilisation, les contraintes posées lors de la réalisation d'un projet en matière de protection qualitative des sols peuvent fortement varier. Les questions ci-après visent à synthétiser les différents facteurs et paramètres à prendre en compte dans la planification. Elles n'interfèrent en aucun cas avec des exigences administratives liées à une procédure d'autorisation de construire (permis communal, permis soumis à approbations cantonales, projet soumis à EIE au niveau cantonal ou fédéral, projets de entreprises fédérales, etc.). Les réponses à ces questions servent à préciser l'ampleur des impacts sur les sols et ne remplacent pas une évaluation précise par un spécialiste des sols.

Question 1: Quelle est l'utilisation actuelle du sol et dans quelle zone climatique se trouve mon projet?

Utilisations

On distingue les situations suivantes:

- > zone agricole de plaine;
- > zone de montagne du Jura (de 800–1000 jusqu'à 1700 m d'altitude);
- > zone subalpine et alpine (entre 1000 et 3000 m d'altitude);
- > zone forestière;
- > zone urbaine.

Les exigences en matière de protection des sols sont valables dans toutes les situations. En revanche, les contraintes en termes de génie civil diffèrent et nécessitent de ce fait des mesures particulières, qui sont décrites dans le chapitre 1.6 du présent module.

Remarque: les surfaces figurant dans des inventaires ou zones de protection particulières au niveau communal, cantonal ou fédéral, peuvent interférer avec les buts de la protection des sols.

Question 2: Quelle est l'importance des emprises et des décapages?

Emprises

Lors de travaux de génie civil, il convient de faire une distinction entre les emprises temporaires sur les sols, et les emprises définitives (sans remise en l'état initial). C'est le total des emprises qui sera déterminant pour l'autorité chargée de fixer les conditions d'octroi du permis de construire. Concernant les volumes de matériaux terreux qui seront exportés définitivement hors du périmètre du chantier pour être réutilisés ou mis en décharge, il est important de différencier le volume issu de la couche supérieure du sol (horizon A) de celui issu de la couche sous-jacente (horizon B). La distinction entre petit et grand chantier est sujette à de nombreuses interprétations et discussions. La majorité des cantons exige un suivi par un spécialiste de la protection des sols sur les chantiers (SPSC) à partir d'une emprise sur une surface de 5000 m² ou pour un chantier linéaire d'une longueur de 1000 m¹⁴. Il faut se référer à l'autorité cantonale compétente pour connaître les exigences en la matière.

Question 3: Quel est le type d'emprise sur les sols de mon projet?

Types d'emprise

Les trois cas de figure suivant sont proposés dans cette publication:

- > le sol fait l'objet d'une emprise définitive avec décapage intégral et exportation des matériaux terreux hors du périmètre du projet;
- > le sol est réutilisé sur place pour la création d'espaces verts et/ou de milieux naturels qui ne correspondent plus à l'état initial;
- > le sol est décapé, puis remis en place conformément à l'état initial, avec une remise en culture complète (p. ex. chantiers linéaires).

¹⁴ On notera que le Land du Bade-Wurtemberg en Allemagne a envisagé de fixer le chiffre de 5000 m² dans sa législation. Cf. Bodenkundliche Baubegleitung BBB. Leitfaden für die Praxis. Bundesverband Boden (BVB), 2013.

Question 4: Quelles sont les caractéristiques des sols à décapier?

- > Existe-t-il des données accessibles sur la nature et les caractéristiques des sols (cartes pédologiques, bases de données sur les sols)?
- > Existe-t-il des indices d'une pollution chimique du sol, ou de la présence de plantes envahissantes? Dans l'affirmative, il faudra établir comment les sols décapés seront recyclés ou éliminés.
- > Existe-t-il des indices de présence de vestiges archéologiques sur le site touché par les décapages et les excavations? Dans l'affirmative, il faudra tenir compte dans la planification d'éventuels arrêts de chantier ou campagnes préliminaires de fouilles.

Caractéristiques des sols à décapier**Question 5: Quelle est la durée du chantier et comprend-elle une période d'hivernage?**

La réponse à cette question déterminera par exemple le type d'entreposage des matériaux terreux (forme et emplacement) et les mesures d'ensemencement et d'entretien des dépôts. Elle influencera également toutes les mesures de protection des sols.

Durée du chantier

2 > Planification des mesures de protection des sols

Les normes SIA et VSS structurent le processus de construction d'un ouvrage en trois phases principales, elles-mêmes subdivisées en sous-phases. La terminologie désignant ces phases varie selon les normes: phase I = développement, avant-travaux, respectivement projet et études préliminaires; phase II = réalisation, pendant travaux, respectivement constructions et emprises; phase III = exploitation, après-travaux, respectivement remise en place et restitution.

Dans ce module, une approche correspondant aux bonnes pratiques actuelles de planification est proposée. Elle vise à mieux intégrer les exigences de l'environnement et de la protection des sols avant la phase d'appel d'offres et à clarifier et préciser les rôles et les tâches des différents acteurs. Cette procédure permet de recevoir des devis descriptifs détaillés, d'avoir une vision réelle des coûts, et de diminuer les imprévus et les avenants.

Les consultations menées avant cette publication ont permis de constater que la phase d'appels d'offre des travaux n'était souvent pas synchronisée avec le retour des exigences des autorités liées au permis de construire¹⁵, qui ne peuvent alors plus être satisfaites lors de la réalisation. Afin d'éviter cette situation, le projet de l'ouvrage et le descriptif technique (avec coûts et délais) devraient tenir compte des conditions du permis de construire pour que celles-ci puissent être intégrées dans l'appel d'offre.

Toutes les considérations de ce module se basent essentiellement sur les normes SIA et VSS. Le degré de détail de la phase de développement est influencé par l'importance des mesures de protection des sols dans le projet considéré.

Messages importants pour les maîtres d'ouvrage et les planificateurs:

- > *La protection des sols est une question d'anticipation. Planifiée suffisamment tôt dans le projet, elle permet de reconnaître les éventuels conflits d'intérêt et de limiter les dépenses et les imprévus.*
- > *La protection des sols est une affaire de spécialistes. Ces derniers sont intégrés dès les études préliminaires. Leur cahier des charges est défini et adapté au projet.*
- > *Elaboration d'un «concept de gestion des sols»¹⁶. Ce document est réalisé par le spécialiste engagé. Les informations qu'il contient servent de base à l'élaboration du projet de l'ouvrage en permettant d'évaluer et adapter en conséquence le dimensionnement et les méthodes choisies. Le dossier de mise à l'enquête est ensuite établi à partir du projet de l'ouvrage.*

¹⁵ Notion définie au sens du droit fédéral de l'aménagement du territoire et des constructions (art. 22 LAT). Voir aussi arrêt du Tribunal fédéral, ATF 113 Ib 314 consid. 2b au sujet de la notion d'installation soumise à autorisation de construire.

¹⁶ La terminologie peut varier selon les cantons et les maîtres d'ouvrages: en français, les termes suivants sont le plus souvent utilisés: «notice de protection des sols», «plan de gestion des sols», «concept de mouvement et restitution des terres».

- > *Conditions sols du permis de construire: l'instance compétente vérifie si le projet soumis correspond aux exigences relatives à la protection des sols. Si ce n'est pas le cas, elle formule des conditions concernant la protection qualitative des sols. Ces conditions revêtent bien entendu un caractère contraignant pour le maître d'ouvrage (MO). Ce dernier peut faire appel à un bureau d'étude spécialisé pour se faire conseiller pour leur mise en œuvre.*
- > *Intégration des mesures de protection des sols dans les documents d'appel d'offres (plans d'exécution, descriptif technique, conditions particulières, devis descriptif): afin que les mesures aient un caractère obligatoire et contraignant pour les entreprises, il faut veiller à les intégrer dans les documents d'appel d'offres, en particulier dans le devis descriptif et les séries de prix. Concrètement, les mesures de protection des sols sont décrites dans le langage du CAN (catalogue des articles normalisés), de manière qu'elles puissent être chiffrées en termes de coûts et de prestations.*
- > *Si l'autorité administrative compétente exige un concept (ou une notice) de remise en culture avant la restitution finale de la parcelle à un utilisateur, le maître d'ouvrage est responsable de sa mise en œuvre et doit informer l'exploitant/propriétaire des conséquences qui en découlent.*

2.1 Intégration des mesures de protection des sols

Les étapes de projet et les prestations à fournir par les bureaux d'études («prestations d'études» dans le texte ci-après) sont tirées du modèle de prestations du Règlement SIA 112/2001¹⁷ et de la norme SN-VSS 640 026¹⁸. Le modèle de prestations a servi de référence pour établir dans l'appel d'offres les prestations à fournir¹⁹. Sous le point «résultats» sont spécifiés les documents à remettre dans le domaine des sols. Pour les prestations à fournir par les entreprises (phase d'appel d'offres et d'exécution des travaux), les documents de référence utilisés sont ceux de la Société Suisse des Entrepreneurs (SSE).

2.1.1 Phase 1: Définition des objectifs

*Prestations d'étude selon la norme SIA 112/2*²⁰: collecte des données de base du projet et vérification des objectifs principaux et des conditions-cadres du projet.

Tâches sols: le maître d'ouvrage, avec l'aide de son bureau d'assistance spécialisé (BAMO), fait une première évaluation de l'importance du projet au niveau des sols. Il peut s'appuyer pour cela sur les questions proposées dans le module 1, chapitre 1.7 «Contraintes sol pouvant découler d'un projet». A ce stade, sans relevé de l'état initial, il n'est pas encore possible de formuler des objectifs détaillés pour la protection des sols. Il s'agit essentiellement de faire une première analyse des emprises et de proposer des solutions afin de diminuer l'impact sur les sols et les conflits potentiels avec les autres utilisations du terrain (agriculture, forêt, etc.).

Phase partielle 11:

Enoncé des besoins, approche méthodologique

¹⁷ Norme SIA 112/2001; SN 508 112. Valable jusqu'au 31.10.2014.

¹⁸ Norme SN-VSS 640 026 Elaboration des projets. Etapes de projet.

¹⁹ Norme SIA 112:2014; SN 509 112. Valable à partir du 1.11.2014.

²⁰ Norme SIA 112/2 Construction durable – Génie civil et infrastructures (projet consultation 2014)

Résultats: conditions-cadres et analyse des besoins en sols. Evaluation stratégique selon le modèle de la norme SIA 112/2.

2.1.2 Phase 2: Etudes préliminaires

Prestations d'études: détermination des conditions-cadres liées au site (aménagement, géologie, etc.) et de la nécessité de procéder ou non à une procédure d'impact sur l'environnement (EIE). Des études de variantes et de faisabilité sont réalisées.

Phase partielle 21:

Définition de l'objet, étude de faisabilité

Tâches sols: première description de l'état initial sur la base d'une collecte de toutes les données contenues dans les divers inventaires et dans les plans d'aménagement (cf. fig. 14). Ces conditions-cadres permettent ensuite d'évaluer les différentes variantes du projet de construction et de choisir ainsi l'implantation optimale. Une première appréciation qualitative pourra se faire (surfaces d'assolement, présence de sols pollués, risques, etc.).

Résultats: première description de l'état initial des sols touchés, plan d'utilisation des sols.

Prestations d'études: choix des prestataires, ou du projet, répondant le mieux aux exigences.

Phase partielle 22:

Procédure de choix de mandataires

Tâches sols: choix des prestataires spécialisés dans l'environnement, en particulier dans le domaine des sols si nécessaire. Engagement d'un pédologue ou d'un spécialiste de la protection des sols sur les chantiers (SPSC) pour effectuer les premières études concernant les sols.

Résultats: cahier des charges pour le choix du mandataire spécialisé sol (pédologue ou SPSC), engagement.

2.1.3 Phase 3: Etude du projet

Prestations d'études: élaboration des concepts exigés par le projet (p. ex. concepts paysager, d'aménagement et d'écologie). Les premiers plans et descriptions sont esquissés, et un premier rapport technique élaboré. Si le projet est soumis à étude d'impact, rédaction du rapport d'enquête préliminaire, qui servira de cahier des charges au rapport d'impact sur l'environnement (RIE).

Phase partielle 31:

Avant-projet

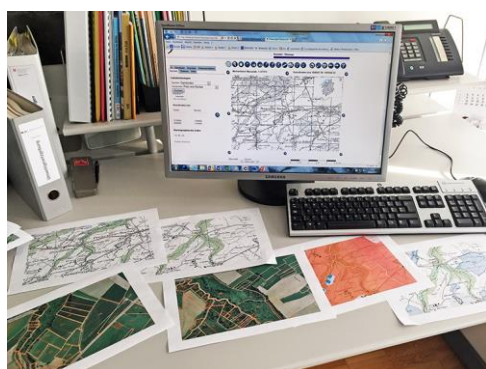
Tâches sols: sondages pédologiques sur le terrain, rédaction du concept de gestion des sols (ou notice sol), définition des objectifs de gestion et de remise en état des sols. Première orientation des exploitants des surfaces concernées par le maître d'ouvrage ou son mandataire spécialisé.

Résultats: rapport technique de l'avant-projet, concept de gestion des sols avec plan des emprises provisoires sur les sols. Le concept servira de base à l'élaboration du projet de l'ouvrage et contribuera à une meilleure estimation des coûts.

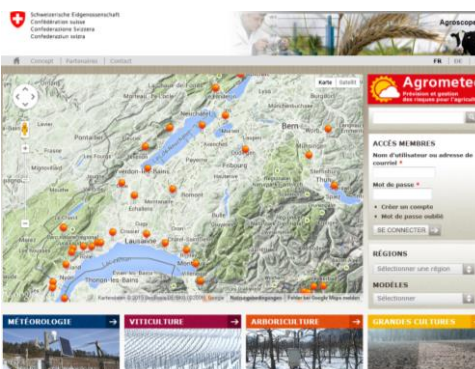
Prestations d'études: élaboration du projet définitif, avec plans de détail et dimensionnements de l'ouvrage. Calcul des emprises totales définitives; révision et compléments aux concepts; si le projet est soumis à EIE, rédaction du rapport RIE incluant un chapitre sols. Planification générale des travaux et devis général.

Phase partielle 32:
Projet de l'ouvrage

Fig. 14 > Données SIG d'un guichet cartographique **Fig. 15** > Données agro-météorologiques



Source: Guichet cartographique du canton de Fribourg



Source: www.agrometeo.ch

Tâches sols: révision et compléments au concept de gestion des sols (ou notice sol). Formulation du cahier des charges pour le suivi de la phase de réalisation. La planification des décapages s'effectue à ce stade et s'intègre dans l'échéancier général. Elle tient compte des périodes de végétation et de données de stations météorologiques (cf. fig. 15), et propose des durées de travaux suffisantes pour tenir compte de l'humidité des sols et des événements pluvieux nécessitant des arrêts des décapages.

Orientation des exploitants sur les questions de l'enherbement préalable des surfaces à décapier: Il est recommandé de passer une convention avec les exploitants des sols touchés par les emprises provisoires et de clarifier la question des indemnités²¹.

Si le bilan des matériaux terreux prévoit un excédent ne pouvant pas être valorisé sur place, il est recommandé d'inclure au dossier de mise à l'enquête un projet de valorisation des matériaux terreux avec plans détaillés.²²

Résultats: concept détaillé de gestion des sols, avec cahier des charges pour le SPSC portant sur la phase de réalisation. Si nécessaire, projet de valorisation des matériaux terreux excédentaires.

Prestations d'études: élaboration de la documentation et du dossier d'autorisation de construire. Si le projet est soumis à EIE, on y joindra le RIE définitif. Des demandes d'autorisation spéciales devront aussi être fournies à ce stade.

Phase partielle 33:
Procédure de demande d'autorisation / dossier de mise à l'enquête

Tâches sols: rédaction d'une notice séparé détaillant le respect des exigences de l'OSol, de la législation agricole et des autres prescriptions locales. Doivent notamment y figurer la description de l'état initial, les objectifs de protection, leur prise en compte dans

²¹ Guide pour l'estimation de dommages causés aux cultures. Union Suisse des Paysans (USP). Actualisation annuelle. Ce guide contient aussi un exemple de projet d'indemnisation pour des dépôts temporaires.

²² Directives sur les remodelages de terrain pour la réhabilitation du sol hors zone à bâtir. Canton de Berne. 2015.

le projet, les mesures particulières y compris les procédés de décapage et de réalisation des pistes et installations, le bilan des matériaux (non pollués et pollués), les plans avec zones de stockage (cf. fig. 16), pistes et installations de chantier, les mesures durant la phase de remise en culture et jusqu'à la restitution finale des sols aux exploitants.

Résultats: l'autorité vérifie si le dossier est bien complet et répond à toutes les exigences légales. Si ce n'est pas le cas, elle demande des documents supplémentaires au maître d'ouvrage, ou fait des remarques. Délivrance du permis de construire avec conditions environnementales et exigences pour la protection des sols.

Prestations d'études: adaptation du projet de l'ouvrage aux exigences des autorités.

Tâches sols: intégration des exigences des autorités de protection des sols dans le projet de l'ouvrage, si nécessaire adaptation du concept de gestion des sols par le SPSC, et adaptation des coûts et des délais. Si les autorités exigent l'engagement d'un SPSC dès la phase 4 «Appel d'offres», il faut établir son cahier des charges et le faire valider avant l'appel d'offres.

Résultats: projet de l'ouvrage prêt pour l'appel d'offres aux entreprises et permettant l'intégration des exigences de la protection des sols dans les documents de soumission. Dernier délai pour l'engagement d'un SPSC.

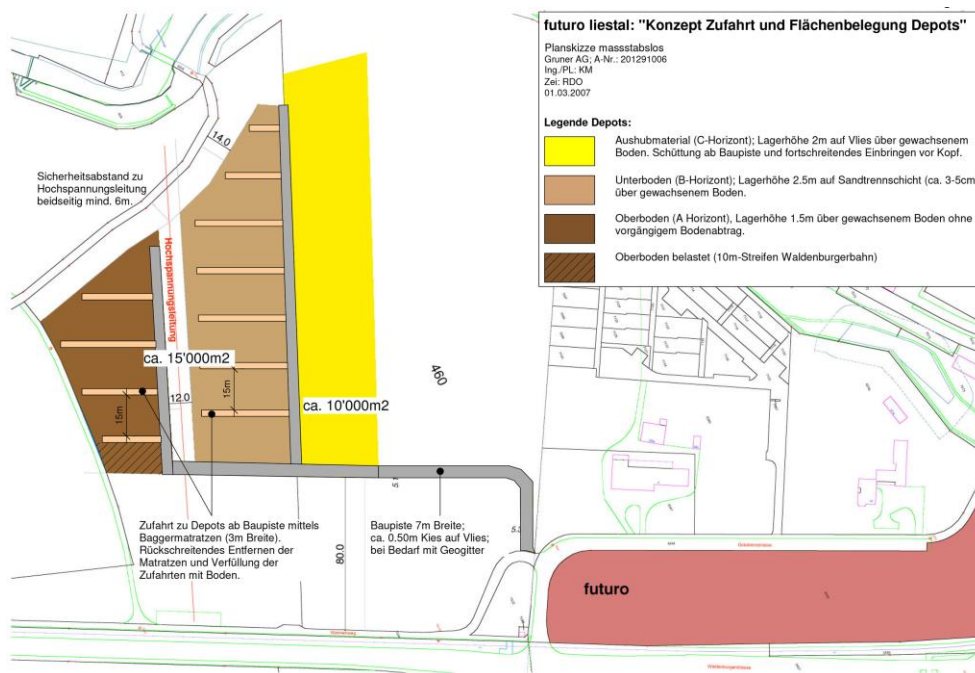
Phase partielle 332.3:

Mise à jour du projet de l'ouvrage

Phases partielles 333/334:

Mise à jour des coûts et des délais

Fig. 16 > Plan des zones de stockage, pistes et installations de chantier



Source: Atelier 5 (2013), sanu future learning sa, Rapp Infra AG

2.1.4 Phase 4: Appel d'offres

Prestations d'études: entre autres, proposition de critères d'aptitudes et d'adjudication.

Tâches à effectuer par les bureaux d'études: conformément à la Loi sur les marchés publics (LMP), et pour des questions d'uniformisation des critères, des critères d'aptitude et d'adjudication tenant compte des besoins de la protection des sols seront formulés. Un premier critère serait par exemple de séparer l'attribution des travaux de décapage de celle des travaux de terrassement. Ceci permettrait d'exécuter les décapages dans des conditions météorologiques plus favorables et avec des pelles sur chenilles légères.

Critères d'aptitude: ces critères sont liés au savoir-faire professionnel des entreprises et définissent les exigences que devront remplir les soumissionnaires pour pouvoir exécuter les travaux. Il est conseillé d'y spécifier les exigences relatives aux travaux de décapage des sols.

Exemples de critères d'aptitude intégrant la protection des sols:

- > *Qualité de la formation et du savoir-faire du personnel responsable et du personnel affecté à l'exécution du marché: machinistes avec expériences spécifiques dans des travaux de décapage. Fournir des références précises.*
- > *Ressources en personnel et en infrastructures (justificatifs: planning, renseignements sur le personnel et l'utilisation des machines): préciser pour les travaux de décapage la disponibilité du personnel qualifié et des machines de chantier exigées, en sachant qu'il faudra prévoir suffisamment de souplesse en fonction des conditions météorologiques.*
- > *Expériences acquises dans des projets similaires: fournir des références datées qui permettent de prouver l'expérience dans la protection des sols.*

Critères d'adjudication: ils peuvent être précisés dans les conditions générales et particulières ainsi que dans le devis descriptif.

Objectifs: élaboration des documents d'appel d'offres avec les plans et les descriptifs techniques annexés.

Tâches à effectuer par les bureaux d'études: intégration dans les documents d'appel d'offres des exigences de protection des sols découlant de l'autorisation de construire ainsi que de toutes les mesures formulées dans le concept de gestion des sols. Il faut éviter de les annexer aux documents d'appel d'offres sous forme de concept de la protection des sols ou dans les dispositions environnementales générales. Pour s'assurer que ces mesures seront chiffrées par les entreprises, les bureaux de planification doivent les formuler et les intégrer aux niveaux suivants:

- > *contrat provisoire:* formuler les exigences générales de protection des sols;
- > *conditions générales et conditions particulières:* formulation des conditions-cadres relatives à la protection des sols. C'est ici qu'il faut reprendre les exigences des

Phase partielle 41:

Appels d'offres, comparaisons des offres, propositions d'adjudication

Phase partielle 411:

Organisation

Phase partielle 412.1:

Elaboration des documents d'appel d'offres et de mise à l'enquête

autorités et les mesures spécifiques au projet décrites dans le concept de gestion des sols.²³

- > *catalogue des prestations/devis descriptif – positions du CAN²⁴ et liste des travaux en rapport avec les sols*: formulation des travaux à exécuter dans le domaine des sols et indication des métrés. Il faut notamment fixer les conditions pour les arrêts de travaux et prévoir les positions pour ces arrêts. Il en va de même que pour les périodes des travaux de décapage. Les types de machines utilisées pour circuler sur le sol en place et pour effectuer les décapages et les manèges doivent figurer dans le devis descriptif.

Les chapitres du CAN les plus importants pour les sols²⁵:

- > CAN 113: *Installations de chantier, avec la position 200 pour les pistes de chantier*
- > CAN 116: *Défrichements (pour les pistes d'accès et le dessouchage);*
- > CAN 117: *Démolitions et démontage;*
- > CAN 151: *Travaux sur des conduites, position 200 pour les travaux de terrassement, et 211 pour les décapages;*
- > CAN 181: *Aménagements extérieurs;*
- > CAN 211: *Fouilles et terrassement. Par exemple pour tranchées, parking souterrains lors de la remise en place du sol*
- > CAN 213: *Travaux hydrauliques position 300 «Terrassements en terre végétale»;*
- > CAN 216: *Sites pollués et sites contaminés;*
- > CAN 237: *Travaux de canalisations, position 200 pour les travaux de terrassement, et 211 pour les décapages.*

Et, pour tous les travaux spéciaux qui se réalisent souvent avant les travaux principaux et nécessitent des pistes et des places d'installation:

- > CAN 161: *Epuisement des eaux, position 100;*
- > CAN 162: *Enceintes de fouilles, positions 110, 210, 310, 410, 510 et 610;*
- > CAN 164: *Tirant d'ancrages, position 100;*
- > CAN 171: *Pieux, position 100;*
- > CAN 173: *Amélioration des sols de fondations, positions 110, 210, 310, 410 et 510.*

Annexes techniques, plans détaillés – plans à remettre dans le domaine des sols: carte des décapages, plan de remise en état, plan d'ensemencement, caractéristiques imposées pour les machines (p. ex. interdiction d'utilisation de pneus industriels, poids maximal en charge, pression maximale au sol, type particulier de machine imposée pour certains travaux).

Tâches à effectuer par les entreprises: sur la base des plans détaillés fournis par les bureaux d'études, décrire, par exemple dans les annexes techniques de l'offre, les

CAN – les chapitres les plus importants pour la protection des sols sur les chantiers

²³ Afin d'aider les planificateurs et les personnes chargées de préparer les documents d'appel d'offres, des outils sont à disposition sur le site <http://soletconstruction.ch> de HEIA-FR, Haute école d'ingénierie et d'architecture, Fribourg, dont un modèle du CAN 102 comprenant les positions importantes pour la protection des sols avec des explications détaillées.

²⁴ Centre suisse d'études pour la rationalisation de la construction (CRB). www.crb.ch.

²⁵ Les outils mis à disposition sur le site de l'HEIA Fribourg, détaillent les positions concernées du chapitre du CAN 113 et du CAN 211 (fouilles et terrassement) qui peuvent être précisées dans les appels offres

méthodes et les procédés de décapage, de maniement et d'entreposage des sols et de remise en état des terrains. Fournir la liste des machines proposées avec leurs caractéristiques techniques (poids total en charge, pression au sol, etc.).

Résultats: les exigences de la protection des sols sont intégrées dans les documents de soumissions de manière détaillée et transparente pour tous les soumissionnaires et permettent ainsi une comparaison objective des offres.

Objectifs: analyse et évaluation des offres.

Tâches à effectuer par les bureaux d'études: le maître d'ouvrage, à l'aide de son bureau d'assistance spécialisé (BAMO), effectue une comparaison technique des offres, en intégrant la composante protection des sols. Il peut aussi faire appel à l'expertise du SPSC mandaté.

Prestations d'études: préparation des contrats d'entreprise.

Tâches sols: intégration formelle dans les contrats des mesures particulières et des procédés de décapage, d'entreposage intermédiaire, de reconstitution et remise en état des sols.

Phase partielle 412.2:
Comparaison des offres

Phase partielle 416:
Achèvement de la phase d'appel d'offres

2.1.5 Phase 5: Réalisation

Objectifs: élaboration des différents documents qui seront utiles à l'exécution, l'élaboration de plans de surveillance et des mesures à prendre en cas d'urgence. Etablissement de la documentation relative aux contrôles selon le plan qualité.

Tâches sols à effectuer par les bureaux d'étude ou par le mandataire spécialisé dans les sols (SPSC): Préparation et établissement de différents documents d'exécution:

- > intégration des exigences de la protection de sols dans la liste de contrôle «environnement» ou établissement d'un plan de contrôle «sol» à l'intention de la DT avec les mesures concrètes à prendre en cas de dépassement des valeurs limites tensiométriques (cf. module 3, chapitre 3.7 «Choix des machines et des procédés de décapage») ou lors d'un événement pluvieux;
- > plans de décapage détaillés, surtout pour des zones caractérisées par une grande variabilité des sols (si pas déjà précisé dans le concept de gestion des sols);
- > fiche de décision «autorisation de décapage»;
- > protocole de remise en état des terres;
- > plan d'urgence en cas de mauvaises conditions météorologiques;
- > fiche de non-conformité pour chantier.

Tâches sols à effectuer par les entreprises: livraison des plans définitifs des installations, avec indication de l'emplacement des dépôts de terre et des pistes de chantier; livraison définitive d'une liste de machines de chantier avec leurs caractéristiques.

Phase partielle 51:
Projet d'exécution

Résultats: disposer de plans d'exécution de détail et de listes de contrôle «environnement» intégrant les aspects sols validés par le maître d'ouvrage et son mandataire sols spécialisé; les autorités pourront aussi de cas en cas demander à voir ces documents.

Objectif: réalisation de l'ouvrage sous la coordination et la supervision de la direction des travaux (DT), conformément au mandat de la DT et aux documents de soumission.

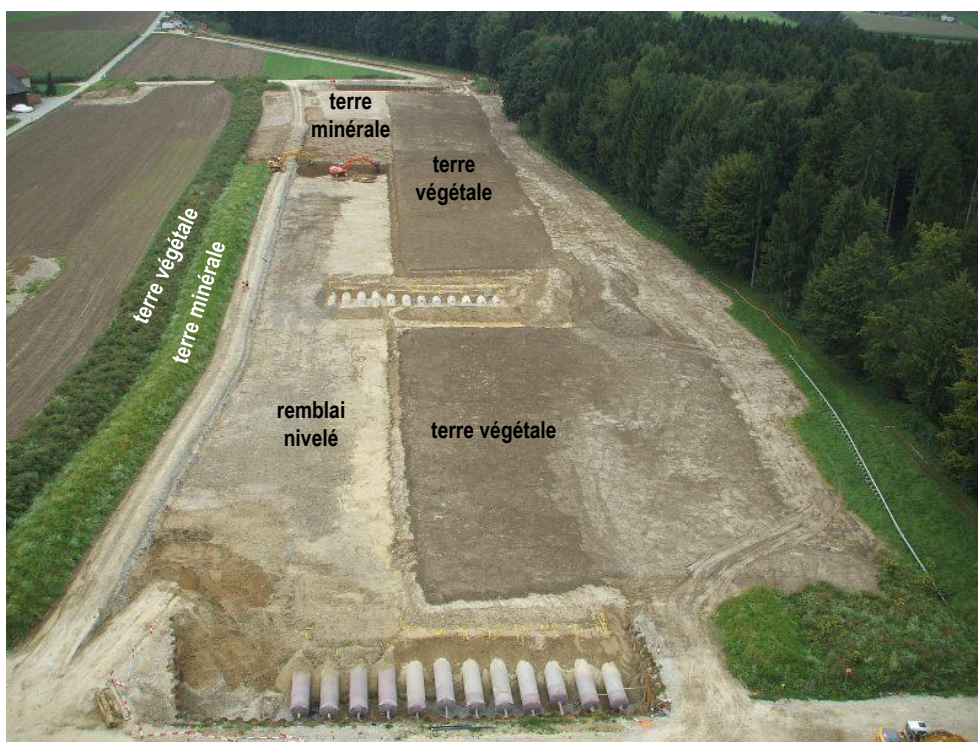
Phase partielle 52:
Exécution de l'ouvrage

Tâches sols à effectuer par la Direction des travaux (DT) et son mandataire spécialisé dans les sols (SPSC)²⁶: la DT convoque une séance de préparation avant le démarrage des travaux en présence de l'entreprise, de l'exploitant et du SPSC. Tous les procédés convenus dans le contrat d'entreprise sont validés de manière définitive lors de cette réunion préparatoire (pistes de chantier et des places d'installation, procédé de décapage et de stockage des terres, mode de remise en état des emprises provisoires et des surfaces à reconstituer, etc.; cf. fig. 17). Le SPSC participe aux séances de chantier pertinentes pour la protection des sols et effectue des tâches de conseil et d'information de la DT, du maître d'ouvrage et des entreprises. Il organise les mesures d'entretien à réaliser chaque année (fauche des dépôts, lutte contre les néophytes, etc.).

Résultats: procès-verbal de séances de chantier avec décisions, procès-verbal d'autorisation de décapage, journal de chantier et liste de contrôle «sols» tenue et mise à jour par la DT.

Fig. 17 > Reconstitution du sol – installation de stockage de gaz naturel

Terminologie selon SSE (2014)



Source: M. Vogt, Vogt Planer, Gasverbund Mittelland AG (GVM)

²⁶ Voir <http://soleconstruction.ch>, «Tableau de répartition des tâches de la protection des sols entre les différents acteurs impliqués».

Objectifs: planification, organisation et exécution de la mise en service des équipements, des installations et des éléments de l'ouvrage. Bouclage de la mise à jour des modifications, constatation et élimination des défauts.

Phase partielle 53:
Mise en service, achèvement

Tâches sols à effectuer par la Direction des travaux (DT) et par le mandataire spécialisé dans les sols (SPSC): réception du remblai nivelé et réception commune de «l'ouvrage sol» en présence de l'exploitant, du maître d'ouvrage, et des entreprises. Etablissement et validation des modalités de remise en culture transitoire avec l'exploitant et le maître d'ouvrage.

Résultats: ouvrage réceptionné et mis en service. Réception environnementale intégrant les aspects «sols» et les objectifs de remise en état; procès-verbal de réception du remblai nivelé, procès-verbal de réception du sol et convention des modalités de remise en état des sols qui seront restitués aux exploitants. Les procès-verbaux contiendront notamment les non-conformités par rapport au contrat d'entreprise et avenants éventuels. Contrat avec l'exploitant pour la phase transitoire de remise en culture, si celle-ci n'est pas assurée par une entreprise agricole spécialisée.

2.1.6 Phase 6: Exploitation

Objectifs: le fonctionnement de l'ouvrage ou de l'installation doit être garanti. Pour les sols, il s'agit de la phase transitoire de remise en culture jusqu'à la restitution finale aux exploitants. La durée du mandat pour le SPSC doit être fixée pour toute la phase transitoire de remise en culture jusqu'à la restitution finale des surfaces.

Phase partielle 61:
Fonctionnement

Tâches sols à effectuer par le mandataire spécialisé dans les sols (SPSC), sur mandat du maître d'ouvrage: conseil et suivi de la remise en culture transitoire, suivi de l'élimination des non-conformités établies dans de réception des sols, suivi des remises en état des emprises provisoires, restitution finale des surfaces à l'exploitant en vue d'une utilisation normale (en présence du maître d'ouvrage et de l'exploitant). Si des mesures correctives sont demandées (p. ex. à la suite de compactations ou de pertes de sols), elles peuvent être définies et suivies par le SPSC.

Résultats: restitution finale des sols avec procès-verbal. Contrôle de qualité des surfaces remises en état (contrôle de qualité final).

Objectifs: aptitude au service et valeur de l'ouvrage conservées pour une période définie. Pour les sols, cette phase correspond à l'exploitation normale des sols.

Phase 62:
Maintenance

Tâches sols: le maître d'ouvrage et ses mandataire sont libérés de toutes tâches et responsabilités, sur la base du procès-verbal de restitution finale des sols. L'exploitation du sol pourra se faire dans le respect des bonnes pratiques agricoles.

Résultat: fertilité des sols assurée durablement.

2.2 Rôle et tâches du spécialiste de la protection des sols sur les chantiers (SPSC)

Si le projet prévoit le décapage de sols sensibles à la compaction, pollués ou susceptibles de l'être, l'utilisation de machines de chantier lourdes et/ou le déplacement de quantités importantes de matériaux terreux, l'engagement d'un/d'une spécialiste responsable de la protection des sols sur les chantiers (SPSC) est préconisé par les autorités dès la phase de planification. L'analyse des pratiques actuelles dans les cantons²⁷ montre que les autorités exigent un suivi du chantier par un SPSC lorsque le projet implique des emprises temporaires supérieures à 5000 m² ou dans certaines situations critiques²⁸.

Le suivi des sols dans les projets de construction est effectué par une personne qualifiée inscrite sur la «Liste des spécialistes SSP/BGS de la protection des sols sur les chantiers (SPSC)» établie par la Société Suisse de Pédologie²⁹ ou recommandée par le service cantonal chargé de l'application de l'ordonnance sur la protection des sols (OSol). Un suivi de la protection des sols sur les chantiers de la phase 31 d'avant-projet jusqu'à la phase 62 de restitution des emprises aux exploitants permet d'accompagner le maître d'ouvrage dans l'application des exigences légales et de garantir la mise en œuvre des mesures de protection spécifiques au chantier.

Le SPSC conseille la direction des travaux (DT) dans des situations limites (intempéries) et facilite la bonne réalisation des travaux. De par son rôle et sa fonction, il est en quelque sorte une DT spécialisée dans les sols. Il est intégré dans la structure organisationnelle du chantier, et ses fonctions doivent être clairement définies dans son contrat (mandat régi par le Code des obligations CO, art. 394).

Les rapports entre le SPSC, le maître d'ouvrage et les autorités sont précisés dans le contrat passé avec le maître d'ouvrage. Le droit du SPSC d'informer les autorités est déterminé lors de l'établissement des modalités de communication. Le maître d'ouvrage reste seul responsable du respect des exigences légales vis-à-vis des autorités.

Les tâches et les compétences du spécialiste de la protection des sols sur les chantiers doivent être fixées dans un cahier des charges. Des cantons et des institutions (p. ex. SSP/BGS, VSS) proposent des cahiers des charges types. Si ces derniers ne sont pas utilisés, le cahier des charges est soumis aux autorités cantonales pour approbation.

Le SPSC est un mandataire spécialisé au même titre qu'un autre mandataire spécialisé dans le domaine environnemental (spécialistes bruit, sites contaminés, eau ou nature et paysage). Sa position peut varier selon les projets et les organigrammes de chantier. Il pourra soit être intégré dans l'équipe du Suivi environnemental en phase de réalisation de chantier (SER), soit être considéré comme un mandataire particulier (cf. fig. 18).

Profil, tâches et responsabilités

Cahier des charges du SPSC

Position du SPSC et son intégration dans l'organisation du projet de construction

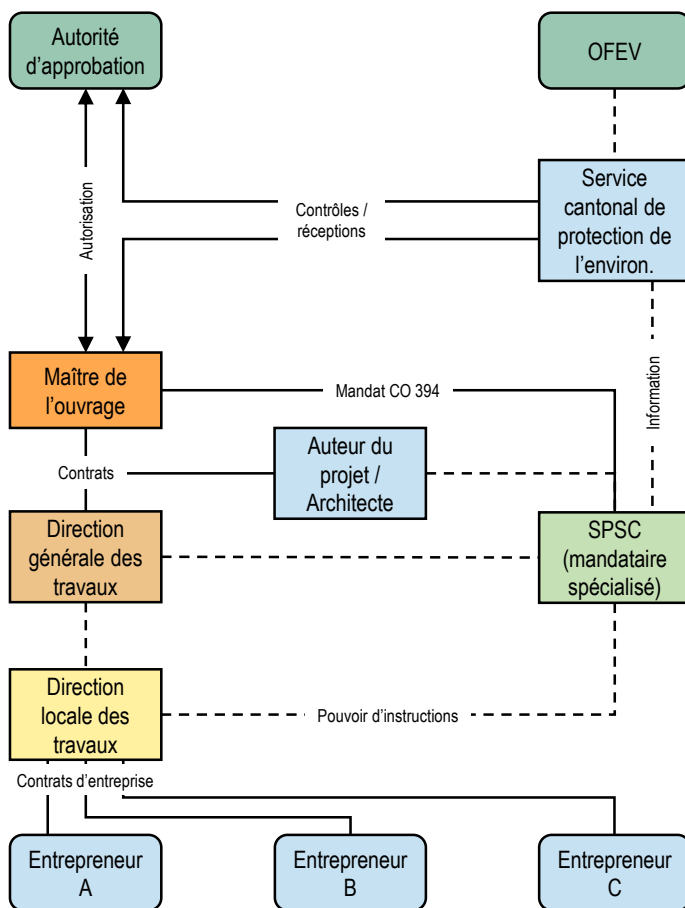
²⁷ Ateliers régionaux de protection des sols réalisés entre octobre 2012 et juin 2013.

²⁸ Manuel EIE, OFEV. 2009. Module 6. Bases légales. Pages 4 et 5.

²⁹ www.soil.ch

Fig. 18 > Modèle d'organisation du SPSC, adapté sur la base du modèle du SER

Légende: traits continus = relations contractuelles; traitsillés = les tâches



Source: Norme SN-VSS 640610b et publication de l'OFEV «Suivi environnemental de la phase de réalisation avec contrôle intégré des résultats», adapté et complété par E. Bellini. Forum national Suivi environnemental de chantier, sanu future learning sa, mars 2012.

Remarque: A noter que la durée d'engagement du SPSC, contrairement à d'autres mandataires spécialisés, s'étend jusqu'à la restitution finale des sols à l'exploitant.

Divers outils d'aides à la planification ont été publiés par la Confédération, les cantons ou d'autres institutions. Ces documents sont également mis en lien depuis le site internet de l'OFEV. Des aides pour les planificateurs ont été développées dans le cadre de la rédaction de cette publication et sont téléchargeables sur le site internet de l'HEIA-FR, Haute école d'ingénierie et d'architecture, Fribourg (<http://soletconstruction.ch>).

Outils d'aides à la planification

3 > Mesures générales de protection des sols

Ce module présente et explique des mesures générales de protection des sols en tenant compte de l'évolution des connaissances et des pratiques. Il se base sur des chantiers réalisés en plaine et dans des terres agricoles labourables, tout en tenant compte d'autres situations de chantiers. Les planificateurs et les directions de travaux y trouveront des explications permettant de mieux comprendre les contenus et les fondements pédologiques des mesures préconisées. Pour l'exécution de ces mesures, on se référera à des fiches techniques.

3.1 Concept de gestion des sols

L'ensemble des mesures présentées dans ce module compose les chapitres et les contenus du document appelé «notice sols spécifique au projet» ou «concept de gestion des sols spécifique au projet». Il appartiendra au spécialiste sols de «traduire» ces exigences générales (cf. tab. 8) pour le projet concerné, de préciser les mesures en fonction du type de projet et d'adapter le degré de détail à la phase de planification (avant-projet, projet de l'ouvrage, projet d'exécution). Pour les projets soumis à étude d'impact, ces contenus peuvent être intégrés au chapitre «sol» du rapport relatif à l'impact sur l'environnement (RIE), et servir de base à l'élaboration du cahier des charges pour le suivi de la protection des sols en phase de chantier (SPSC).

Concept de gestion des sols

Les thèmes suivants pourront être traités et décrits dans un concept de gestion des sols:

Questions à traiter

- > description de l'état initial;
- > calendrier des travaux et objectifs de remise en état;
- > réduction maximale des emprises et mesures de réduction des décapages;
- > enherbement préalable des emprises;
- > choix des machines et des procédés de décapage;
- > accès, pistes et places d'installations provisoires de chantier;
- > stockage temporaire et bilan des matériaux terreux (pollués et non pollués);
- > remise en état des sols à la fin des travaux (sols décapés et non décapés);
- > remise en culture transitoire et suivi après réception de «l'ouvrage sol»;
- > restitution finale des sols des emprises provisoires.

Les cartes et les plans suivants serviront à préciser les mesures:

Plans et cartes

- > carte des décapages avec épaisseurs des sols;
- > plans avec les pistes, les installations provisoires de chantier, les dépôts de matériaux terreux.

3.2 Description de l'état initial et du degré de sensibilité des sols

La description de l'état initial permet de connaître la qualité et la sensibilité des sols touchés par le projet, de diagnostiquer toutes les formes d'atteintes dans le périmètre concerné par le projet, comme des contaminations de sols, et de relever la présence de drainages ou de vestiges archéologiques³⁰.

La distinction entre interventions de longue ou de courte durée préconisée jusqu'à présent pour définir la méthode de relevé de l'état initial³¹ n'est plus pratiquée. Cette distinction temporelle est surtout utile et pertinente pour les mesures d'entreposage de matériaux terreux (cf. chapitre 3.9 «Procédés d'entreposage provisoire des matériaux terreux»). De manière générale pour les chantiers, on relèvera les épaisseurs et caractéristiques des horizons de la couche supérieure et sous-jacente du sol pour établir une carte des décapages. Il faut également consigner les paramètres importants pour l'établissement d'une carte de la sensibilité des sols aux contraintes physiques. Les paramètres pédologiques concernés sont les suivants: pierrosité, texture, pH, matière organique, groupe de régime hydrique et profondeur utile. D'autres relevés et sondages pourront être réalisés en fonction de la phase de planification, du degré de détail demandé et des questions auxquelles le planificateur devra apporter des réponses.

Etat des connaissances et des pratiques

Tab. 8 > Checklist de l'analyse de l'état initial – Questions auxquelles le planificateur doit répondre

	Questions à examiner par le planificateur	Etudes et investigations recommandées	Réponses et critères de décision obtenus	Aides pratiques, fiches techniques, autres sources
Etudes préliminaires	Quelle est l'utilisation du sol dans le périmètre concerné par les travaux?	Recherche des données de base existantes (SIG) avec informations sur l'utilisation et l'affectation des sols (SDA, forêts, sites protégés, zones de protection des eaux ou des sources, etc.)	Optimisation des variantes en diminuant les emprises sur les SDA	Portails de géo-informations des cantons et des services chargés de la protection des sols
	Les sols présentent-ils des risques d'être pollués chimiquement (le long de routes, de pylônes électriques, sols viticoles, etc.)?	Cartes et données de base existantes: inventaires des sites pollués, des décharges, etc.	Permet l'évaluation des risques et l'élaboration d'un plan de sondages	Cadastre des sites pollués des cantons. Instructions matériaux terreux OFEV.
	Les sols présentent-ils d'autres risques d'atteintes, en particulier présence de néophytes, de drainages défectueux, de corps étrangers? Existe-t-il des indices de présence de vestiges archéologiques sur le site touché par les décapages et les excavations?	Données de base existantes: sites connus avec néophytes, plans des drainages au niveau communal par exemple	Permet d'estimer les risques et le cahier des charges pour les analyses suivantes	Pour les néophytes: www.inflora.ch Pour les vestiges archéologiques, prendre contact avec le service archéologique cantonal
	Quelle variabilité des sols peut-on s'attendre à trouver dans le périmètre du chantier? Y-a-t-il présence de sols artificiels dans les emprises?	Sur la base de cartes pédologiques existantes ou de photos aériennes (analyse de la topographie et de la géologie), visites de terrain	Permet d'estimer la complexité des sols et le cahier des charges pour les sondages à réaliser lors de la phase suivante	

³⁰ Manuel EIE. OFEV. 2009. Module 5. RIE chapitre 5.6 «Sols».

³¹ Construire en préservant les sols. Guide de l'environnement n° 10. OFEFP. 2001.

	Questions à examiner par le planificateur	Etudes et investigations recommandées	Réponses et critères de décision obtenus	Aides pratiques, fiches techniques, autres sources
Avant-projet et projet de l'ouvrage	En vue des travaux de décapages, quelle est l'épaisseur de la couche supérieure et sous-jacente des sols?	Sondages à la tarière dans les zones d'emprises définitives et provisoires, jusqu'à l'horizon C (limite d'enracinement), carte des décapages avec degrés de sensibilité des sols (au minimum 1:5 000)	Détermination des épaisseurs de décapage, caractérisation des horizons, des volumes et bilan des matériaux terreux à déplacer	Cartes pédologiques existantes Norme VSS 640 582 ³² Cahier de la FAL 24, Cartographie et estimation des sols agricoles Classification des sols de Suisse, SSP/BGS (2008) Directives ASG pour la remise en état des sites (2001)
	Le sol est-il sensible à la compaction? Y-a-t-il des zones où des mesures particulières seront nécessaires?	Paramètres à relever pour la couche supérieure: pierrosité, texture, pH, matière organique, groupe de régime hydrique. Et pour la couche sous-jacente: texture et profondeur utile	Détermination des zones sensibles et base pour la formulation des mesures de protection	Degrés de sensibilité selon tab. 2, Norme VSS 640 582 Directives pour la protection des sols lors de la création de conduites souterraines de transport (OFEN)
	Si le risque de pollution chimique est confirmé, quels sont les polluants concernés et leurs teneurs?	Sondages de la couche supérieure et de la couche sous-jacente, analyses de laboratoire selon OSol	Volumes réutilisables et détermination des filières de traitement avec estimation des coûts	Instructions matériaux terreux OFEV. Manuel «Sols pollués». OFEFP 2005.
	De quelles espèces de néophytes s'agit-il? Y-a-t-il d'autres contraintes?	Relevés de terrain et cartographie des zones de présence de néophytes	Emplacements précis connus et base pour la formulation des mesures (tri et élimination)	Fiches techniques des cantons pour la gestion des néophytes
Projet d'exécution	Quels sols se ressient plus rapidement que les autres dans le périmètre du chantier (temps de ressuyage)?	Groupe de régime hydrique, texture, situation dans le relief (p. ex. cuvettes)	Critère pour l'emplacement des installations temporaires et des stations de tensiomètres	
	Quelle est la valeur agricole actuelle des sols (pointage agronomique des sols)? Quelle est la profondeur utile du sol en cm?	Pointage agronomique des sols (points 1 à 100) ou valeur approximative évaluable à partir du groupe de régime hydrique	Important pour définir les objectifs de la remise en état des sols agricoles	«Estimation de la valeur des terres cultivées et des surfaces proches de l'état naturel lors de remembrements» suissemelio et OFAG (2004)
	Quels types de cultures se trouvent sur les surfaces à décapier et quelles sont leurs périodes de récolte?	Informations à relever au niveau de la parcelle: type de culture, inscription à un réseau écologique	Détermination du montant des indemnités pour la gestion des cultures avant les décapages	Guide pour l'estimation des dommages aux cultures, Union Suisse des Paysans (USP)

Conformément à l'instruction matériaux terreux de l'OFEV³³, les matériaux terreux pollués par des métaux lourds ou des polluants organiques doivent être triés et classés selon leur degré de pollution. Pour rappel, les matériaux terreux sont divisés en trois catégories:

Pollution chimique des sols

- > *matériaux terreux non pollués*: peuvent être utilisés sans restriction en respectant les principes décrits dans le module 1;
- > *matériaux terreux peu pollués*: doivent être valorisés dans le périmètre du chantier (lieu de provenance), afin de ne pas diluer la pollution. Pour leur entreposage provisoire, la bonne pratique est de disposer une natte protectrice ou un géotextile sous le dépôt, afin de protéger le sol non pollué. Si ces matériaux ne peuvent pas être utili-

³² Norme SN-VSS 640 582 «Terrassement, sol – Inventaire de l'état initial, tri des matériaux terreux manipulés.» Tableau 2, p. 16. VSS Zurich. 1999.

³³ Evaluation et utilisation des matériaux terreux. OFEFP. 2001.

sés sur place, ils doivent être traités comme des déchets conformément à l'ordonnance sur le traitement des déchets (OTD 1990);

- > *matériaux terreux très pollués*: ne peuvent pas être valorisés. Ils doivent être traités comme des déchets conformément à l'OTD.

Conformément à l'art. 15, al. 3 de l'ordonnance sur l'utilisation d'organismes dans l'environnement (Ordonnance sur la dissémination dans l'environnement, ODE), les matériaux terreux contaminés par des plantes indésirables, doivent être valorisés ou assainis au lieu d'enlèvement ou, si cela n'est pas possible, être éliminés de manière à exclure toute nouvelle propagation de ces organismes. L'idée étant d'éviter que des plantes indésirables soient disséminées dans l'environnement par des mouvements de terres et colonisent de nouvelles niches écologiques. Une distinction est faite entre plantes néophytes au sens de plantes exotiques introduites en Suisse après 1492, et plantes indigènes problématiques. Certaines plantes néophytes peuvent être envahissantes, causer des problèmes de santé (plantes allergènes), supplanter des espèces indigènes, ou poser des problèmes aux infrastructures.

Néophytes et autres plantes indésirables

Plantes invasives: la renouée du Japon et le vinaigrier³⁴

Les expériences de ces dernières années ont montré que le risque de dissémination de plantes invasives lors des déplacements de terre était particulièrement marqué avec la renouée du Japon (Reynoutria japonica; cf. fig. 19) et le vinaigrier (Rhus typhina; cf. fig. 20), qui peuvent se multiplier par fragmentation du rhizome. La lutte contre ces deux espèces est très difficile à réaliser et il peut se révéler nécessaire de mettre en décharge les matériaux contaminés, ce qui est très coûteux.

Sur le lieu de dépôt (p. ex. décharges, carrières), les matériaux contaminés doivent être recouverts par une couche d'au moins 5 m de matériaux non contaminés pour la renouée du Japon, et d'au moins un mètre pour toutes les autres espèces.

Fig. 19 > Renouée du Japon



Fig. 20 > Vinaigrier



Source: Info Flora

³⁴ Bruno Grünenfelder. Documentation du cours pour spécialistes de la protection des sols sur les chantiers. sanu future learning sa. 2012.

Plante allergène: l'ambroisie à feuilles d'armoise³⁵

L'ambroisie à feuilles d'armoises est une plante très allergène et envahissante originaire d'Amérique du nord (cf. fig. 21). Le danger qu'elle présente tient dans le caractère extrêmement allergène de son pollen. Il provoque des réactions allergiques au niveau des yeux et des voies respiratoires, et déclenche fréquemment de l'asthme. Elle pousse le long des chemins ou sur les chantiers, partout où se trouvent des sols artificialisés nus. Pour éviter sa propagation en Suisse, l'ordonnance sur la protection des végétaux l'a classée en 2006 parmi les mauvaises herbes «particulièrement dangereuses». Il est obligatoire d'annoncer les foyers d'ambroisie aux services phytosanitaires cantonaux et de prendre des mesures d'éradication. Le sol remanié sur les sites de construction est un habitat favorable au développement de l'ambroisie. Une couverture végétale dense permet de réduire considérablement sa croissance, et donc la production de graines. Pour cette raison, il faut procéder le plus rapidement possible à l'ensemencement des dépôts (plantes concurrentes pour l'ambroisie), et ne pas exporter de matériaux terreux infestés sans les avoir assainis au préalable.

Fig. 21 > Ambroisie à feuilles d'armoise

Source: B. Gueux, République et canton de Genève

3.3**Planification des travaux et formulation d'objectifs**

De manière générale, il faut utiliser au mieux les périodes de végétation (mois d'été) et de sécheresse, et éviter les mois d'hiver. Les statistiques climatiques de MétéoSuisse permettent d'évaluer la fréquence des aléas. En choisissant les périodes les plus favorables à l'évaporation et au ressuyage des sols, on réduit fortement le risque de compaction de la couche sous-jacente. Il faut donc prévoir des marges suffisantes pour la réalisation des travaux préparatoires (comme les accès et les décapages), en tenant compte d'éventuelles interruptions des travaux en cas de précipitations importantes.

Planification

Les investigations de l'état initial réalisées permettent de préciser le cahier des charges des études à faire et de formuler, au plus tard lors du projet d'exécution, des objectifs pour la remise en état des emprises provisoires. Ceux-ci doivent être mesurables et vérifiables à la réception des travaux. Aux objectifs de protection des sols fixés par le législateur (OSol) peuvent s'ajouter d'autres contraintes, comme la protection des eaux

Formulation d'objectifs de gestion des sols et de remise en état

³⁵ Directives pour la lutte contre l'ambroisie à feuilles d'armoise (*ambrosia*). Euphresco. www.euphresco.org.

ou la protection de la nature. Dans ce cas, il faut préciser de quelle manière ces emprises provisoires seront remises en état. Dans sa planification des accès au chantier, des travaux de décapage, de mouvement des terres et de circulation sur les sols en place enherbés, le maître d'ouvrage doit veiller à limiter au strict minimum les emprises et à prévenir les atteintes aux sols. Le décapage des couches supérieures et sous-jacentes du sol peut détruire les agrégats du sol et la porosité naturelle. C'est pourquoi il faut limiter autant que possible les surfaces décapées et privilégier des méthodes permettant de protéger les sols. Le décapage de la couche supérieure prive le sol de sa protection principale. La couche sous-jacente mise à nu est instable et exposée sans protection aux intempéries. Si des matériaux terreux sont exportés, il faut veiller à établir un calendrier pour leur réutilisation et valorisation en tenant compte des objectifs de la protection des sols, sans oublier d'entreprendre en temps voulu les démarches d'autorisations³⁶ qui en découlent.

3.4 Réduction des emprises et des surfaces décapées

Un chantier bien organisé choisit les méthodes de construction qui limitent au strict minimum les surfaces décapées et réduisent les emprises temporaires. Ceci permet aussi de limiter les coûts. La bonne pratique veut que l'on décape les sols uniquement sur les surfaces concernées par les fouilles et les terrassements.

Pour le choix des emplacements d'entreposage des installations de longue durée, il faut être très attentif à la sensibilité des sols à la compaction. Pour les installations de longue durée, les recommandations des années 1990 préconisent un décapage des sols. La norme SN-VSS 640 583 définit long par plus d'un an. Cependant, la pratique de ces dernières années montre que l'on peut prolonger cette durée à trois ans au moins sans que la régénération des sols n'en soit affectée.

Un spécialiste de la protection des sols sur le chantier examine la situation de manière détaillée, en considérant par exemple les critères suivants:

- > caractéristiques et sensibilité des sols;
- > degré de sollicitation des sols (machines, matériaux, etc.);
- > type de culture avant les emprises;
- > topographie et emplacement précis des emprises;
- > objectifs de remise en état;
- > place à disposition pour le stockage des matériaux.

Pour la remise en état, après la fin de travaux, des méthodes d'ameublissement et d'aération de la couche supérieure (p. ex. bêcheuse) ou la mise en herbe peuvent être nécessaires (cf. chapitre 3.11 «Remise en état des emprises sur sols non décapés, sur fouilles linéaires ou sur surfaces reconstituées»).

³⁶ P. ex. Directives sur les remodelages de terrain pour la réhabilitation du sol hors zone à bâtir. Canton de Berne. 2015.

Récapitulation des recommandations:

- > faire expertiser les emprises temporaires du chantier et la sensibilité des sols;
- > planifier un enherbement préalable des surfaces des emprises (cf. chapitre 3.5 «Enherbement préalable des emprises»);
- > les surfaces utilisées pour le chantier (installations, dépôts de matériel, etc.) ne sont pas décapées mais protégées par un géotextile et une couche de grave non traitée 0/45 posée sur le sol en place (cf. chapitre 3.8 «Accès et pistes de chantier»), sauf si une sensibilité élevée des sols à la compaction ou une faible profondeur du sol sur un sous-sol rigide font exception. Une fois protégé, le sol peut supporter de fortes charges, et cela durant plusieurs années;
- > lors de la localisation des emprises, on veillera aussi à délimiter les sols en place qui ne sont pas touchés par les activités du chantier en empêchant leur accès avec des barrières et en signalant leur emplacement, afin de prévenir toute circulation sur des zones non protégées et toute salissure directe. Les terrains situés à proximité du chantier, en particulier les surfaces agricoles, ne peuvent être utilisés comme installations de chantier ou d'entreposage qu'avec l'approbation des autorités et une convention avec les utilisateurs/exploitants.

Recommandations

Exemple d'exigences du Service des routes du canton de Vaud³⁷

H144: Rennaz (VD) –
Les Evouettes (VS)

L'objectif principal du maître d'ouvrage est la minimisation des surfaces décapées; pour ce faire, il a pris les options suivantes au niveau du projet:

- > réalisation des pistes de chantier sur les chemins existants ou dans l'emprise du remblai;
- > construction des fossés drainants de part et d'autre du remblai sans décapage préalable en réalisant des pistes provisoires directement sur la couche supérieure du sol;
- > stockage de la couche supérieure et de la couche sous-jacente directement sur la terre végétale enherbée; les pistes d'accès au stock sont aussi réalisées sur la couche supérieure enherbée;
- > réalisation, dans la mesure du possible, des places d'installation des entreprises sans décapage préalable.

3.5 Enherbement préalable des emprises

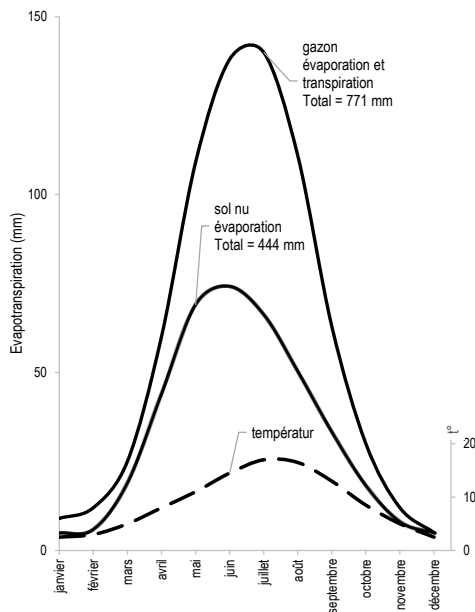
Enherber les sols avant les travaux de terrassement est une mesure qui a fait ses preuves. Ce constat vaut pour tous les sols et toutes les emprises, qu'elles soient temporaires ou définitives. Lorsque les terrains sont enherbés, ils sèchent plus vite (évapotranspiration) et permettent ainsi d'engager plus rapidement les machines pour rouler sur les sols en place et effectuer les travaux de décapage (cf. fig. 22). La durée d'intervention des machines est ainsi prolongée. Les sols enherbés présentent donc un avantage aussi bien en termes de coûts-efficacité pour les travaux que du point de vue de la protection des sols.

Etat des connaissances –
Enherbement préalable des
emprises

³⁷ Claude Kündig, François Petriccioli. Gestion des terres végétales. Exigences du Service des routes du canton de Vaud. 2010.

Fig. 22 > Comparaison d'évapotranspiration

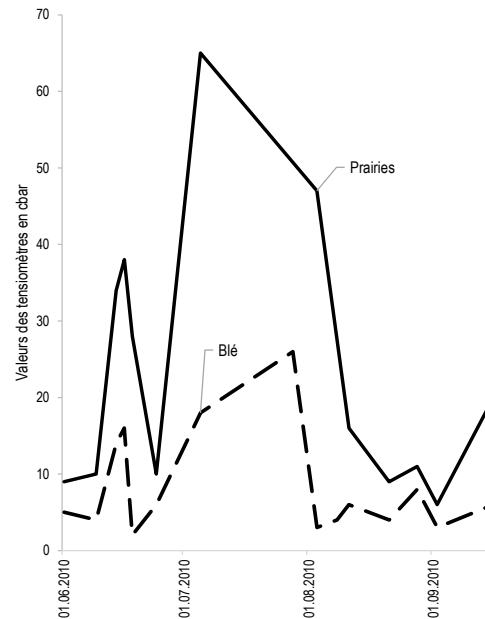
Un sol enherbé assèche rapidement le sol en période de végétation



Source: www.u-picardie.fr

Fig. 23 > Suivi des tensiomètres – Influence du type de culture sur les valeurs tensiométriques

Comparaison de deux couvertures végétales sur un même site



Source: A9 Vaud Nord 2010, Service des routes du canton de Vaud

Un terrain enherbé présente une couverture végétale bien enracinée qui stabilise le sol et accélère son ressuyage. Par temps chaud, une prairie peut évaporer jusqu'à cinq litres d'eau par m² en une seule journée. Une comparaison entre des prairies naturelles et des terres labourées montre que les sols nus sont plus sensibles à la compaction (porosité et capacité d'infiltration diminuées). La structure du sol des prairies est plus stable et résiste mieux aux atteintes physiques. La figure 23 montre que l'herbe est plus efficace toute la saison et que le blé après la moisson n'a plus d'effet de ressuyage tandis que l'herbe, si elle est fauchée régulièrement peut pousser jusqu'en automne et permet d'assécher les sols sur une plus longue période dans l'année (remontée de la courbe entre traits pleins après le 31.08.10).

3.6 Mesure de l'humidité des sols

L'état d'humidité du sol peut être quantifié par des mesures de teneurs en eau ou des mesures de forces de succion (ou potentiel matriciel). Seul le tensiomètre fournit la seconde grandeur. La susceptibilité des sols à la compaction ne dépend pas de la teneur en eau, mais de la force de succion, dont la mesure est par ailleurs plus précise. Les sondes à humidité de type Watermark® mesurent la force de succion d'une manière indirecte et assez imprécise. La sonde TDR quant à elle mesure la teneur en eau. Ces deux types de sondes ne sont donc pas appropriés pour la protection des sols.

Etat des connaissances –
L'humidité des sols

La fonction de la mesure tensiométrique est de dire à partir de quel état d'humidité (force de succion) le sol est praticable par des engins de chantier et peut être manipulé sans subir de dommages. Le résultat de la mesure permet de déterminer si l'intervention est possible ou proscrite et de préciser le cas échéant la méthode de manipulation des sols et le type de machines autorisé. La limite d'intervention des machines de chantier à chenilles se calcule à l'aide d'un nomogramme qui met en lien le poids de l'engin et sa pression au sol avec la force de succion. Celle-ci est mesurée à l'aide d'un tensiomètre, qui est le principal instrument de mesure du spécialiste de la protection des sols sur les chantiers. Les expériences de la pratique et une enquête auprès des spécialistes ont permis de montrer les qualités de cet outil, mais aussi de souligner ses faiblesses et ses dysfonctionnements dus notamment à la fragilité de la bougie en céramique et aux exigences d'entretien³⁸. C'est pourquoi des recherches ont été menées ces dernières années pour développer des tensiomètres moins fragiles et plus fiables (modèle Quickdraw[®], prototype TensiOsol³⁹).

L'humidité des sols est en règle générale très fluctuante, notamment en raison de la variabilité des sols à petite échelle, du type de végétation, de l'influence de la nappe phréatique et des précipitations (orages locaux durant l'été). Pour cette raison, les données tensiométriques recueillies sur un site ne peuvent être transposées qu'avec précaution à un autre site.

Trois sources de données tensiométriques sont principalement à disposition pour obtenir des données sur la force de succion des sols:

1. *mesure tensiométrique ponctuelle* sur un lieu précis du chantier;
2. *placette de mesure* (temporaire) sur le chantier;
3. *réseau de stations de mesure* de l'humidité des sols des cantons (fixe).

Les tensiomètres mobiles à réponse rapide permettent d'effectuer des mesures ponctuelles (cf. fig. 24) sur les lieux précis d'intervention de machines lorsque des données comparatives complémentaires à celles des placettes de mesures fixes se révèlent nécessaires, par exemple en cas d'imprévus dans le déroulement du chantier, de non représentativité de la placette ou de défectuosité des tensiomètres sur une placette. Dans ce cas, les mesures doivent être représentatives de la zone sur laquelle a lieu l'intervention, et répétées en fonction des variations de la qualité du sol ou de son humidité dans le périmètre concerné. Une stratégie simple consiste à privilégier les secteurs les plus fragiles (humidité plus grande, teneur en argile plus élevée).

Mesure tensiométrique ponctuelle

³⁸ Luzius Matile, Roman Berger et Rolf Krebs. Mesure tensiométrique lors de la protection des sols sur les chantiers. ZHAW. 2011.

³⁹ Pascal Boivin, François Fülleman, Alice Johannes. Développement d'un tensiomètre incassable pour la protection des sols sur les chantiers (TensiOsol). hepia-Agronomie-Gruppe Sols et Substrats. 2012.

Fig. 24 > Tensiomètres mobiles à réponse rapide*TensiOsol – Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève (hepia)*

Source: J.-P. Clément, OFEV

Pour chaque placette, il est recommandé d'installer cinq tensiomètres sur une surface de 2 m² et de prendre la valeur de mesure médiane comme résultat (cf. fig. 25). La profondeur de mesure standard est de 35 cm. Tous les détails sur le fonctionnement, la préparation et le maniement des tensiomètres se trouvent expliqués dans des fiches techniques.

Placette de mesure temporaire sur le chantier

Fig. 25 > Placette de cinq tensiomètres sur chantier*Place de golf, Rheintal (SG)*

Source: J.-P. Clément, OFEV

Fig. 26 > Station cantonale fixe*Bodenmessnetz Nordwestschweiz*

Source: bodenmessnetz.ch

Plusieurs cantons disposent d'un réseau de stations fixes sur leur territoire (cf. fig. 26). La force de succion est mesurée en général à deux profondeurs: dans la couche supérieure du sol (20 cm) et dans la couche sous-jacente (35–40 cm). Il est important de comparer les spécificités des stations de mesure (région climatique, type de sol et

Réseau de stations de mesure de l'humidité des sols des cantons

utilisation du terrain, microtopographie, nappe phréatique etc.) à celles du site du chantier. Les données tensiométriques provenant de stations de mesure fixes ne sont pas directement transposables à une autre région ou à un chantier donné. Par contre, elles fournissent des informations précieuses sur l'évolution temporelle de l'état d'humidité des sols et sur leur temps de ressuyage, ce qui permet de mieux planifier les travaux de décapage en fonction des caractéristiques climatiques d'une région. Ces données sont donc très utiles pour la phase de planification (programme des travaux).

Remarque: pour les décisions d'engagement de machines, ce sont les mesures sur site qui font foi.

Dans les sols gelés, superficiels (<50 cm), très pierreux ou constitués de sables grossiers, l'utilisation des tensiomètres peut se révéler impossible. Dans ces cas, il faut évaluer la sensibilité des sols à la compaction à l'aide des données pluviométriques mesurées sur le chantier (pluviomètre) et en estimant le ressuyage du sol, par exemple au moyen de tests tactiles. Cette situation est fréquente dans les régions alpines.

Rôle du SPSC: Le SPSC présent sur le chantier pour tous les travaux pouvant porter atteinte aux sols, peut apprécier, sur la base de valeurs tensiométriques et d'autres tests de terrain et en tenant compte des conditions actuelles des chantiers et des types de sols concernés, si l'intervention d'une machine est judicieuse.

Limites d'utilisation des tensiomètres

3.7 Choix des machines et des procédés de décapage

La compaction persistante de la couche sous-jacente du sol est considérée comme une atteinte dans la législation environnementale⁴⁰. Le guide «Construire en préservant les sols» de l'OFEV (2001) et la norme SN-VSS 640 583 (2001) préconisent:

Etat des connaissances –
Choix des machines et des
procédés de décapage

- > de ne pas rouler sur les sols en place pour tous les engins de chantiers dont la pression au sol dépasse 0,5 kg/cm²;
- > de ne pas rouler sur les sols en place pour tous les engins de chantiers dotés de pneus industriel de chantier, sauf si la force de succion est supérieure à 25 cbar et la charge par roue ne dépasse pas 2,5 t par roue et la pression au sol est inférieure à 0,5 kg/cm²;
- > *au-dessus de 10 cbar de force de succion:* il est possible de rouler sur le sol avec des machines de chantier à chenilles appropriées;
- > *entre 6 et 10 cbar de force de succion:* les couches supérieure et sous-jacente peuvent être décapées dès 6 cbar, mais le terrain (engorgé) n'est pas assez portant pour le passage de véhicules sur le sol en place enherbé;
- > *en dessous de 6 cbar de force de succion* de ne pas manipuler les sols, car sa structure est trop instable pour permettre le décapage de matériaux terreux; ni de rouler sur les sols en place, car dans ce degré d'humectation (détrempé) le sol est trop humide et n'est pas portant.

Charges et pressions

Forces de succion

En 1993, un nomogramme d'engagement des machines en fonction de la pression au sol, du poids en charge de la machine et de la force de succion mesurée à l'aide de

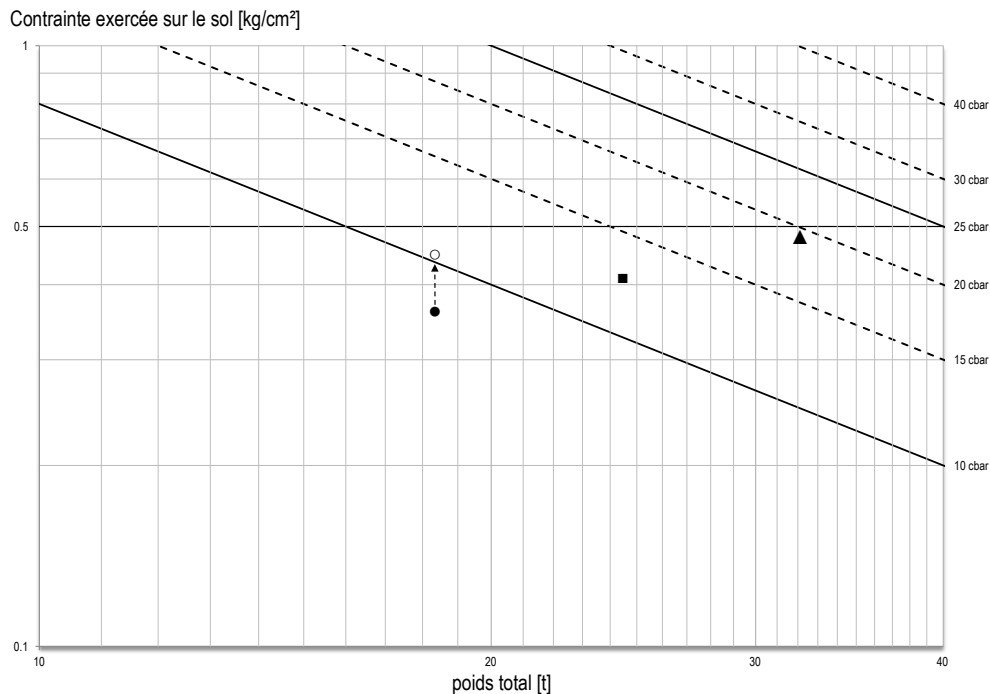
Nomogramme d'engagement

⁴⁰ Art. 6, al. 1, OSol.

tensiomètres à la base de la couche labourée (30 à 35 cm) a été établi dans le cadre de l'élaboration de la directive pour les conduites de gaz⁴¹. Ce nomogramme a été repris, entre autres, dans le guide «Construire en préservant les sols» de l'OFEV et dans la norme SN-VSS 640583. Il est l'outil de référence pour calculer les limites d'engagement des machines de chantier à chenilles en se basant sur des mesures tensiométriques effectuées sur le site du chantier (cf. fig. 27).

Fig. 27 > Limite d'intervention d'une machine de chantier à chenilles en fonction de l'humidité du sol

La formule permettant de calculer cette limite d'intervention est: poids total de la machine [t] x pression au sol [bar] x 125 = force de succion minimale nécessaire [cbar].



Exemples de pelles hydrauliques à chenille (cf. fig. 27):

- = poids total en charge 18,2 t, largeur de chenilles 700 mm, pression au sol 0,38 kg/cm²;
- = poids total en charge 24,5 t, largeur de chenilles 750 mm, pression au sol 0,41 kg/cm²;
- ▲ = poids total en charge 32 t, largeur de chenilles 750 mm, pression au sol 0,49 kg/cm².

La pelle de 18,2 t peut rouler dès la limite de 10 cbar (○; cf. SN-VSS 640583 (2001), 5.2 «Engagement adéquat des machines»); la pelle de 24,5 t peut rouler dès 13 cbar; la pelle de 32 t peut rouler dès 20 cbar.

⁴¹ Directive de l'OFEN pour la protection des sols lors de la création de conduites souterraines de transport de combustibles (1993, révisée en 1997).

3.7.1 Machines de chantier – critères de sélection pour l'appel d'offre

Pour les travaux de décapage, les experts de la protection des sols sur les chantiers sont d'avis unanime que la pelle hydraulique à chenilles munie d'un godet à bord lisse est la machine la plus apte pour effectuer les décapages sans porter atteintes aux sols (cf. fig. 28). Idéalement, cette pelle devrait peser moins de 25 t et exercer une pression au sol inférieure à 0,5 kg/cm².⁴² D'autres machines de chantier peuvent être utilisées pour effectuer des décapages, comme les décapeuses (scrape dozer) ou les chargeuses à chaîne/trax (cf. fig. 29). Toutefois, l'expérience a montré qu'elles ne pouvaient être engagées que dans des conditions restrictives et uniquement sur certains types de sol. En plus de la compaction, elles risquent de provoquer des malaxages et des cisaillements qui portent atteinte à la structure des sols (cf. fig. 30). Certains services cantonaux chargés de la mise en œuvre de l'OSol proscrirent ce type de machines dans le cadre des procédures d'autorisation. Il en est de même des véhicules de chantiers équipés de pneus industriels ou de génie civil⁴³ qui ne sont pas adaptés pour rouler sur les sols en place (surface de contact, pression de gonflage et rigidité des armatures).

Décapage

Fig. 28 > Fouille linéaire avec pelle hydraulique à chenilles sur sol en place enherbé



Source: J.-P. Clément, OFEV

L'entreprise remet en répondant à l'appel d'offre une liste des machines qu'il propose d'engager sur le chantier dans le cadre de tous les travaux impliquant le sol en place et les mouvements de matériaux terreux en indiquant leur poids total, leur pression au sol et la largeur des chenilles. Sur la base de cette liste, on détermine à partir de quelle valeur de force de succion chaque machine pourra être engagée sur le sol en place pour les décapages, les mouvements de sols et la circulation sur les sols en place.

Liste des machines

⁴² Bodenkundliche Baubegleitung BBB. Leitfaden für die Praxis. Bundesverband Boden (BVB). 2013. Précisé et adapté par l'auteur suite aux ateliers d'expert.

⁴³ Cf. Construire en préservant les sols. Guide de l'environnement n°10. OFEFP. 2001. p. 68.

Remarque: Les machines prévues pour circuler sur route ou pistes ou pour effectuer des terrassements ne sont pas engagées sur le sol en place, et ne circulent pas sur celui-ci.

Fig. 29 > Trax et scrape dozer



Source: M. Vogt, Vogt Planer

Source: J.-P. Clément, OFEV

Fig. 30 > Remise en place du sol au bulldozer en conditions humides

Une atteinte portée à la structure du sol par tassement, lissage et malaxage réduit la capacité d'infiltration de l'eau.



Source: J.-P. Clément, OFEV

L'emploi de bennes agricoles (charge par roue 3500 kg et plus) pour effectuer des transports de matériaux terreux ou de matériaux d'excavation à la place des dumpers à chenilles n'est pas judicieux. Leur pression au sol est en effet bien plus élevée que celle de ces derniers⁴⁴, et les passages répétés détruisent les agrégats par lissage et malaxage.

Les travaux de mise en culture sur des sols reconstitués ou remis en état doivent être effectués dans des conditions de ressuyage optimales avec des machines agricoles légères munies de pneumatiques à basse pression (<1 bar). Le maître d'ouvrage est responsable de la bienfacture de ces interventions. Si l'exploitant du terrain reconstitué ou remis en état n'est pas idéalement équipé, le recours à des entreprises agricoles est préconisé.

Utilisations de machines agricoles sur des chantiers

⁴⁴ Protection des sols dans l'agriculture. Un module de l'aide à l'exécution pour la protection de l'environnement dans l'agriculture. L'environnement pratique n°1313. OFEV et OFAG, 2013.

Machines agricoles et compaction des sols en place

Les milieux du génie civil font souvent remarquer que les machines agricoles ne subissent pas les mêmes restrictions d'utilisation que les leurs en cas d'intempéries. Voici quelques précisions sur les caractéristiques d'engagement respectives de ces engins qui peuvent expliquer ce traitement différencié: au cours des vingt dernières années, la mécanisation agricole a fait d'énorme progrès dans le domaine des pneumatiques souples à pression de gonflage <1 bar, du nombre d'essieux et du placement des roues en crabe en vue de protéger les sols contre la compaction. Les machines de chantier n'ont pas connu ce développement, même si les engins à chenilles contribuent également à prévenir la compaction. A cela s'ajoute le fait que les travaux agricoles avec des véhicules lourds se limitent principalement à la période de juillet à octobre, alors que les engins de chantier sont en service en toutes saisons. En outre, les machines agricoles ne roulent en général qu'une fois sur le même passage pour la préparation du sol, pour un semis ou une récolte. Alors que les machines de chantier effectuent de nombreuses allées et venues dans un laps de temps restreint sur le même passage⁴⁵.

Pour prévenir les compactations persistantes par les machines agricoles, des recherches ont été menées ces dernières années afin de développer des outils d'aide à la décision. En Suisse, deux modèles informatisés sont utilisés pour déterminer le risque de compactage au moment du passage d'une machine agricole à pneus sur un sol dans un état donné: TASC^{®90} et Terranimo^{®91}. Le modèle Terranimo[®] est en libre accès sur Internet. Il est proposé en deux versions: une version Terranimo light[®] qui permet une appréciation simple et rapide du risque de compaction; et une version Terranimo expert[®] qui permet une détermination plus précise de la résistance du sol ainsi que l'évaluation de mesures techniques de réduction de la contrainte exercée sur le sol.

Le modèle Terranimo calcule le risque de compaction durable à partir de 35 cm de profondeur dans un sol en place. Conçu pour des pneus agricoles à basse pression ou similaires (non rigides, non armés) et des sols agricoles d'au moins 50 cm de profondeur (en particulier pour des surfaces d'assolement), il n'est pas directement transposable aux machines de chantier à chenilles.

3.7.2 Procédés de décapage des emprises terrassées

La question qui se pose est de choisir un procédé de décapage et de mouvement des terres le plus respectueux possible des sols. L'objectif est de réduire au maximum le nombre d'étapes de travail tout en optimisant les coûts. Le service de la protection des sols du canton de Zurich a documenté une vingtaine de techniques de décapages et une trentaine de méthodes de remises en culture⁴⁶, en commentant les avantages et les désavantages de chaque procédé ainsi que des machines utilisées. Ce projet a montré qu'il existe de nombreuses possibilités d'optimiser la protection des sols durant ces travaux et que ces mesures permettent en même temps de gagner en rentabilité et en efficacité.

Etat des connaissances –
Procédés de décapage

⁴⁵ Construire en préservant les sols. Guide de l'environnement n°10. OFEFP. 2001. Fiche 6 et chapitre 7.

⁴⁶ Canton Zürich, Baudirektion. Amt für Landschaft und Natur. Ces fiches techniques (Methodenblätter) existent depuis 2005 et sont téléchargeables sur le site internet du canton. Certaines fiches ont été traduites et sont disponibles sur le site internet gesdec de la République et canton de Genève.

Le principe de base est d'effectuer le décapage depuis le sol en place ou depuis une piste d'attaque, en utilisant le système par bandes. Il ne faut en aucun cas circuler sur la couche sous-jacente sensible à la compaction.

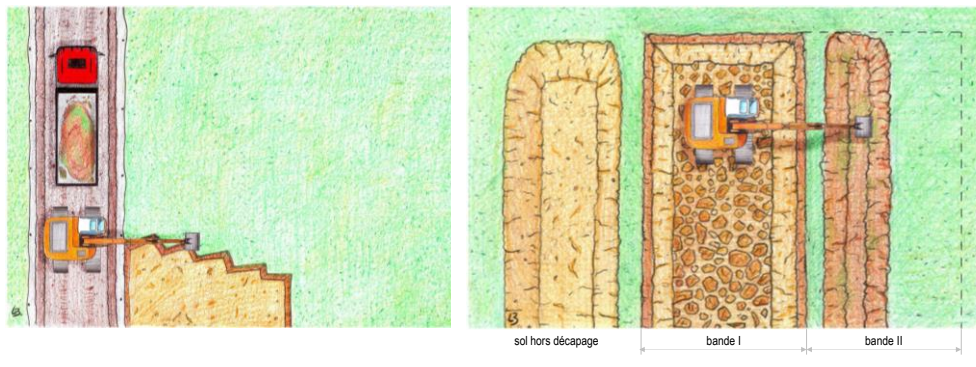
Pour les emprises définitives ou les emprises après remblayages, deux procédés sont préconisés pour démarrer le décapage en bandes. Soit une piste d'attaque provisoire est installée et la première bande de décapage est réalisée depuis la piste; soit la pelle hydraulique roule sur la première bande de décapage et dépose l'horizon A sur la deuxième bande à décaper, et dépose la couche sous-jacente sur le côté de l'emprise (cf. fig. 31).

Décapage en bandes

Fig. 31 > Décapage en bandes

Décapage en bandes depuis une piste d'attaque

Décapages en bandes depuis l'horizon C, sans piste d'attaque



Croquis: L. Bourban

Récapitulation des recommandations:

- > le maître d'ouvrage ou le planificateur définit, avec l'aide du spécialiste sol, un procédé de décapage et de remise en état (cahier des charges pour les machines), afin de disposer d'une base suffisamment détaillée pour l'appel d'offre;
- > en cas de pollution chimique ou biologique des matériaux terreux, il établit un concept de gestion des sols qui précise les emplacements, les procédés de décapage, l'entreposage provisoire et l'élimination de ces matériaux. Cette dernière pouvant se révéler très onéreuse, les coûts correspondants seront estimés le plus tôt possible dans le projet;
- > pour les décapages, il envisage l'utilisation de pelles hydrauliques légères à chenilles qui permettent de limiter au strict minimum le poids total et la pression au sol, de même que l'opportunité de séparer les travaux de décapage des travaux de terrassements dans la phase d'appel d'offres. Des articles spécifiques pour les deux types d'exigences sont inclus dans l'appel d'offre⁴⁷;
- > il planifie ces travaux de décapages pendant la période de végétation;

Recommandations – Procédés de décapage

⁴⁷ Claude Kündig, François Petriccioli. Gestion des terres végétales. Exigences du service des routes du canton de Vaud. 2010. Norme SIA 118. Conditions générales pour l'exécution des travaux de construction.

- > il prévoit de faire enherber les surfaces à décaper l'année précédente ou au minimum trois à six mois avant les travaux de décapage. Dans tous les cas, les exploitants des terrains concernés doivent être informés avant juillet de l'année qui précède les travaux, des mesures de mise en herbe ou, à défaut, de l'interdiction de travailler les sols entre la récolte et les travaux de décapage, cette interdiction s'appliquant aussi aux déchaumages (enfouissement des restes de cultures);
- > il prévoit de faire faucher périodiquement les surfaces à décaper;
- > il établit un calendrier des travaux qui tienne compte du risque d'intempéries dans la région;
- > il fixe dans le contrat d'entreprise un nombre de jours d'intempéries à partir desquels l'entrepreneur a droit à une indemnité et/ou à un report de délai.

3.8 Accès et pistes de chantier

Les bonnes pratiques veulent que l'on cherche à utiliser au maximum des accès existants et que l'on cherche à utiliser des surfaces déjà imperméabilisées pour établir les dépôts et les installations de chantier. Les pistes de chantier permettent de diluer ou répartir les charges et de réduire la compaction du sol. Les questions qui se posent, lors de l'aménagement des pistes de chantier, sont en général liées au choix des matériaux ainsi qu'au dimensionnement (épaisseur et largeur) et à l'entretien des pistes. Les procédés détaillés se trouvent dans des fiches techniques cantonales. La piste de chantier constituée de grave non traitée 0/45⁴⁸ est considérée actuellement comme une solution adaptée à quasiment tous les types de sol et de chantier (cf. fig. 32). Les autres pistes alternatives sont également présentées ci-après. Rappelons que la construction de ces installations provisoires ne peut débuter que lorsque les sols sont suffisamment ressuyés, et en respectant le nomogramme pour l'engagement des machines.

Etat des connaissances –
Accès et pistes de chantier

La grave non traitée est déchargée à reculons sur le sol naturel enherbé et protégé par un géotextile choisi d'après sa fonction première (séparation, filtration, drainage ou renforcement). L'épaisseur de la couche doit être de 50 cm après roulage⁴⁹. Pour que les pistes restent fonctionnelles sur toute la durée du chantier, elles doivent être entretenues régulièrement. Cet entretien doit être mentionné dans les documents d'appel d'offres. Selon l'emplacement de la piste, un système de récolte et de drainage des eaux pluviales sera mis en place.

Graves non traitées

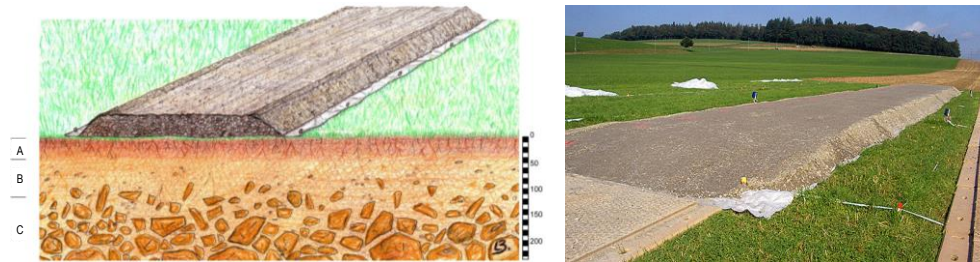
⁴⁸ Norme SN-VSS 670 119-NA.

⁴⁹ Merkblatt «Lastverteilende Massnahmen», Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich. On recommande entre 40 et 60 cm de grave après roulage selon le poids des machines qui l'utiliseront.

Fig. 32 > Pistes à base de grave non traitée 0/45

Piste de chantier de grave non traitée 0/45 d'une épaisseur de 0,5 m après roulage sur géotextile posé sur l'herbe

Essais HEIA Fribourg, Grangeneuve



Croquis: L. Bourban

Source: J.-P. Clément, OFEV

Piste avec matériaux d'excavation du chantier: ces matériaux ne sont pas toujours adaptés à la réalisation de pistes ou d'installations. Plus la classe granulaire est grossière, plus la répartition de la charge est mauvaise. Eviter un diamètre granulaire $\varnothing > 15$ cm.

Pistes en copeaux de bois: elles représentent une bonne solution pour les chantiers forestiers où l'on peut utiliser directement les copeaux de bois provenant du défrichage. Attention au pourrissement rapide dans les endroits humides et aux exigences d'entretien et de recyclage élevées. L'épaisseur doit impérativement être de 50 cm après roulage.

Plaques mobiles emboîtables: les plaques doivent se recouvrir suffisamment pour assurer la rigidité de la piste et garantir ainsi la protection des sols (cf. fig. 33). Un goupillage est nécessaire. Leur avantage réside dans leur légèreté et leur facilité de transport⁵⁰. Ce système est particulièrement intéressant pour les pistes d'attaque et pour les décapages sur les sols très meubles (p. ex. sols organiques).

Matelas en rondins de bois: pour des travaux de décapage de courte durée (sur une saison et sans hivernage) ou ponctuels, cette méthode est efficace et peu onéreuse (cf. fig. 34). Toutefois, l'expérience a montré que les rondins se fragmentent rapidement.

Plaques mobiles rigides en métal ou en béton: ces plaques ont l'avantage d'être rigides et de bien supporter de grosses charges. Mais leur poids élevé les rend difficile à manier et onéreuses à transporter. Sur le terrain, les bords des plaques ont tendance à s'enfoncer et à compacter les sols.

⁵⁰ Test de l'efficacité de trois pistes de protection des sols sur chantier à préserver les propriétés physiques des sols. Rapport technique. Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève (hepia) et Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg (HEIA-FR). 2010.

Fig. 33 > Plaques mobiles emboîtables*Essais HEIA Fribourg, Grangeneuve***Fig. 34 > Matelas en rondins de bois***Essais HEIA Fribourg, Grangeneuve*

Source: J.-P. Clément, OFEV

3.9

Procédés d'entreposage provisoire des matériaux terreux

Des expériences d'entreposage sur de longues durées permettent d'apporter des précisions sur la hauteur des dépôts, la durée d'entreposage et le degré de sensibilité des sols. Le tableau 9 reprend les critères actuellement utilisés tout en les complétant et les précisant. Des expériences sur des chantiers ont montré que des stockages de plus de six ou sept ans n'avaient pas posé de problèmes. Pour les sols sensibles à la compaction, il est recommandé de ne pas stocker ces matériaux plus de six mois et d'éviter l'hivernage (stockage d'avril à octobre). Pour les sols riches en matière organique (plus que 30 % de matière organique), une solution de réutilisation immédiate ou avec un entreposage de moins d'un mois est à privilégier. Pour l'entreposage de longue durée, on recommande actuellement de ne pas décaper les sols en place sous les dépôts et de réduire la hauteur de ces derniers.

Etat des connaissances –
Entreposage provisoire des
matériaux terreux

Tab. 9 > Mesures recommandées pour l'entreposage en fonction du type de matériaux terreux et de la durée de l'entreposage, pour la couche supérieure et la couche sous-jacente

Les hauteurs se réfèrent toujours à des matériaux non tassés

Couche supérieure (horizon A)	Entreposage sans hivernage	Entreposage avec hivernage
Est-il nécessaire de procéder à un enherbement?	Oui, si la durée dépasse 5 mois; attention au risque de colonisation par des plantes indésirables: si ce risque existe, il est recommandé d'ensemencer rapidement.	Oui.
Hauteur du dépôt en fonction de la teneur argile et de la sensibilité des sols	1,5 m; 1 m si la teneur en argile dépasse 30 %	1,5 m; 1 m si la teneur en argile dépasse 30 %
Couche sous-jacente (horizon B)	Entreposage sans hivernage	Entreposage avec hivernage
Est-il nécessaire de procéder à un enherbement?	Oui, si durée >5 mois; si présence de plantes indésirables, ensemencement précoce à effectuer	Oui.
Hauteur du dépôt en fonction de la teneur argile et de la sensibilité des sols	2,5 m; 2 m si la teneur en argile dépasse 30 %	2,5 m; 2 m si la teneur en argile dépasse 30 %

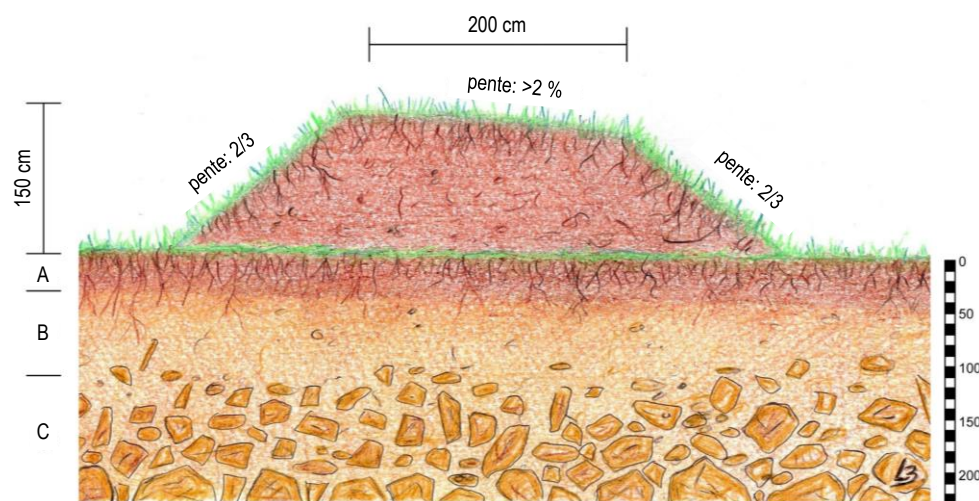
Auteur: E. Bellini, IC Infraconsult SA

La limitation en hauteur des matériaux terreux et la forme triangulaire ou trapézoïdale améliorent l'aération et permettent de réduire les zones d'anaérobie au centre des dépôts (noyau), tout en préservant la structure des agrégats et la teneur en matière organique (cf. fig. 35, tab. 9). L'enherbement des dépôts favorise l'aération du sol par l'intermédiaire des racines et assure l'évapotranspiration, qui peut atteindre en été jusqu'à 5 litres d'eau par m² et par jour. Il faut privilégier un mélange de plantes à enracinement profond (trèfle, luzerne et graminées).

Hauteur, forme et enherbement des dépôts

Fig. 35 > Entreposage provisoire de matériaux terreux

Entreposage de matériaux terreux couche supérieure (forme trapézoïdale);
Durée: 1 an et plus



Croquis: L. Bourban

Si des matériaux terreux peu pollués doivent être entreposés en vue d'une réutilisation sur le même site lors de la remise en état (concentrations comprises entre les valeurs indicatives et les seuils d'investigation de l'OSol), il faut veiller à les stocker sur des surfaces permettant d'éviter tous risques de lessivage de substances dans les sols et de pollution diffuse par les eaux de ruissellement. On choisira donc de préférence des installations de chantier drainées ou des places imperméabilisées.

Matériaux terreux peu pollués

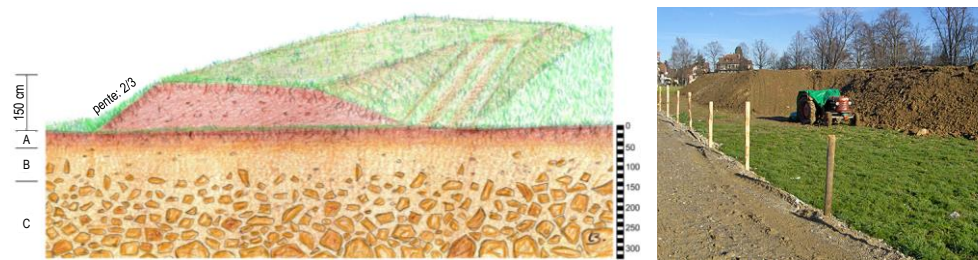
Récapitulation des recommandations:

- > l'entretien des dépôts (fauche, désherbage) doit être pris en compte lors de la planification et de la réalisation (cf. fig. 36);
- > les dépôts avec un hivernage ou plus peuvent être mis en place sur un géotextile non tissé;
- > lors de la mise en forme du dépôt, il faut veiller à ne pas entraver l'aération et la bonne levée des semences par des lissages ou des compactations;
- > les dépôts ne doivent jamais être placés dans une cuvette, car en raison des intempéries, ils risqueraient d'avoir «les pieds dans l'eau» et de s'asphyxier. En cas de ruissellement de pente, l'eau de pluie doit pouvoir s'écouler et il faudra prévoir si nécessaire des drainages;

Recommandations –
Entreposage provisoire des
matériaux terreux

- > les dépôts ne doivent pas être parcourus par des machines de chantier. Il faut en particulier veiller à ce que la pelle ne monte pas sur les dépôts pour les taluter et les reprendre;
- > en fonction de la durée d'entreposage, du type de matériaux terreux et de la présence de plantes indésirables, un enherbement des dépôts est à prévoir.

Fig. 36 > **Forme alternative pour un entreposage prolongé**



Croquis: L. Bourban

Source: R. Quartier, OFEV

3.10 Procédés de reconstitution ou de remise en place des sols après travaux («ouvrage sol»)

A la fin des travaux de génie civil, au moment de la remise de l'ouvrage proprement dit au maître d'ouvrage, la direction des travaux fait procéder à la reconstitution des sols (p. ex. sur tranchée couverte, remblai, espaces verts, etc.) ou à la remise en état des emprises provisoires. La reconstitution des sols est exécutée par des entreprises du génie civil et débouche sur un procès-verbal de remise de «l'ouvrage sol» qui permet d'établir la bienfaisance des travaux de reconstitution et, éventuellement, les assainissements à réaliser avant l'acceptation définitive des sols.

Responsabilités

Après la réception des sols reconstitués ou des surfaces de sols restés en place, débute la «phase transitoire de remise en culture» qui débouchera sur la restitution finale de ces terrains aux utilisateurs. Ce n'est qu'une fois le «procès-verbal de restitution finale des surfaces aux utilisateurs» signé, que le maître d'ouvrage est libéré de la responsabilité des atteintes aux sols et de la bienfaisance des reconstitutions ou remises en état.

La «phase transitoire de remise en culture» est souvent confiée à des entreprises horticoles, agricoles ou forestières spécialisées dans ce domaine. Si les surfaces remises en état ou reconstituées sont de peu d'importance, le maître d'ouvrage peut déléguer ces travaux d'entretien aux futurs utilisateurs, mais il reste seul responsable des conditions sols liées au permis de construire.

La reconstitution de sols doit être soigneusement planifiée, tout comme la phase transitoire de remise en culture. Pour les chantiers comportant d'importantes emprises provisoires et reconstitutions, il est recommandé d'établir un «concept de remise en culture» ou une notice de reconstitution et de phase transitoire de remise en culture décrivant en détail le processus et les exigences à respecter.

La reconstitution des sols débute avec le nivellement du remblai et s'achève à la restitution finale des surfaces aux utilisateurs (cf. tab. 10). Elle comprend un ensemble de règles et recommandations qui sont présentées ci-après.

Etapes de la reconstitution

- > *Remblai nivelé*: la surface du remblai nivelé et l'interface remblai-sol reconstitué doivent faire l'objet de prescriptions concernant l'infiltration et l'évacuation des eaux de drainage. La continuité de la conductivité hydraulique à la base du sol reconstitué doit être garantie.
- > *Détermination des objectifs de remise en culture*: les critères fixés lors de la reconstitution des sols dépendent des objectifs d'utilisation après restitution de ces surfaces.
- > *Critères de reconstitution*: les critères de reconstitution définissent les caractéristiques pédologiques des matériaux terreux utilisés et l'épaisseur des couches en fonction de l'utilisation (p. ex. espace vert, sol agricole productif SDA, sol forestier productif, sols extensifs, etc.). Ils déterminent la durée de la phase transitoire de remise en culture et serviront de référence pour le protocole de réception de l'ouvrage sol.

Tab. 10 > Enherbement et remises en culture – planification et réalisation

Déroulement de haut en bas

	Interventions sur les sols touchés (emprises)	Acquisition des terrains, contrats avec les exploitants	Documents clés pour les sols	
Phases de planification du projet	Exploitation et rotation normale des cultures agricoles, sauf en cas de fouilles archéologiques	Premiers contacts avec les exploitants Convention avec les exploitants	Concept mouvement des terres et remise en culture	Cahier des charges du SPSC
Phase d'appel d'offres aux entreprises	Le maître d'ouvrage est responsable de la protection des sols pour toutes ces phases. Le mandat du spécialiste de la protection des sols sur les chantiers (SPSC) concerne également toutes ces phases.	Enherbement préalable des surfaces définitives et provisoires	Documents de soumission: Conditions particulières, devis descriptif (CAN) Annexes des documents de soumission: plans détaillés des emprises, cartes des décapages	
Phase de réalisation de l'ouvrage		Décapages et mises en dépôt Entretien des dépôts Phase de remise en état des emprises décapées et provisoires	Modalités pour la phase de remise en culture à adapter et mettre à jour si nécessaire Protocole de réception du remblai nivelé	
Phase de mise en service et exploitation de l'ouvrage		Phase transitoire de remise en culture des emprises à assainir ou des sols reconstitués Prolongation éventuelle de la phase de transition	Protocole de réception des sols reconstitués Protocole de réception finale	
		Exploitation et rotation normale des cultures agricoles		

> *Phase transitoire de remise en culture:* cette phase nécessite une bonne information des utilisateurs, car il y a souvent un conflit d'intérêt entre l'impatience de l'utilisateur d'entrer en pleine jouissance de son terrain, et la nécessité de stabiliser et restructurer les sols reconstitués. Pour les surfaces de 5000 m² et plus, il est recommandé de conclure une convention de remise en culture et d'indemnisation selon les normes de l'Union Suisse des Paysans (USP). A la fin de cette phase, un protocole de restitution de ces surfaces est établi, qui libère le maître d'ouvrage de ses responsabilités.

3.10.1 Réalisation et réception du remblai nivelé

L'état de la surface nivelée du remblai sur lequel le sol sera reconstitué a une grande influence sur la morphologie du sol et sur les conditions d'écoulement hydrique des eaux qui percolent à travers lui (engorgement à la base du sol en raison d'un effet barrière ou de dépressions du remblai, et rupture de la conductivité hydraulique à l'interface sol/remblai). La stabilité du remblai vise à prévenir l'apparition d'accumulations d'eau. Le réglage de la pente du remblai, la constitution de rigoles de drainages remplies de galets ou graviers grossiers et la mise en place d'une couche assurant la conductivité hydraulique sol/remblai sont des mesures qui doivent être envisagées et planifiées. La pente est déterminée en fonction des précipitations moyennes de la région:

- > >1000 mm de précipitations annuelles: au minimum 5 % de pente pour le remblai nivelé;
- > <1000 mm de précipitations annuelles: entre 2 % et 3 % de pente recommandée.

Le sol reconstitué ne doit en aucun cas servir au réglage définitif du niveau et de la morphologie du terrain. Les objectifs fixés pour le remblai nivelé doivent être indiqués de manière détaillée et précise et être contrôlés (DT, entreprises et SPSC) à la réception du remblai nivelé avant de passer à l'étape de la reconstitution du sol. Il est recommandé d'établir un procès-verbal permettant de fixer les tâches et les défauts à corriger.

3.10.2 Reconstitution du sol

Une fois le remblai nivelé achevé, il est recommandé de remettre en place la couche sous-jacente et la couche supérieure du sol en une seule étape, en travaillant par bandes successives (cf. fig. 37) et dans le sens de la pente avec la pelle à chenilles. La reconstitution se fait depuis l'horizon C (remblai nivelé). Le sol remis en place n'est en aucun cas parcouru par les machines de chantier.

Fig. 37 > Reconstitution du sol par bandes successives en une seule étape



Source: R. Quartier, OFEV

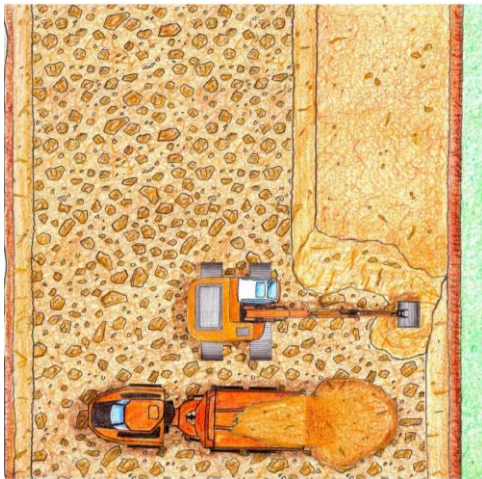
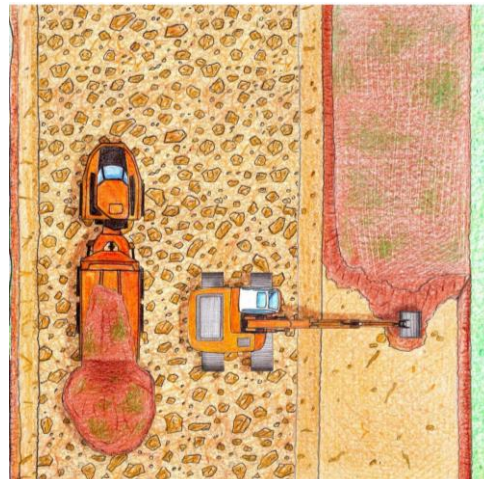
Les avantages du procédé de remise en place par bande sont les suivants:

- > le gain de temps est indéniable, car cette technique permet de travailler plus efficacement et est moins tributaire des conditions météorologiques;
- > les machines ne circulent pas sur la couche sous-jacente et sur le sol reconstitué;
- > l'enherbement de la couche sous-jacente n'est pas nécessaire.

Les inconvénients (ou risques) de ce procédé en une étape (ou par bande) sont les suivants:

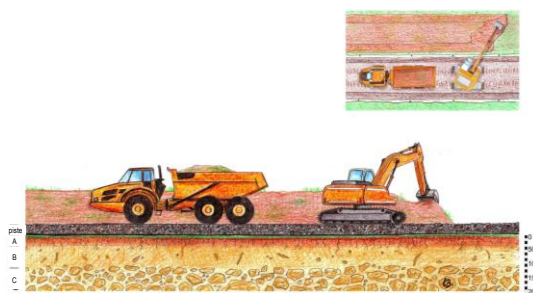
- > cette technique requiert une logistique de chantier plus exigeante (cf. fig. 38), puisque les apports de matériaux de la couche supérieure et sous-jacente du sol doivent se faire simultanément (risque de confusion entre les matériaux);
- > les niveaux altimétriques de la couche sous-jacente et de la couche supérieure du sol seront constamment vérifiés (nécessité de placer des jalons de niveau).

Remise en place par bande

Fig. 38 > Remise en place de l'horizon B et A par bandes*Remise en place par bande, couche sous-jacente**Remise en place par bande, couche supérieure*

Croquis: L. Bourban

Pour la reprise des tas, la pelle à godet devrait travailler depuis le bas de l'andain, les matériaux terreux étant acheminés avec des transporteurs sur une piste de chantier (cf. fig. 39).

Reprise des tas**Fig. 39** > Reprise des tas – horizons A ou B*Reprise des tas (horizons A ou B) depuis une piste**Reprise des tas (horizons A ou B) depuis dessus l'andain. Risques élevés de compaction et lissage*

Croquis: L. Bourban

Source: J.-P. Clément, OFEV

3.10.3 Réception de l'ouvrage sol

Les objectifs fixés pour le sol reconstitué doivent être indiqués de manière détaillée et précise et être contrôlés (DT, entreprises et SPSC) à la réception du sol reconstitué avant de passer à la phase transitoire de remise en culture. Il est recommandé d'établir un procès-verbal de réception de l'ouvrage sol permettant d'établir les défauts à corriger.

3.11 Remise en état des emprises sur sols non décapés, sur fouilles linéaires ou sur surfaces reconstituées

Dans les chantiers importants, la phase de remise en état des sols et la phase transitoire de remise en culture s'effectuent après la remise de l'ouvrage proprement dit, ce qui signifie que la direction des travaux n'est plus associée à ces opérations, sauf pour les éventuelles corrections de défauts constatés à la réception de l'ouvrage sol. La correction de ces défauts, de même que les autres interventions de remise en état et/ou en culture, sont assurées par des entreprises spécialisées (ou par l'utilisateur).

Responsabilités

Le maître d'ouvrage reste responsable jusqu'à leur restitution finale des emprises provisoires, y compris des défauts cachés de l'ouvrage sol ou de ceux résultant des interventions des entreprises spécialisées. Il est tenu de faire respecter les restrictions et précautions visant à protéger le sol de toute atteinte, et de favoriser une restructuration adéquate du sol. L'utilisateur futur ne peut pas renoncer à ces restrictions et précautions prescrites par la législation environnementale sous prétexte d'accéder plus rapidement à ses terrains. Le non-respect de ces prescriptions peut d'ailleurs conduire à la suppression du droit d'indemnisation pour perte de gain ou défaut caché.

Pour ces phases de travaux, le maître d'ouvrage a tout intérêt à conclure un contrat avec le SPSC chargé du chantier ou un expert des remises en culture. Pour les chantiers comportant des emprises provisoires importantes, le maître d'ouvrage devrait s'assurer durant la phase de développement du projet que ces questions seront étudiées en détail par des spécialistes et fixées dans une notice sur la remise en état et la phase transitoire de remise en culture des emprises provisoires.

Le planificateur doit se poser trois questions à propos de la remise en état:

Planification

- > *Quelles sont les surfaces concernées par une remise en état?* Il s'agit, d'une part, des emprises provisoires du chantier sur des sols non décapés et si possible enherbés au préalable, comme les installations de chantier et les accès avec ou sans piste, etc., et, d'autre part, des fouilles linéaires (<1,25 m) pour conduites enterrées, des fouilles linéaires de 1,25 m à 2,50 m, des surfaces de sols décapés puis remis en place sur le sous-sol initial, et des surfaces de sols reconstitués sur remblais nivelés.
- > *Quels sont les sols à remettre en état?* Pour les fouilles linéaires importantes et les sols décapés ou reconstitués, la phase transitoire de remise en culture est détaillée dès la planification. A la fin du chantier, le SPSC établit l'état de malaxage superficiel et de compaction des couches du sol en place.
- > *Quelles sont les mesures ou interventions préconisées?* Les interventions et mesures à réaliser durant la phase transitoire de remise en culture (cf. fig. 40) dépendent des caractéristiques pédologiques des sols concernés, de leur état, de leur besoin de stabilisation structurale (tassement naturel, restructuration par les racines et les organismes du sol) et de leur future utilisation.

Fig. 40 > Décompactage avec une bêcheuse

Source: Office de la protection de l'environnement et de l'énergie, Bâle Campagne

Le tableau 11 propose des mesures de remise en culture durant la phase transitoire en fonction des types d'emprise et des caractéristiques pédologiques des sols concernés.

La restitution finale des surfaces remises en culture, avec ou sans phase transitoire, fait l'objet d'un protocole de restitution finale à l'utilisateur. Celui-ci est établi par un expert sol (p.ex. SPSC ou pédologue) en présence de l'utilisateur, du propriétaire foncier et du maître d'ouvrage. Dans certains cantons, le responsable de la mise en œuvre de l'OSol sur les chantiers exige d'être présent pour les restitutions de surfaces importantes ou à utilisations particulières (p.ex. SDA). La protection des sols sur les chantiers se termine avec l'approbation du protocole par tous les acteurs concernés. Sauf défauts cachés, le maître d'ouvrage est dès cet instant libéré de toutes responsabilités et prétentions pécuniaires.

Divers outils d'aides à la planification ont été publiés par la Confédération, les cantons ou d'autres institutions. Ces documents sont également mis en lien depuis le site internet de l'OFEV. Des aides pour les planificateurs ont été développées dans le cadre de la rédaction de cette publication et sont téléchargeables sur le site internet de l'HEIA-FR, Haute école d'ingénierie et d'architecture, Fribourg (<http://soletconstruction.ch>).

Phase transitoire de remise en culture

Restitution finale des sols des emprises provisoires

Outils d'aides à la planification

Tab. 11 > Mesures de remise en culture durant la phase transitoire

	Types d'emprise	Interventions/mesures	Contrôles/documents
Fouilles et emprises provisoires	Emprises provisoires sur sols en place peu ou pas sensibles à la compaction	Aucune, si état satisfaisant après travaux. L'utilisateur est informé des précautions conseillées pour ménager les sols après travaux	<ul style="list-style-type: none"> • Expertise de l'état par l'expert sol et si état satisfaisant protocole de restitution finale et immédiate à l'utilisateur.
	Emprises provisoires sur sols en place moyennement sensibles à la compaction Fouilles linéaires de <1,25 m	Constat par l'expert sol d'éventuelles atteintes et de leur ampleur et intensité: <ul style="list-style-type: none"> • Mesures de décompaction (bêcheuse)? • Mise en herbage de fauche extensive avec au moins un hivernage? 	<ul style="list-style-type: none"> • Convention sur les mesures à prendre et les indemnités dues à l'utilisateur. • Contrat d'exécution avec une entreprise spécialisée (ou l'utilisateur). • Protocole de restitution finale après mesures.
	Emprises provisoires sur sols en place très sensibles à la compaction Fouilles linéaires de >1,25 m à 2,50 m	Constat par l'expert sol d'éventuelles atteintes et de leur ampleur et intensité: <ul style="list-style-type: none"> • Mesures de décompaction (bêcheuse)? • Mise en herbage de fauche extensive avec au moins deux hivernages? 	<ul style="list-style-type: none"> • Convention sur les mesures à prendre et les indemnités dues à l'utilisateur. • Contrat d'exécution avec une entreprise spécialisée (ou l'utilisateur). • Protocole de restitution finale après mesures.
Décapagés	Sols décapés et remis en place sur le sous-sol initial	Expertise de la remise en place: <ul style="list-style-type: none"> • Constat des défauts à corriger (pierres, déchets, moulles ou inégalités de la surface). • Contrôle de conformité du sol (réception ouvrage sol: qualité des matériaux, épaisseur des couches). • Détermination du nombre d'hivernages de l'herbage de fauche nécessaires à la stabilisation du sol remis en place. 	<ul style="list-style-type: none"> • Protocole de réception de l'ouvrage sol. • Convention sur les mesures à prendre, la durée de la phase transitoire de remise en culture et les indemnités dues à l'utilisateur. • Contrat d'exécution avec une entreprise spécialisée (ou l'utilisateur). • Protocole de restitution finale après mesures.
Remblayages	Sols reconstitués sur des remblais	Expertise de la remise en place: <ul style="list-style-type: none"> • Constat des défauts à corriger (pierres, déchets, moulles ou inégalités de la surface). • Contrôle de conformité du sol (réception ouvrage sol: qualité des matériaux, épaisseur des couches). • Détermination du nombre d'hivernages de l'herbage de fauche nécessaires à la stabilisation du sol remis en place selon le classeur ASGB «Fiche remise en culture». 	<ul style="list-style-type: none"> • Protocole de réception de l'ouvrage sol. • Convention sur les mesures à prendre, la durée de la phase transitoire de remise en culture et les indemnités dues à l'utilisateur. • Contrat d'exécution avec une entreprise spécialisée (ou l'utilisateur). • Protocole de restitution finale après mesures.

Auteurs: E. Bellini, IC Infraconsult SA et J.-P. Clément, OFEV (Ateliers sanu future learning sa, 2013)

4 > Cas-types avec des recommandation pour la protection des sols

Dans le cadre des travaux préliminaires à la rédaction de cette publication, il est apparu judicieux d'offrir l'opportunité à quelques experts de présenter des types de chantier illustrant des problématiques «nouvelles». Ces cinq contributions reflètent le point de vue personnel des auteurs sur des cas particuliers de chantiers basé sur leurs expériences pratiques et les conclusions qu'ils en ont tiré. Ces contributions visent à stimuler la réflexion sur la protection des sols sur les chantiers.

4.1 Chantier avec emprise temporaire en forêt

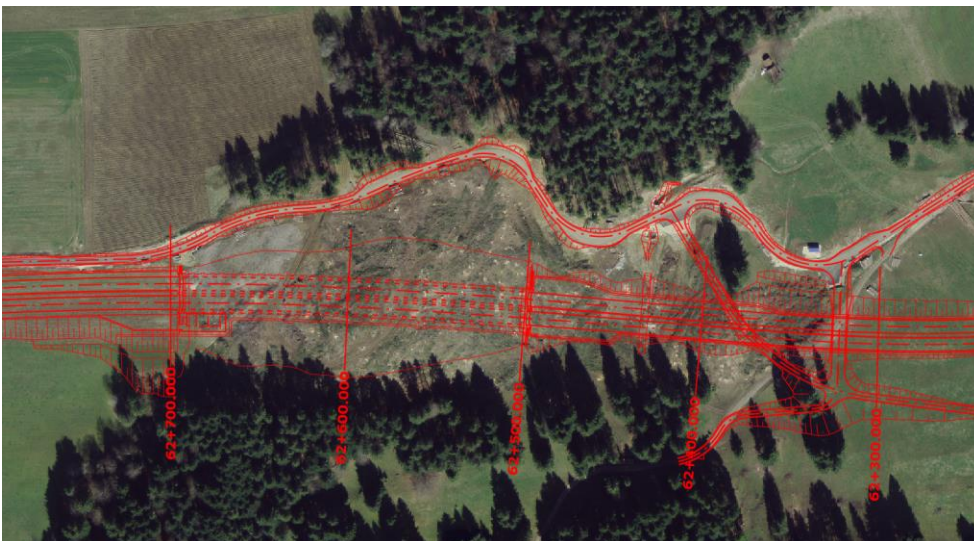
Construction de la route nationale A16 Transjurane – un exemple de décapage des souches et de remise en état en milieu forestier.

Cette route nationale relie, du nord au sud, la frontière franco-suisse à Delle-Boncourt (Territoire de Belfort-Canton du Jura) et à Bienne (Canton de Berne). Longueur totale de 85 km, avec alternance à deux et quatre pistes. Le projet définitif faisait l'objet d'une étude d'impact sur l'environnement (EIE, 3^{ème} étape), qui a précisé les impacts du tracé et a défini les modalités de compensation.

Auteur:
Bruno Hostenstein, ingénieur
forestier EPFZ

Situation et projet

Fig. 41 > Plan de situation avec orthophoto – A16 «Transjurane» de Boncourt (JU) à Bienne (BE)



Source: A16 Transjurane

L'exemple présenté ci-après est l'objet d'une emprise temporaire en forêt. Le tracé autoroutier est construit dans une galerie couverte à deux tubes de deux voies de circulation (quatre pistes). Il fallait défricher deux hectares de forêt pour permettre de construire à ciel ouvert cet ouvrage souterrain (tranchée couverte), remblayé à la fin des travaux de génie civil (cf. fig. 41).

Un bilan initial quantitatif et qualitatif en ce qui concerne le défrichement et le reboisement de compensation est requis en vue de l'autorisation de défrichement. Quant au sol, le but est d'en récupérer l'humus forestier et de le mettre en dépôt intermédiaire en vue de la réutilisation ultérieure. La qualité de l'humus forestier est jugée suffisamment bonne pour une valorisation. Le décapage envisagé prévoit un mélange des horizons A et B du sol forestier. Cet humus forestier sera réutilisé sur la ou les surfaces destinées à reconstituer un sol forestier. Ainsi on crée un milieu favorable qui permet d'introduire directement des plants d'arbres forestiers et de réduire la proportion des essences pionnières.

Afin de préparer le sol pour le décapage, il fallait procéder au défrichement, ce qui nécessitait l'utilisation de machines (tracteur forestier, processeur, porteur) parcourant le sol forestier. Ces travaux se déroulaient pendant la saison hors végétation. En exécutant ces travaux, les horizons A (couche supérieure) et B (couche sous-jacente) du sol se mélangeaient sur la majeure partie de la surface.

Le concept de gestion des sols contient un plan des zones à décapier. Pour chaque zone, on définit l'épaisseur de l'humus forestier à décapier, la surface et le volume estimé. On indique également la surface nécessaire pour le stockage intermédiaire et l'endroit. On précise la réutilisation ultérieure (endroit, épaisseur, volume). Ceci permettra d'établir un bilan qui renseigne sur les éventuels déficits ou excédents. Un calendrier des travaux détermine les démarches à effectuer.

Le permis de construire doit mentionner des charges à respecter quant au sol forestier (récupération, stockage, réutilisation). Pour la soumission des travaux «Extraction et broyage des souches», il importe de disposer de données précises telles que le nombre de souches et la surface exacte. Au-delà, il faut définir la méthode de travail avec la ou les machines et le résultat final exigé. Ainsi l'entreprise qui soumissionne sait comment et avec quel équipement elle doit travailler et le prix offert sera plus précis et comparable. La surface de défrichement est définie dans le plan d'emprise ou plan de défrichement faisant l'objet du dossier de défrichement. Voir «Plan de défrichement», figure 42.

Une fois les travaux de bûcheronnage terminés, y compris la récupération grossière des branches et petits bois pour la valorisation comme bois-énergie, le terrain est prêt pour l'extraction des souches ainsi que pour le broyage des débris des souches et des rémanents de coupe.

La méthode appliquée comprend deux passages avec une machine sur chenilles semblable à une pelle mécanique. Le premier passage consiste à extraire les souches avec une vis (semblable à un tire-bouchon) et, lors du deuxième passage, on procède au broyage en copeaux de tout ce qui est matière bois en surface ou dans le sol. Cette machine sur chenilles permet de travailler une surface d'un rayon de dix mètres autour

**Caractéristiques et enjeux
pédologiques**

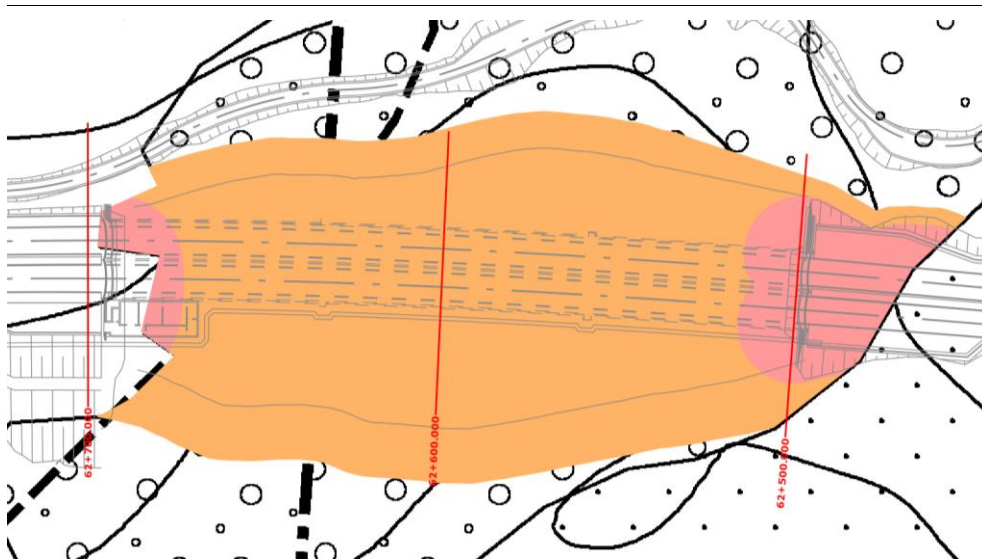
Concept de gestion

Phase de planification

Phase de réalisation

de la machine. Ensuite elle se déplace et travaille le secteur suivant. Lors du deuxième passage avec le broyeur, les copeaux de bois sont mélangés avec l'humus forestier (horizons A et B). Ce mélange est décapé avec une pelle mécanique en fonction de l'épaisseur des horizons A et B et mis en dépôts intermédiaires. Les tas d'humus forestier ont une hauteur entre deux et trois mètres. Durée de la mise en dépôt: environ trois ans (cf. fig. 43).

Fig. 42 > Plan de défrichement – A16 «Transjurane» de Boncourt (JU) à Bienne (BE)



Source: A16 Transjurane

L'évolution de la qualité de l'humus forestier mis en dépôt dépend beaucoup de l'aération du stock. D'une part, les copeaux de bois mélangés à l'humus forestier évitent un compactage du tas et assurent une aération et, d'autre part, ils ont un effet de drainage pour le stock. Ainsi la durée de stockage peut sans problème aller au-delà de trois ans. Plus la durée de stockage est longue, plus la minéralisation est importante. La mise en place d'une couverture végétale permet de diminuer ce phénomène (stabilisation de la matière organique).

La remise en état prévoit une restitution de l'humus forestier avec une épaisseur d'environ 30 cm. Ainsi on crée des conditions très favorables pour la remise en culture, ce qui permet d'introduire directement des essences d'arbres forestiers en plus d'une proportion d'essences pionnières qui permettent d'améliorer le sol. En tenant compte de la station (altitude 600 m, versant au nord de la chaîne de Montoz dans la Vallée de Tavannes), il est prévu de planter un tiers d'essences pionnières (aulne blanc, bouleau, saule) et deux tiers d'arbres forestiers pour produire du bois (sapin blanc, épicéa, érable, orme). Le projet ne prévoit pas de semis préalable. Du fait que l'on restitue l'humus forestier, le sol permet de travailler avec des plants à racines nues.

Ce système de décapage et de dessouchage permet de limiter les dégâts au sol du fait que cette machine est développée pour ce genre de travail spécialisé. Elle possède des chenilles larges, ce qui limite la pression sur le sol. Son poids est de 25 t. Et elle a l'avantage de travailler secteur par secteur en restant stationnaire. Avec le tire-bouchon, on peut extraire des souches en profondeur de n'importe quel diamètre. Ainsi des débris de souches viennent en surface prêts pour le broyage. Avec son bras de dix mètres de long, la machine peut travailler des surfaces non praticables et les chenilles larges permettent de circuler sur tous les types de sol: sol marécageux, sol sensible, sol très organique. Même un sol caillouteux n'empêche pas le travail avec le broyeur.

Expériences

Recommandations pour chantiers similaires:

Recommandations

- > pour tout travail d'extraction et/ou de broyage de souches, les machines sur chenilles sont mieux adaptées que les tracteurs à pneus qui font plus de dégâts au sol;
- > ces travaux doivent être confiés à une entreprise spécialisée sur la base d'un appel d'offres direct et non par sous-traitance;
- > pour l'appel d'offres, la surface à traiter doit être clairement définie ou alors le nombre de souches par catégorie de diamètres doit être connu;
- > les dépôts intermédiaires doivent être surveillés s'il y a de la végétation indésirable qui s'installe. Un entretien s'avèrerait alors nécessaire. Un ensemencement peut être judicieux pour éviter la germination de saules et autres plants indésirables sur les tas. Des mélanges possibles sont: UFA Queen GOLD, UFA 323 GOLD, UFA Queen GOLD + luzerne, UFA Remise en culture GOLD et Schweizer 323. L'ensemencement se fait dans la période de mars à septembre. En général, on procède à deux à trois fauches par année. Une année sèche et des tas moins organiques demandent moins d'interventions;
- > plus un dépôt reste longtemps, plus un ensemencement est judicieux pour empêcher la germination de plants indésirables;
- > il faut planifier les surfaces nécessaires au stockage intermédiaire. Prévoir des emprises temporaires dans le cadre du projet d'approbation, si possible à proximité du chantier (question des coûts de transport);
- > les travaux de décapage doivent être surveillés par la direction des travaux. Il s'agit d'une tâche qui incombe à un spécialiste, en l'occurrence au SPSC.

L'engagement des machines sur les sols défrichés dépend de la sensibilité des sols (hydromorphie, épaisseur, taux d'argile etc.) et du broyage des souches, car le tapis forestier ainsi formé devrait augmenter la portance du sol et donc diminuer sa sensibilité. Le tableau 12 propose des règles d'engagement.

Engagement des machines

Tab. 12 > Recommandations concernant les conditions de ressuyage du sol forestier et l'engagement de machines chantier

Sensibilité du sol	Limite d'engagement	Pression au sol	Poids des machines
peu sensible (p. ex. rendzine)	min. 10 cbar	max. 0,5 kg/cm ²	max. 30 t
normal (p. ex. sol brun)	min. 10 cbar	max. 0,5 kg/cm ²	max. 25 t
sensible (p. ex. gley)	min. 20 cbar	max. 0,4 kg/cm ²	max. 20 t

Source: B. Holenstein, ingénieur forestier EPFZ

Les sols forestiers sont une matière précieuse. Il importe donc de les récupérer. L'exemple traite une emprise temporaire en forêt où l'humus forestier décapé est réutilisé sur place. Pour les emprises définitives, il importe également de récupérer l'humus forestier et de le mettre en dépôt intermédiaire. On en manque très souvent lors des remises en état de décharge ou de carrières.

Humus forestier décapé

Fig. 43 > Illustrations de l'emprise temporaire en forêt – A16 «Transjurane» de Boncourt (JU) à Bienne (BE)

Coupe rase – défrichage



Souches



Broyage



Vis tire-bouchon en action



Dépôt d'humus forestier



Détail de la vis tire-bouchon



Source: B. Holenstein, P. Studer, P.-A. Gogniat

4.2 Chantiers en milieux alpins

Le projet «Reisseck II», de la société autrichienne Hydro Power AG, consiste à agrandir la centrale à pompage-turbinage Reisseck II (Autriche, région de Carinthie).

Les centrales électriques de Malta et de Reisseck/Kreuzeck sont transformées afin d'augmenter de 40 % environ la capacité de production de courant de pointe. Les installations existantes sont complétées par une centrale et une conduite forcée souterraines. Bien que les bassins supérieur et inférieur de l'installation existaient déjà, quelque 260 000 m³ de déblais rocheux (matériaux d'excavation conventionnels et matériel de fraisage d'un tunnelier) devaient être déposés de manière permanente à une altitude comprise entre 2200 et 2300 m. Les interventions temporaires sur le sol concernaient une surface d'environ 50 000 m² située entre 2100 et 2400 m d'altitude.

Les zones prévues pour accueillir les matériaux rocheux étaient principalement formées de sols bruns alpins comprenant parfois un horizon B relativement épais, auxquels s'ajoutaient localement des rankers alpins. Certaines parties étaient en outre constituées de sols squelettiques humifères qui s'étaient formés sur d'anciens dépôts de matériaux de chantiers créés lors de la construction, il y a 60 ans, de l'actuelle centrale électrique. En général, seule une petite quantité de matériaux terreux y avait été déposée sur la couche sous-jacente minérale d'éboulis et de gravier. En raison du système poral de ces anciens déblais et de l'érosion des particules fines qui en est résulté, le processus de formation du sol n'a parfois même pas encore débuté. En ce qui concerne la végétation, celle-ci était constituée d'associations de type *Sieversio-Nardetum* (pelouse à nard), des parties assez étendues étant également colonisées par des associations d'arbrisseaux nains (*Rhododendron ferrugineum* et autres espèces). Dans les secteurs des anciens déblais rocheux s'est développée une végétation pionnière éparse formée de diverses plantes pulviniformes et espèces des pelouses alpines.

Les restrictions et conditions-cadres pour les travaux de construction étaient liées au fait que les secteurs à proximité immédiate des zones prévues pour le dépôt définitif n'étaient pas suffisamment étendus pour y entreposer provisoirement les matériaux de la couche supérieure du sol et la végétation. Par ailleurs, des quantités très importantes de matériaux ont été produites en peu de temps pendant les années 2011 et 2012, alors que la remise en état et la renaturation du site ne pouvaient être entreprises qu'après l'achèvement complet de l'ensemble du projet, à savoir en janvier 2014 (voire même en 2015).

Certaines restrictions étaient aussi imposées par la durée relativement longue de la période hivernale à cette altitude. Ainsi, les travaux d'enlèvement de la végétation et de la couche supérieure du sol ne pouvaient pas être entrepris avant la fin mai, après le déneigement naturel des surfaces concernées. En revanche, l'humidité du sol n'a guère posé de problème étant donné la déclivité assez importante des surfaces de prélèvement et de remise en place des matériaux terreux et leur exposition plein sud. La remise en place des matériaux a occasionné beaucoup de travail manuel, et les surfaces ne pouvaient pas être végétalisées par mauvais temps (pluie, chutes de neige, etc.). Cependant, l'interruption temporaire de l'enherbement n'a pas eu de conséquence sur le déroulement général des travaux vu l'étendue du chantier.

Auteur:

Dr. Helmut Wittmann, IfÖ Institut für Ökologie OG, Technisches Büro für Ökologie

Situation et projet

Caractéristiques et enjeux pédologiques

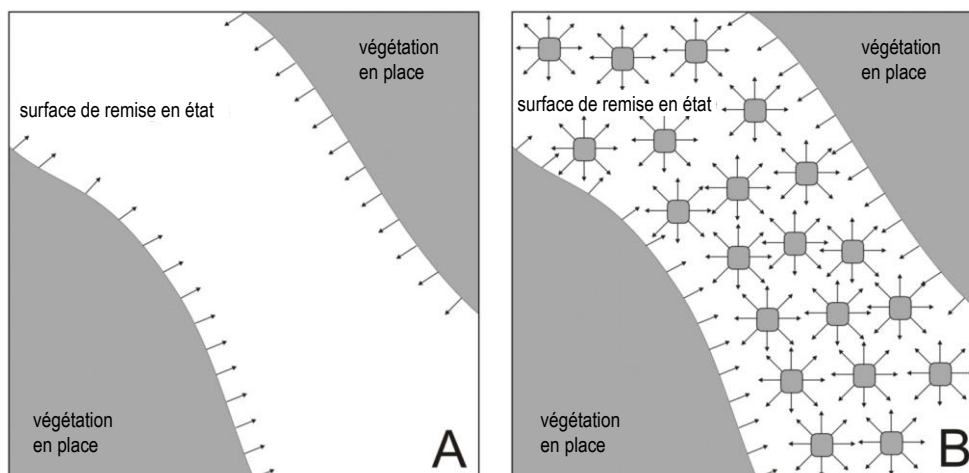
Les objectifs de remise en état du site ne se limitaient pas à la reconstitution du sol, mais visaient aussi à établir une végétation durable ne nécessitant pas d'entretien. Celle-ci devait être dans une large mesure identique à la pelouse initiale, de manière qu'après un certain temps, même un spécialiste ne puisse plus la distinguer de la végétation d'origine. Il s'agissait en outre de choisir une technique de végétalisation qui permette de stabiliser immédiatement le terrain tout en laissant la végétation se développer librement. Les autorités n'ont autorisé le dépôt permanent d'une quantité aussi importante de matériaux à cette altitude qu'à la seule condition que ces paramètres soient respectés.

Le concept de gestion des sols comprenait d'une part l'enlèvement de la végétation en place sur l'ensemble de la surface, d'autre part le décapage de l'horizon B riche en particules fines. Une partie des fractions (couche supérieure humifère avec végétation, et horizon B riche en particules fines) devait être entreposée à proximité des emprises, et la plus grande partie à des emplacements appropriés situés à l'étage montagnard (env. 1500 m d'altitude). Ces matériaux étaient destinés à être réutilisés par la suite pour la remise en état et la renaturation du site en altitude après l'achèvement des travaux sur le remblai du matériel d'excavation. D'une manière générale, la végétalisation des zones de dépôt devait se faire soit en posant une couverture végétale sur toute la surface, soit en recourant à la procédure combinée semis/mottes de gazon alpin. (cf. fig. 44). Cette technique consiste à déposer des mottes de gazon en damier sur une fine couche de sol de l'horizon A (ou sur des fractions de l'horizon B riche en particules fines ayant reçu des apports d'engrais), et d'ensemencer les zones intermédiaires avec un mélange spécial pour sites d'altitude. Les faibles distances de dissémination des semences produites par les mottes de gazon alpin, ajoutées aux semis en germination, permettent d'obtenir assez rapidement une végétation identique à la végétation naturelle. Pour prévenir l'érosion et stabiliser les fractions fines de la couche supérieure de sol, il était prévu de toujours recouvrir la surface avec des filets en fibre de coco fixés par des sardines.

Concept de gestion

Fig. 44 > Procédure combinée semis/mottes de gazon alpin

Principe de la procédure combinée semis/mottes de gazon (les flèches symbolisent l'espace de développement de la végétation): la plantation de mottes de gazon alpin disposées en damier permet de limiter l'espace de terrain à recouvrir par les plantes et d'obtenir ainsi rapidement une colonisation naturelle.



Le concept de gestion des sols et les stratégies de végétalisation étant déjà décrits en détail dans les documents de soumission, la seule exigence mentionnée dans l'autorisation était la mise en œuvre intégrale des mesures prévues dans ce domaine. La technique combinée semis/mottes de gazon alpin était présentée et expliquée de manière précise et la méthode nécessaire illustrée par des images dans les plans détaillés accompagnant la planification.

Phase de planification

Le décapage de la couche supérieure du sol a été effectué à l'aide d'une pelle hydraulique munie d'un godet adapté, qui permettait en général d'enlever facilement le sol et la végétation en place (cf. fig. 45). Dans les secteurs très pierreux, de petites pelles équipées d'un godet adapté ont été utilisées. En principe, le transport des fractions de sol a été assuré au moyen de véhicules à benne basculante. Après le transport, l'horizon B riche en particules fines a d'abord été entreposé sur une hauteur maximale de un mètre pour pouvoir y déposer l'horizon A avec la végétation. Les fractions de sol et les mottes de gazon alpin ont été entreposées avec une petite pelle de 4,5 t, en général avec le soutien de deux ouvriers travaillant à la main. En principe, un épierrage a été effectué lors du dépôt des fractions, en particulier au niveau de la couche supérieure du sol.

Phase de réalisation

Dans certains secteurs, l'horizon B et l'horizon A ont pu être enlevés simultanément avec la végétation existante et directement mis en place dans d'autres secteurs de remblais déjà en place. Ce mode de travail a nécessité une planification logistique du déroulement du chantier. Il a notamment fallu protéger les surfaces de prélèvement (qui se situaient donc déjà dans la zone du chantier) en posant par endroit une clôture. Dans les zones ne se prêtant pas à une remise en place directe, on a utilisé les matériaux entreposés à l'étage montagnard (horizon B riche en particules fines, recouvert par l'horizon A avec la végétation). Ceux-ci ont été chargés et ramenés en altitude pour être mis en place après un entreposage d'un an et demi. Pour la remise en culture finale, un peu plus de 10 000 m² de végétation sont encore entreposés à l'étage montagnard. D'ici la fin du chantier, l'entreposage provisoire aura duré jusqu'à quatre ans. Aucun problème notable (embroussaillage, développement de plantes ligneuses) n'est apparu jusqu'ici, les fractions de sol entreposées et la végétation ne nécessitent pas d'entretien hormis d'être protégées des machines de chantier.

La mise en place de la couche supérieure du sol et de la végétation s'est faite par étapes, parallèlement à la création des dépôts permanents de matériaux rocheux. La dimension des différentes zones à remettre en état et à renaturer était principalement déterminée par l'accessibilité des surfaces de remblai avec le bras de la pelle. Autrement dit, les matériaux rocheux ont été déversés jusqu'à la hauteur permettant encore d'appliquer la couche supérieure du sol et la végétation avec la pelle mécanique. Cette méthode a conduit à une mise en place simultanée des couches de matériaux rocheux et des mottes.

En complément des mesures de protection des sols et de végétalisation, les surfaces reconstituées ont été aménagées visuellement avec des roches de différentes grandeurs ainsi que des arbres morts en s'inspirant du milieu naturel environnant. Ces «accessoires» ont contribué à une intégration optimale de ces zones dans le cadre paysager.

De bonnes à très bonnes expériences ont été faites avec la procédure choisie. Malgré l'altitude extrême, le sol et la végétation ont atteint assez rapidement des conditions très proches de l'état naturel, voire presque naturelles. Les filets en fibres de coco ont permis de prévenir complètement l'érosion superficielle et d'éviter ainsi des travaux ultérieurs. Hormis deux à trois fumures complémentaires à faible dose, aucune autre mesure n'est nécessaire.

Expériences

Les mesures de protection des sols et de végétalisation ont été très bien acceptées par le maître d'ouvrage. Celui-ci avait déjà eu l'occasion d'expérimenter dans d'autres chantiers alpins les méthodes utilisées. Les coûts supplémentaires de la protection des sols et de la végétalisation se sont révélés tout à fait supportables, et ce pour les deux raisons suivantes:

1. la possibilité de déposer de manière permanente une grande quantité de matériaux à proximité immédiate de l'endroit où ils ont été produits permet d'éviter des transports coûteux dans la vallée;
2. les surfaces revégétalisées ne nécessitent aucun entretien, le maître d'ouvrage n'a plus besoin de s'en occuper après l'achèvement du projet.

Il n'y a pas eu de problème ni d'expérience négative avec le présent projet.

Sur le plan pratique, les recommandations suivantes paraissent nécessaires:

Recommandations

- > bien informer l'entreprise chargée d'exécuter les travaux sur les techniques de protection des sols et de végétalisation utilisées, en soulignant le caractère «irremplaçable» de la couche supérieure du sol et de la végétation;
- > établir un appel d'offres relativement détaillé, si possible avec une présentation précise et illustrée par des images du déroulement des travaux, car pour de nombreuses entreprises de construction, l'utilisation de ce genre de techniques est une nouveauté. L'appel d'offres peut être utilement complété par des explications techniques sur les procédures lors des entretiens avec les soumissionnaires;
- > concevoir une logistique de chantier bien adaptée, de manière que la couche supérieure du sol et la végétation soient toujours protégées, y compris pendant les autres étapes des travaux. En général, le plus judicieux est de «dégager» une surface d'une grandeur appropriée de ses matériaux valorisables en fonction de l'avancement du chantier. De cette manière, le déroulement technique des opérations peut progresser rapidement sans devoir toujours faire attention aux précieuses zones de sol et de végétation;
- > exiger des entreprises qu'elles fassent appel à des collaborateurs hautement qualifiés pour ces activités (en particulier en ce qui concerne les conducteurs des pelles mécaniques);
- > utiliser un mélange de semences de haute qualité préparé par des spécialistes en fonction des lieux d'utilisation. Il doit comprendre des espèces «structurantes» parfaitement adaptées à l'altitude et au lieu d'utilisation (en général Poaceae – graminées) et quelques légumineuses (Fabaceae – papilionacées) favorisant la formation du sol. L'adaptation à l'altitude et au site est un critère beaucoup plus important que la richesse en espèces! La diversité sera de toute façon assurée par la végétation de la couche supérieure du sol remis en place;

- > en ce qui concerne l'utilisation et l'application d'engrais longue durée, les quantités doivent être réduites par rapport aux indications du fabricant; mieux vaut fertiliser plus souvent afin de soutenir en permanence le développement de la végétation;
- > les zones revégétalisées doivent être protégées de toute pâture pendant au moins trois périodes de végétation après l'achèvement de travaux; suivant l'altitude, l'exposition, la durée d'enneigement et le développement de la végétation, une période plus longue peut s'avérer nécessaire. En raison du piétinement et du broutement des parties de plantes productrices de semences, la pâture est extrêmement dommageable au développement de la couche végétale;
- > accompagner ces mesures par une surveillance pédologique et/ou écologique du chantier; le responsable de cette surveillance collabore à l'information préalable des entreprises, met à disposition son expérience en matière de logistique de chantier, donne des explications lors de l'exécution des travaux sur le terrain, et assure au moins périodiquement le suivi de la mise en œuvre.

Fig. 45 > Illustrations des étapes du chantier alpins – Reisseck II (Kärnten, A)

Quelque 260 000 m³ de déblais rocheux ont été déposés sur une crête rocheuse à une altitude de 2200 à 2300 m.



Début des travaux de prélèvement des mottes de gazon alpin avec végétation de la couche supérieure du sol, et préparation pour le transport.



Mise en place et aménagement de la couche supérieure du sol: les mottes de gazon sont déposées en damier sur une fine épaisseur de couche supérieure de sol (env. 10 à 15 cm). Des pierres de différentes grandeurs sont déversées sur la surface pour reproduire l'aspect du terrain environnant.



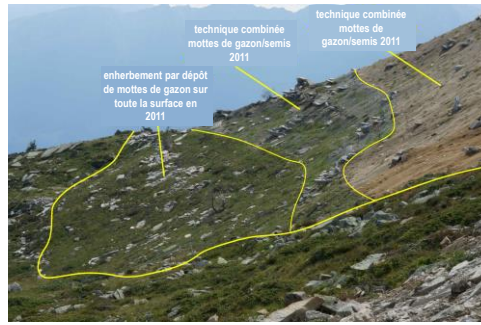
Ouvriers en train de fixer à l'aide de sardines le filet en fibres de coco de stabilisation des matériaux déposés; au premier plan on distingue la couche supérieure de sol mise en place, avec les mottes de gazon disposées en damier.



Le terrain après l'achèvement de l'enherbement et des autres mesures d'aménagement.



Développement de la végétation en 2012, montrant les différents stades en fonction des dates de mise en place.



Développement de la végétation en 2012, montrant les différents stades en fonction des dates de mise en place.



Tout à gauche de la photo, la surface du terrain a été entièrement recouverte avec des mottes de gazon; après une période relativement courte, quatre mois, elle présente déjà un aspect très proche de la végétation environnante.



Photographie aérienne de la crête en été 2012 avec la limite du dépôt de matériaux (flèche rouge), la partie enherbée en 2012 (surface verte ou grise en aval), et les surfaces renaturées et remises en état en 2012 (couleur brun clair).



Aspect en 2013 des surfaces enherbées (à droite et au-dessus du trait tillé jaune: malgré l'altitude extrême et la période de végétation relativement courte, on voit déjà que l'objectif de remise en état est atteint).



Grâce à l'aménagement adéquat du terrain et à l'agencement des matériaux rocheux, l'aspect optique de la surface enherbée est très proche de celui du terrain environnant (à gauche de la ligne jaune).



Après deux ans de développement, le terrain donne déjà l'impression d'un pâturage alpin.



Deux ans après sa pose, le filet en fibres de coco destiné à prévenir l'érosion n'est plus visible qu'en quelques endroits.



Surfaces après deux ans (premier plan) et après une année de développement de la végétation (partie supérieure de la photo).



Andain composé de l'horizon B d'environ un mètre d'épaisseur avec mottes de gazon alpin déposées en surface (horizon A), après deux ans d'entreposage à l'étage montagnard.



Situation – Kärnten, Autriche



Source: Helmut Wittmann, IfÖ Institut für Ökologie OG, Technisches Büro für Ökologie

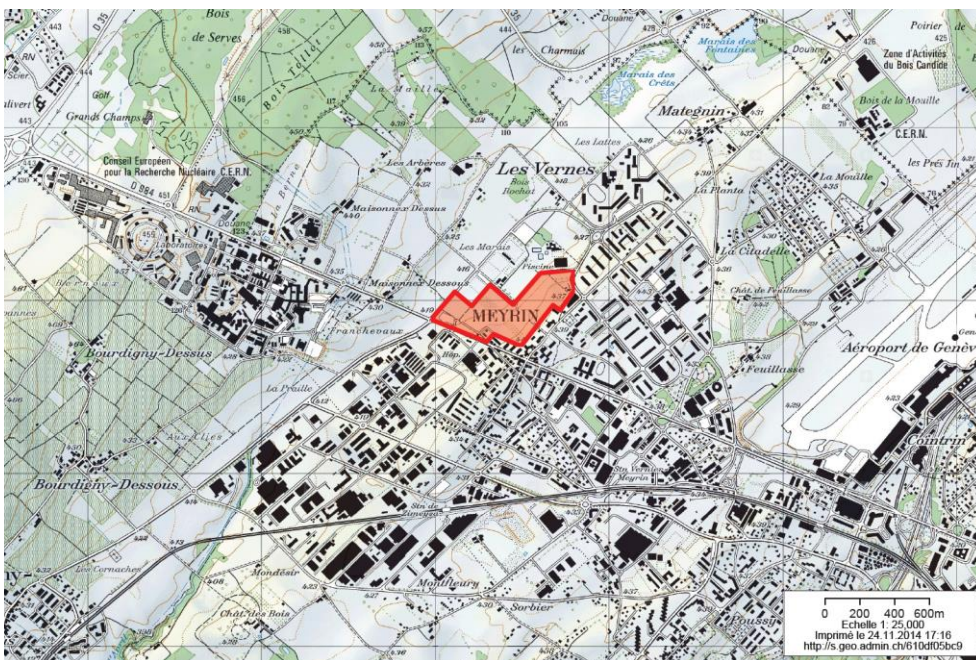
4.3

Chantiers en milieu urbain

La ville de Meyrin (GE) s’est développée durant les années 1960 lors de la réalisation des grands ensembles suburbains. Aujourd’hui, la zone bâtie de la commune vit une nouvelle phase de croissance dans le cadre des grands projets d’aménagement du territoire genevois. Il s’agit de construire de nouveaux quartiers de logements pour la population (cf. fig. 46).

Auteur:
Bastien Guex, service de la
protection des sols du canton de
Genève

Fig. 46 > Plan de situation «Les Vergers» à Meyrin (GE)



Source: map.geo.admin.ch

Le nouveau quartier «Les Vergers» est une extension urbaine sur la zone agricole (cf. fig. 47). Il s’implante sur des surfaces cultivées circonscrites par des habitations, des installations sportives et deux voies de circulation. D’une surface d’environ 19,5 ha, le site a été identifié par le plan directeur cantonal 2015 pour la construction de surface de logements, d’activités et d’infrastructures publiques.

Situation et projet

Fig. 47 > Vue panoramique du chantier «Les Vergers» à Meyrin (GE)



Source: B. Guex, service de la protection des sols du canton de Genève

Préalablement, il a été nécessaire de modifier les limites des zones d'affectation du sol. De la zone agricole et de la zone de verdure ont été déclassées en zone à bâtir et zone sportive. Ensuite, le projet a fait l'objet d'un plan directeur de quartier (PDQ) accompagné d'une étude environnementale stratégique (EES) suivi d'un plan localisé de quartier (PLQ; cf. fig. 48), et enfin d'autorisations de construire. Les procédures du PLQ puis des autorisations ont intégré une étude de l'impact sur l'environnement en deux étapes.

Fig. 48 > Plan localisé de quartier «Les Vergers» à Meyrin (GE)



Source: République et canton de Genève, département du territoire, commune de Meyrin

Le site constitue le flanc sud du vallon du Nant d'Avril. Des dépôts de retrait glaciaire morainique argilo-limoneux composent le substratum des sols du vallon. C'est pourquoi une succession de sols, du pseudogley au fond du vallon jusqu'au sol brun au sommet, a été observée et décrite dans le rapport d'impact sur l'environnement (RIE).

**Caractéristiques et enjeux
pédologiques**

Compte tenu des contraintes de génie civil, l'important volume de matériaux terreux engendré impliqua de trouver une surface d'entreposage temporaire à l'extérieur de l'aire du nouveau quartier. Le phasage et les besoins du chantier ne permettant pas de stocker temporairement, sur place, la totalité du volume nécessaire pour la remise en état (au centre-ville, cela eût été rédhibitoire pour la réutilisation des matériaux). Les pilotes du projet ont loué une surface en zone agricole de 2,1 ha, pour l'entreposage des matériaux terreux uniquement. Cette surface a été intégrée à l'étude de l'impact sur l'environnement et aux autorisations de construire, ce qui a permis d'ajouter les mesures de protection du sol agricole dans les procédures. Cette situation est toutefois exceptionnelle, car c'est en raison de la dimension exceptionnelle du projet que ce dernier est soumis à la procédure EIE. L'utilisation de surfaces en zone agricole pour une installation de chantier sans demande d'autorisation est hélas fréquente.

L'objectif de remise en état des sols est, de manière générale, d'améliorer la qualité des sols de la zone bâtie. Comme il s'agit de reconstituer des sols pour des espaces verts, l'exigence pour la remise en état a porté sur la reconstitution de sols à deux horizons (horizon A et B), en insistant sur l'obligation de réutiliser la couche sous-jacente du sol. Bien qu'une épaisseur standard de sol ait été définie par le RIE et reprise dans les permis de construire, une certaine souplesse est laissée aux architectes en fonction du type d'aménagements paysagers prévus.

Objectifs de reconstitution et de remise en état

Les mesures préconisées pour la protection des sols mentionnées dans le RIE ont été intégralement reprises comme conditions pour les autorisations de construire successives et un plan de gestion des sols, régulièrement mis à jour, a également été demandé. En particulier, le décapage des sols à la pelle mécanique a été exigé.

Phase de planification

L'étude de l'impact, le suivi environnemental de réalisation et la surveillance des dépôts temporaires en zone agricole sont assurés par trois bureaux d'ingénieurs en environnement distincts qui ont la charge de conseiller et contrôler les maîtres de l'ouvrage, ainsi que les entreprises dans les limites de leurs mandats respectifs.

Le chantier a commencé en 2013 et les premiers bâtiments sont en construction (cf. fig. 49). Les sols sont décapés au moyen de pelles mécaniques et les matériaux terreux sont acheminés par des camions circulant sur des pistes de protection du sol. L'entreposage des matériaux en zone agricole est réalisé correctement, en respectant les hauteurs de dépôts de 2,5 m préconisées.

Phase de réalisation

En raison d'une contamination des sols par l'ambrosie à feuille d'armoïse, un décapage sélectif des zones concernées a été réalisé prioritairement et les matériaux pollués biologiquement ont été évacués en décharge.

A ce jour, un retour d'expérience serait incomplet, car la phase de réalisation n'est pas terminée. Cependant, les points suivants peuvent être mentionnés:

Expériences

- > la planification directrice (PDQ et PLQ) a permis d'identifier très en amont l'impact du projet sur le sol, ainsi que les contraintes y relatives (EES et EIE);
- > ces contraintes ont été intégrées aux documents de soumission, ce qui a permis de fixer clairement les règles à suivre par les entreprises;
- > l'exigence d'un SER est bénéfique pour l'application des mesures prévues par l'EIE;
- > une coordination des différents intervenants lors de la phase de réalisation, ici assurée par la commune, est indispensable pour l'application et la cohérence des mesures de protection des sols. Lors de la construction d'un nouveau quartier, l'absence de coordination entre les différentes autorisations de construire conduit souvent à un échec des mesures de protection des sols.

A cet égard, le projet de nouveau quartier «Les Vergers» possède les ressources nécessaires, compte tenu de la coordination communale et de l'encadrement par des spécialistes de l'environnement, pour que les bonnes pratiques en matière de protection des sols soient appliquées.

Par ailleurs, un contact avec l'entreprise de terrassement a été effectué par le service de géologie, sols et déchets, pour s'assurer de la bonne communication entre les intervenants. A ce titre, il est conseillé d'avoir un contact privilégié avec les ingénieurs et les entreprises pour vérifier que les objectifs de protection des sols sont atteints.

Spécifiquement pour les chantiers de très grande ampleur et constitués de chantiers plus petits successifs:

Recommandations

- > coordonner la phase de réalisation. Il est indispensable qu'une entité publique ou privée coordonne les chantiers collectifs (p. ex. parking sous-terrain, routes, canalisations, installations de chantier, zone de dépôt) et les chantiers isolés (p. ex. bâtiment de logements, école).
- > anticiper le besoin de surface pour l'entreposage temporaire des matériaux terreux afin de les intégrer aux procédures. Une zone de dépôt est susceptible de porter atteinte à l'environnement. Cela nécessite d'estimer en amont – p. ex. EIE 1^{ère} étape – les volumes de sols décapés/stockés/reconstitués.
- > planifier et organiser précisément les mouvements de matériaux terreux, élaborer un plan de gestion des sols évolutif qui puisse être utilisé par tous les promoteurs immobiliers et maîtres d'ouvrage du nouveau quartier. Préciser au besoin, les volumes de sols nécessaires pour la remise en état et mettre à jour le plan de gestion des sols.

La densification de la zone à bâtir ou l'utilisation des parcelles agricoles enclavées permet de limiter l'étalement urbain et le morcèlement du paysage, mais elle diminue la surface libre de construction utilisable par une installation de chantier en ville. En outre, les nouvelles lois autorisant une augmentation de la surface bâtie en fonction du standard énergétique de la construction réduisent d'autant la surface libre sur une parcelle. Cette évolution a deux conséquences. Premièrement, hormis en zone agricole, il n'existe quasiment plus de surfaces disponibles pour l'entreposage temporaire des matériaux terreux, et deuxièmement, sans surface d'entreposage, les matériaux terreux ne sont pas réutilisés sur place. A l'exemple du nouveau quartier «Les Vergers» qui, malgré une surface totale de 19,5 ha, a besoin de 2,1 ha supplémentaires pour entreposer temporairement le volume de sols nécessaires à la remise en état.

Remarques générales

Fig. 49 > Illustrations du chantier «Les Vergers» à Meyrin (GE)

Piste d'accès au chantier pour permettre le passage des véhicules à pneus.



Les chantiers en zone urbaine impliquent une planification détaillée des emprises et installations.



Mise en place des matériaux terreux sur le site d'entreposage. La pelle hydraulique travaille en circulant sur le sol.



Pour les entreposages de plus de cinq mois il faut prévoir des accès pour l'entretien des andains.



Pour les entreposages de plus de cinq mois il faut prévoir l'enherbement immédiat des andains, autrement des plantes indésirables vont coloniser les andains.



Il faut être attentif au risque d'envahissement par des plantes indésirables (ici ambroisie) des surfaces remaniées (anthropisation).



Source: B. Gueux, service de la protection des sols du canton de Genève

4.4 Chantiers linéaires de pose de conduites et de câbles enterrés

Les chantiers linéaires de pose de conduites ou câbles enterrés, tels que fibres optiques, câbles électriques, lignes téléphoniques, conduites d'eau potable exigent des mesures de protections spécifiques. Cette contribution est basée sur les expériences et observations accumulées par les auteurs dans le cadre de tels chantiers. Elle ne concerne que des fouilles peu profondes (<2 m) et une largeur du fond de la fouille n'excédant pas 1,25 mètres.

Ces chantiers présentent des conditions de travaux particulières:

- > ils impliquent un avancement régulier des machines de terrassement de parcelle en parcelle. Par conséquent ils touchent des surfaces variées du point de vue de l'utilisation, des caractéristiques et de l'état d'humidité des sols;
- > les emprises sur des sols en place (surface non décapée) concernent des surfaces importantes;
- > les passages sur le sol en place sont nombreux et répétés.

Il est impératif de bien planifier le chantier et, lors des travaux, de faire preuve d'adaptation aux aléas climatiques et autres imprévus.

Pour ces chantiers linéaires, une ancienne technique consistait à travailler (y compris pour les transports et circulations) sur l'emprise décapée: ce décapage limité à la couche supérieure (terre végétale 30 cm) partait du principe qu'il n'y avait plus de risque de compaction ou d'atteinte et que toute mesure pour éviter les compactations de la surface décapée devenait inutile (p. ex. arrêt du travail en conditions humides). Alors qu'en réalité, la couche sous-jacente est fortement tassée et fait obstacle à la croissance des racines et à l'infiltration de l'eau après la remise en culture.

L'expérience pratique de la protection des sols sur les chantiers a montré qu'il est beaucoup moins préjudiciable pour le sol de travailler directement sur la surface enherbée. Le sol en place présente une résistance aux compactations beaucoup plus importante de par sa structure et la trame racinaire. Il possède une capacité de «récupération» bien supérieure (activité biologique – organismes et racines – et alternances gel/dégel). Après les travaux, des outils agricoles permettent de réparer facilement des dégâts dans la couche supérieure, alors que des travaux d'amélioration de l'horizon de profondeur sont beaucoup plus onéreux et peu efficaces.

Sur la base de nos expériences pratiques, il est recommandé de limiter la largeur de l'emprise décapée au minimum nécessaire pour l'enfouissement des conduites. Il convient alors de distinguer l'emprise totale du chantier et la fouille. Chacune de ces emprises fait l'objet de mesures de protection des sols spécifiques durant les travaux ainsi que pour la période de remise en culture. L'utilisation de la technique de décapage limitée à la fouille figure dans l'appel d'offre, de même que les exigences fixées pour les machines et techniques.

Le projet est accompagné par un spécialiste de la protection des sols sur les chantiers (SPSC). Avant le début des travaux, le SPSC, en tenant compte de la sensibilité des sols, participe au choix du tracé, à la localisation des places d'installation et à la plani-

Auteurs:

Véronique Maître,
bureau pEaudSol, et
Jean-Pierre Clément, OFEV

Conditions de travaux
particulières

Limiter le décapage à la fouille

Phase de planification

fiction de l'organisation du chantier. Le rôle du planificateur est primordial. Le choix du tracé et la prise en compte d'une emprise de chantier suffisamment large sont deux décisions qui sont en soi des mesures de protection des sols. Les mesures de protection des sols intègrent les activités de soudage; le planificateur détermine les emplacements prévus à cet effet.

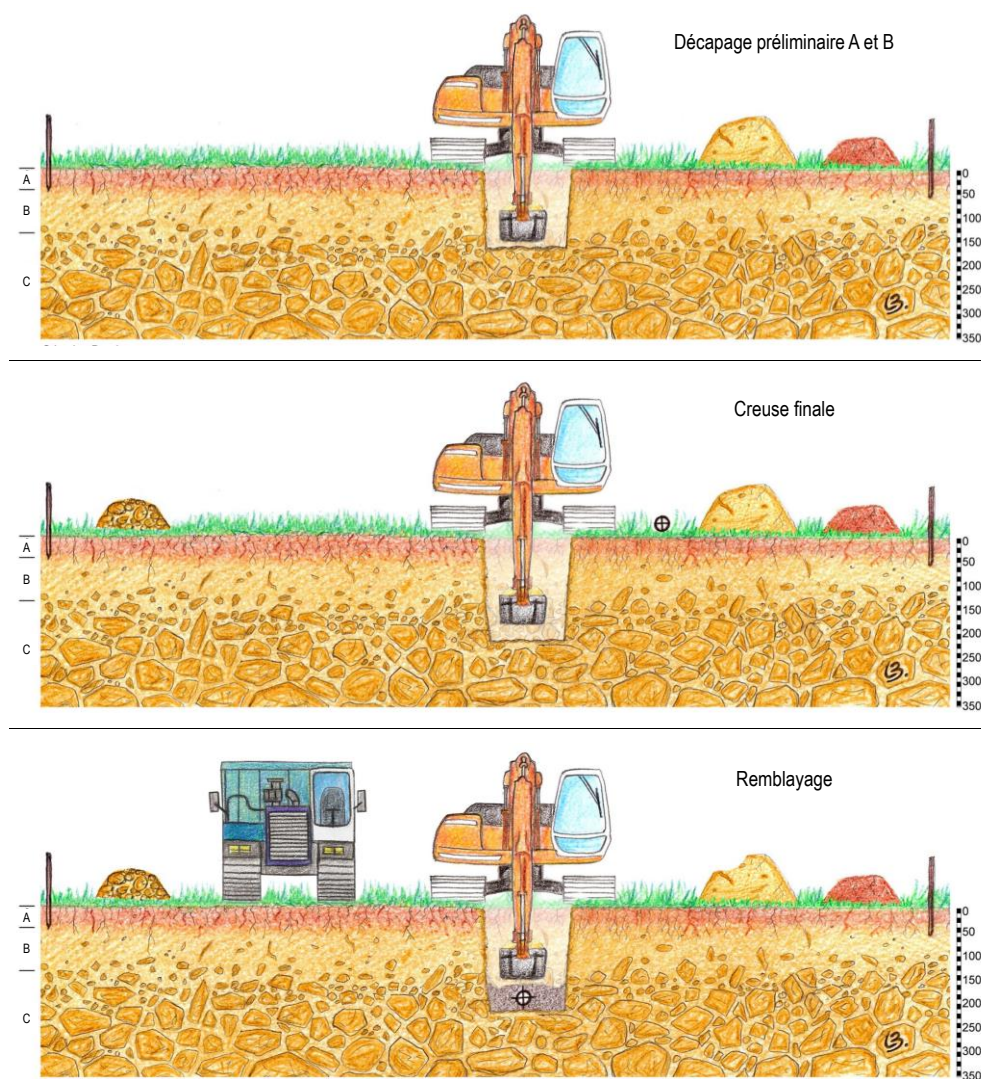
La végétalisation préalable de l'entier de l'emprise de chantier est préconisée (bande de 6 à 18 m; cf. fig. 50):

- > mise en herbe préalable (prévoir au minimum 3 mois de croissance pendant le période de végétation, semer si possible l'année précédente);
- > si on n'a pas pu mettre en herbe, convenir avec l'exploitant agricole qu'il n'effectuera aucun travail du sol (labour, déchaumage, sous-solage, etc.).

Recommandations

Fig. 50 > Fouille linéaire – étapes du chantier

largeur: <2 m; profondeur: <2 m. Les deux piquets symbolisent l'emprise de chantier



Les indemnités des exploitants agricoles ne concernent pas uniquement la perte de culture due aux travaux à proprement parler. Elles englobent:

- > la préparation de l'emprise de chantier pour améliorer la portance du sol avant les travaux;
- > la reprise de l'emprise décapée pour favoriser la reconstitution de la structure du sol et la récupération de sa capacité de drainage initiale.

L'exploitant agricole est indemnisé par le maître d'ouvrage pour toutes ces contraintes sur la base des «directives concernant l'évaluation de la perte de revenu pour les terres cultivables mises à contribution pendant plusieurs années» de l'Union Suisse des Paysans à Brugg (AG).

Le tracé doit être choisi en tenant compte des points suivants:

- > privilégier les bords de routes et chemins et éviter les longs tronçons sans accès. Sinon, privilégier un tracé dans le sens des cultures et en limite de parcelles;
- > éviter les bas-fonds et les anciens marais.

Les travaux sont effectués pendant la période de végétation pour profiter de l'effet de l'évapotranspiration sur le ressuyage des sols. Pour travailler dans des conditions optimales, il faut prévoir suffisamment de machines et de personnel pour profiter des beaux jours.

La technique de décapage limité à la fouille repose sur le principe que tous les passages se font sur le sol en place, sous réserve que, dans les configurations qui le permettent, on privilégie d'abord les circulations sur les surfaces en dur (route, chemin ; cf. fig. 51). Ce principe implique de respecter les exigences suivantes, qui devront être contrôlées/validées par le SPSC mandaté. Utiliser des engins à chenilles exerçant une pression au sol $< 0,5 \text{ kg/cm}^2$. Les activités sur les sols en place doivent respecter les limites d'engagement (humidité du sol) déterminées par le nomogramme en fonction du poids et de la pression au sol de la machine. Ceci implique l'installation de stations de mesures tensiométriques par le SPSC. Pour disposer d'un nombre maximal de jours de travail (succion $> 10 \text{ cbar}$), utiliser des engins à chenilles de poids inférieur à 20 t. Pour les passages répétés (apport de matériel, tirage de la conduite, pose de la conduite, évacuation des matériaux excédentaires etc.), on favorisera l'utilisation de machines à chenilles légères (p. ex. dumpers à chenilles).

Machines et techniques

L'utilisation d'une piste de protection en bordure de la fouille est indispensable en cas:

- > d'utilisation de véhicules à chenilles plus lourds;
- > d'utilisation de véhicules à pneus industriels;
- > de longs tronçons ($< 500 \text{ m}$) sans accès impliquant de nombreux aller-retour.

Quelles que soient les conditions d'humidité et les types de sol rencontrés, il faut installer une couche de protection sur les zones d'installation de chantier pour les travaux de soudage et le dépôt du matériel lourd. La couche de protection peut être de différente nature: graviers ou copeaux de bois, plaques, rondins de bois. Les modalités

d'installation et de démontage sont à respecter de manière rigoureuse si on veut assurer l'efficacité de ces protections (cf. module 3, chapitre 3.8 «Accès et pistes de chantier»).

Fig. 51 > Illustrations des chantiers linéaires

Le système consistant à décaper toute la couche supérieure de l'emprise porte atteinte à la fertilité des sols.



Travail sur sol en place enherbé.



Dépose sans mélange des couches (de droite à gauche: horizon A, horizon B et horizon C)



Remise en place de la couche supérieure et sous-jacente du sol et évacuation des matériaux d'excavation excédentaires.



La remise en place du sol est réalisée sans tasser les couches du sol.



Ensemencement de la fouille remblayée



Source: J.-P. Clément, OFEV

Les travaux de décapage, d'excavation, d'entreposage et de remblayage sont exécutés sans mélanger les couches. Les andains sont bien séparés. Les matériaux terreux sont intégralement remis en place. Le volume équivalent de la conduite et de l'enrobage doit être compensé par l'évacuation des matériaux d'excavation excédentaires. Lors de la remise en place des matériaux, la couche supérieure et la couche sous-jacente du sol

ne sont pas tassés. Il faut façonner le rehaussement induit en une forme de bombement de façon à ce que le travail de semis puisse se faire. La surface finale n'est pas nivelée car le bombement dû au foisonnement disparaît avec le temps.

La DT et le SPSC organisent une réunion sur place avec les exploitants agricoles. Le SPSC fait un constat de l'état après travaux des sols de l'emprise. Selon les résultats du constat, soit la parcelle est restituée à l'agriculteur sans restriction, soit des mesures correctrices sont convenues (cf. module 3, chapitre 3.11 «Remise en état des emprises sur sols non décapés, sur fouilles linéaires ou sur surfaces reconstituées»). Dans le dernier cas, les conditions de dédommagement de l'exploitant sont fixées.

Restitution des terrains à l'exploitant

4.5 **Projet de protection contre les crues – Hochwasserschutz Linth 2000: «Une amélioration qualitative du sol au lieu d'un remplacement quantitatif des surfaces»**

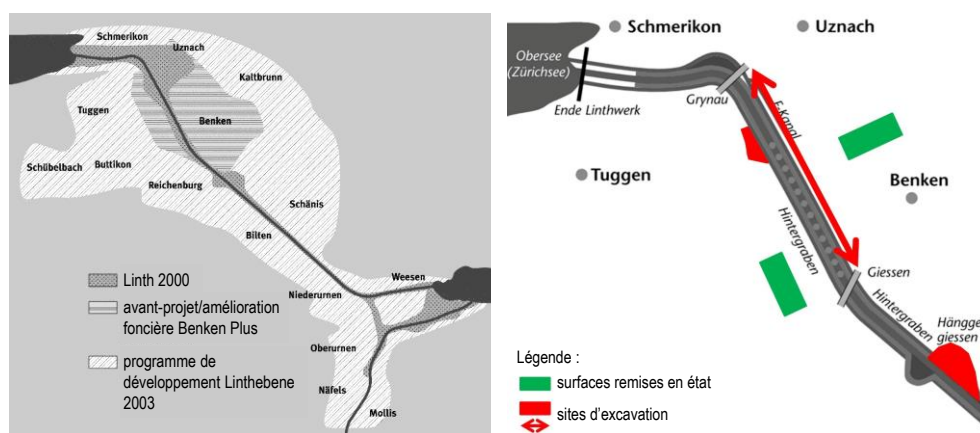
L'élaboration du projet «Hochwasserschutz Linth 2000»⁵¹ s'est faite en tenant compte des planifications supérieures, comme le programme de développement de la plaine de la Linth – EKL 2003 (GL, SG, SZ et ZH) et l'avant-projet agricole Benken Plus (cf. fig. 52). Les bases pour la réalisation des mesures de protection contre les crues et de remise en état des sites ont été élaborées dans ce cadre, notamment en ce qui concerne la coordination des différents besoins (protection contre les crues, développement de l'habitat, loisirs, exploitation agricole et protection de la nature). Les mesures de compensation écologique représentent un paramètre et une base de décision d'une importance déterminante. Pour le projet de protection contre les crues, différentes mesures de compensation écologique ont été prises. Ajoutées à la valorisation des matériaux terreux dans le respect de l'environnement, elles ont eu une influence positive sur le bilan des écopoints selon l'EIE.

Auteur:
Stefan Zeller, Klaus Büchel
Anstalt, Ingenieurbüro für
Agrar- und Umweltberatung,
Mauren (FL)

Fig. 52 > Projet «Hochwasserschutz Linth 2000»

Intégration du projet «Hochwasserschutz Linth 2000» dans les planifications régionales supérieures (EKL 2003 et Benken Plus).

Aperçu schématique du projet «Teilprojekt Linthkanal». Les surfaces remises en état et les sites d'excavation sont indiqués en couleur.



Source: Hochwasserschutz Linth 2000

⁵¹ www.linthwerk.ch

Quelque 300 000 m³ de matériaux terreux très minéraux (horizon A et B) excédentaires ont été produits lors d'un projet de protection contre les crues. Environ 220 000 m³ ont pu être valorisés dans le respect de l'environnement et du sol dans le cadre de deux projets de réhabilitation ayant conduit à une amélioration qualitative des sites concernés, d'une surface totale de 25 ha. Ces mesures ont permis de garantir durablement l'exploitation agricole de ces terrains et de compenser partiellement la perte de surface par une amélioration qualitative du sol. En outre, le trafic généré par le projet de protection contre les crues a pu être fortement réduit, tout comme les volumes de matériaux mis en décharge.

Les projets de réhabilitation des sols ont été réalisés sur des gleys et des sols semi-tourbeux drainés. L'une des caractéristiques de ces sols est qu'ils sont exposés à une dégénération progressive (tassement et affaissement de la tourbe). Les systèmes de drainages sont souvent trop âgés et auraient besoin d'être assainis. L'engorgement périodique de la surface du sol en raison de l'élévation du niveau de la nappe phréatique, ajouté à la faible épaisseur de la zone non saturée et aux affaissements marqués, empêchent une exploitation agricole «normale». A long terme, l'exploitation fourragère moyennement intensive à intensive se trouve ainsi menacée. Si aucune mesure de réhabilitation n'est prise, une extensification sera inévitable. Or dans les régions particulièrement intéressantes pour l'agriculture («zones stratégiques»), il est indispensable de garantir que le site se prête au moins à l'exploitation fourragère.

Situation et projet

Caractéristiques et enjeux
pédologiques

Fig. 53 > Réhabilitation de sols semi-tourbeux drainé

Sol semi-tourbeux drainé (état avant travaux)

Sol recouvert (état après travaux)



Source: Section Sols, OFEV

Les principaux objectifs fixés pour la planification et la mise en œuvre étaient la protection durable des surfaces (cf. fig. 53), l'amélioration du sol et des sites, et la conservation de la fertilité. Il s'agissait en outre de valoriser judicieusement les matériaux

Objectifs de remise en état

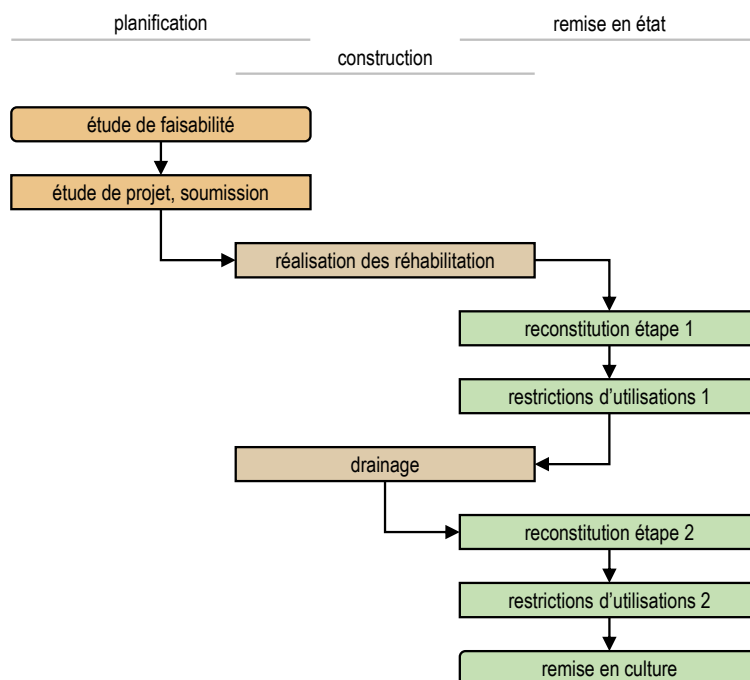
terreux excédentaires en partant de réflexions écologiques, afin de réduire au minimum l'impact environnemental du projet de protection contre les crues dans le domaine des sols, d'éviter d'utiliser le volume limité des décharges pour matériaux d'excavation dans la région, et de diminuer le trafic généré par les transports.

La planification du projet comprenait une évaluation de la faisabilité avec une étude de variantes, et une évaluation pédologique détaillée de la situation avec un bilan des masses. L'analyse pédologique initiale s'est basée sur une cartographie des surfaces à réhabiliter et des zones d'excavation, et sur l'évaluation de différents profils de sondages et courbes granulométriques. Dans les secteurs comportant des pylônes traités contre la corrosion ainsi que des types de végétation dignes de protection, des investigations plus poussées ont été nécessaires. Pour le remplacement du système de drainage, une planification détaillée de l'exécution a été réalisée séparément (cf. fig. 54). Les autorisations ont été délivrées dans le cadre de l'autorisation du projet de protection contre les crues (canton de Saint-Gall) et de la procédure d'autorisation de construire usuelle (canton de Schwyz).

Phase de planification

Fig. 54 > Déroulement du projet de réhabilitation en état

Déroulement du projet de réhabilitation en état. En raison de la mise en place d'un système de drainage dans le cadre du projet de reconstitution des sols, le passage à la phase de remise en culture transitoire s'est fait en deux étapes (restrictions d'utilisations étape 1 et 2). L'interruption de l'exploitation a duré environ cinq ans.



Source: Klaus Büchel Anstalt 2013

L'intégration de la protection du sol s'est faite en premier lieu au travers des «exigences en matière d'environnement» (étude d'impact sur l'environnement du projet de protection contre les crues) (cf. fig. 55). Les mesures concernant les projets de remise en état ont été concrétisées dans la «stratégie de mise en œuvre dans le domaine envi-

Concept de gestion

ronnemental» (phase de planification du projet), dans le «concept de protection des sols» (phase de soumission) et dans le «programme de mesures de protection des sols» (phase de planification de la réalisation). Les détails techniques suivants ont nécessité une planification approfondie: desserte des chantiers (pistes de transport avec copeaux de bois, voies de circulation sur pistes en plaques de métal pour les pelles sur chenilles), profil du terrain, techniques de réhabilitation et reconstitution du sol (20 cm pour l'horizon A, environ 50 à 70 cm pour l'horizon B).

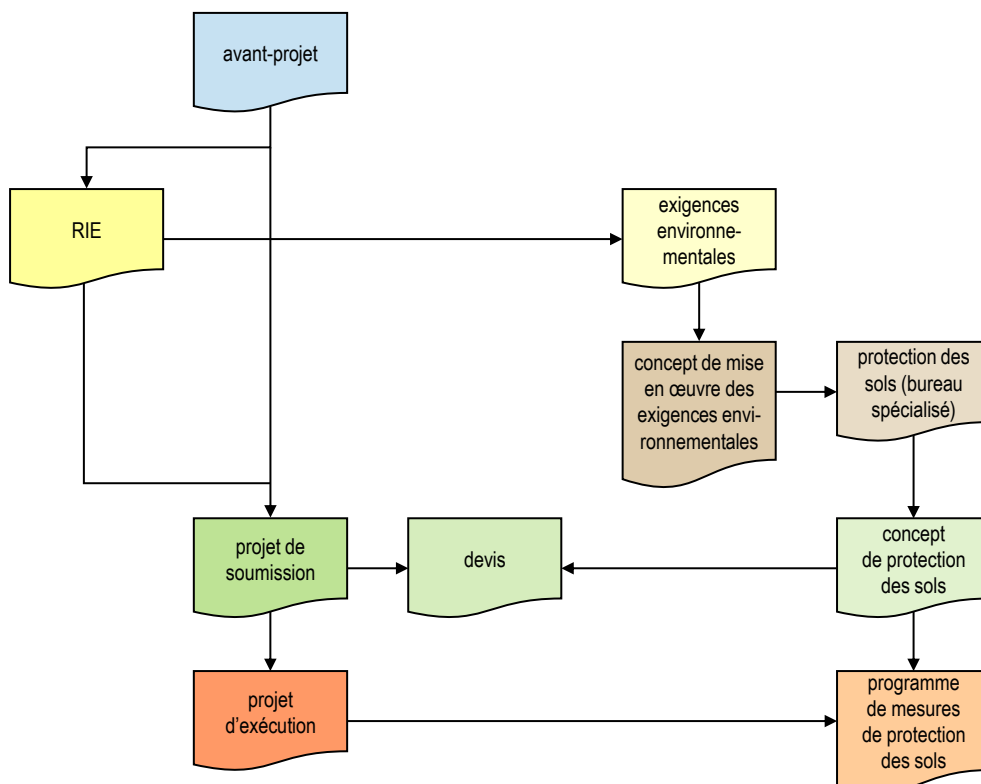
Les projets de réhabilitation ont été traités en tant que lots séparés dans le cadre du projet de protection contre les crues. Ils ont été planifiés et dirigés lors de la réalisation en tenant compte des aspects pédologiques (cf. fig. 57). La direction des travaux a été élargie à un suivi de la protection des sols. Celui-ci a aussi été assuré lors des travaux de construction liés au drainage. Le mandat pour ces travaux a été attribué sous forme de mandat d'accompagnement général à un bureau spécialisé en pédologie.

Phase de réalisation

Les matériaux terreux ont été déposés selon la technique du placement direct (c'est-à-dire sans décapage préalable) sur les surfaces à réhabiliter. Les horizons B et A ont été déposés non tassés par bandes successives à l'aide d'une pelle sur chenilles (emploi de machines commandées par GPS).

Fig. 55 > Planification de la protection de l'environnement et des sols dans le cadre du projet «Hochwasserschutz Linth 2000»

Structure simplifiée du projet, lequel comprend l'approbation du projet de remise en état dans le cadre du projet de protection contre les crues. Dans ce cas, il n'y a pas eu élaboration d'un projet de détail (projet d'exécution).



La surveillance des conditions climatiques et des paramètres pédologiques (principalement la force de succion) s'est faite au moyen de stations de mesure automatiques et autonomes. Grâce au transfert de données sur le serveur FTP et à l'alarme par SMS, le spécialiste de la protection des sols était constamment informé des conditions locales sur le chantier et pouvait prendre les décisions nécessaires au moment voulu. Ce suivi a été complété par des contrôles réguliers sur le terrain avec un tensiomètre et un piézomètre manuels.

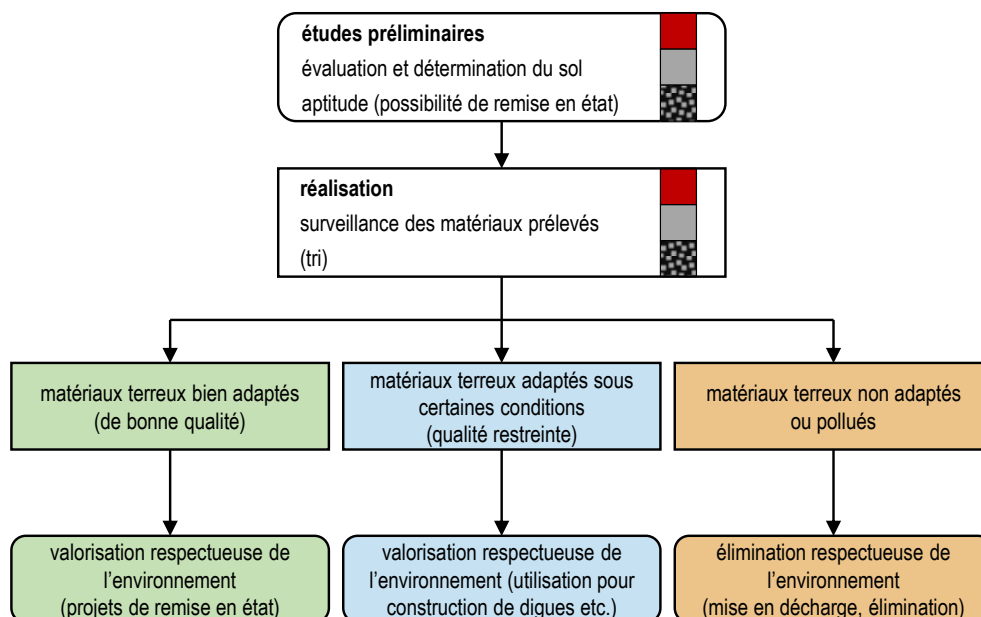
La qualité des matériaux terreux a été systématiquement contrôlée au fur et à mesure de l'avancement du chantier (cf. fig. 56). Sur les surfaces de mise en place des matériaux, un échantillon de sol a été prélevé dans chaque livraison et soumis à une analyse granulométrique (archivage d'échantillons de réserve). La mise en place et l'évolution des surfaces ont été contrôlées par GPS et inscrites sur un plan. La traçabilité des matériaux terreux mis en place est ainsi garantie pour chaque surface.

Les surfaces réhabilitées ont étéensemencées par étapes en fonction de l'avancement du chantier (mélanges trèfle-graminées). Pendant la phase transitoire de remise en culture, le terrain a été fauché. Après une période de consolidation d'une année, la pâture a été autorisée (ânes, moutons, jeunes bovins jusqu'à 200 kg). Le recours au pacage est notamment lié aux difficultés d'exploitation occasionnées par les dépôts le long de la fouille pour la conduite du nouveau drainage. Environ deux ans après l'achèvement du drainage, le sol a pu être entièrement travaillé etensemencé. Les surfaces ont été restituées aux exploitants cinq ans après le début des travaux de réhabilitation.

Phase transitoire de remise en culture

Fig. 56 > Diagramme d'évaluation des matériaux terreux

Diagramme d'évaluation des matériaux terreux par rapport à la qualité du sol, aux possibilités de remise en état et au triage des matériaux. Outre une cartographie générale dans le cadre des études préliminaires et de la planification, un suivi de la qualité a été assuré pendant tous les travaux de construction.



Recommandations

La planification (pédologique) du projet doit être entreprise le plus tôt possible. Il convient notamment d'élaborer à un stade précoce une étude de faisabilité (technique, économique et légale) et un programme provisoire des travaux, afin de pouvoir disposer d'une marge de manœuvre suffisante pour la planification détaillée et la gestion des apports de matériaux terreux. La technique de réhabilitation, les éventuelles interruptions des travaux ainsi que la durée de l'occupation des surfaces pour les travaux sont en l'occurrence des paramètres importants.

Malgré les différentes normes et directives disponibles, il n'existait pas encore de procédure standardisée pour la réalisation de projets de réhabilitation. La situation initiale et les objectifs de la réhabilitation doivent être évalués pour chaque projet et les détails techniques (en particulier le procédé de réhabilitation et la desserte des chantiers) adaptés aux caractéristiques spécifiques du site. La combinaison entre réhabilitation et drainage choisie ici pour les deux surfaces remises en état n'est pas forcément nécessaire. Il convient d'évaluer de cas en cas quelle est la «bonne» solution.

Les paramètres qui ont le plus d'influence sur l'avancement du chantier sont les conditions climatiques et le programme des travaux. Les interruptions prolongées et les temps d'immobilisation doivent donc être pris en compte lors de la planification d'exécution, et coordonnés avec les programmes de travaux en lien avec des projets connexes. En ce qui concerne les arrêts et interruptions de travaux, il convient de définir une solution adéquate et transparente dans l'appel d'offres, et de sensibiliser le maître d'ouvrage et l'entrepreneur à ces défis temporels. Une disposition précisant la capacité exigée pour garantir un avancement minimal des travaux est également nécessaire. La gestion des apports de matériaux terreux est en l'occurrence un facteur essentiel pour garantir un déroulement efficace et à moindre coût du projet.

L'interruption de l'exploitation et la phase transitoire de remise en culture sont à convenir avec le propriétaire foncier et l'exploitant. Le temps joue un rôle déterminant pour la réussite. L'interruption de l'exploitation dépend de différents facteurs, elle dure en général au moins quatre à cinq ans. Pendant cette période, une solution doit être trouvée pour les exploitants concernés (surfaces de remplacement ou indemnités). Pour assurer la coordination et la surveillance des prescriptions concernant la phase transitoire de remise en culture, il est recommandé de désigner un représentant du propriétaire et/ou de l'exploitant afin qu'ils soient aussi associés à la responsabilité du projet.

En plus d'une assurance-qualité systématique et complète, un suivi est dans tous les cas recommandé (monitoring, notamment de paramètres physiques et biologiques). L'amélioration effective du sol peut être démontrée en choisissant des méthodes d'analyse adéquates. L'expérience montre qu'il faut attendre au moins trois ans après l'achèvement des travaux pour pouvoir tirer un premier bilan sur le résultat du projet de réhabilitation.

Fig. 57 > Illustrations des étapes de la réhabilitation des sols – Benken Plus

Acheminement des matériaux terreux par la piste de transport en copeaux de bois et déversement sans tassement.



Mise en place des matériaux terreux au moyen d'une pelle sur chenilles. La hauteur de la couche a été réglée à l'aide d'un GPS.



Détail de l'engagement d'une machine sur une piste (plaques en métal). Les machines légères (faible pression au sol) ont parfois été engagées directement sur le sol en place selon le nomogramme.



Remise en culture transitoire – production de fourrages secs. Utilisation de tracteurs avec pneus jumelés.



Vue d'aérienne du chantier: mise en place des matériaux terreux.



Vue d'aérienne du chantier: mise en place du drainage.



Source: Klaus Büchel Anstalt 2013

> Annexe

Liste des participants aux ateliers thématiques et régionaux, et personnes consultées

Les ateliers ont été organisés par l'équipe de sanu future learning sa et animés par Enrico Bellini et Valérie Parrat, en présence des représentants du mandant OFEV, Jean-Pierre Clément et Roland von Arx, section Sols. Une partie des ateliers a été protocolée par Jürg Rohner (Rohnerconsult).

Tab. 13 > Personnes ayant participé aux ateliers thématiques

	Représentants des services cantonaux chargés de la mise en œuvre de l'OSol (FABO)	Spécialistes SSP/BGS de la protection des sols sur les chantiers (SPSC)	Experts
Sols forestiers	Dominik Mösch (AG) François Schnyder (ZH) Gaby von Rohr (SO)	Geri Kaufmann Martin Zürrer	Andreas Freuler et Peter Lüscher, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL) Bruno Holenstein, ingénieur forestier indépendant Robert Jenni, service forestier et de la faune du canton de Fribourg (SFF) Andreas Ruef, cartographe
Sols urbains	Bastien Guex et Christian Keimer (GE) Daniel Schmutz (BL) Remo Zanelli (ZH)	Martin Frei Mariann Künzi	Joël Amossé, Université de Neuchâtel Pascal Boivin et Lionel Chabbey, Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève (hepia) Silvia Tobias, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL)
Sols alluviaux et organiques	Bastien Guex et Christian Keimer (GE) Daniel Schmutz (BL) Remo Zanelli (ZH)	Günter Markus	Joël Amossé, Université de Neuchâtel Pascal Boivin et Lionel Chabbey, Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève (hepia) Claire Guenat, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) Roland Haab, spécialiste des tourbières
Sols sub-alpins et alpins	Alexander Imhof (UR) Marco Lanfranchi (GR) Roman Sutter (SG)	Nina von Albertini Bertrand Wüthrich	Stefan Julen et Regula Schild, études d'impacts et suivi de chantiers alpins Christian Rixen, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL)
Sols agricoles	Christine Hauert (SO) Claude Kündig (VD) Dominik Mösch (AG) Wolfgang Sturny (BE)	Emmanuel Brandt Franca Ciocco Véronique Maître Marco Rossi Hans Sägesser Matthias Stettler Markus Vogt	Jürg Jaun, conseiller indépendant pour la branche des sables et graviers

Source: E. Bellini, IC Infraconsult SA

Tab. 14 > Personnes ayant participé aux ateliers régionaux

	Représentants des services cantonaux chargés de la mise en œuvre de l'OSol (FABO)	Spécialistes SSP/BGS de la protection des sols sur les chantiers (SPSC)	Experts
Oltén	Daniel Schmutz (BL)	Christoph Abegg Thomas Gasche Bruno Grünenfelder Martin Huber Marion Kaiser Matias Laustela Hans Pfister	Luzius Matile, Haute école des sciences appliquées de Zurich (ZHAW)
Fribourg	Jean Fernex (JU) Barbara Gfeller Laban (FR) Bastien Guex et Christian Keimer (GE) Claude Kündig (VD)	Irène Birolini Marc-André Dubath Véronique Maître Antoine Margot Gaëtan Mazza Adrian von Niederhäusern	Antoine Besson, Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève (hepia) Fabienne Favre Boivin, Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg (HEIA-FR)
Lucerne	Gérald Richner (NW) David Widmer (LU)	Daniele Moro Jan Sutter	
Landquart	Sven Bürzle (FL) Achim Kayser (TG) Gianfranco Tognina (GR)	Jens Bohne Franca Ciocco Andreina Reutemann Stefan Zeller	Helmut Wittmann, IfÖ Institut für Ökologie OG, Autriche

Source: E. Bellini, IC Infraconsult SA

Tab. 15 > Présentation du manuscrit 27 août 2013 à Bienne aux milieux intéressés

Institution	Représentant(s)
Association Suisse de l'industrie des Gravieres et du Béton (ASGB)	Beat Haller
Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)	Adrian Verasani
Centre de formation de la société suisse des entrepreneurs (SSE), Campus Sursee	Markus Enz
CFF Infrastructures	Randy Koch et Thierry Marchon
Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg (HEIA-FR)	Fabienne Favre Boivin
Office fédéral de l'agriculture (OFAG)	Anton Stübi
Office fédéral de l'énergie (OFEN)	Yves Amstutz
Office fédéral des routes (OFROU)	Marguerite Trocmé Maillard
Remontées Mécaniques Suisses (RMS)	Maurice Rapin
sanu future learning sa	Peter Lehmann
Service cantonal d'archéologie NE	Judith Becze-Deak
Service des routes VD	François Petricioli
Société Suisse de Pédologie (SSP/BGS)	Rolf Krebs
Société Suisse des Entrepreneurs (SSE)	Nicole Loichat
Société suisse des ingénieurs et des architectes (sia)	Fritz Zollinger
Union Suisse des paysans (USP)	Martin Würsch

Source: E. Bellini, IC Infraconsult SA

Tab. 16 > Personnes ayant contribué aux modules 1 à 3

Prénom, nom	Fonction	Institution
Pascal Boivin	Professeur, filière agronomie	Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève (hepia)
Elisabeth Clément	Section Espaces ruraux et paysage, surfaces d'assolement (SDA)	Office fédéral du développement territorial (ARE)
Fabienne Favre Boivin	Professeur, filière de génie civil	Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg (HEIA-FR)
François Fullemann	Protection des sols, Division Géologie, Sols et Déchets (GEODE)	Direction générale de l'environnement (DGE), Département du territoire et de l'environnement (DTE), VD
Bastien Guex	Ingénieur sols et sous-sols, Service de géologie, sols et déchets	Direction générale de l'environnement (DGE), Département de l'environnement, des transports et de l'agriculture (DETA), GE
Luzius Matile	Professeur, filière environnement et ressources naturelles	Haute école des sciences appliquées de Zurich (ZHAW)
François Petriccioli	Chef de la section travaux de la division Infrastructure routière	Direction générale de la mobilité et des routes (DGMR), Département des infrastructures et des ressources humaines (DIRH), VD
Bertrand Wüthrich	Conseiller agricole	Fondation rurale interjurassienne (FRI), JU

Source: E. Bellini, IC Infraconsult SA

> Répertoire

Abréviations

ARE

Office fédéral du développement territorial

ASG

Association Suisse des Sables et Graviers (aujourd'hui ASGB)

ASGB

Association Suisse de l'industrie des Graviers et du Béton

ATF

Arrêts du Tribunal fédéral

BAMO

Bureau d'appui au maître d'ouvrage

CAN

Catalogue des Articles Normalisés

CO

Code des obligations

CRB

Centre suisse d'études pour la rationalisation de la construction

DT

Direction des travaux

EES

Étude environnementale stratégique

EIE

Étude de l'impact sur l'environnement

EKL

Programme de développement de la plaine de la Linth (Entwicklungskonzept Linthebene)

FABO

Service cantonal de la protection des sols

FAL

Station fédérale de recherches en agroécologie et en agriculture (aujourd'hui IDU)

FTP

File Transfer Protocol

GVO

Gentechnisch veränderte Organismen

GPS

Système de localisation mondial (Global Positioning System)

HEIA-FR

Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg

IDU

Institut des sciences en durabilité agronomique

LAT

Loi fédérale sur l'aménagement du territoire (Loi sur l'aménagement du territoire)

LFo

Loi fédérale sur les forêts (Loi sur les forêts)

LMP

Loi sur les marchés publics

LPE

Loi fédérale sur la protection de l'environnement (Loi sur la protection de l'environnement)

MO

Maître d'ouvrage

OAT

Ordonnance sur l'aménagement du territoire

ODE

Ordonnance sur l'utilisation d'organismes dans l'environnement (Ordonnance sur la dissémination dans l'environnement)

OFAG

Office fédéral de l'agriculture

OFEFP

Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (aujourd'hui OFEV)

OFEN

Office fédéral de l'énergie

OFEV

Office fédéral de l'environnement

OFo

Ordonnance sur les forêts

OSol

Ordonnance sur les atteintes portées aux sols

OTD

Ordonnance sur le traitement des déchets

PDQ Plan directeur de quartier		
PLQ Plan localisé de quartier		
RIE Rapport d'impact sur l'environnement		
SDA Surfaces d'assolement		
SER Suivi environnemental en phase de réalisation de chantier		
SETEC Système de filtration des eaux de chaussées		
SIA Normes SIA de la Société suisse des ingénieurs et des architectes (sia)		
SMS Service de messagerie (Short Message Service)		
SN Norme suisse		
SPSC Spécialiste de la protection des sols sur les chantiers reconnus par la SSP/BGS		
SSE Société Suisse des Entrepreneurs		
SSP/BGS Société Suisse de Pédologie		
TDR time domain reflectometry		
VSS Association suisse des professionnels de la route et des transports		
	Figures	
	Fig. 1 Gravières: premier plan en reconstitution, arrière plan en exploitation	8
	Fig. 2 La fouille est excavée – Conduite de gaz Transitgas de Walbach (AG) à Däniken (SO) en 1994	9
	Fig. 3 Excursion annuelle SSP/BGS 2013 – Dix ans de la surveillance de la protection des sols sur les chantiers (SPSC)	10
	Fig. 4 Journée de perfectionnement et d'échanges pour SPSC, organisée par la SSP/BGS et le sanu	12
	Fig. 5 La porosité du sol est essentielle au maintien de ses fonctions	16
	Fig. 6 Illustration de la diversité des sols en Suisse	18
	Fig. 7 Les différentes définitions du sol et le champ d'application de la LPE	20
	Fig. 8 Terminologie utilisée pour les talus routiers ou les bas-côtés – filtre en terre	21
	Fig. 9 Chantier en milieu forestier – A16 «Transjurane» de Boncourt (JU) à Bienne (BE)	27
	Fig. 10 Chantier en milieu subalpin – amélioration du sol à Château d'Oex (VD), 1450 m d'altitude	29
	Fig. 11 Chantier en zone de montagne du Jura – pose d'une ligne électrique souterraine appartenant à la BKW Berne SA	31
	Fig. 12 Illustration de différentes situations urbaines caractéristiques avec des profils et des natures de sols très variables	33
	Fig. 13 Chantier en milieu urbain – chantier du bâtiment de l'ARE à Ittigen (BE)	34
	Fig. 14 Données SIG d'un guichet cartographique	41
	Fig. 15 Données agro-météorologiques	41

Fig. 16 Plan des zones de stockage, pistes et installations de chantier	42	Fig. 34 Matelas en rondins de bois	68
Fig. 17 Reconstitution du sol – installation de stockage de gaz naturel	46	Fig. 35 Entreposage provisoire de matériaux terreux	69
Fig. 18 Modèle d'organisation du SPSC, adapté sur la base du modèle du SER	49	Fig. 36 Forme alternative pour un entreposage prolongé	70
Fig. 19 Renouée du Japon	53	Fig. 37 Reconstitution du sol par bandes successives en une seule étape	73
Fig. 20 Vinaigrier	53	Fig. 38 Remise en place de l'horizon B et A par bandes	74
Fig. 21 Ambroisie à feuilles d'armoise	54	Fig. 39 Reprise des tas – horizons A ou B	74
Fig. 22 Comparaison d'évapotranspiration	57	Fig. 40 Décompactage avec une bêcheuse	76
Fig. 23 Suivi des tensiomètres – Influence du type de culture sur les valeurs tensiométriques	57	Fig. 41 Plan de situation avec orthophoto – A16 «Transjurane» de Boncourt (JU) à Bienne (BE)	78
Fig. 24 Tensiomètres mobiles à réponse rapide	59	Fig. 42 Plan de défrichement – A16 «Transjurane» de Boncourt (JU) à Bienne (BE)	80
Fig. 25 Placette de cinq tensiomètres sur chantier	59	Fig. 43 Illustrations de l'emprise temporaire en forêt – A16 «Transjurane» de Boncourt (JU) à Bienne (BE)	82
Fig. 26 Station cantonale fixe	59	Fig. 44 Procédure combinée semis/mottes de gazon alpin	84
Fig. 27 Limite d'intervention d'une machine de chantier à chenilles en fonction de l'humidité du sol	61	Fig. 45 Illustrations des étapes du chantier alpins – Reisseck II (Kärnten, A)	87
Fig. 28 Fouille linéaire avec pelle hydraulique à chenilles sur sol en place enherbé	62	Fig. 46 Plan de situation «Les Vergers» à Meyrin (GE)	90
Fig. 29 Trax et scrape dozer	63	Fig. 47 Vue panoramique du chantier «Les Vergers» à Meyrin (GE)	90
Fig. 30 Remise en place du sol au bulldozer en conditions humides	63	Fig. 48 Plan localisé de quartier «Les Vergers» à Meyrin (GE)	91
Fig. 31 Décapage en bandes	65	Fig. 49 Illustrations du chantier «Les Vergers» à Meyrin (GE)	94
Fig. 32 Pistes à base de grave non traitée 0/45	67	Fig. 50 Fouille linéaire – étapes du chantier	96
Fig. 33 Plaques mobiles emboîtables	68	Fig. 51 Illustrations des chantiers linéaires	98

Fig. 52 Projet «Hochwasserschutz Linth 2000»	99	Tab. 9 Mesures recommandées pour l'entreposage en fonction du type de matériaux terreux et de la durée de l'entreposage, pour la couche supérieure et la couche sous-jacente	68
Fig. 53 Réhabilitation de sols semi-tourbeux drainé	100	Tab. 10 Enherbement et remises en culture – planification et réalisation	71
Fig. 54 Déroulement du projet de réhabilitation en état	101	Tab. 11 Mesures de remise en culture durant la phase transitoire	77
Fig. 55 Planification de la protection de l'environnement et des sols dans le cadre du projet «Hochwasserschutz Linth 2000»	102	Tab. 12 Recommandations concernant les conditions de ressuyage du sol forestier et l'engagement de machines chantier	81
Fig. 56 Diagramme d'évaluation des matériaux terreux	103	Tab. 13 Personnes ayant participé aux ateliers thématiques	106
Fig. 57 Illustrations des étapes de la réhabilitation des sols – Benken Plus	105	Tab. 14 Personnes ayant participé aux ateliers régionaux	107
Tableaux			
Tab. 1 Résumé de la terminologie utilisée selon la situation et la langue	20	Tab. 15 Présentation du manuscrit 27 août 2013 à Bienne aux milieux intéressés	108
Tab. 2 Principales fonctions écologiques, économiques et sociales du sol	22	Tab. 16 Personnes ayant contribué aux modules 1 à 3	109
Tab. 3 Atteintes, sources et effets	23		
Tab. 4 Recommandations pour la planification et la réalisation en milieux forestiers	28		
Tab. 5 Recommandations pour la planification et la réalisation en milieux subalpins et alpins	30		
Tab. 6 Recommandations pour la planification et la réalisation dans des pâturages de l'arc jurassien	32		
Tab. 7 Recommandations pour la planification et la réalisation en sols urbains	35		
Tab. 8 Checkliste de l'analyse de l'état initial – Questions auxquelles le planificateur doit répondre	51		