

Construire en préservant les sols



**Office fédéral de l'environnement,
des forêts et du paysage (OFEFP)**

Construire en préservant les sols



**Office fédéral de l'environnement,
des forêts et du paysage (OFEFP)**

Sommaire

Préface	5
Littérature conseillée avec adresse de commande	6
Introduction	8

Informations pratiques

Fiche 0 : La protection des sols sur les chantiers	11
Fiche 1 : L'état initial	12
Fiche 2 : La manipulation des matériaux terreux	16
Fiche 3 : L'entreposage des matériaux terreux	22
Fiche 4 : La remise en place	27
Fiche 5 : La mise en culture	32
Fiche 6 : La prévention du compactage	37

Informations générales à propos du sol

Chap. 1 La fertilité du sol	41
Chap. 2 Le sol vit	42
2.1 Interface sol/plante	42
2.2 Classification, ordre de grandeur et brève description	43
2.3 Les vers de terre	46
Chap. 3 Les types de sols	48
3.1 Les sols perméables	48
3.2 Les sols engorgés	49
3.3 Les sols hydromorphes	49
3.4 Les sols alluviaux	49
3.5 Les sols hydromorphes organiques	50

Chap. 4 La nature du sol	51
4.1 L'argile	52
4.2 Le silt	53
4.3 Le sable	54
Chap. 5 La structure du sol	56
5.1 Structures primaires	56
5.2 Mottes et assemblages (structure secondaire)	57
Chap. 6 Les pores du sol et la porosité	60
6.1 Masse volumique apparente et densité réelle	60
6.2 Espace poral : les pores et leur répartition dans le sol	61
6.3 Régimes de l'eau et de l'air : la taille des pores	63
Chap. 7 La portance du sol	65
7.1 Conductivité ou perméabilité du sol	65
7.2 Mesure de la force de succion dans le sol	66
7.3 Relation entre le poids, la surface de portance et la transmission de la pression	67
7.4 Force de succion et intervention des machines	67
Chap. 8 Les méthodes d'analyse	69
8.1 Mesure de la capacité d'infiltration	69
8.2 Mesure de la force de succion	72
8.3 Mesure de la masse volumique apparente	74
8.4 Mesure de la résistance à la pénétration	76
8.5 Démonstrations au champ	78
Littérature citée	81
Illustrations	82
Impressum	83

Fiche 0**Fiche 1****Fiche 2****Fiche 3****Fiche 4****Fiche 5****Fiche 6****Chap. 1****Chap. 2****Chap. 3****Chap. 4****Chap. 5****Chap. 6****Chap. 7****Chap. 8**

Max Frisch («L'Homme apparaît au Quaternaire», 1982)

**«Le sol existe
aussi la nuit»**



Avant-propos

Lors de travaux de construction, on excave ou décape souvent d'importantes cubatures de sol fertile, que l'on entrepose en tant que matériaux terreux et utilise ultérieurement, p.ex. pour des remises en culture.

Des sols sont en outre mis à contribution provisoirement pour l'installation du chantier et des pistes de desserte ou l'aménagement de dépôts et de logements pour les travailleurs.

La loi sur la protection de l'environnement et plus particulièrement l'ordonnance de 1998 sur les atteintes portées aux sols exigent que les sols soient protégés des atteintes et que les matériaux terreux soient manipulés avec précaution afin d'en sauvegarder la fertilité. Pour pouvoir le faire, il faut avoir suffisamment de connaissances sur la structure, les organismes vivant dans le sol, les fonctions et la vulnérabilité du sol.

Le présent guide remplace et actualise le manuel épuisé « Protection des sols et génie civil » de 1996. Il résume des connaissances de base sur les sols et montre en six fiches pratiques comment construire en préservant les sols. Le guide complète les normes, les instructions et les directives qui traitent de types particuliers d'interventions du génie civil (p.ex. extraction de gravier, aménagement de conduites de gaz, construction de routes). Il contient l'essentiel de ce qui est valable pour tout type de construction.

Ce guide s'adresse surtout aux entreprises et aux personnes travaillant dans le domaine de la construction, mais aussi aux services de la construction et aux autorités responsables de la protection de l'environnement.

Nous remercions vivement tous ceux qui ont contribué à la réussite de ces recommandations pour l'exécution et qui les appliqueront dans la pratique.

Office fédéral
de l'environnement, des
forêts et du paysage

Bruno Oberle
Sous-directeur



Littérature conseillée avec adresse de commande

Ce choix de textes de référence indique les documents les plus importants en matière de protection des sols contre les atteintes physiques ou chimiques.

adresse de commande **www.admin.ch/edmoz**

- Loi du 7 octobre 1993 sur la protection de l'environnement (LPE), (révision du 1er juillet 1997), RS 814.01
- Ordonnance du 1er juillet 1998 sur les atteintes portées aux sols (OSol), RS 814.12
- Ordonnance du 10 décembre 1990 sur le traitement des déchets (OTD), RS 814.015
- Ordonnance du 26 août 1998 sur les sites contaminés (OSites), RS 814.680

adresse de commande **www.environnement-suisse.ch**

- OFEFP, Commentaires concernant l'ordonnance du 1er juillet 1998 sur les atteintes portées aux sols (OSol), L'environnement pratique, Berne, 2001.
- OFEFP et FAL, Zurich-Reckenholz, Directives pour l'échantillonnage et l'analyse des polluants dans le sol (parution en 2002).
- OFEFP, Instructions pratiques pour l'évaluation et l'utilisation des matériaux terreux, Environnement pratique, Berne (remplace l'instruction pratique n° 4 de 1993), 2001.
- OFEFP, Directive pour la valorisation, le traitement et le stockage des matériaux d'excavation et déblais (Directive sur les matériaux d'excavation), Environnement pratique, Berne, 1999.
- OFEFP, Domaine sol, Informations EIE, n° 6, Berne, 1991.
- OFEFP, Vidéo «Construire en préservant les sols», Berne, 1999.

adresse de commande **www.energie-schweiz.ch**

- OFE, «Directives pour la protection des sols lors de la construction de conduites souterraines de transport (Directives pour la protection des sols, DPS)», Berne, 1997.

adresse de commande **www.vss.ch**

- OFROU, Rapport de recherche n° 245, «Manipulation des sols dans le génie civil», Ch. Salm & Stephan Häusler, Union des professionnels suisses de la route, Zurich, 1999.

adresse de commande **www.admin.ch/sar**

- FAL, IUL, FAW et RAC, Méthodes de référence des stations fédérales de recherches agro-nomiques, Zurich-Reckenholz, (mise à jour annuelle).
- FAL, Cartographie et estimation des sols agricoles, les cahiers de la FAL n° 24, Zurich-Reckenholz, 1997.

adresse de commande **www.be.ch/bve/umnet/index_f.html**

- Commission technique pour la reconstitution des sols du canton de Berne, «Fiche technique – relevés pédologiques pour les décharges et les sites d'extraction de matériaux», Berne - Zollikofen, 1995.
- Commission technique pour la reconstitution des sols du canton de Berne, «Fiche technique – pour la remise en culture de terrains reconvertis», Berne - Zollikofen, 1997.

adresse de commande
www.snv.ch

- SN 640 581a Terrassement, sol : Généralités et données de base, Union des professionnels suisses de la route (SNV), Winterthur, 1998.
- SN 640 582 Terrassement, sol : Inventaire de l'état initial / Tri des matériaux terreux manipulés, Union des professionnels suisses de la route (SNV), Winterthur, 1999.
- SN 640 583, Terrassement, sol : Emprises et terrassements, Union des professionnels suisses de la route (SNV), Winterthur, 1999.
- SN 533 205, pose de conduites et câbles souterrains, Union des professionnels suisses de la route (SNV), Winterthur, 2001.

adresse de commande
www.fsk.ch

- Association suisse des sables et graviers (ASG/FSK), Directives pour la remise en culture, Berne, 2001.

adresse de commande
www.umweltschutz.ch

- PUSCH/BGS, Protection des sols dans les communes – 9 champs d'action, Zurich, 2001.

adresse de commande
www.soil.ch

- Protection des sols contre les atteintes physiques. Stratégie pour la mise en œuvre des nouvelles prescriptions formulées dans la loi sur la protection de l'environnement (LPE) et l'ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol). Société suisse de pédologie, SSP/BGS, document n° 9, ISBN 3 260 05430 8, Zollikofen, 1999.

adresse de commande
<http://ppur.epfl.ch/domaines/7.html>

- Le sol vivant. J.-M. Gobat et al. collection Gérer l'environnement, n° 14, PPUR, 1998. Physique du sol, Musy et Soutter, PPUR, 1991. Cartographie des sols, J.-P. Legros, PPUR, 1996.

adresse de commande
combi.agri.ch/lmz

- Le sol, R. Flückiger et al. Centrale des moyens d'enseignement agricole, Zollikofen, 1994.

adresse de commande
www.inra.fr

- Guide des analyses en pédologie, Denis Baize, INRA Editions, 2000.

Les documents cités dans ce guide figurent dans l'annexe **Littérature citée** à la page 81, et sont mentionnés en accolades [] dans le texte.

Introduction

Ce guide de l'environnement vise à faciliter la mise en œuvre des articles 6 et 7 de l'ordonnance du 1^{er} juillet 1998 sur les atteintes portées aux sols (OSol) [7].

Il traite de la protection de la couche supérieure du sol et du sous-sol (cf. schéma ci-dessous) lors de travaux de génie civil.

DÉFINITIONS

Pédologie

Protection qualitative des sols

Sol en place

Horizon A = Couche supérieure du sol contenant jusqu'à 30% de matière organique

Horizon B = sous-sol, il présente une structure bien développée et il est biologiquement actif. Il contient moins d'humus et de racines que l'horizon A

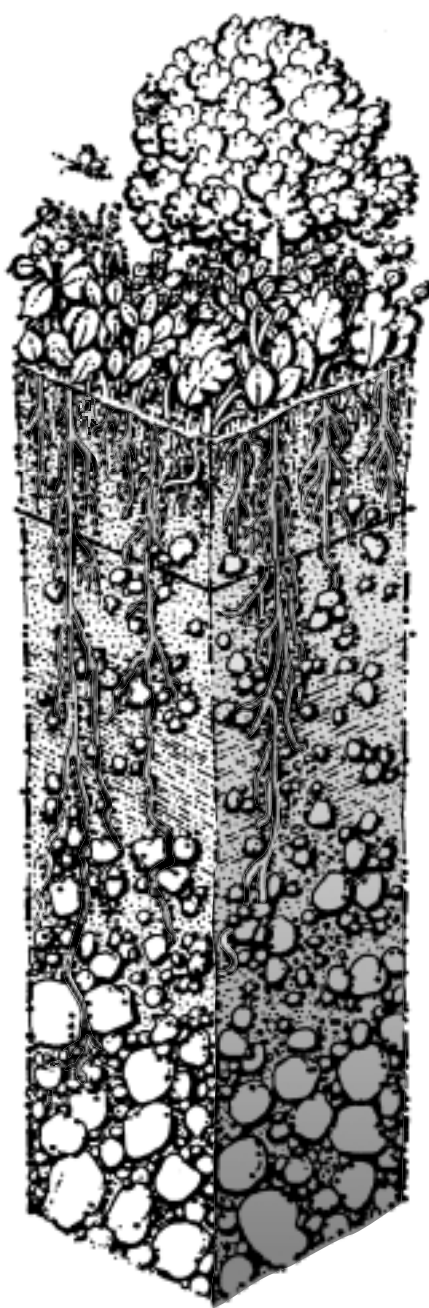
Horizon C = Matériau parental (sous-sol au sens géologique du terme), peu ou pas de racines, composé de sédiments meubles ou de roches fissurées

Couche supérieure du sol (épaisseur variant, en règle générale, de 5 à 30 cm)

Sous-sol

Limite d'enracinement = détermine selon la LPE [8] la limite entre le sol et les matériaux sous-jacents

Sol au sens de la LPE [8]

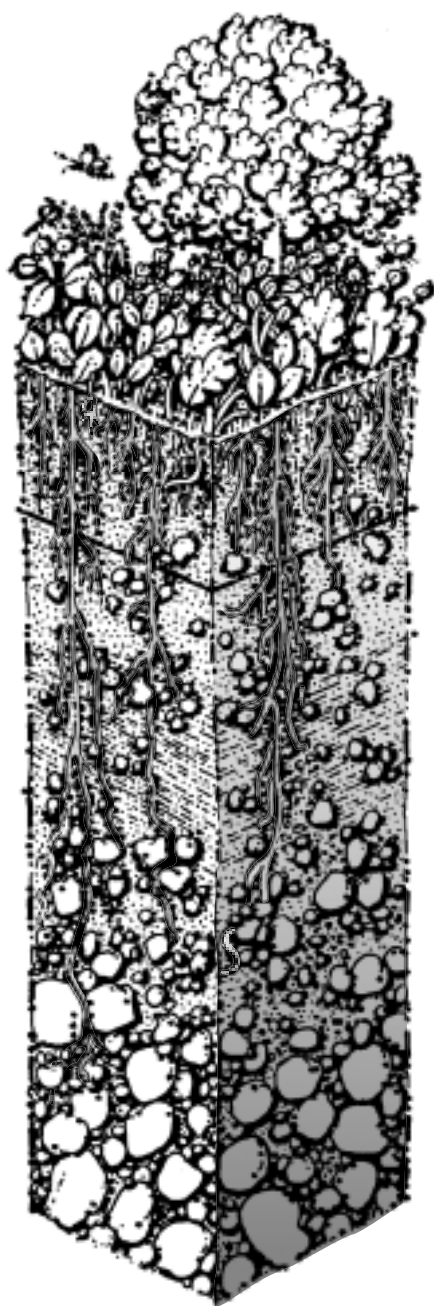


Profil pédologique

Représentation d'un profil de sol et des domaines d'application de diverses bases légales et informations pratiques (cf. Littérature citée, page 81).

Il consiste en une partie consacrée aux conseils pratiques pour la protection des sols lors de toutes les étapes d'un chantier, de la plani-

fication à la remise des terrains (fiche 0 à 6), et d'une autre partie consacrée au sol et à la science du sol, la pédologie (chapitres 1 à 8).



Génie civil et génie rural

Sol manipulé = matériaux terreux

Couche supérieure du sol
décapée (épaisseur variant,
en règle générale, de 5 à
30 cm) / matériaux terreux

Sous-sol excavé

(Lorsque l'épaisseur
de la couche et sa qualité
le permettent, prélever
et entreposer au moins
50 cm)

Matériaux terreux

Instructions pratiques [2]

La limite d'excavation du
sous-sol réutilisable sera
fixée en fonction des objec-
tifs de restitution (épais-
seur du sol après
reconstitution)

Matériaux d'excavation

Directive sur les **matériaux
d'excavation** [9]

Domaine d'application
de ce guide

Représentation d'un profil de sol et des domaines d'application de diverses bases légales et informations pratiques (cf. Littérature citée, page 81).

Informations pratiques



La protection des sols sur les chantiers

Fiche 0

Sur les chantiers qui sont soumis à un rapport d'étude d'impact sur l'environnement (EIE), les travaux de terrassements et autres manipulations de sols (matériaux terreux) doivent, en règle générale, être supervisés par des spécialistes reconnus de la protection des sols sur

les chantiers (SPSC). Cette supervision par des SPSC, pour la protection des sols, au travail d'un organe de révision.

Le cahier des charges type d'un SPSC se présente comme suit :

Phase 1 : Projet et études préliminaires [2] :	Phase 2 : Construction et emprises :	Phase 3 : Remise en place et restitution :
- Mesures de protection des sols : Propositions pour protéger les sols sensibles à la compaction, adaptations ou modifications du plan des mesures et du projet. - Participation à l'attribution des travaux : Exigences posées au parc des machines, organisation des travaux, planning, interruptions pour mauvaises conditions météorologiques. - Gestion des matériaux terreux : Planification du tri des matériaux terreux, de leurs mouvements et de leurs entreposages. - Information des propriétaires et exploitants concernés sur la mise en herbe préalable des surfaces de terres ouvertes faisant partie des emprises du chantier.	- Information du personnel de chantier quant à la protection des sols et des mesures qui en découlent pour le chantier (cf. fiche 6). - Conseil de la direction du chantier pour toutes les questions de la protection des sols : Délimitation en quantité et en qualité des surfaces suffisantes pour l'entreposage des matériaux terreux (cf. fiche 3). - Accompagnement sur place des travaux de décapage. Rédaction des règles de travail et mise en œuvre d'éventuelles mesures de protection des sols. - Participation à toutes les réunions de chantier en rapport aux sols, surveillance indépendante du planning des travaux, présence et contrôle préventif pour toutes les phases des travaux touchant aux sols. - Pendant la phase de construction, information des services cantonaux chargés de la protection des sols sur le déroulement des travaux et sur le respect des mesures prescrites pour protéger les sols.	- Supervision des remises en place en tenant compte du respect des valeurs de force de succion prescrites (cf. fiche 2 et 6). - Restitution des parcelles de sol reconstitué (remise d'ouvrage) en présence de représentants du constructeur, du maître de l'ouvrage et des propriétaires/exploitants, avec protocole de restitution (cf. fiche 4). - Accompagnement des travaux de réparation d'éventuels dégâts (sous-solage, drainage, etc.). - Instruction de l'exploitant sur les règles culturelles à observer pour assurer une bonne restructuration des sols remis en place (cf. fiche 5). - Restitution définitive des parcelles, évaluation de l'état obtenu par rapport à l'état initial (test à la bêche, cf. fiche 5) et libération pour une utilisation normale.

Cahier des charges des spécialistes responsables de la protection des sols sur les chantiers [6].

Pour des projets de petite envergure, non soumis à une EIE, le cahier des charges SPSC pourra être adapté et allégé.

L'état initial

Règles et méthodes

Fiche 1

La caractérisation de l'état initial du sol est obligatoire pour les projets qui sont soumis à un rapport d'étude d'impact sur l'environnement (EIE).

Interventions de longue durée (catégorie A)

Pour ces interventions de longue durée sur des surfaces clairement délimitées, où les matériaux terreux sont en général entreposés une ou plusieurs années avant d'être utilisés pour une reconstitution du sol suivie d'une remise en culture (exemples : gravière, carrière, tunnel en tranchée à ciel ouvert, et autres

gros chantiers), on exige une carte des sols exécutée selon la méthode de Reckenholtz [1].

Interventions de courte durée (catégorie B)

Pour les interventions de courte durée, en général il s'agit des chantiers en ligne, une carte des sols ne convient pas et il faut cartographier les emprises du tracé et les installations de chantier. On cartographie le tracé par sections. Les résultats de la cartographie sont représentés et décrits en lots bien délimités et cohérents du point de vue pédologique, sur des cartes synthétiques du tracé. Les moyens auxiliaires et les critères d'appréciation sont identiques à ceux qui sont utilisés pour établir une carte des sols.

Installations	Mesures	Carte Pédologique	Carte de sections	Test à la bêche (comparaison)	Analyse de terre*	Mesures physiques**
Grands chantiers (route/rail)						
Gravières, carrières, glaisières						
Décharges et remblais						
Conduites souterraines						
Reconstitutions de sols						
Nivellements importants						
Constats d'atteintes existantes						
Atteintes dues à l'exploitation						
Apports de sol ou de substrats						
Utilisation de matériaux terreux hors du chantier						

* Polluants, granulométrie, M.O.

** Masse volumique, précompaction, etc.

Aperçu des méthodes destinées à établir l'état initial des sols [4].

Légende

La détermination de l'état actuel est, en règle générale, exigée dans le cadre de la procédure d'EIE/APG ou peut être exigée pour établir la réalité de demandes de dédommagements.

Ces mesures peuvent être utilisées pour une évaluation plus détaillée, dans le cadre d'expertises ou de comparaisons.

Sols pollués

(investigations complémentaires)

Lorsque le sol est manipulé, il faut tenir compte de l'instruction pratique de l'OFEFP «Évaluation et utilisation des matériaux terreux» [2]. Le sol en place qui va être manipulé doit être analysé si l'on soupçonne qu'il puisse être pollué. Si une pollution est avérée, c'est l'instance cantonale chargée de la protection qualitative du sol qui décide de la suite des opérations. Pour des projets de la catégorie A, l'examen d'éventuelles pollutions fait obligatoirement partie de la description de l'état initial.

Démarche pratique

L'appréciation du sol en profondeur, ou sa description pédologique, se fait en général à l'aide d'une tarière à main (tarière Edelmann ou gouge), jusqu'à une profondeur d'un mètre environ, pour autant que les pierres ne fassent pas obstacle. Sur la base des informations ainsi obtenues (sondage pédologique), on dresse une description détaillée du sol, sous la forme d'un levé de terrain.

Catégorie A

En fonction de la topographie du lieu et de la variabilité des types de sol que l'on s'attend à trouver, on sondera tous les 25 à 50 mètres sur le tracé.

L'aspect et la couleur des horizons du sol donnent des indications sur le développement, l'épaisseur et la perméabilité du sol.

On estime la texture du sol (nature du sol) par test tactile [3]. On peut également constater les signes caractéristiques de régimes d'eau et d'air perturbés (engorgement, taches de rouille, coloration grise, odeur).

La présence de carbonates peut être vérifiée à l'aide de l'acide chlorhydrique (HCl) et le pH peut être approximativement déterminé, sur la base d'une échelle colorimétrique, à l'aide d'un réactif liquide ou de bâtonnets.

Les types de sols identifiés sont regroupés en unités pédologiques et leurs surfaces délimitées par unité cartographique, en général à une échelle de 1 : 5'000 [4].

Pour chaque unité cartographique définie, on creuse un profil pédologique. C'est seulement dans un profil qu'on peut discerner et apprécier de manière fiable les aspects morphogénétiques des sols : la structure du sol, sa pierrosité, les migrations des éléments fins (argiles), certaines réactions chimiques, la profondeur de l'enracinement, l'activité biologique (vers de terre), l'épaisseur d'un sol et les limites de ses horizons. Ces données sont reportées sur une fiche de description du profil pédologique type de l'unité cartographique. On prélève également des échantillons des horizons du profil pour des analyses chimiques et physiques en laboratoire [4].

Catégorie B

Pour des chantiers en ligne, comme par exemple la pose d'une conduite de gaz, on formule des exigences un peu différentes pour la cartographie. Elles se trouvent dans des directives spécifiques [5].

En premier lieu, on relève des caractéristiques visibles importantes pour le chantier, comme les pentes longitudinales et transversales, les glissements de terrain, les sorties d'eau et les mouilles locales, les zones de pierrosités importantes, etc.

Puis, à l'aide de la tarière, on définit l'épaisseur de la couche supérieure du sol (profondeur du décapage), le régime hydrique (perméabilité et ressuyage), la profondeur d'altération (sols superficiels ou profonds), la nature du sol (sensibilité au compactage).

Les relevés sont décrits par sections sur une carte synthétique du tracé mettant en évidence des caractéristiques importantes pour la planification du chantier, la sensibilité des sols au compactage et les mesures de protection qu'il faudra prendre [4, 5].

Fiche 1

Type de sol [cf. chapitres 3 et 4]	Sensibilité du sol à la compaction	Sensibilité aux contraintes
• sols organiques • fréquemment engorgés jusqu'en surface • avec nappe perchée, mais rarement saturés jusque à la surface, ou sols riches en argiles et en silts	extrêmement sensible	• risque permanent de compaction • de faibles charges peuvent déjà causer des dégâts persistants
• sous influence d'eaux de pente ou souterraines, mais rarement saturés jusqu'à la surface • sols ayant plus de 50% de silt et moins de 10% d'argile sous influence d'eaux de pente ou souterraines et de nappes perchées	très sensible	• mis à part lors de périodes de sécheresses prolongées, très sensibles aux atteintes physiques • choix limité de machines engageables
• sols sous l'influence d'eaux de pente ou souterraines et de nappes perchées • sols ayant plus de 50% de silt et moins de 10% d'argile et un régime hydrique et une aération équilibrés	normal	• très sensibles aux atteintes physiques en périodes de pluies prolongées ainsi que durant le repos de la végétation • les périodes où les sols sont bien ressuyés doivent être exploitées au maximum • prudence maximale pour rouler dessus
• sols ayant un régime hydrique et une aération équilibrés, une structure stable (à l'exclusion des sols silteux ayant plus de 50% de silt et moins de 10% d'argile)	peu sensible	• en général peu sensibles lorsque les sols sont bien ressuyés • niveau de précaution normal
• sols ayant une pierrosité de plus de 50% • sables riches en graviers et en pierres ayant moins de 50% de silt et moins de 10% d'argile	très peu sensible	• peu sensibles à la compaction • supportent en général bien les contraintes mécaniques • niveau de précaution normal

Classification des degrés de sensibilité à la compaction [4].

Catégories A et B

L'évaluation de la sensibilité au compactage des sols se base sur des paramètres relevés dans le cadre de la cartographie des sols. La classification par degré de sensibilité se présente de la manière suivante:

On peut exiger, à titre préventif, le constat d'éventuels dégâts, par exemple dus au travail du sol ou à des systèmes de drainage non entretenus, ou encore à des interventions antérieures (p. ex. pose de conduites), lors des travaux de cartographie des sols dans le but de produire un relevé qui permette de vérifier le bien-fondé de toute réclamation survenant après la restitution des parcelles. L'appréciation d'une remise en culture achevée (contrôle de la bonne facture, p. ex. après l'exploitation d'une gravière) peut également être exigée [6].

Charge en polluants

Selon l'OSol du 1^{er} juillet 1998, les atteintes physiques et chimiques portées aux sols doivent être surveillées et évaluées [7]. Cette ordonnance découle des articles 29, 33, 35 et 39 de la loi fédérale sur la protection de l'environnement (LPE) du 7 octobre 1983, révisée en 1995 [8]. La directive sur les matériaux d'excavation (1999) [9] traite uniquement de la valorisation du sous-sol compris au sens géologique du terme (horizon C).

Pour l'évaluation et la mise en valeur de matériau terreux (horizon A et B), c'est l'instruction pratique de l'OFEFP «Evaluation et utilisation des matériaux terreux» (2001) [2] qui est applicable. Elle remplace l'information OSol n° 4 (1993) qui a dû être adaptée à l'évolution de la législation. L'instruction pratique contient des valeurs d'appréciation pour la charge en polluants, elle fixe quand et comment les sols en place doivent être examinés et établit comment le sol déplacé (matériaux terreux) peut être utilisé ou mis en décharge.

La manipulation des matériaux terreux

Introduction

Le décapage et l'excavation d'un sol (sol au sens de l'OSol qu'il ne faut pas confondre avec le sous-sol non altéré) doivent être considérés à juste titre comme une intervention de génie civil, car le sol en place est arraché à sa situation naturelle. La fertilité d'un sol peut ainsi être gravement menacée, ce qui va à l'encontre du principe fondamental de la LPE [8].

De ce fait, la manipulation des matériaux terreux doit être liée à un permis de construire. En vue de maintenir la fertilité du sol, on applique le principe selon lequel on ne peut manipuler des matériaux terreux sans l'exis-

tence d'un permis de construire en règle, et que la nécessité de procéder à des décapages doit être démontrée, en particulier pour des interventions de courte durée comme la pose de conduites.

Si l'on soupçonne que les matériaux terreux sont contaminés, il faut procéder à des analyses de polluants des surfaces à décapier, au moins par un échantillonnage représentatif [voir également fiche 1 «L'état initial»].

L'instruction pratique de l'OFEFP «Evaluation et utilisation des matériaux terreux» [2] donne

Type de chantier et manipulation de la couche supérieure du sol [6].

Type de chantier	Enherber le sol, ne pas le décapier	Décapier et réutiliser de suite	Décapier et entreposer	Décapier et exporter
Prélèvement de matériaux en continu (enherbement)		Ne redéposer que sur des sous-sols préalablement enherbés.	Hauteur de tas, cf. fiche 3, ne pas rouler dessus.	
Prélèvement de matériaux par tranche (remise en état directe)		Redéposer sur la tranche restituée (sous-sol redéposé) et enherber.		
Chantiers importants: routes, voies ferrées, etc.			Décapier les surfaces excavées et les pistes. Ne pas décapier les surfaces d'entreposage.	En cas d'emprises définitives, pour autant qu'il y ait des surplus.
Décharges de matériaux excavés, remblayages			Décapier les décharges et les accès, ne pas décapier les surfaces d'entreposage.	
Conduites souterraines	Décapage limité à la fouille.		Déposer directement la couche supérieure et le sous-sol sur le sol enherbé.	
Lignes aériennes et poteaux	Piste posée directement sur le sol enherbé, décapage limité aux fondations.			

des indications quant à la valorisation des matériaux terreux ou à leur mise en décharge définitive.

De plus, nombre de cantons mettent à disposition diverses fiches et directives de chantier, contenant des informations et prescriptions plus détaillées sur la manipulation des matériaux terreux [voir également la littérature conseillée aux pages 6 et 7].

Le décapage est une atteinte

Le décapage des matériaux terreux prive le sol de sa couche protectrice principale. Le sous-sol est plus instable et après décapage il reste exposé sans protection aux influences météorologiques. L'activité biologique dans le sol se concentre dans les couches proches de la surface, lesquelles sont en général assez stables, même momentanément dépourvue de couverture végétale protectrice, pour résister à l'érosion hydrique ou éolienne. Dans les terres arables utilisées de manière intensive, par exemple dans les loess qui ont une faible teneur en matière organique, la couche supérieure du sol lorsqu'elle est dépourvue de couverture végétale est exposée aux dangers de l'érosion au même degré que le sous-sol laissé nu.

Les effets négatifs du décapage sont aggravés lorsque les matériaux terreux ne sont pas remis en place directement et ensemencés, mais qu'ils subissent un stockage intermédiaire de plus ou moins longue durée.

Le test de la stabilité structurale dans l'eau est très démonstratif de la sensibilité aux intempéries d'un sous-sol mis à nu :

On dépose avec précaution dans un bocal rempli d'eau une motte de terre provenant de la couche supérieure du sol et dans un deuxième bocal on procède de même avec une motte du sous-sol. Alors que la motte de la couche supérieure reste longtemps intacte, celle provenant du sous-sol se délite très rapidement.

Choix de la période d'intervention

Lorsqu'une manipulation d'un sol est indispensable, il faut au moins prendre toutes les dispositions afin que le sol vivant n'en souffre pas trop. Par principe, le sol doit être complètement ressuyé au moment de l'intervention; il doit être si possible remis en place directement et dans tous les cas ensemencé immédiatement. Dans les interventions de courte durée, comme par exemple pour la pose de conduites, on peut éventuellement renoncer à l'ensemencement. Les mauvaises herbes (adventices) qui s'installent doivent être fauchées avant la montée à graine (pas de traitement herbicide!).

C'est pendant la période de végétation que les conditions sont réunies pour travailler des sols ressuyés et pour une repousse rapide de la couverture végétale. Cette période est plus longue en plaine qu'en montagne. Tous les travaux de manipulation des matériaux terreux doivent être prévus pour les mois d'été.

Le sol a souvent tendance à être plus sec à la fin de l'automne qu'au début de l'été, et dans ce cas, on peut encore travailler en octobre dans de bonnes conditions. Pour réussir l'installation d'une prairie permanente, il ne faut pas la semer au-delà de la mi-août. Lorsque des ensemencements plus tardifs s'imposent, il faut prévoir une céréale d'automne (p. ex. seigle à faucher en vert).

Humidité du sol

En aucun cas, on ne doit circuler sur la couche supérieure du sol et sur le sous-sol lorsqu'ils sont détrempés, ni les décapier, ni les déplacer, ni les mettre en stockage intermédiaire, ni les remettre en place. L'humidité du sol encore tolérable pour les travaux dépend de la nature du sol (teneur en argile), ainsi que du poids et de la pression au sol des machines et des véhicules engagés. Ce n'est pas la teneur en eau absolue qui fournit la base de mesure opportu-

ne, mais la force de succion (appelée également tension hygrométrique). La force de succion permet d'évaluer quels types de pores sont encore remplis d'eau, ou déjà ressuyés. Dans le génie civil, c'est plutôt la valeur pF [cf. chapitre 7.2] qui est usuelle pour exprimer la force de succion; par contre dans la pratique agricole, c'est la force de succion qui est mesurée aux champs en centibars à l'aide de tensiomètres. Le tableau ci-après indique les relations qui peuvent être établies entre les valeurs de référence les plus importantes pour les deux types de mesures.

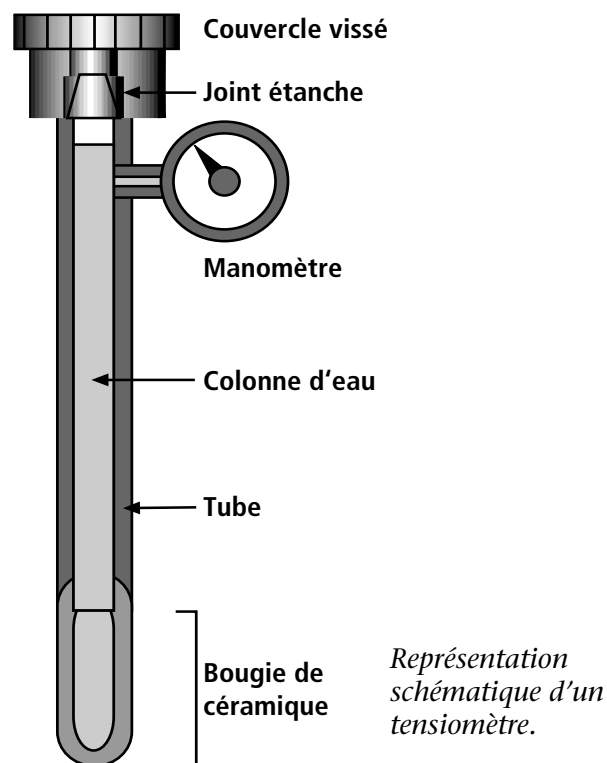
Fiche 2

pF	Cb	Ressuyage d'après les pores
1,8	6,3	Pores grossiers ressuyés
2,0	10	Pores > 30 μm ressuyés
2,5	31,5	Pores > 10 μm ressuyés
2,7	50	Pores > 06 μm ressuyés
2,8	63	Pores > 05 μm ressuyés
2,9	80	Limite de mesure du tensiomètre
4,2	1500	Tous les pores moyens sont ressuyés (Point de flétrissement permanent)

Au-dessous de la valeur de pF 2, il ne faut pas tolérer la mise en service de machines de chantier. A partir d'un pF 2,5 – en employant des machines de chantier usuelles à chenilles – des dégâts importants ne sont généralement plus à craindre. A partir d'un pF 2,8, le sol peut supporter des machines de chantier lourdes.

Mesures avec des tensiomètres (cf. chapitre 8.2)

La mesure de la force de succion à l'aide d'un tensiomètre est une méthode éprouvée de longue date et qui est utilisée dans la pratique, p. ex. pour l'irrigation des cultures. Les tensiomètres sont donc disponibles sous toutes sortes de formes, allant jusqu'à l'appareil à lecture digitale, relié à des mémoires électroniques. Pour l'emploi sur un chantier, c'est l'appareil à manomètre, simple et robuste, qui convient. Il est bon marché et indépendant d'une source d'électricité.



Mise en place

Pour une mesure fiable, il faut mettre en service une batterie de cinq tensiomètres par site de mesure, l'hétérogénéité du sol pouvant créer de fortes variations. Les tensiomètres sont installés de telle sorte que l'extrémité de la bougie poreuse soit à 35 cm de profondeur, dans un orifice foré exactement à la dimension du tube. Pour obtenir un bon contact

avec le sol, il faut mélanger la terre extraite à de l'eau et verser une fraction de cette bouillie dans le trou avant d'installer l'appareil. Après l'installation de l'appareil, on répand encore autour du tube un peu de poudre d'argile et on la tasse, afin d'empêcher l'eau de s'infiltrer le long du tube et de perturber le résultat des mesures. Un manchon de caoutchouc qui adhère bien au tube empêche également l'infiltration de l'eau de pluie.

Relevés et mise en valeur des résultats

Un jour plus tard, on peut se mettre à relever les forces de succion. On tire la valeur médiane des résultats de chaque groupe de tensiomètres. Les relevés doivent se faire quotidiennement ou du moins à intervalles toujours constants, et toujours au même moment de la journée, de préférence le matin. Le relevé simultané des pluviomètres fait partie de cette démarche.

Entretien

Le tube du tensiomètre est rempli d'eau. Lorsque la force de succion est élevée, supérieure à 80 centibars par exemple, il peut se produire une chute soudaine et complète de la tension (appelée « désaturation »). Les tensiomètres désaturés doivent être ouverts et rechargés d'eau dégazée (de préférence bouillie). L'air résiduel dans la partie horizontale de l'embranchement vers le boîtier du manomètre doit être purgé à l'aide d'une pompe à vide, car une partie de la force de succion est absorbée par effet de coussinet d'air, et les résultats des mesures peuvent être perturbés. En aucun cas, il ne faut secouer les tensiomètres installés.

Pour l'utilisation en hiver, on doit rajouter un antigel à l'eau dans les tensiomètres

Entreposage

On ne doit pas laisser sécher les tensiomètres qui ont servi, car les pores de la bougie poreuse seraient alors colmatés par les sels dissous dans l'eau du sol. Ils doivent être entreposés

dans un local à l'abri du gel, dans de l'eau distillée ou déminéralisée (de l'eau de pluie propre convient également), jusqu'au prochain emploi. Il faut enlever la saleté et les dépôts d'algues avant de les entreposer. Après un entreposage hivernal, il est indiqué de faire un contrôle soigneux de leur fonctionnement avant de les remettre en service.

Fiche 2

Profondeur de décapage

Dans le profil d'un sol bien développé, on distingue en gros trois couches (horizons A, B et C). Ces horizons sont séparés par des transitions progressives ou une succession nette des couches, et sont par conséquent plus ou

moins faciles à reconnaître. Suivant la roche-mère et le type de sol, une coloration nettement différenciée des couches nous aide à identifier la succession des horizons.

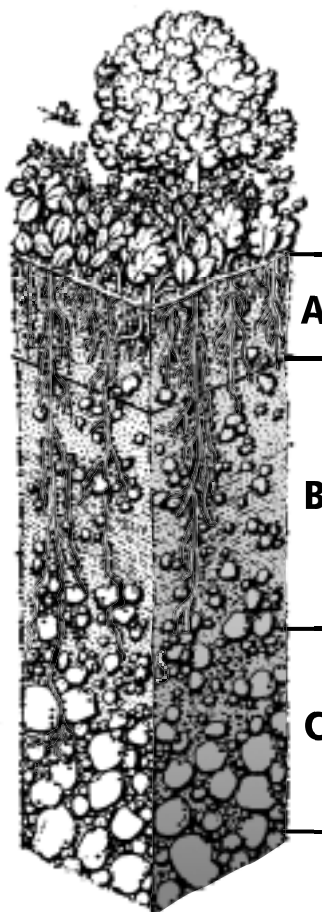


Schéma d'un sol avec trois horizons distincts (sols ABC) : l'horizon supérieur A, l'horizon du sous-sol B et le matériau parental de l'horizon C. Dans les sols bruts, la couche supérieure du sol (A), contenant de l'humus et habitée par des êtres

vivants, se trouve directement sur la roche-mère nonaltérée (sols AC). Ce type de sols se rencontre aussi bien sur de la roche ferme (dalles) que sur les sédiments meubles constitués d'argiles, de marnes, de silts, de sables ou de graviers.

La couche supérieure du sol

L'horizon A est clairement reconnaissable dans le profil grâce à sa coloration foncée. Il est actif du point de vue biologique et, comparé au sous-sol, présente une teneur en humus élevée. En règle générale, il est colonisé par un réseau dense de racines et parcouru de galeries de vers, et par conséquent forme une couche assez meuble. Dans les terres arables, l'horizon A est assimilé à la couche labourée.

Sous-sol

(au sens pédologique du terme)

L'horizon B sous-jacent est constitué d'un matériau minéral altéré présentant une teneur en humus beaucoup moins élevée. C'est pour quoi sa couleur est moins foncée. Mais dans sa partie supérieure au moins, il est encore bien colonisé par les racines et également actif du point de vue biologique. Vers le bas, il évolue de manière plus ou moins marquée vers l'horizon C, non-altéré; sur la roche et le gravier, la transition est plus reconnaissable que sur des colluvions ou des loess, dépourvus de pierre.

Qualité des matériaux terreux

Outre les critères pédologiques présentés ci-dessus, la qualité des matériaux décapés en tant que matériaux terreux joue un rôle très important. Les critères définissant cette qualité sont décrits dans la fiche 1. Cette dernière indique de manière détaillée la marche à suivre pour établir l'état initial et la qualité des sols. Dans l'esprit d'une protection du sol optimale, il faut veiller à ce que les matériaux terreux de toutes les catégories puissent être utilisés de manière rationnelle.

Procédés et machines

Le choix et l'utilisation adéquate des machines de chantier et les procédés préconisés auront une influence primordiale sur la réduction des impacts d'interventions de génie civil sur le sol, en particulier sur le compactage.

En fonction de la topographie et de la surface à décapier, de la distance entre le chantier et le site d'entreposage, les boteurs/niveleuses à chenilles, les draguelines ou les décapeuses légères à benne sont les machines qui conviennent le mieux.

En raison de la mauvaise répartition de la pression au sol (faible surface de contact) ou de leur médiocre efficacité (rapport poids de la machine au volume décapé), les chargeuses à pneus ou à chenilles sont à proscrire, de même que les bobcats, les chargeurs frontaux des tracteurs ou les pelles mécaniques à pneus.

Limite d'engagement

La force de succion admissible pour une utilisation des machines qui ménage le sol peut être calculée de manière individuelle pour chaque machine. Elle indique la force de succion à partir de laquelle on peut circuler sur un sol sans pour autant lui porter atteinte de façon persistante [cf. chapitre 7 des informations générales].

Au-dessous de 10 cbar de force de succion, aucune machine de chantier ne doit être mise en service.

La mesure de la force de succion doit se faire à l'endroit où on roulerait sur le sol après un décapage de l'horizon A, c.-à-d. à 35 cm de profondeur. Même si la couche supérieure du sol est ressuyée, le sous-sol peut être encore très engorgé.

Influence du type de sol

Il est important de tenir compte également du type de sol. Pour les sols avec une teneur en argile élevée (>30%), il faut majorer de 10% la force de succion admissible calculée.

Passages répétés

Dans le cas de va-et-vient ou de passages répétés sur le même emplacement, l'effet de compactage augmente très rapidement lorsque la force de succion diminue. En situation limite, ces types de travaux de chantier (outils poussant ou prélevant la terre, va-et-vient et roulage) doivent être arrêtés.

Calcul de la force de succion admissible

La force de succion admissible peut être calculée individuellement pour chaque machine équipée de chenilles, si le poids (avec chargement) et la pression au sol par cm² (avec chargement) sont connus.

Formule pour le calcul de la force de succion admissible en centibars:

Poids x pression à la surface du sol x 1.25
(tonnes) (bars)

Cette formule n'est pas utilisable pour les véhicules à pneus. Les formules correspondantes pour les véhicules agricoles à pneus se trouvent au chapitre 7.

L'entreposage des matériaux terreux

Prescriptions

Dans nombre de cantons, il existe des prescriptions sur l'entreposage des matériaux terreux, en particulier de la couche supérieure du sol. Elles indiquent la hauteur maximale des tas (dans la plupart des cas entre 1,5 et 2,5 m). Encore faut-il distinguer entre le tas de terre déposé encore meuble et le tas de terre raffermi. Ces instructions exigent en général que la terre soit mise en tas à reculons, c.-à-d. sans rouler sur le matériau déposé. Des normes et directives pour les dépôts de matériaux terreux ont été également élaborées par la VSS (Union des professionnels suisses de la route), l'ASG/

FSK (l'Association suisse des Sables et Graviers) et la SSP/BGS (Société Suisse de Pédologie).

Pour les reconstitutions ultérieures du sol, il faut pouvoir disposer en quantité suffisante non seulement de la couche supérieure du sol, mais aussi de matériaux du sous-sol correspondant (horizon B). Des normes concernant le stockage intermédiaire de la couche supérieure et du sous-sol figurent dans le tableau ci-dessous.

La présente fiche vise à compléter les normes et prescriptions existantes. Des variantes dans la recherche de solutions optimales, qui prennent en considération le type de sol et ses caractéristiques, sont tout à fait possibles.

Fiche 3

Type de matériaux terreux :	Hauteur du tas non tassé :	Force de succion à respecter pour décaper et mettre en tas :	Mesures généralement applicables :
Couche supérieure du sol pour entreposage court (< 1 an)	≤ 2.5 m	sableux: > 25 centibars argileux: > 35 centibars	- Toujours décaper et entreposer la couche supérieure et le sous-sol séparément. - Entreposage sur des surfaces bien perméables, non sensibles au tassement. Ne pas décaper les sols. - Ne jamais rouler sur les tas et ne pas les pâturer. Enherber les tas avec des plantes à enracinement profond.
Couche supérieure du sol pour entreposage long (> 1 an)	≤ 1.5 m	sableux: > 25 centibars argileux: > 35 centibars	
Sous-sol: fortement à extrêmement sensible au tassement [4]	≤ 1.5 m	> 35 centibars	
Sous-sol: normalement à faiblement sensible au tassement [4]	≤ 2.5 m	> 25 centibars	
Sous-sol: peu sensible au tassement [4]	> 2.5 m	> 15 centibars	

Mesures pour l'entreposage de divers matériaux terreux (hauteurs et forces de succion) [6]

Effets de l'entreposage

La couche du sol proche de la surface et bien aérée s'est formée grâce à une intense activité biologique. Le métabolisme chimique de cette couche se déroule dans des conditions aérobies, et la formation de l'humus et des complexes argilo-humiques est une propriété caractéristique de cette zone bien oxygénée.

A partir de cette couche, les racines des plantes, les vers de terre et d'autres organismes du sol pénètrent toujours plus profondément au travers d'autres horizons. Mais la porosité, la teneur en humus et l'activité biologique diminuent sensiblement avec la profondeur.

Si l'on entasse la couche supérieure d'un sol, on voit apparaître des «signes d'asphyxie» tout d'abord à l'intérieur du dépôt, c.-à-d. dans le noyau qui est le plus éloigné de l'air extérieur. Dans des conditions anaérobies, les organismes aérobies du sol sont asphyxiés, et on voit apparaître des processus de putréfaction qui produisent des gaz putrides ou du méthane. Lorsque le dépôt est repris, on constate également une coloration grisâtre et souvent une odeur pénétrante de putréfaction (odeur de boues d'épuration).

En créant des tas de forme trapézoïdale et en limitant leur hauteur, on essaye de réduire au minimum ou d'éviter l'apparition d'un noyau central anaérobie dans le tas.

Les couches profondes à l'intérieur du tas sont soumises à une pression statique due au poids de la terre. Sous cette contrainte les pores grossiers, qui garantissent l'aération de la terre, disparaissent en premier. Puis le sol situé sous le dépôt est également légèrement compacté, et forme une dépression où l'eau s'accumule et remonte par capillarité dans le tas qu'elle peut détrempier.

Il faut donc définir une stratégie de protection des sols pour l'entreposage des matériaux terreux. Plus le stockage intermédiaire est destiné à se prolonger, plus il est important de res-

pecter cette stratégie. Dans chaque cas, il convient de mettre au point, parmi les possibilités à disposition, la variante qui combine le plus grand nombre de facteurs dont l'influence est positive.

Mise en place des dépôts

Les dépôts seront planifiés et mis en place en tenant compte de leur durée et des caractéristiques des matériaux terreux.

Entreposage de courte durée (catégorie A)

Le délai de construction, donc d'entreposage des matériaux terreux ne dépassera pas un an, p. ex. pour la pose de conduites, la construction de chemins et de canalisations, etc.

Entreposage de longue durée (catégorie B)

Il est destiné en général à durer plusieurs années, comme c'est le cas par exemple sur les gros chantiers, dans l'exploitation de gravières et de carrières de sable et d'argile, et dans des décharges pour déchets à ciel ouvert.

Forme et réalisation

Du point de vue de la forme du dépôt, on peut opter soit pour un andain trapézoïdal allongé, non cultivé, soit pour un dépôt étalé en surface plane utilisable par l'agriculture.

Les principes de protection du sol émis ci-dessus sont applicables de cas en cas pour les stockages de courte durée (cat. A), par contre ils sont impératifs pour la catégorie B.

Evacuation des eaux météoriques

Le dépôt doit être réalisé de manière à ce que les eaux de surface puissent s'écouler librement et ne s'accumulent pas au pied du dépôt (dépôt sur une croupe, éventuellement sur un lit de gravier).

Le dépôt ne doit en aucun cas être réalisé dans une dépression ou sur un sol imperméable.

Fiche 3

Aération

Le dépôt doit permettre une circulation de l'air dans sa masse entière. C'est pourquoi il doit être mis en place quand la terre est ressuyée et ne pas être soumis au passage répété des machines. La distance entre le noyau central du dépôt et sa surface doit être réduite au minimum (forme trapézoïdale aiguë). Pour les dépôts étalés en surface plane, il faut limiter l'épaisseur du dépôt.

Pente

Les dépôts en surface plane doivent être créés de manière à ce que leur surface présente une pente de 5% au minimum, afin que l'eau de pluie puisse ruisseler sans entrave et ne pénétre pas dans le dépôt.

Enherbement

Il faut enherber le dépôt immédiatement après sa mise en place et procéder à des ensemencements par étapes pour des dépôts d'une certaine importance. Pour cela, il faut semer un mélange de longue durée trèfle violet – graminées – luzerne dont les racines colonisent profondément le sol. Les racines maintiennent l'activité biologique du sol. L'évapotranspiration sous couverture végétale peut atteindre en été 5 litres d'eau par m² et par jour, ce qui maintient au sec le dépôt.

Sous-sol (horizon B)

Les principes énumérés ci-avant sont également applicables aux dépôts pour le sous-sol (horizon B), excepté pour la forme et la hauteur du tas. En raison de leur perméabilité structurelle, des matériaux purement minéraux provenant de sous-sols constitués de graviers sableux pourraient être stockés en tas très élevés, mais le sol en place sous le dépôt serait alors compressé par cette trop grande charge. Ces matériaux perméables conviennent particulièrement bien à la reconstitution des sols dans nos régions pluvieuses. En revanche les sols très argileux ou les sous-sols contenant une part importante de matière organique sont moins adaptés. La relation entre le type de sol et l'aptitude au stockage est directement applicable aux matériaux terreux du sous-sol [voir *Mesures pour l'entreposage de divers matériaux terreux (hauteurs et forces de succion)*, page 22].

Type de sol et hauteur du tas

La relation entre le type de sol et les propriétés physiques d'un sol est exposée en détail dans la partie générale de ce guide pratique. Les normes concernant la hauteur du tas admissible, peuvent être tirées du tableau sur les mesures pour l'entreposage, page 22. L'humidité du sol au moment de sa mise en dépôt joue un rôle plus important que le type de sol. Les sols argileux sont très sensibles au compactage s'ils sont humides. Les sols organiques sont sensibles à l'asphyxie lorsque leur humidité est élevée. Les sols silteux sont sensibles à l'érosion, ils faut veiller à les enherber dans les meilleurs délais ou à les couvrir de nattes si des orages sont à craindre durant la période de stockage. La forme du tas joue également un rôle. Il faut être attentif aux risques de confusion entre les normes de hauteur de tas pour des matériaux terreux fraîchement déposés et pour un tas raffermi.

Dépôts étalés en surface plane

Les dépôts intermédiaires de durée moyenne à longue, prévus pour plusieurs années, de couche supérieure sur un support perméable

(sol de gravière) peuvent avoir une hauteur d'env. 1,5 m, à condition que des végétaux comme un mélange trèfle violet-luzerne-graminées maintiennent le sol en activité.

Les dépôts étalés de moyenne durée, exploités par l'agriculture, comme par exemple pour des bourses aux terres d'un chantier de grande importance, peuvent même atteindre la hauteur maximum de 2,5 m dans de bonnes conditions (stockage de courte durée, type de sol adapté, région pauvre en précipitations).

Dépôts en andain

Ces dépôts ne sont généralement pas exploités, mais uniquement fauchés en cas de nécessité (p.ex. lors de l'apparition de plantes adventices). Ils sont aussi aérés latéralement et pénétrés par les racines jusqu'à une certaine profondeur. Des essais ont montré que dans les matériaux terreux déposés en andains, les deux premières années, il se forme une zone d'asphyxie qui croît depuis la base, mais qui ensuite régresse sensiblement suite à une restructuration du sol, due essentiellement à la croissance des racines et à l'activité des vers de terre. Dans un profil trapézoïdal, la pression due à la charge du matériau entassé se divise par deux. Un sol sec peut donc exceptionnellement être entassé sur une hauteur allant jusqu'à 2,5 m (mesure sur la terre meuble).

Machines et procédés

En fonction du procédé choisi, le sol sera décapé et déposé latéralement en une seule opération avec la même machine, par exemple pour la pose de conduites. En revanche si le matériau terreux doit être déplacé sur des distances importantes, il doit être chargé et déversé dans un camion ou un tombereau. On déplace directement le matériau terreux avec une excavatrice et une décapeuse à chenille lors de corrections morphologiques importantes ou de travaux d'assainissement.

Dans tous les cas, le sol doit être déposé avec précaution et ne doit pas être soumis au passage des machines. C'est pourquoi les bouteurs/niveleuses et les décapeuses à chenilles peuvent être utilisés en cas de nécessité pour le transport, mais en aucun cas pour la création d'un dépôt de terre.

Pour égaliser des dépôts étalés, on ne peut utiliser que des niveleuses automotrices légères (de moins de 15 tonnes) à chenilles adaptées pour les sols organiques (pression au sol $< 200 \text{ g/cm}^2$).

Principes généraux

De manière analogue à la remise en place d'un sol, pour la création de dépôts intermédiaires de matériaux terreux en forme d'andain ou étalés en surface plane, les principes suivants sont applicables :

- Dans un terrain en pente, on doit toujours travailler de haut en bas, de manière à ce qu'il n'y ait pas d'accumulation d'eau de pente.
- Il ne faut jamais déposer de la terre sur un support détrempe. Des dépressions de la surface de stockage nivelée, dans lesquelles l'eau pourrait s'accumuler, doivent être égalisées avec du matériau perméable.
- Les dépôts qui viennent d'être créés ne peuvent être nivelés qu'avec les bouteurs/niveleuses à sols organiques les plus légers, en réduisant au minimum le nombre de va-et-vient.
- L'ensemencement avec un mélange trèfle violet-luzerne-graminées doit être effectué sans délai, si nécessaire par étapes.

Mesures complémentaires

En principe, il faut travailler de manière à ce que des mesures complémentaires soient superflues. Dans des cas exceptionnels, celles-ci peuvent contribuer à l'élaboration de solutions compatibles avec la protection du sol et de l'environnement. Quelques solutions possi-

bles et éprouvées sont décrites ci-dessous. Ces mesures concernent surtout l'entreposage de longue durée de matériaux terreux.

Drainage

En situation défavorable, en particulier dans les pentes, où existe un risque d'accumulation d'eau, on recommande d'installer un dispositif favorisant l'infiltration de l'eau. Le captage des eaux de ruissellement en amont du dépôt est plus efficace que l'installation d'une couche sous-jacente de gravier coûteuse qui doit généralement être encore protégée de l'envasement par un géotextile de séparation.

Aération

Dans le cas où le stockage intermédiaire doit atteindre une hauteur plus grande que prévu, des tuyaux d'aération peuvent être installés à l'intérieur du tas. Ces derniers doivent se recouper dans les deux sens, en particulier dans la partie inférieure, de manière à garantir la pénétration de l'air également dans le noyau central.

Protection contre les éboulements

Là où le dépôt par manque de place doit être en pente raide, p. ex. pour l'entreposage intermédiaire d'un sous-sol qui s'y prête bien, les bords du dépôt peuvent être stabilisés et protégés contre les éboulements par la plantation de buissons pionniers à fort enracinement. Suivant les conditions locales il s'agira de plantations de boutures d'osier, d'aulne, ou de coudrier, de jeunes plants de robinier, d'argousier, de prunellier, d'épine blanche, etc. en plantation directe ou de rejets avec racines.

La remise en place

Importance et mise en œuvre

Cette fiche décrit la procédure de remise en place de matériaux terreux en vue de l'utilisation agricole des sols reconstitués après des inter-

ventions de génie civil de longue durée. Elle est mise en œuvre là où la couche supérieure du sol et le sous-sol (horizon B), après décapage et entreposage, doivent être remis en place et «réactivés» biologiquement. Les étapes de la reconstitution et remise en culture se déroulent généralement de la manière suivante:

- | | | |
|--|--|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Convention avec l'exploitant/propriétaire. 2. Finition de l'aplanissement (remblai nivelé). 3. Drainage du remblai : <ul style="list-style-type: none"> - Réglage de la pente. - Mise en place d'aménagements facilitant l'infiltration et l'écoulement. - Mise en place d'un système de drainage. 4. Reconstitution des sols avec des machines adéquates et dans des conditions de resuyage favorables.

 <p>Pour des sols reconstitués destinés aux grandes cultures, les règles suivantes seront observées :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mise en place d'un sous-sol sur une épaisseur d'au moins 80 cm. - Semis d'un engrais vert, si le sous-sol a été entreposé durant plus d'une année. | <ul style="list-style-type: none"> - Mise en place de la couche supérieure d'une épaisseur de 30 à 35 cm (durant la période de juin à août qui suit l'année de l'éventuel semis d'un engrais vert sur le sous-sol). <ol style="list-style-type: none"> 5. Protocole de restitution (réception de l'ouvrage), en présence du spécialiste chargé de la protection des sols sur le chantier, de représentants du maître d'œuvre, de la direction des travaux et de l'exploitant/propriétaire, en vue de définir les dégâts ou défauts à réparer : <ul style="list-style-type: none"> - Protocole de réception [6]. - Test à la bêche [fiche 5]. - Convention sur le type et la durée de la remise en culture/exploitation avec le propriétaire et l'exploitant. 6. Si nécessaire, réparation des dégâts ou défauts constatés (p. ex. par des sous-solages, des drainages ou épierrages). 7. Tous les sols reconstitués doivent faire l'objet d'une exploitation extensive et douce [fiche 5]. | <ol style="list-style-type: none"> 8. Restitution finale/évaluation (idem chiffre 5) : <ul style="list-style-type: none"> - Protocole de la restitution après remise en culture. - Evaluation de l'état obtenu, év. comparaison avec l'état initial [4] : test à la bêche, év. test au pénétromètre, volume des pores grossiers, taux d'infiltration et/ou conductivité hydraulique à l'état saturé (chapitre 8). - Ev. appel à l'appréciation du service cantonal de la protection des sols. 9. Ev. réparation/élimination des dégâts ou défauts (cf. chiffre 6). 10. Restitution de la parcelle pour une exploitation normale. <p>Selon le cas considéré, certaines étapes peuvent être ignorées!</p> |
|--|--|--|

Fiche 4

Procédure de reconstitution et de restitution des sols temporairement occupés [6]

La remise en culture peut se faire directement avec des matériaux terreux qui viennent d'être décapés. C'est le cas par exemple lorsque des gravières sont exploitées par étapes. La tranche exploitée est immédiatement remblayée et elle reçoit directement le sous-sol (horizon B) et la couche supérieure du sol fraîchement décapés de la nouvelle tranche mise en exploitation.

Limitation des décapages

Fiche 4

Là où les sols ont été décapés, il est, en général, obligatoire de les reconstituer ou remettre en culture. C'est pourquoi il est préférable, lors d'une intervention de génie civil, de s'assurer dans quelle mesure il est vraiment nécessaire de décapier.

Pour les chantiers de type linéaire, le décapage de la couche supérieure du sol de la piste de travail et de transport, qui se pratiquait auparavant, n'était justifié que dans des cas exceptionnels et impliquait de coûteuses remises en culture.

Il ne faut, en règle générale, décapier que les surfaces qui sont directement excavées. Il faut également prendre en compte la sensibilité des sols à la compaction dans la délimitation du tracé de la ligne. Les tronçons critiques qui subsistent doivent être protégés d'un compactage excessif à l'aide de moyens auxiliaires appropriés, p.ex. piste en rondins ou en gravier. Lorsqu'une prairie est mise en place avant l'intervention, le sol se rétablit après les travaux sans intervention supplémentaire dans la plupart des cas.

Mise en place directe

Lorsqu'un sol est arraché à sa situation naturelle et remis en place immédiatement, ses propriétés ne sont que peu modifiées, ce qui n'est pas le cas s'il est repris d'un dépôt qui a duré plusieurs années. On peut donc renoncer à l'activation biologique préalable par cou-

ches, c.-à-d. que l'enherbement du sous-sol avant la mise en place de la couche superficielle du sol n'est pas nécessaire. Il faut s'assurer si une mise en place directe de la couche superficielle du sol et du sous-sol décapés, en d'autres termes la reconstitution définitive d'un sol est possible dans un autre site, afin d'éviter de passer par un stockage intermédiaire des matériaux terreux. Les manipulations supplémentaires de déchargement et de chargement au dépôt impliquent non seulement une augmentation des frais, mais aussi une sollicitation mécanique accrue du sol.

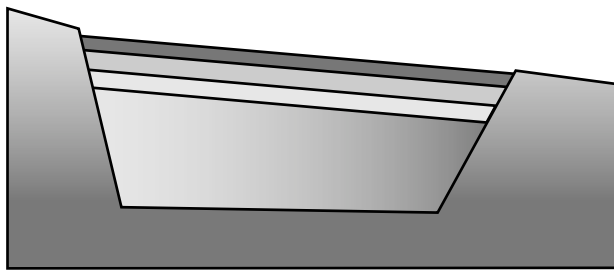
Système en deux phases

Ce système correspond à un procédé en deux phases avec un enherbement intermédiaire du sous-sol, avant la mise en place de la couche superficielle du sol. Il faut choisir ce procédé lorsque le sous-sol doit être repris à partir d'un dépôt, et qu'il faut assurer sa restructuration et son activation biologique à l'aide de plantes pionnières ayant un enracinement fourni et développé. L'enherbement intermédiaire est indiqué également pour des terrains où le sous-sol a été soit découvert (suite à un décapage) et laissé nu, soit recouvert temporairement d'une couche de gravier pour servir de piste ou d'installation de chantier. Logiquement, il faut également recourir à cette technique pour la remise en culture de routes, de chemins et de places consolidées. Ce procédé impose un délai d'une année jusqu'à la reconstitution définitive du sol, étant donné qu'il est rarement possible durant la même période de végétation de réaliser à la fois l'ensemencement intermédiaire du sous-sol, la remise en place de la couche supérieure du sol et la remise en culture.

Les étapes successives d'une reconstitution et d'une remise en culture intégrale, comme elle se réalise p. ex. à la fin de l'exploitation d'une gravière, sont décrites ci-après.

Matériaux de comblement

Un bon sol ne peut se développer et se conserver que sur un support drainant. Un sol influencé par une nappe perchée est défavorable pour la croissance des plantes et par conséquent, son aptitude à être exploité est limitée. Les sols qui doivent être remis en place après l'exploitation d'une gravière se trouvaient à l'origine sur un support perméable où ils ont pu se développer et former des sols bruns lessivés fertiles (chapitre 3). C'est pourquoi, dans ces cas-là, une remise en culture adéquate est extrêmement difficile, les matériaux de comblement étant souvent peu drainants ou imperméables.



	Couche supérieure		Matériaux de comblement
	Sous-sol		Couche d'infiltration
	Sol en place		

Représentation schématique – inspirée de diverses directives et normes – d'un remblayage, suivi d'une reconstitution du sol et d'une remise en culture

En mettant en place une couche drainante de gravier lavé, on essaye de diriger l'eau d'infiltration le long d'une pente régulière créée au-dessus des matériaux de comblement, vers une couche perméable qui existerait en aval. L'épaisseur minimale prescrite de cette couche, en règle générale de 15 cm, est toutefois insuffisante lorsque :

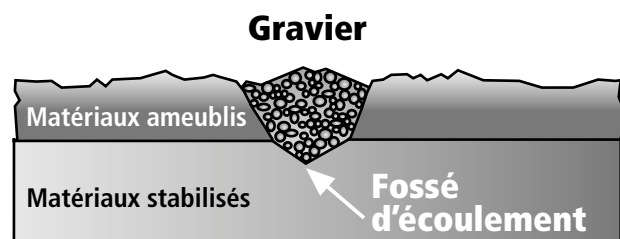
- la distance à parcourir est trop longue (résistance à l'écoulement)
- la surface de la décharge n'est pas absolument régulière (interruption de l'écoulement)
- les matériaux terreux remis en place sont instables (battance)

En outre, cette couche drainante est souvent formée de matériaux lavés grossiers (graviers d'infiltration). L'eau peut certes circuler facilement dans ces graviers, mais l'absence de pores fins dans la couche de gravier empêche l'eau gravitaire de la couche de sol remis en place de s'y écouler (zone d'accumulation au-dessus du niveau de rupture de la continuité capillaire). La force capillaire la retient dans le sol.

Il faut tout d'abord vérifier si le remblai est imperméable et s'il doit le rester (décharge confinée de déchets) ou s'il peut éventuellement être ameubli et rendu perméable (essais d'infiltration) avant la mise en place du sous-sol.

Si ce n'est pas le cas, il faut étudier où se dirigeront les eaux de ruissellement et d'infiltration, et si elles peuvent être collectées et déversées dans un fossé d'évacuation des eaux à ciel ouvert. La configuration de la surface des matériaux de comblement et de la parcelle reconstituée doivent prendre en compte les futurs écoulements.

L'installation de canaux d'écoulement superficiels (fossés à ciel ouvert) et de bassins de rétention pour l'eau excédentaire peuvent être inclus dans la planification comme des atouts supplémentaires. Ils peuvent être reconnus en tant que nouvelles surfaces de compensation écologique.



Des aménagements favorisant l'infiltration et l'écoulement des eaux peuvent être conçus de manière à économiser les matériaux de qualité, tout en livrant un bon résultat.

Mise en place du sous-sol

Suivant le procédé choisi et la distance de transport, le sous-sol est amené par camion, tombereau ou décapeuse à chenilles et réparti avec une excavatrice ou un buteur/niveleuse. Dans des conditions favorables (sol sur lequel repose le dépôt bien ressuyé, sous-sol sec, machines adaptées et légères et machinistes expérimentés), le remblai peut être mis en place directement avec la décapeuse à chenilles.

Fiche 4

Les matériaux terreux provenant d'autres sous-sols n'entrent en considération pour la reconstitution d'un sol que s'ils sont adaptés à la couche supérieure. Il ne faut pas utiliser des matériaux terreux très argileux ou tourbeux.

Enherbement intermédiaire

On ameublit et égalise le sous-sol remis en place avec des outils agricoles, et on l'ensemence. Le lit de semence ne devrait pas être préparé trop finement car le sous-sol tend en général à la désagrégation et à la battance. La formation d'une croûte en surface empêcherait une bonne levée de la semence. Par contre dans un lit de semence préparé très grossièrement, une partie des graines se perd parce qu'elle descend trop profondément entre les mottes grossières. On recommande donc en général de majorer la dose normale de semis de 50 % pour les semis dans des sous-sols.

Des analyses de disponibilité des éléments nutritifs sur des échantillons de terre pris au dépôt donnent des indications sur la dose et la composition d'une éventuelle fumure de fond. Il faut être prudent avec les apports d'engrais organiques comme le fumier et le compost, dans la mesure où les organismes vivants du sol capables d'assurer les processus de décomposition ne sont pratiquement pas présents dans le sous-sol. Toutefois, des matières organiques actives, comme du fumier décomposé par voie aérobie ou du compost incorporé en surface, peuvent améliorer sensi-

blement les conditions de démarrage. Par contre, le purin et les boues d'épuration sont à proscrire.

Choix de la culture pionnière

Diverses directives recommandent l'utilisation de radis fourrager, de moutarde et de chou de Chine, en raison de leur enracinement. Mais ces plantes ne sont pas adaptées à tous les types de sol. Suivant le type de sol, le pH et le climat, d'autres plantes pionnières se développent tout aussi bien. A tous points de vue, les mélanges offrent plus de sécurité que les semis purs. Toutefois certaines plantes supportent difficilement la concurrence dans un mélange et ne lèvent pas. En semis pur en revanche, elles peuvent se développer très fortement et rapidement.

Mise en place de la couche supérieure du sol

La mise en place de la couche supérieure du sol se fait en général l'année qui suit l'enherbement intermédiaire, exceptionnellement la même année lorsque le sol est bien ressuyé, mais au plus tard début août. Si la culture intermédiaire s'est développée fortement, elle doit être fauchée et broyée (faucheuse à fléaux, faucheuse à mulching) sur place avant la poursuite de la reconstitution du sol.

En règle générale, il n'est pas nécessaire de broyer les cultures non hivernantes gelant sur pied (sorgho, tournesol, sarrasin, radis fourrager).

Si les résidus végétaux sont incorporés au terrain par le passage d'une bêcheuse ou d'un incorporateur type MM100, il est inutile de les enlever. Mais les amoncellements éventuels de végétaux doivent être éparpillés avant la pose de la couche supérieure du sol (la formation de ce qu'on appelle des «matelas» doit être évitée).

La couche supérieure du sol peut être amenée et déposée de plusieurs manières. On doit circuler le moins possible avec les machines sur le sous-sol déjà colonisé par les racines et uniquement s'il est bien ressuyé.

Travail du sol et semis

L'épaisseur de terre meuble doit être d'au moins 25-30 % plus élevée que l'épaisseur visée après raffermisssement. Il est cependant peu indiqué de déposer une couche supérieure du sol de plus de 40 cm d'épaisseur (exception: bourse des terres). La couche supérieure du sol mise en place doit laisser pénétrer l'air jusqu'au sous-sol biologiquement activé. Si nécessaire, un sous-solage au moment de la préparation du lit de semence peut faciliter l'aération du sol.

Le lit de semence préparé de cette manière est ensemencé d'un mélange trèfle violet-luzerne-graminées de longue durée (de préférence inoculer la luzerne avec une préparation de bactéries) et exploité pendant trois ans au moins avec ménagement [v. fiche 5 «La mise en culture»].

La mise en culture

Objectif

Pour les projets soumis à étude d'impact sur l'environnement (EIE), on règle par contrat avec les propriétaires concernés le problème de la remise en culture, de sa durée et des indemnités pour les pertes de rendement qui en résultent.

Le but de la mise en culture est de favoriser une activité biologique qui mette en route et soutienne une stabilisation et une restructuration des sols abîmés et instables.

Fiche 5

Phase verte de courte durée

La phase de mise en culture est indiquée partout où le sol en place a été compacté et doit être soumis à un sous-solage profond (p. ex. pose de conduites sans décapage de la couche supérieure du sol de la piste de circulation et de travail). Dans ce cas, une phase de restructuration, sous forme d'une prairie exploitée extensivement pendant au moins une année, est nécessaire avant de reprendre la parcelle dans une rotation normale des cultures.

turation, sous forme d'une prairie exploitée extensivement pendant au moins une année, est nécessaire avant de reprendre la parcelle dans une rotation normale des cultures.

Mise en culture pluriannuelle

Dans tous les cas où le sol a été arraché à sa situation naturelle et qu'en conséquence on a dû recourir à un enherbement intermédiaire du sous-sol, la durée de la période de mise en culture doit être prolongée (p. ex. mise en culture après l'exploitation d'une gravière, pose d'une conduite avec décapage des pistes de circulation). Une période de végétation ne suffit pas pour rétablir et pour stabiliser les conditions d'équilibre dans un sol fraîchement déposé. Trois années complètes représentent un minimum pour cela. Des expériences faites dans des situations peu favorables avec des sols sensibles ont montré que dans bien des cas, cinq ans, exceptionnellement dix ans, étaient insuffisants pour obtenir la consolidation souhaitée dans le sol.

Les mesures proposées ci-après concernent la remise en culture pluriannuelle de sols fraîchement reconstitués destinés à la culture (après la remise de l'ouvrage) et visent à assurer une bonne re-structuration des sols (remise en culture avant la restitution des

parcelles aux exploitants et le passage à une utilisation normale) :

- Ne rouler sur un sol qu'à l'état sec et avec des machines légères
- Éviter de travailler le sol
- Installer des plantes à enracinement profond (trèfle violet, luzerne)
- Produire du fourrage sec (foin, regain)

- Pas de fertilisation azotée, pas de lisiers et purins, pas de traitement herbicides en pleine surface
- Éviter les coupes précoces et trop basses
- Proscrire le pacage
- Prévoir une durée d'utilisation prolongée pour obtenir un effet restructurant maximal (4 ans entre la remise de l'ouvrage et la restitution).

Mesures préconisées pour une remise en culture pluriannuelle [6]

Principes généraux

Le but d'une mise en culture soignée est de rétablir dans un sol reconstitué les fonctions nécessaires à la fertilité du sol. Les objectifs principaux sont :

- La stabilisation de la structure du sol grâce à l'armature vivante des racines. Ainsi, la portance et la résistance aux passages sur le sol est améliorée.
- L'évaporation de l'eau excédentaire.
Une prairie prélève en une seule journée d'été jusqu'à 5 litres d'eau au m².
- La colonisation biologique de mottes inertes et compactes grâce aux radicelles et l'ap-provisionnement du sol en azote. Les bactéries présentes dans les racines de la luzerne fixent jusqu'à 170 kg d'azote de l'air par ha et par an.
- L'activation de la pédofaune, en particulier des vers de terre, qui outre le creusement des galeries qui servent de pores grossiers, sont importants aussi et surtout pour la formation du complexe argilo-humique (agrégats).

Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire de convaincre l'exploitant que pendant la phase de mise en culture, ce n'est pas la maximisation du rendement, mais l'optimisation des conditions de vie pour les plantes et la faune du sol qui a la priorité absolue. C'est pourquoi il est indispensable de régler à l'avance les questions liées à la remise en culture et aux indemnités pour perte de rendement.

Fertilisation

A la base, la fumure se fait en fonction de la disponibilité des éléments nutritifs déterminée auparavant par une analyse de terre. L'échantillon à analyser comprendra au moins quinze prélèvements répartis sur la surface remise en culture. Si l'on se trouve des inégalités de

terrain à l'intérieur de la parcelle à analyser, il faut échantillonner séparément ces surfaces. Il est recommandé de procéder à une analyse complète et de déterminer aussi bien les éléments nutritifs solubles à l'eau que les réserves.

Pas ou peu d'azote

En règle générale, les doses de fumure azotée doivent être faibles. Les cultures trop bien nourries ne développent pas un réseau racinaire dense; un enracinement profond se réalise lorsque la plante doit rechercher ses éléments nutritifs et son eau dans le sol. Pour favoriser le développement de la luzerne, il faut renoncer à toute fumure azotée.

Fumure organique

Les engrais organiques sous forme de fumier mûr ou de compost seront apportés à dose modérée et finement incorporés. Ils sont bien tolérés par les vers de terre et favorisent leur développement. Grâce à l'activité de bioturbation et de consommation des vers, la terre minérale fine se mélange intensivement à la matière organique dans leur tube digestif et forme des précieux complexes argilo-humiques (agrégats).

Pas de purin

Le purin non dilué porte atteinte à la population de vers de terre. Ces précieux auxiliaires ne peuvent pas s'échapper dans leurs galeries creusées verticalement, et sont brûlés. De plus, la croissance des graminées est favorisée par le purin, et celles-ci concurrencent et font disparaître la luzerne. Il faut renoncer à épandre du purin, du lisier ou des boues d'épuration pendant la phase de mise en culture. On peut cependant tolérer de faibles doses de lisier complet bien aéré et non corrosif à partir de la deuxième année de culture.

Exploitation

L'année du semis, une coupe d'automne est indiquée pour les semis précoces, et une coupe de nettoyage pour les semis plus tardifs. La matière verte fauchée – de peu de volume – est laissée au champ et éparpillée sur la surface. Ne jamais faucher la luzerne trop tôt ou trop bas.

Fourrage sec ou ensilage

Dès la deuxième année, une fauche régulière pour produire du fourrage séché au sol est indiquée. C'est avec ce type d'utilisation que les risques de compactage du sol sont les plus faibles. Si on veille strictement à n'intervenir que sur un sol ressuyé et portant, on peut tolérer également l'ensilage.

Pas de fauche en vert, ni de pâture

Durant cette phase, il faut renoncer à la fauche en vert et à la pâture. Des coupes fréquentes nuisent à la luzerne et au trèfle violet. Elles impliquent également des passages fréquents avec un risque accru de compaction du sol. La pâture cause des dégâts de piétinement. La luzerne et le trèfle violet, qui sont précieux en raison de leurs racines profondes, sont également rapidement éliminés par la pâture.

Contrôle de la qualité

Pendant la période de remise en culture, tous les défauts comme les mouilles, l'asphyxie, etc., sont décelables grâce aux modifications du comportement des plantes. Après une remise en culture soigneusement exécutée, la couverture végétale devrait normalement se développer régulièrement et, avec le temps, devenir toujours plus vigoureuse. Des irrégularités marquées dans la couverture végétale sont le signe de défauts qui, dans tous les cas, doivent être corrigés par des interventions supplémentaires comme un sous-solage ou un drainage.

Contrôle des teneurs en éléments nutritifs

Après deux à trois ans de remise en culture, l'approvisionnement en éléments nutritifs doit être de nouveau contrôlé à l'aide d'analyses de sol, sur des échantillons de terre prélevés selon le même protocole indiqué précédemment. Pour garantir la comparabilité des résultats, ces analyses doivent être confiées au même laboratoire. L'interprétation des résultats devrait avoir lieu en collaboration avec un expert agricole.

Le test à la bêche

Le test à la bêche consiste à prélever une tranche de sol jusqu'à une profondeur de 45 cm à plusieurs endroits, également à l'extérieur de la surface remise en culture, ou à proximité immédiate. Ce mini-profil est examiné soigneusement de haut en bas. On note les observations par tranches de 5 cm (voir formulaire page 35).

Les caractéristiques suivantes méritent d'être relevées :

- la résistance à la pénétration (degré de compaction),
- la régularité et la profondeur de l'enracinement (colonisation),
- la présence et l'activité de la pédofaune (en particulier les vers de terre),
- la forme et la stabilité des mottes (grumeaux),
- l'activité de décomposition également dans les zones profondes (observe-t-on encore des reliquats de la culture pionnière du sous-sol ?),
- la consistance de la couche et l'aération (les mottes se brisent-elles facilement, y a-t-il des zones asphyxiées qui puent et dont la coloration est marquée ?).

Normalement, le test à la bêche fait partie des tâches attribuées aux spécialistes de la protection des sols lors de la procédure de contrôle à la restitution d'importantes surfaces reconstituées.

Test à la bêche

Type de sol

Caractéristiques	Profondeur utile en cm							
	05	10	15	20	25	30	35	40
Etat général du sol								
meuble, grumeleux	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
durci, ferme, pris en masse	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
MO non transformée	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Odeur								
agréable, odeur de terre fraîche	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
puante, fécale	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
inodore	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Couleur								
chaude, régulière	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
pâle, mouchetée	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Structure des mottes								
friable, grumeleuse	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
cassante, anguleuse	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Enracinement								
fourni, régulier	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
seulement dans les fissures et les galeries de vers de terre	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
absent	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Vers de terre								
visible, actif	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
pas manifeste	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Analyse sommaire:

Recommandations

Surface du sol		Mesures	
☐ meuble, grumeleuse		☐ aucune	
☐ battante/croûtée		☐ herser/sous-soler	
☐ érodée		☐ enherber	
Humidité du sol/état		Eviter les compactions	
☐ sec/en masse durcie		☐ traficable, mais ne pas travailler trop finement	
☐ frais/friable-émiettable		☐ travaillable, mais ne pas rouler dessus	
☐ humide/plastique ou pétrissable		☐ ni travaillable, ni traficable	
Aération/activité biologique		Activation	
Odeur, couleur, décomposition de la MO		Installer des herbages	
☐ verte et bleue/putride/résidus de récolte		☐ travailler des sols bien ressuyés/semis direct	
☐ résidus de récolte pas transformés		☐ travail superficiel du sol	
Autres informations (culture en place, peuplement, mouilles, etc.)			
Date:		Signature:	

Fiche 5

Transition vers une rotation des cultures

En trois ans de remise en culture, un sol ne peut en aucun cas rétablir pleinement la stabilité de sa structure. On doit tenir compte de cet état de fait lorsqu'on réintroduit ces parcelles dans un assolement.

Il faut donc renoncer dans les années qui suivent aux cultures sarclées qui sollicitent fortement le sol, comme les pommes de terre et les légumes de plein champ, et aux cultures qui se récoltent tard, comme les betteraves sucrières et le maïs. Il faut préférer à cela une rotation axée sur les céréales avec l'introduction aussi rapide que possible d'une prairie artificielle.

Fiche 5

Il est peu raisonnable de consacrer beaucoup d'efforts à mettre soigneusement en place des matériaux terreux, pour ensuite les compacter en profondeur par une exploitation inadéquate. Ceci d'autant plus, que dans la mesure où un ameublissement profond est encore réalisable, les frais de remise en état seront élevés. Le sous-solage n'est pas un remède au compactage. C'est une intervention assez brutale qui vise à créer les conditions nécessaires à la restructuration d'un sol abîmé. Cette intervention ne doit en aucun cas être considérée comme une méthode culturale qui peut être renouvelée indéfiniment.

La prévention du compactage

Circulation sur le sol lors de travaux de génie civil

Lors de l'exploitation des sols, pour les récoltes et les transports, il faut passer sur les terres agricoles et les sols forestiers. La mécanisation croissante de ces travaux a déjà provoqué certaines atteintes physiques aux sols. Celles-ci ont été identifiées et ont été traitées dans le cadre des nouveaux articles relatifs à la protection mécanique du sol dans l'ordonnance sur les atteintes portées au sol (OSol, art.7).

Lorsqu'il faut circuler sur le sol pour réaliser des interventions de génie civil, les conditions qui prévalent sont généralement différentes. Les différences pratiques les plus importantes par rapport à l'exploitation agricole consistent en général dans le fait que :

- la couche supérieure du sol est souvent préalablement enlevée sur une grande surface et entreposée en tas (décapage),
- les travaux de terrassement nécessités par le projet sont exécutés en toutes saisons et s'étendent sur plusieurs mois,
- les passages ne sont pas uniques comme pour la préparation du sol ou la récolte, ils sont répétés et s'effectuent souvent dans la même trace,
- dans la plupart des cas, ce sont des machines et des véhicules lourds qui sont mis en service,
- ce sont toujours des matériaux qui pèsent très lourds comme des matériaux d'excavation, des éléments de construction, du gravier ou du béton qui doivent être déplacés.

Les travaux de génie civil, surtout les travaux pour les transports d'énergie et les voies de communication, exigeront également à l'avenir une occupation temporaire de vastes surfaces de terres agricoles ou forestières. Nous allons présenter quelques mesures de la protec-

tion physique des sols qui devraient être utiles pour planifier et exécuter de façon optimale ces travaux de génie civil.

Préservation de la fertilité du sol

L'objectif principal et primordial consiste à préserver à long terme la fertilité du sol [cf. chapitre 1 des informations générales]. Il faut éviter que des atteintes mécaniques fassent perdre au sol ses qualités naturelles de milieu pour la croissance des plantes. Il faut ménager l'équilibre du sol dans sa structure naturelle et éviter toute compaction inutile ou toute atteinte aux horizons (couches naturelles) du sol.

On peut atteindre ce but en appliquant les principes suivants :

- ne circuler sur le sol que s'il est bien ressuyé et suffisamment portant,
- éviter des trajets inutiles,
- ne mettre en service que des machines et des procédés adaptés,
- réduire au strict minimum la surface soumise à des atteintes mécaniques (emprise),
- éviter tout déplacement inutile de matériaux terreux, en particulier le décapage,
- ne jamais laisser le sol sans couverture végétale, c.-à-d. nu et sans protection.

Ces principes doivent impérativement faire partie intégrante de l'avant-projet, du projet principal et de sa planification dans le temps, ainsi que quant aux appels d'offre correspondants. Leur mise en œuvre doit être contrôlée sur le chantier. En règle générale, cela implique la surveillance du chantier sur place par un spécialiste reconnu de la protection des sols [cf. Fiche 0].

L'application pratique de chaque principe est décrite brièvement ci-dessous, dans la mesure où cela est nécessaire. Des informations plus détaillées figurent dans les chapitres de la *partie générale* de ce guide pratique.

Sol ressuyé

Un sol ressuyé est plus portant. C'est la force de succion, mesurée avec des tensiomètres, qui sert de critère d'évaluation à la portance. Une placette de mesure est composée de cinq tensiomètres. La valeur qui fait foi est la valeur médiane des cinq valeurs relevées individuellement. On ne doit pas circuler sur des sols dont la force de succion est inférieure à 10 centibars.

Choix des machines

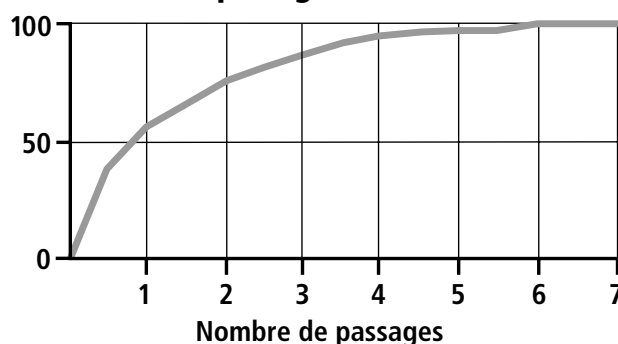
Les machines adaptées sont celles qui sont aussi légères que possible, avec une bonne répartition du poids et une faible pression au sol. Les trains de roulement larges et longs présentent une pression au sol plus faible. Les machines bien conçues peuvent atteindre sans problème des périodes d'utilisation deux fois plus longues que la normale, en particulier dans les phases où le sol est relativement humide.

Le nomogramme présente à gauche la pression au sol admise en g/cm² et le poids des machines en tonnes (t) pour une force de succion donnée en centibars (cbar en bas). Ce permet de démontrer qu'en doublant la surface de portance d'un boteur pesant 16 t avec une pression au sol de 1000g/cm², il peut déjà être mis en service dès 10 cbar, au lieu de 20 cbar.

Fréquence des passages

Chaque phase de travail doit être planifiée de manière à être réalisée avec le moins de passages possible. C'est la multiplication des passages qui provoque en grande partie le compactage.

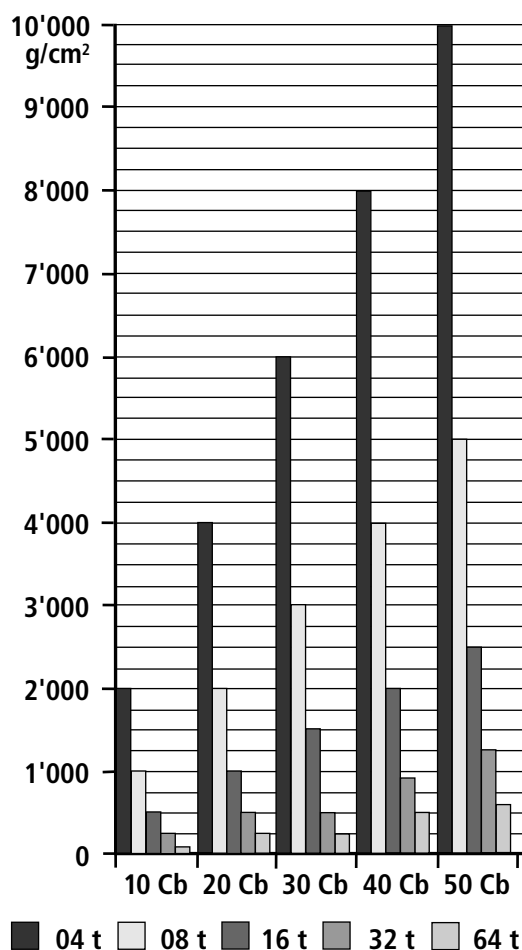
Niveau de compactage



Compactage en relation avec la fréquence des passages

Ce sont principalement les véhicules à pneus (camions de chantier, bennes à pneus) qui présentent les risques les

plus élevés de compactage. Leur emploi sur des sols en place devrait être évité le plus possible. Des forces de succion inférieures à 20 cbar ne sont, en général, plus admissibles pour des passages répétés sur des sols argileux (teneur en argile > 30%), car un sol dans cet état d'humidité est plastiquement déformable. Là où un passage répété du même tronçon est inévitable, il faut établir une piste pour les transports avant le début des travaux (p. ex. piste en rondins ou en gravier).



Réduire les emprises

Il faut toujours limiter autant que possible les surfaces touchées par le chantier. Pour de grands chantiers, comme par exemple la pose de pipelines, il faut adapter la technique de construction en conséquence. Pour les remblayages et les remises en culture, il faut planifier les pistes d'accès de manière à ce qu'elles puissent être ameublées sur toute leur surface avant la remise en place du sous-sol et de la couche supérieure du sol.

Pas de décapage inutile

Le décapage systématique de la couche supérieure du sol avant l'intervention de génie civil dans le terrain a certes une longue tradition. De nombreux propriétaires sont encore convaincus du bien-fondé de cette mesure (argument choc: diminution des pertes en humus). Or, les décapages pour des raisons de protection du sol ne sont défendables que pour des sols très superficiels.

En particulier lorsqu'il s'agit de rouler sur le sol pour un nombre de passages limité, il est préférable de laisser en place la couche supérieure du sol comme couche de protection. Celle-ci présente, en raison de son activité biologique, une capacité de régénération bien meilleure que la couche de sous-sol qui lui est sous-jacente.

Dans un sous-sol compacté, une restructuration naturelle n'est pratiquement plus possible. L'assainissement de sous-sols compactés est coûteuse en temps et en argent.

Il est également préférable de déposer, pour des entreposages de courte durée, les matériaux terreux sur la couche supérieure du sol. On pourra certes constater une asphyxie locale du sol (en se fondant sur l'odeur de pourriture qui se dégage lorsque le matériau terreux est repris). Mais l'activité biologique se remet rapidement en train après un ameublissement superficiel favorisant l'aération.

Lorsque pour des machines identiques, les traces de passage dans la couche supérieure du sol sont beaucoup plus profondes que dans le sous-sol, il faut attribuer cette plus grande visibilité des ornières à la compression des pores grossiers. Le sous-sol contenant moins de pores grossiers, les compactations y sont moins visibles, mais par contre elles impliquent dans la plupart des cas une perte pratiquement totale des pores grossiers. On ne peut plus remédier à de tels dégâts sans recourir à des méthodes coûteuses.

Toujours semer une couverture végétale

Les racines rendent un sol enherbé considérablement plus portant qu'un sol nu. En été, une prairie est en mesure de prélever sans problème cinq litres d'eau par jour et m². Le semis d'une prairie sur la surface concernée doit s'effectuer le plus tôt possible, au mieux déjà un ou deux ans avant l'intervention, afin que la prairie puisse s'installer complètement. Après les passages d'engins, la prairie se régénère en général rapidement. C'est seulement dans des cas graves qu'elle doit être ressemée, et dans la plupart de ces cas, il suffit d'effectuer un sursemis.

Chapitres 1 à 8

Informations générales à propos du sol



1. La fertilité du sol

Définitions

L'art. 2 de l'OSol (ordonnance du 1er juillet 1998 sur les atteintes portées aux sols) [7] définit le concept de la fertilité du sol de la manière suivante :

- ¹ Le sol est considéré comme fertile :
- a. s'il présente une biocénose diversifiée et biologiquement active, une structure typique pour sa station et une capacité de décomposition intacte;
 - b. s'il permet aux plantes et aux associations végétales naturelles ou cultivées de croître et de se développer normalement et ne nuit pas à leurs propriétés;
 - c. si les fourrages et les denrées végétales qu'il fournit sont de bonne qualité et ne menacent pas la santé de l'homme et des animaux;
 - d. si son ingestion ou inhalation ne menace pas la santé de l'homme et des animaux.

Dans sa publication «Protection des sols contre les atteintes physiques» [15] la Société Suisse de Pédologie définit la fertilité du sol - voir également le protocole sur la protection des sols de la Convention alpine (1991) - comme étant la capacité d'un sol de remplir ses fonctions en lui-même et en interaction avec

les autres milieux et systèmes environnementaux. Dans ce sens, la fertilité du sol peut être considérée comme une expression de sa multifonctionnalité.

Sont citées parmi les principales fonctions du sol :

- base vitale et espace vital pour l'homme, les animaux, les plantes et les microorganismes,
- gisement de ressources naturelles,
- site pour d'autres usages économiques, les transports, l'approvisionnement et la distribution, l'évacuation des eaux et des déchets,
- archives de l'histoire naturelle et culturelle,
- milieu de transformation et de régulation pour les apports de substances.

Chap. 1

Pour plus de détails :

Consulter :

Commentaires concernant l'ordonnance du 1^{er} juillet 1998 sur les atteintes portées aux sols (OSol), L'environnement pratique, OFEFP, 2001.

Directives pour l'estimation de la fertilité du sol, OFEFP/FAC en collaboration avec différentes stations de recherches agronomiques et les offices cantonaux de la protection du sol, FAL, 1991.

2. Le sol vit

Le sol abrite un monde vivant très diversifié. Si la macrofaune (vers de terre, escargots, insectes) est généralement bien connue, en raison de la taille des organismes facilement observables à l'oeil nu, elle ne représente qu'une part infime de la biomasse totale du sol, tant au niveau pondéral que de la diversité des espèces rencontrées. La plus grande partie des organismes du sol (mésafaune, microfaune et microflore) n'est pas visible à l'oeil nu. Elle est donc peu connue.

Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse qui ne prétend pas détailler toute l'écologie du sol. Le schéma ci-dessous tente de représenter de manière simplifiée la répartition de la biomasse dans la couche superficielle du sol.

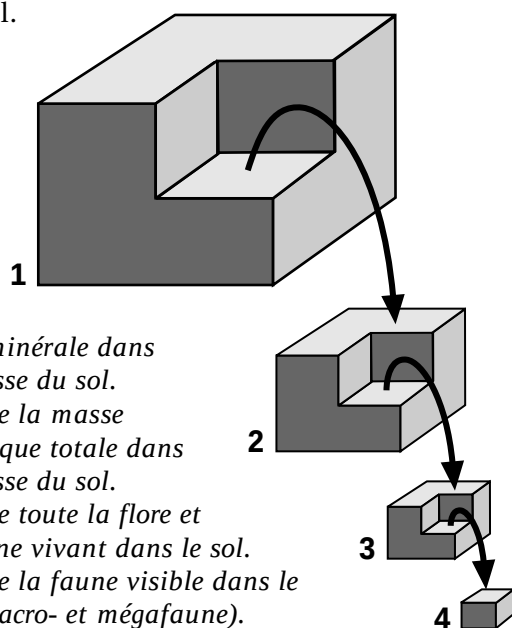


Fig. 01 : Représentation simplifiée de la distribution pondérale d'un sol.

2.1 Interface sol/plante

La plante s'enracine dans le sol et y trouve sa nourriture, elle peut y croître et se multiplier. De son côté, le sol est lui-même colonisé par la croissance des racines des plantes. Les exsudats racinaires augmentent la disponibilité des éléments nutritifs. Des particules, calcaires en

particulier, sont attaquées, désagrégées et dissoutes. La zone active de transition entre les racines et le sol s'appelle la rhizosphère.

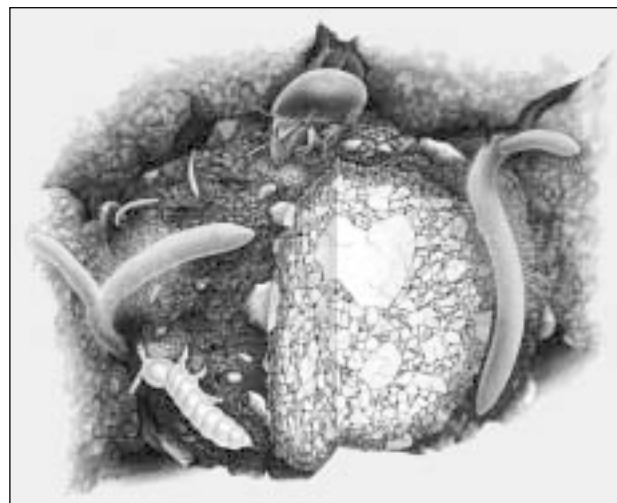


Fig. 02 : La pédofaune au niveau d'un agrégat (l'image correspond à un carré de 4 mm) On a représenté au milieu en haut un acarien et en bas à gauche un collembole. Ces animaux, classés dans la mésafaune, peuvent être encore tout juste identifiés à l'oeil nu. Le grumeau est entouré par des poils absorbants de plantes.

Sol/chevelu/microorganismes

Les particules minérales de l'agrégat, si petit soit-il, sont maintenues ensemble par un film d'eau, par un grand nombre de poils absorbants extrêmement fins et par les hyphes des champignons.

La surface d'un agrégat est souvent partiellement ou complètement revêtue d'une pelouse bactérienne. C'est ainsi que le grumeau constitué des particules minérales les plus fines (argile, silt et sable) est rendu stable (structuration vivante).

Microorganismes/plantes

Les microorganismes et les plantes cohabitent de manière variée et se complètent de manière idéale. Il arrive souvent qu'une espèce

végétale dépende de certains microorganismes pour tout simplement prospérer. De même que divers microorganismes sont dépendants de la présence de certains végétaux. Deux exemples connus de synergismes sont présentés ci-dessous :



Fig. 03 : La symbiose avec les bactéries fixant l'azote, principalement chez les légumineuses. Le gain d'azote est considérable; une prairie de trèfle ou de luzerne peut fixer 170 kg N par ha et par an.

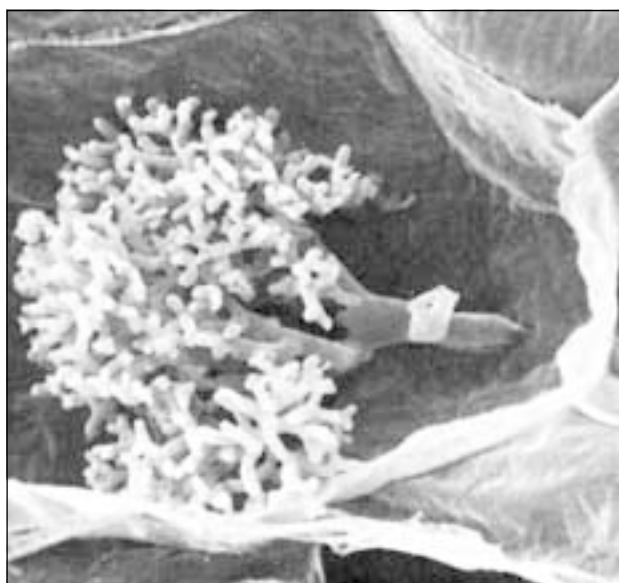


Fig. 04 : Arbuscules intracellulaires de micorhyzes, qui pénètrent à l'intérieur de la racine. Les hydrates de carbone prélevés à la plante sont échangés contre des éléments nutritifs tirés du sol.

2.2 Classification, ordre de grandeur et brève description

La faune vivant dans le sol est classée en 5 groupes suivant sa taille, tout comme la répartition selon la granulométrie [ch. 4] et la taille des pores [ch. 6] de la matrice minérale du sol, leur milieu de vie.

Microflore, $\varnothing$ 0,5 - 5 μm

(= Argile-silt fin = pores moyens fins)

Du point de vue du nombre et du poids, cette fraction invisible de la pédofaune forme de loin la plus grande part de la biomasse dans le sol.

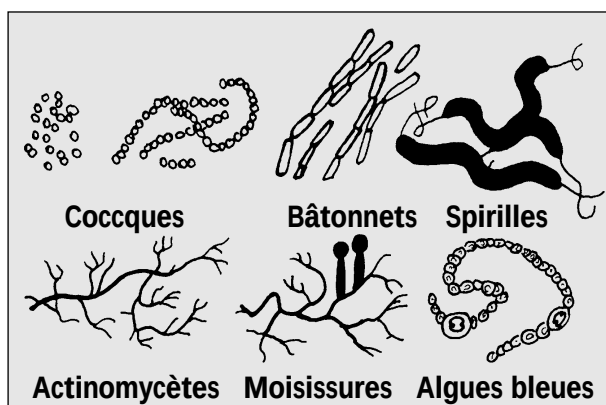


Fig. 05 : Illustrations simplifiées de représentants importants de la microflore du sol pour montrer sa diversité.

La microflore vit en permanence à la surface des particules du sol et dans leurs interstices. Le plus souvent, elle forme ce qu'on appelle des pelouses. Souvent ces pelouses lient ensemble les particules minérales et organiques extrêmement petites, les entourant d'une enveloppe gélatineuse. Celle-ci alimente à son tour beaucoup de petits êtres vivants du sol. Les microorganismes vivent souvent en symbiose avec les racines, et leur densité est par conséquent très élevée dans la rhizosphère.

D'autres microorganismes, comme p. ex. des champignons, peuvent avoir un effet antibiotique, ou inhibiteur de croissance, qui peut être tout à fait souhaitable (p. ex. extermination de germes pathogènes). A quelques exceptions près, ces organismes dépendent d'un milieu aéré (oxygéné). C'est pourquoi leur concentration est la plus élevée dans les couches les plus proches de la surface du sol.

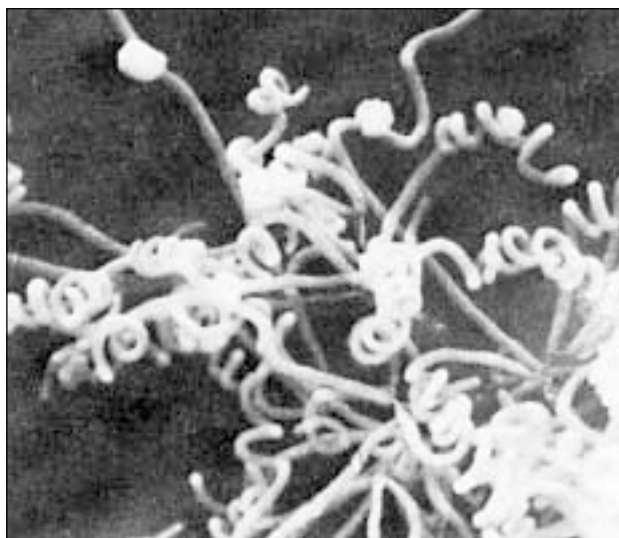


Fig. 06 : Certains microorganismes produisent des substances antibiotiques. Les plus connues sont entre autres la pénicilline et la streptomycine. Chaîne de spores en spirales d'un streptomycète (d'après Williams, 1983, grossie 6000 fois).

Microfaune, Ø 5 - 100 µm (= silt = pores moyens grossiers)

On classe dans cette catégorie les gros organismes de la microflore. les champignons et les algues, les parties les plus fines des plantes (les poils absorbants), ainsi que la microfaune, c.-à-d. les organismes unicellulaires (protozoaires) : les amibes, les flagellés, les ciliés, les rotifères et les nématodes. Ils vivent partiellement de manière stationnaire et se déplacent aussi dans la solution du sol. Ils se nourrissent de substances organiques dissoutes et de détritux (déchets de cellules, substances en suspension ou déposées), mais aussi de bactéries.

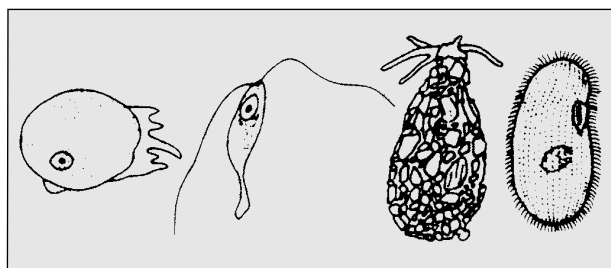


Fig. 07 : de g. à d., amibe nue (rhizopode), zooflagellé, thécamibe (amibe à coquille) et cilié.

Mésafaune, Ø 200 - 4000 µm (= sable = pores grossiers)

La mésafaune vit dans les pores grossiers. Ses représentants principaux, qui peuvent être tout juste identifiés à l'oeil nu, sont aisément observables à l'aide d'une loupe. Il existe des espèces apodes comme les nématodes, mais il y a aussi de nombreuses espèces à membres articulés : des collemboles, des insectes primaires, des acariens et des araignées minuscules.

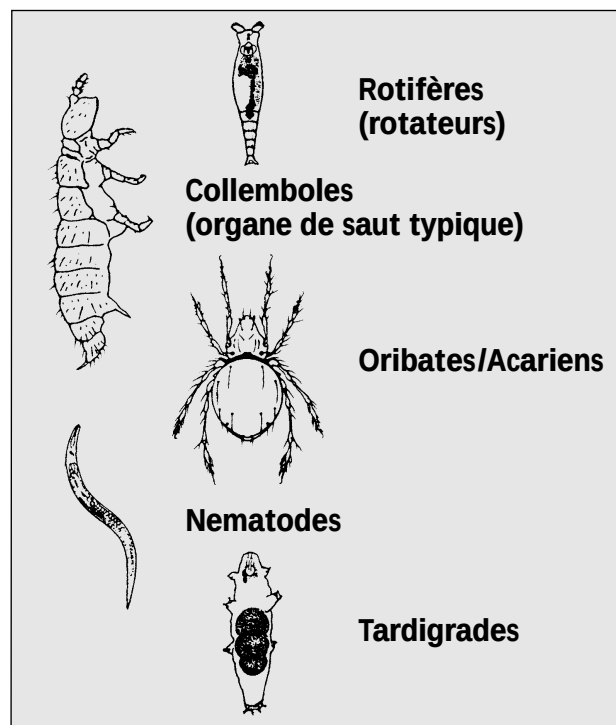


Fig. 08 : Quelques exemples de mésafaune.

Les collemboles sont spécialisés dans la décomposition de la substance végétale morte, tandis que les araignées vivent plutôt de la chasse. Certains acariens se nourrissent en prélevant la sève des plantes, ce sont des ravageurs. D'autres sont des prédateurs se nourrissant p. ex. d'acariens ravageurs, ce sont alors des auxiliaires utiles à l'agriculture. Ils sont souvent les victimes innocentes de la lutte chimique contre les ravageurs.

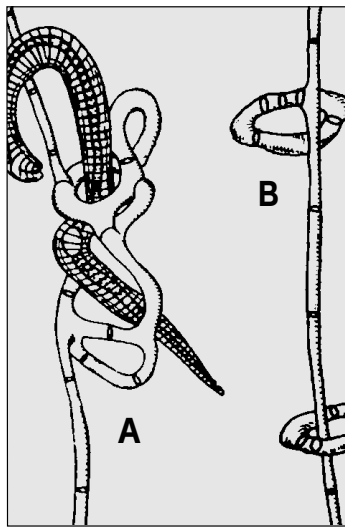


Fig. 09 : Champignon prédateur du genre entomophthora capable, grâce à la formation d'un hyphes spécial (B), d'attraper et de digérer des organismes de petite taille vivant dans le sol, p. ex. (A) un parasite (nématode).



Fig. 10 : Une araignée prédatrice (en bas) attaque un acarien (parasite des plantes).

Macrofaune, Ø 2 - 20 mm (= gravier fin = fentes et galeries des vers)

La macrofaune comprend une multitude d'insectes et de larves, d'araignées, de crustacés (cloportes), de petits vers (enchytrées).

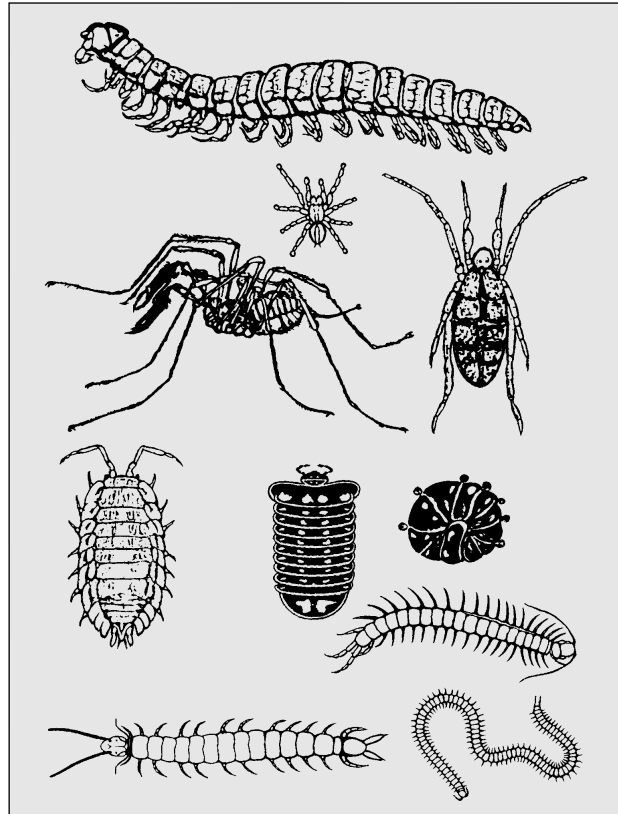
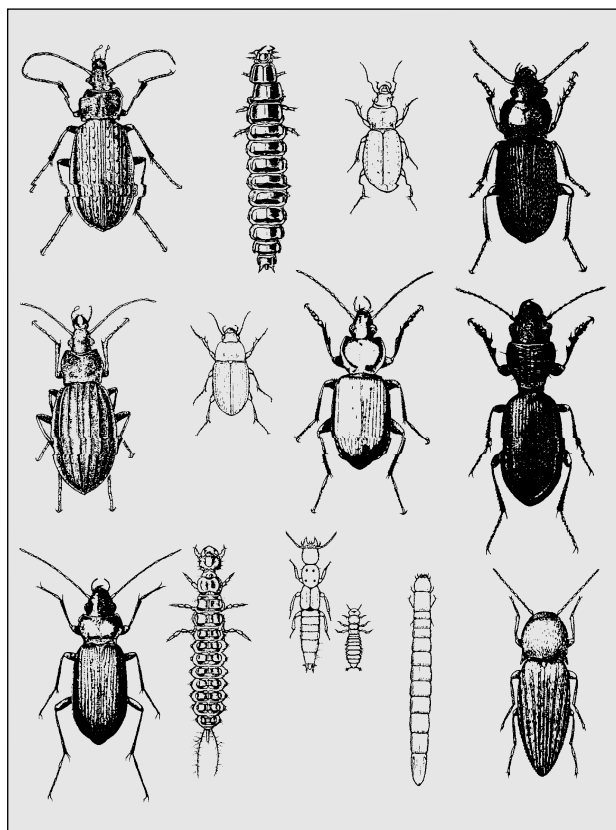


Fig. 11 : Cette illustration montre les représentants de la macrofaune qui fuient la lumière et qu'on ne rencontre pratiquement pas à la surface du sol. Il s'agit de diverses formes d'insectes, de crustacés, d'araignées, de diplopodes. Beaucoup d'entre eux sont des prédateurs (araignées, diplopodes, chilopodes, perce-oreilles). Quant aux cloportes, ils fractionnent la litière et les matériaux végétaux décomposés.

Les représentants de la macrofaune qui vivent et qui chassent à la surface du sol se distinguent de leurs congénères souterrains par une forte pigmentation et une coloration souvent voyante. La grande famille des carabes forme un groupe de décomposeurs connus qui sont d'importants indicateurs de l'activité biologique du sol.



Chap. 2

Fig. 12 : Carabes avec leur larve (Taille entre 7 et 33 mm).

Mégafaune, $\varnothing > 20 \text{ mm}$

(= cailloux = fentes de retrait, crevasses)

On compte dans cette catégorie les gros animaux, des gros coléoptères, escargots et vers de terre. Les petits mammifères vivant dans le sol (campagnols, taupes) appartiennent également à cette catégorie.

2.3 Les vers de terre

Le ver de terre (lombric) est considéré comme le travailleur de force parmi les animaux vivant dans le sol. En se basant sur des fouilles, Darwin a pu constater qu'en 2000 ans, l'activité des vers de terre ont permis de déplacer une couche de terre de plus d'un mètre d'épaisseur. En digérant, le ver de terre mélange intensivement la matière organique avec les plus petites particules minérales du sol pour former des complexes argilo-humiques stables, et contribue ainsi de manière importante à la formation de la structure du sol.

Les vers de terre sont hermaphrodites. Dans le clitelium (renflement circulaire de couleur claire chez les adultes), il se forme un cocon, ensuite déposé dans le sol, duquel éclore plus tard des vers de terre.

La cinquantaine d'espèces de vers de terre qu'on trouve chez nous sont classées en trois catégories selon leur mode de vie.

Espèces épigées

(p. ex. *Dendrobeanea*, *Eiseniella*, *Eisenia foetida*)

Elles vivent dans la couche de litière peu décomposée, dans le compost et le fumier. Les vers sont plutôt petits et minces, très vifs, d'une couleur rougeâtre ou orange. L'élevage en masse de ces vers ne pose pas de problème.

Espèces endogènes

(p. ex. *Allolobophora*, *Octolasion*, *Nicodrilus* au stade juvénile)

Elles vivent principalement dans la couche supérieure du sol et montent rarement à la surface. Ils se frayent un chemin de ci et de là en creusant et en avalant la terre. Le labour les ramène souvent en masse à la surface. Aussi des espèces anéciques comme le Lombric passent en partie leur stade juvénile sous forme endogène.

Espèces vivant dans des galeries verticales (anéciques)

(principalement les espèces *Lumbricus* et *Nicodrilus*)

Vers de grande taille et à forte pigmentation. Ils vivent dans une galerie verticale, qui atteint de très grandes profondeurs dans le sous-sol. Ces animaux se caractérisent par le fait qu'ils vont chercher leur nourriture (généralement de nuit) à la surface du sol pour la ramener dans leur galerie d'habitation.



Fig. 13 : Ver de terre entraînant un fétu de paille.

Là, les parties coriaces et fibreuses des végétaux sont d'abord prédigérées par des microorganismes, puis consommées et digérées par le ver de terre à un stade partiellement décomposé. La substance organique avalée et mélangée intensivement avec la terre fine est excrétée sous forme de turricules.

Les vers de terre apportent donc la contribution la plus importante aussi bien pour la formation que pour l'aération et le drainage du sol. Leurs galeries forment des cheminements prioritaires, riches en éléments nutritifs pour les racines. Les populations de vers de terre peuvent être ménagées et favorisées surtout en renonçant à épandre du purin non dilué corrosif et des herbicides, en laissant les restes de récolte au champ, ainsi qu'en pratiquant le travail du sol sans labour (semis direct).

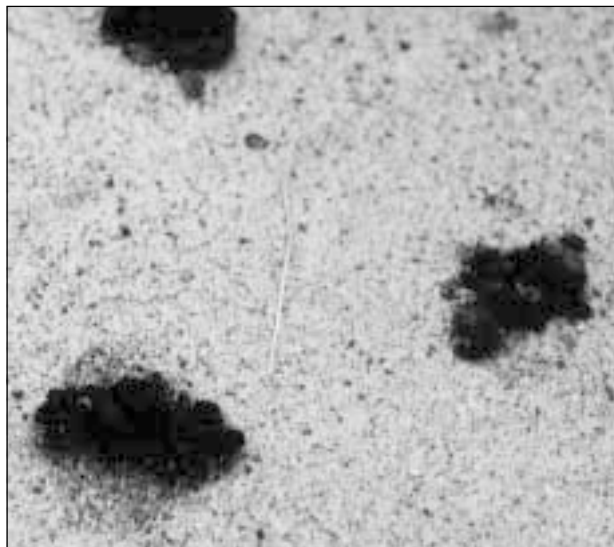


Fig. 14 : L'étonnante activité de bioturbation des vers de terre. Lors d'inondations (24/25 août 1987), la Reuss à Seedorf (UR) a déposé une épaisse couche de sable. En quelques jours, des vers se sont frayé un chemin vers la surface à travers 1 mètre de sable. Les turricules sombres provenant du sol recouvert, riche en humus, se détachent nettement sur le sable clair.

Les vers sont actifs surtout pendant le printemps et l'automne, périodes fraîches et humides. Pendant la période sèche de l'été, ils s'enfoncent profondément dans le sous-sol qui reste humide. Durant cette saison, les interventions culturales ont moins de prise sur eux.

Chap. 2

Pour plus de détails :

Consulter :

Le sol vivant, J.-M. Gobat et al. collection Gérer l'environnement, n° 14, PPUR, 1998.

3. Les types de sols

Les facteurs de formation du sol : la roche-mère, la topographie, le climat, la végétation et les organismes vivants dans le sol, ainsi que l'utilisation du sol par l'homme ont produit une grande variété de types de sol, qui forment la mince couche intermédiaire entre la partie minérale du globe terrestre (p. ex. la roche ou un sédiment meuble) et l'atmosphère.

Les types de sol sont définis selon des caractéristiques précises : matériau originel, succession des horizons et régime hydrique identiques. Lorsqu'on parle dans un rapport d'un sol brun, d'un sol brun calcaire ou d'un podzol, on indique le type de sol. En revanche, les termes de sableux ou d'argileux qualifient la nature granulométrique du sol [cf. chapitre 4 «la nature du sol»]. Le type de sol est donc déterminé largement par la *pédogenèse* du sol, la nature du sol et la roche-mère.

Sous nos conditions climatiques, le régime de l'eau (classe I) joue le rôle principal dans la formation des sols (*pédogenèse*). Il est caractérisé par la perméabilité. Il constitue donc le premier des sept degrés du système de classification des sols en Suisse. Les degrés suivants de la classification sont déterminés par la roche-mère (classe II), les constituants chimiques et minéralogiques (classe III), le lessivage d'éléments et de particules (classe IV) et le degré d'expression des caractéristiques du profil (classe V). Finalement, la classification tient compte des caractéristiques importantes pour la croissance des plantes, telles que la profondeur utilisable par les racines, la capacité de stockage de l'eau et la teneur en éléments nutritifs (classe VI). La dernière étape (classe VII) tient compte de facteurs du milieu comme l'exposition, la végétation et l'utilisation du sol.

La perméabilité d'un sol est indiquée par le coefficient de perméabilité K (voir fig. 15 et chapitre 8).

Coefficient k	Vitesse d'écoulement	Régime hydrique
10 ⁻¹ cm/sec	3600 mm/h	sec
10 ⁻² cm/sec	360 mm/h	
10 ⁻³ cm/sec	36 mm/h	
10 ⁻⁴ cm/sec	3,6 mm/h	humecté
10 ⁻⁵ cm/sec	0,36 mm/h	humide
10 ⁻⁶ cm/sec	0,036 mm/h	
10 ⁻⁷ cm/sec	0,0036 mm/h	engorgé
10 ⁻⁸ cm/sec	0,00036 mm/h	

Fig. 15 : Ce tableau présente les relations entre le coefficient K, la vitesse d'écoulement et le régime hydrique.

3.1 Les sols perméables

Les sols sont considérés comme perméables lorsque leur vitesse d'écoulement dépasse 100 mm par jour, c'est-à-dire une valeur K de 10⁻⁴ cm/sec. Les sols perméables (lessivés) se caractérisent généralement par un profil de couleur uniforme brune à jaunâtre. Même quand les horizons («couches») du sol présentent des couleurs différentes, des taches de rouille ou des colorations grises sont absentes.

Les sols bruns

sont de coloration jaunâtre à brune. Ces colorations proviennent du fer oxydé. L'oxydation n'est possible qu'en présence d'oxygène. Les sols bruns sont donc bien aérés, généralement profonds. Ils sont très répandus dans les zones climatiques tempérées de notre Plateau et de nos Préalpes et font partie des terres arables fertiles.

Les régosols (sols bruts)

sont moins développés que les sols bruns. Ils sont plutôt superficiels. Par sa couleur, l'horizon supérieur (horizon A) se distingue clairement du matériau originel non altéré (horizon C). Il manque une couche de transition ou couche d'altération intermédiaire (horizon B). C'est pourquoi, ce type de sol est également qualifié de sol A/C.

Les sols bruns lessivés

se distinguent des sols bruns par le lessivage et l'accumulation des particules d'argile dans les couches profondes du sol (horizons d'éluviation et d'illuviation).

Les podzols

sont des sols acides fortement lessivés, qui ne fixent pratiquement pas d'éléments nutritifs; ils sont par conséquent des sols pauvres. On trouve les podzols principalement sur des roches à base de silice (granite ou gneiss) sous les forêts de résineux des Alpes.

3.2 Les sols engorgés

Les sols engorgés, ou insuffisamment perméables, se caractérisent par une perméabilité freinée à très restreinte. Des taches de couleur peuvent indiquer une percolation légèrement entravée, tandis que les sols imperméables, dans des climats très pluvieux, sont saturés d'eau pratiquement jusqu'à la surface. L'horizon engorgé se trouve dans la couche du profil colonisable par les racines.

Les pseudogleys

sont des sols qui sont momentanément gorgés d'eau d'infiltration en raison d'une couche colmatée ou d'une granulation fine. La zone d'engorgement temporaire peut être repérée dans le profil grâce aux taches de gley typiques (taches de rouille) et aux concrétions noires de manganèse. Les pseudogleys se rencontrent fréquemment dans les régions pluvieuses. Leur mise en valeur par l'agriculture n'est possible que de manière limitée.

3.3 Les sols hydromorphes

Les sols hydromorphes sont soumis de manière périodique ou constante à l'influence d'apports d'eau extérieure. Cet apport peut s'effectuer latéralement dans une pente (gleys de pente) ou par l'élévation du niveau de la nappe phréatique (battement) dans les plaines.

Les gleys

sont des sols qui sont engorgés par des écoulements latéraux ou des fluctuations des nappes phréatiques. L'eau amenant également du calcaire dans la plupart des cas, les gleys, contrairement aux pseudogleys, ne s'acidifient pas. La couche supérieure est souvent de couleur sombre (paratourbeuse) tandis que le sous-sol saturé d'eau présente des tons allant du gris-noir et gris-vert au bleuâtre, en raison de la réduction des fers.

Du fait qu'ils se trouvent constamment saturés d'eau, les gleys sont des sols très délicats. Les éléments nutritifs aboutissent très rapidement dans un milieu saturé d'eau et peuvent ainsi mettre en danger la nappe phréatique. Une utilisation agricole intensive de ces sols est toujours problématique.

3.4 Les sols alluviaux

Les sols alluviaux

sont limités à de petites zones proches des cours d'eau qui sont périodiquement inondées par des cours d'eau non-corrigés. Dans les sols alluviaux, les couches de matériaux amenés par chaque inondation sont identifiables dans le profil. On ne trouve pratiquement plus en Suisse de sols alluviaux régulièrement inondés, excepté dans les forêts riveraines.

3.5 Les sols hydro-morphes organiques

Les sols tourbeux

sont bien de couleur noire, mais ne sont pas à confondre avec les chernozems (terres noires), qui n'existent pas en Suisse. Les sols organiques doivent leur teinte foncée à la présence des humines. En l'absence d'oxygène, la décomposition des débris végétaux ne peut pratiquement pas se faire, ce qui provoque la formation de la tourbe. Dans ce milieu acide et pauvre en oxygène, des fragments de plantes et des arbres entiers se sont conservés pendant des siècles. Les bas-marais et les tourbières élevées dans leur état naturel ne se rencontrent plus que rarement chez nous.

Lorsque les sols organiques sont drainés, ils sont faciles à mettre en culture et ils sont généralement exploités de manière intensive (cultures maraîchères). Suite au drainage et à l'aération qui en résulte, la masse organique se met à se décomposer rapidement. Ce processus entraîne le tassement de la tourbe (affaissement des tourbes) et la mise en circulation de grandes quantités de nitrates par minéralisation.

Pour plus de détails :

Consulter :

Cartographie et estimations des sols agricoles, les cahiers de la FAL, n° 24, 1997.
Cartographie des sols, J.-P. Legros, PPUR, 1996.

Lorsqu'on classe le matériau dont est constitué le sol, comme par exemple un limon très sableux ou une argile limoneuse moyennement silteuse, on caractérise la nature du sol. Celle-ci est définie par les proportions exprimées en pour-cent d'argile, de silt et de sable, c.-à-d. par la granulométrie de la terre fine minérale. Il s'agit de toutes les particules du sol ayant un diamètre inférieur à 2 mm. Les particules minérales du sol ayant un diamètre de plus de 2 mm font partie de la pierrosité (sables fins et grossiers, cailloux, pierres). La nature du sol influence les caractéristiques tactiles d'un sol.

Pour caractériser la nature du sol, sur la base de la répartition des fractions granulométriques de la terre fine, on utilise ce qu'on appelle le **triangle de texture**. Les pourcentages des fractions suivantes sont placés sur la grille de lecture :

Argiles (A) ($\varnothing$ de la particule $< 0,2 \mu\text{m}$)
Silt (U) ($\varnothing$ de la particule $0,002 - 0,05 \text{ mm}$)
Sable (S) ($\varnothing$ de la particule $0,05 - 2 \text{ mm}$)

Ces pourcentages ont été préalablement mesurés au laboratoire ou évalués par le test tactile.

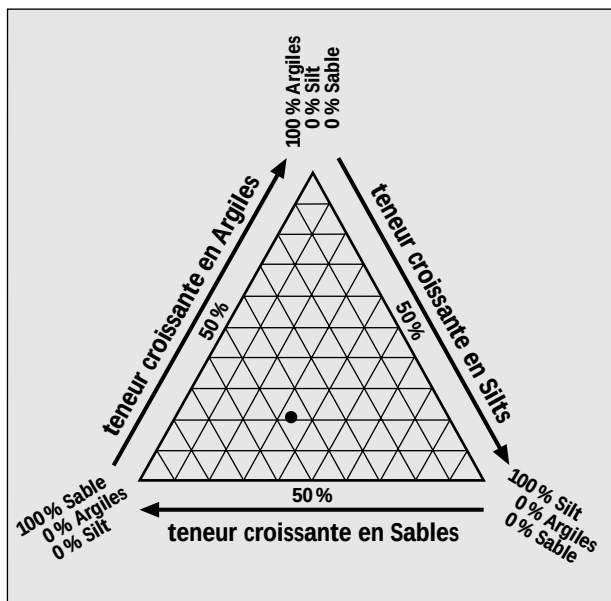
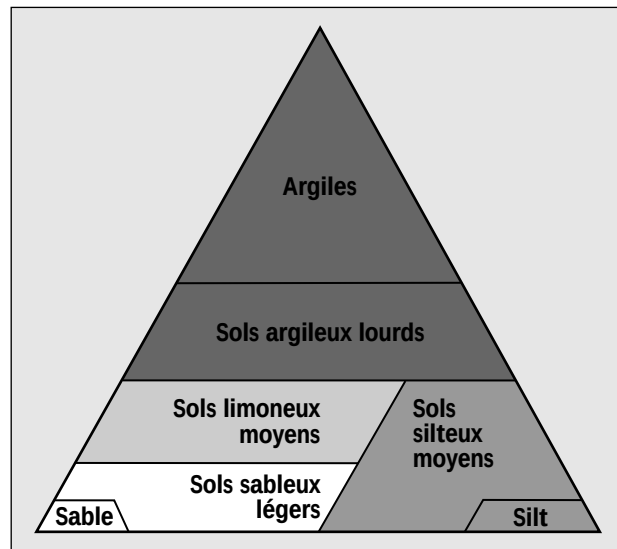


Fig. 16 : Triangle de texture [3]. Le point d'intersection des lignes de pourcentage permet de définir la nature du sol selon une classification simplifiée. Dans l'exemple (•), il s'agit donc d'un sol limoneux moyen. Classification détaillée: sol limoneux moyennement silteux.

4. La nature du sol

Répartition simplifiée de la nature des sols dans le triangle de texture



Classification de la nature du sol:

	Argiles %	Silts %
Sols argileux lourds		
Argile	> 50	< 50
Argile limoneuse	50 - 40	< 50
Limon argileux	40 - 30	< 50
Silt argileux	50 - 30	> 50
Sols silteux moyens		
Silt limoneuse	30 - 10	> 50
Silt sableux	< 10	50 - 70
Silt	< 10	> 70
Sols limoneux moyens		
Limon	30 - 20	< 50
Limon sableux moyen	20 - 15	< 50
Sols sableux légers		
Limon sableux léger	15 - 10	< 50
Sable limoneux	10 - 05	< 50
Sable silteux	10 - 05	15 - 50
Sable	< 05	< 15
Selon la teneur en Silt, on peut encore subdiviser les types de sols en:		
Faiblement silteux	< 15	
Moyennement silteux	15 - 35	
Fortement silteux	35 - 50	

Fig. 17: Le schéma et le tableau ci-dessus permettent une caractérisation plus détaillée de la nature du sol sur la base de la répartition des fractions granulométriques.

4.1 L'argile (A)

Sous le terme d'argile dans le sens pédologique, on comprend la fraction minérale la plus fine du sol. Le diamètre de ses particules se situe au-dessous de $2\ \mu\text{m}$, c.-à-d. au-dessous de $0,002\ \text{mm}$. Cette définition ne doit pas être confondue avec les termes de géologie et de minéralogie décrivant soit des minéraux argileux, soit des roches argileuses sous les termes d'«argile(s)». L'argile a la propriété de gonfler avec l'eau et de se rétracter en séchant (fentes de retrait). De plus, l'argile peut, grâce à sa grande surface spécifique et à ses charges négatives, retenir et échanger des ions de différents éléments (cations). L'argile peut migrer dans l'horizon B; cela se manifeste par des enveloppes d'argile autour des pierres et aux surfaces de rupture des agrégats du sol (caractéristique typique des sols bruns lessivés).



Fig. 18 : Une particule d'argile sous microscope électronique (grossie env. $10'000$ fois). La structure en plaquettes des argiles est parfaitement reconnaissable.

L'argile est un constituant important du sol. Avec la substance organique décomposée, elle forme ce qu'on appelle les complexes argilo-humiques (grumeaux), qui jouent un rôle important pour la nutrition des plantes et pour la stabilité structurale. En raison de sa capacité à gonfler et à se rétracter, l'argile contribue à l'ameublissement naturel du sol et à son aération. Les racines empruntent de préférence ces fentes de retrait pour cheminer vers les profondeurs. Malgré leur apparence compacte, les sols argileux sont biologiquement actifs et aérés en profondeur.

Une proportion trop élevée d'argile pénalise le travail du sol et limite les utilisations. En séchant, la terre argileuse durcit rapidement et forme des mottes compactes. Pour faciliter le travail du sol, il faut assurer le développement d'une structure adéquate par l'entretien de la teneur en humus et la stimulation de l'activité biologique. Un travail trop intensif du sol, particulièrement avec des instruments animés qui brisent ou émiettent les mottes, accentue les effets négatifs des sols argileux sur la croissance des plantes.



Fig.19 : Des mottes grossières et compactes d'un sol argileux labouré en automne sont exposées au gel hivernal (émiettement par effet de gel).

Propriétés mécaniques

Les sols argileux ressuyés sont extrêmement durs et portants. Avec l'augmentation de l'humidité, les sols argileux deviennent plastiques et déformables et sont très sensibles aux atteintes mécaniques (sensibilité à la compaction).

Test tactile

Détrempée, l'argile donne une sensation collante. Humide, elle est plastique et modelable. Plus les dépôts adhérents sur la paume de la main sont faibles, plus la teneur en argile est élevée.

Test du modelage

Si l'échantillon humide peut être modelé en un boudin de diamètre inférieur à 2 mm sans se briser, la teneur en argile est alors supérieure à 30%. A l'état sec, il est plus difficile d'estimer la teneur en argile des sols. Des agrégats très argileux sont difficiles à défaire lorsqu'ils sont secs.

Test à l'ongle

Si en étalant la terre, on obtient une surface lisse et brillante, elle contient plus de 40% d'argile.

4.2 Le silt (U)

Le silt est également un constituant fin du sol. Le diamètre des particules se situe entre 2 et 50 μm , ou 0,002 et 0,05 mm. Par exemple, les loess contiennent en règle générale beaucoup de silt, car ils ont été déposés par le vent (dépôt éolien). Les régions de loess typiques en Suisses ont : Möhlinerfeld (BL) et les collines de Wallbach (AG). Des sédiments meubles peuvent être également riches en silt (Vallée du Rhin saint-galloise).

Le silt n'a pas les propriétés physiques du gonflement et du retrait, ainsi que dans une large mesure les propriétés chimiques (échange d'ions) caractéristiques de l'argile.

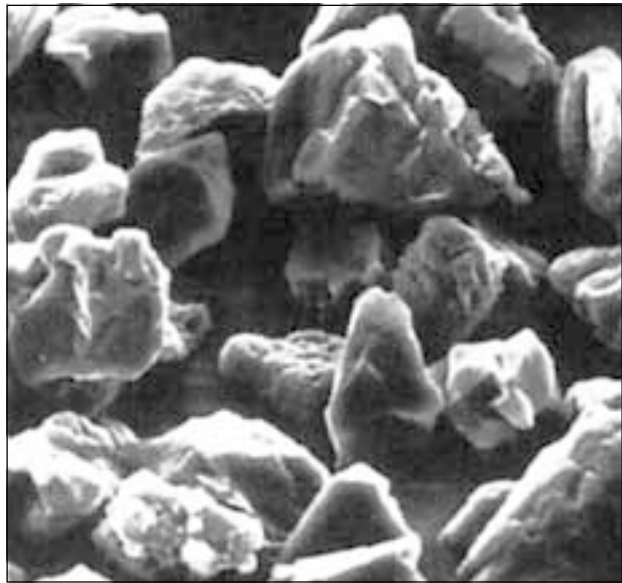


Fig. 20 : Particules de silt vues au microscope, grossies env. 1000 fois.

Propriétés mécaniques

Les sols silteux couverts de végétation sont relativement stables et bien perméables. Lorsqu'ils sont détrempestés, ils sont sensibles au passage des machines. Les sols riches en silt sont généralement sensibles à l'érosion, dès qu'ils sont excavés ou entassés. Ils sont également souvent pauvres en humus et en argile. Le manque de stabilité de la structure qui en résulte doit être compensé par une stabilisation biologique adéquate (couverture permanente, fixation par les racines). Le travail du sol doit être réduit au minimum.

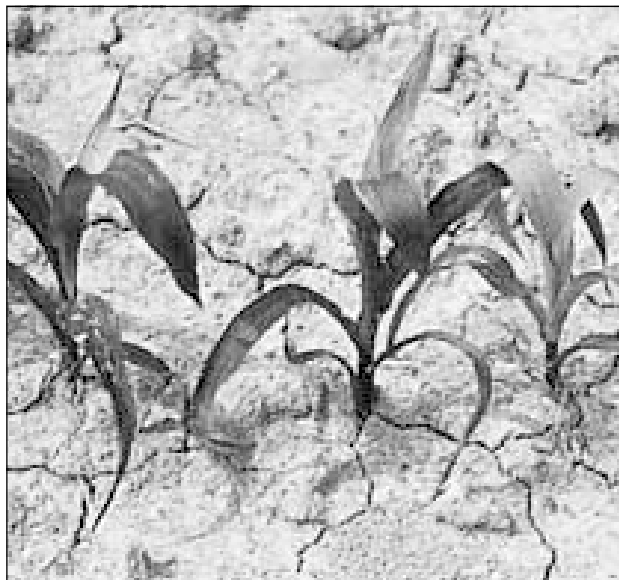


Fig. 21 : Sol de loess sous maïs conventionnel, sol nu (couverture végétale partielle) et croûté. Avec une pente faible, le risque d'érosion est déjà élevé.

Test tactile

Détrempé, le silt donne une sensation glissante et savonneuse. Humide, le silt n'est plastique et déformable que de façon limitée. Il est gras sur la paume de la main.

Test du modelage

Humide, le silt peut être modelé en une boule de 2 à 5 mm de diamètre qui se désagrège lorsqu'on exerce une légère pression. À l'état sec, le silt est mou, velouté au toucher (comme de la farine fleur). Les agrégats contenant du silt sont relativement faciles à défaire.

Test à l'ongle

La surface étalée est lisse à fendillée, mais pas granuleuse.

4.3 Le sable (S)

Le sable est la fraction minérale granulométrique la plus grossière de la terre fine ($\varnothing$ 0,05 à 2 mm). Les sols sableux sont meubles et perméables, peu stables et peu structurés. Grâce à la taille des particules, les sols sableux sont rarement menacés d'asphyxie, même en cas de pressions élevées, car les espaces interstitiels (pores grossiers) sont à peine modifiés. Les sols sableux ressuyent vite, même après une forte sollicitation mécanique; c'est pour cela qu'ils sont très appréciés, en particulier pour les cultures maraîchères précoces, malgré leurs propriétés négatives (sensibilité à la sécheresse, pertes en éléments nutritifs).

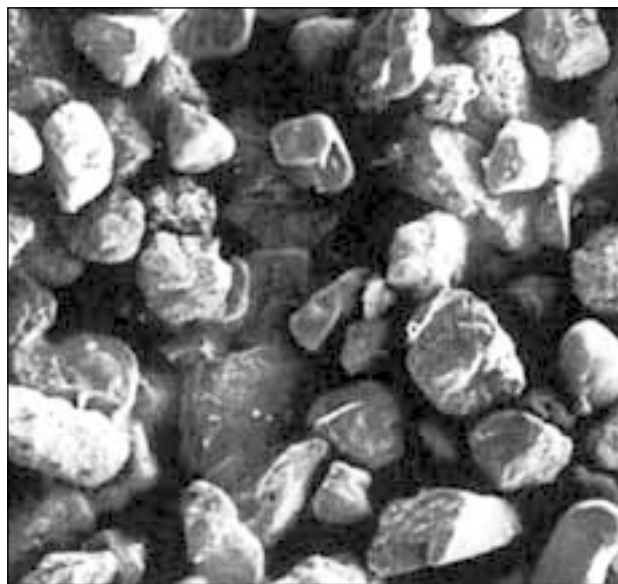


Fig. 22 : Sable (divers minéraux mélangés). L'image est grossie env. 10 fois.

Propriétés mécaniques

Les sols sableux sont, comparés à d'autres sols, moins sensibles à des opérations de génie civil et des travaux d'excavation. L'effet d'un ameublissement mécanique (par un sous-solage) de sols sableux compactés est de courte durée, lorsque la proportion d'argile est inférieure à 12-15%. C'est pourquoi il faut toujours l'associer à une mise en herbe qui les stabilise.



Fig. 23 : Sol sableux (alluvial) à l'état naturel. La stratification des sables plus grossiers ou plus fins, résultant des épisodes successifs de déposition, est nettement reconnaissable.

Test tactile

Qu'il soit détrempé ou sec, le sable donne généralement une sensation rugueuse. Une proportion importante de sable dans le sol limite la cohésion de sorte que les agrégats sont peu ou pas présents.

Au toucher, à l'état humide, la fraction de silt grossier peut à peine être distinguée de la fraction de sable fin.

Un truc pratique: le sable de plus de 0,05 mm de $\varnothing$ crisse fortement sous les dents.

Test du modelage

Si l'échantillon humide ne peut pas être modelé pour former une boule d'env. 10 mm de diamètre, la proportion d'argile est inférieure à 10%. La boule se défait rapidement, même sans pression.

Test à l'ongle

La surface étalée se présente sous forme plus ou moins rugueuse et granuleuse suivant l'importance de la fraction sableuse. Cette surface est toujours matte.

Pour plus de détails :

Consulter :

FAL, IUL, FAW et RAC, Méthodes de référence des stations fédérales de recherches agronomiques, Zurich - Reckenholz (mise à jour annuelle).

Guide des analyses en pédologie, Denis Baize, INRA Editions, 2000.

5. La structure du sol

Les différentes particules (sable, silt et argile) de la fraction minérale fine du sol sont arrangées et liées entre elles plus ou moins fortement dans chaque sol. La structure résulte toujours des facteurs de formation du sol, en particulier du type de sédiments, du climat, du régime hydrique et des réactions chimiques.

Le terme de structure du sol se rapporte donc toujours à la couche meuble du sol, mais jamais à la roche-mère ou aux matériaux non altérés.

5.1 Structures primaires (structures au sens étroit du terme)

Chaque sol présente une structure qui lui est propre, surtout dans **ses horizons non travaillés**. Nous distinguons trois types de structure :

- **Structures différenciées** : particules agrégées et formes distinctes
- **Structures compactes** : formes compactes et soudées
- **Structures particulières** : particules non liées, juxtaposées (non structurées)

Les structures différenciées

La structure prismatique

L'apparition de fentes de retrait induit la formation continue de nouveaux fragments, clairement délimités, avec des angles vifs.



Fig. 24 : Structure prismatique, typique des sols argileux.

La structure polyédrique

résulte également de processus de fissuration. La structure polyédrique est difficile à différencier de la structure prismatique. Elle est fréquente dans la couche supérieure travaillée des sols riches en argile. Si les fragments polyédriques sont de petite taille, la structure est bonne.

La structure en feuillets

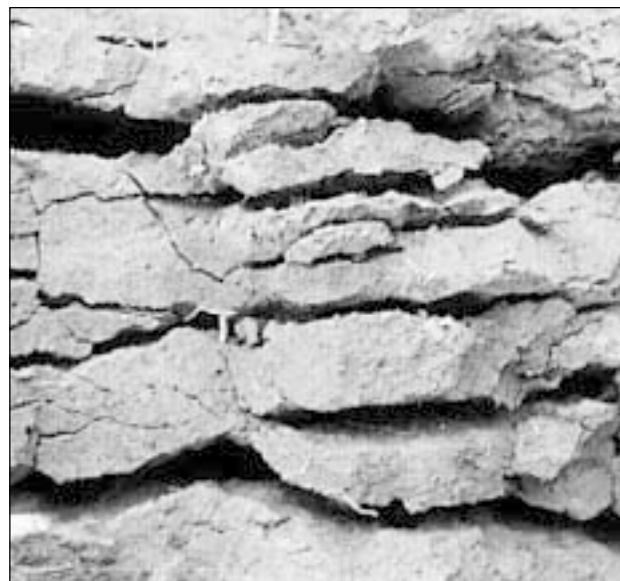


Fig. 25 : Ce sont surtout les sols silteux qui présentent une structure en feuillets, avec des fentes horizontales.

Les structures massives et compactes

se distinguent des structures particulières par le fait que les particules (surtout le sable et le silt) sont soudées ensemble plus ou moins fortement, et forment des blocs lorsqu'on travaille le sol. Les couches ayant une structure compacte sont difficilement colonisées par les racines (mauvais état structural, cf. p. 59).

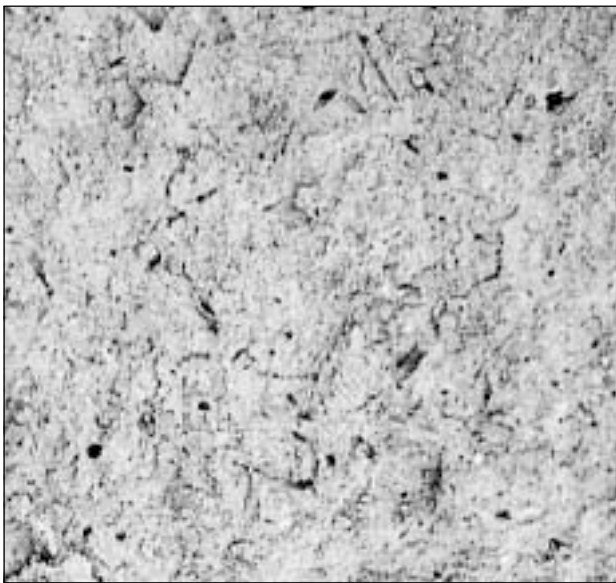


Fig. 26 : Les structures compactes peuvent être actives du point de vue biologique et très fertiles lorsque leur texture et leur assemblage sont favorables (régions de loess).

Les structures particulières

sont caractéristiques des sols sableux légers, pauvres en argile et en humus. Le sol se défait naturellement en petites particules même lorsqu'il est encore légèrement humide (dépend de la taille des particules).



Fig. 27 : Structure particulière

5.2 Mottes et assemblages (structure secondaire)

Une structure secondaire (mottes) plus ou moins marquée apparaît dans la couche superficielle du sol, grâce à l'action des racines et de la pédofaune, à celle du travail du sol, de la transformation de la matière organique et de la formation de l'humus, et grâce à la formation de complexes argilo-humiques. Cette structure exerce une influence positive ou négative en tant que support pour la croissance des plantes et contribue ainsi à déterminer sa fertilité.

Les mottes

Une bonne structure améliore l'aération du sol, ce qui favorise entre autres un réchauffement rapide du sol, de même qu'une meilleure infiltration de l'eau, permettant une meilleure migration des éléments nutritifs. De plus, une structure saine offre des niches et un cadre de vie à la pédofaune. Une structure grumeleuse favorise la croissance des racines. Le travail du sol est plus facile. Plus la structure des mottes est développée, plus grande est sa surface interne et par là sa capacité de rétention.

Le grumeau

Ce type de motte caractérise les sols légers à moyens; les grumeaux arrondis ont un diamètre de 2 - 5 mm.



Fig. 28 : Grumeaux

Les fragments polyédriques et anguleux

ont des angles vifs et une surface de rupture lisse. C'est la forme de mottes typique aux sols argileux. Elle est due au gonflement et au retrait de l'argile. La prédominance de fragments polyédriques de petite taille dans des sols argileux est un signe de bon état structural.

En revanche, la prédominance des fragments anguleux est signe d'un mauvais état structural. On distingue le fragment anguleux par l'absence d'enveloppe humique, sa surface toujours lisse et sa résistance à la rupture.



Fig. 29 : Fragments polyédriques

Les assemblages

Le travail intensif du sol pour les cultures donne naissance à un mélange de mottes, de fragments et de blocs qui évolue d'année en année.



Fig. 30 : Les assemblages avec grumeaux prédominants présentent de nombreuses biocavités et ils sont à classer dans les bonnes structures.



Fig. 31 : Les assemblages avec des fragments grumeleux dominants contiennent moins de cavités bioactives, et par conséquent en général une moins bonne distribution des cavités. Les fragments grumeleux se forment sous l'action des outils de travail du sol dans un sol mal ressuyé. L'état structural est tout juste satisfaisant.

Mauvais état structural

Les structures anguleuses fines résultant d'un travail du sol trop intensif et inadéquat ne sont pas favorables et elles réduisent la fertilité du sol. Elles favorisent la battance, la formation de croûtes, l'érosion et le colmatage. Elles sont dépourvues d'enveloppes humiques.

Les assemblages avec fragments anguleux prédominants

Ces assemblages de taille et de forme fortement variables ne présentent quasiment aucune biocavité. Les cavités sont mal réparties. Ce mauvais état structural est caractérisé par l'absence des enveloppes humiques et l'apparence des fragments (collages).

Les structures compactes en blocs

Les blocs sont durcis et compacts et, en raison de l'absence de pores, dépourvus d'activité biologique à l'intérieur. Les efforts nécessaires au travail du sol augmentent parallèlement avec la dégradation de la structure du sol.



Fig. 32 : Les blocs résultent souvent de l'émiettement par les machines d'un sol trop mouillé.

Les structures spéciales

Elles sont souvent le signe d'erreurs d'exploitation, principalement d'un affinement mécanique (émiettement, tamisage) trop prononcé. Elles favorisent la battance, le croûtage, l'érosion et le colmatage. Les particules fines n'ont pas d'enveloppe humique.

Pour plus de détails :

Consulter :

Le sol, R. Flückiger et al. Centrale des moyens d'enseignement agricole, Zollikofen, 1994.

6. Les pores du sol et la porosité

Les espaces vides entre les particules solides du sol sont au moins aussi importants que ses particules. On parle donc de système poral du sol et on mesure la **porosité** d'un sol exprimée en pourcentage du volume total.

En fonction de la nature du sol, le volume occupé par les composants solides croît avec l'augmentation de la grosseur des particules. En revanche le volume poral total décroît.

Volume des composants :
Sable $\geq$ Limon $\geq$ Silt $\geq$ Argile

Volume poral total :
Argile $\geq$ Silt $\geq$ Limon $\geq$ Sable



Fig. 33 : Lame mince d'un grumeau en lumière incidente sous microscope. Les espaces poreux apparaissent en blanc.

Dans la couche non travaillée du sol, c.-à-d. au-dessous de 25-30 cm, la **porosité totale**, le volume des pores varie entre 35% (dans les sols minéraux pauvres en humus et tassés), et plus de 80% du volume du sol (tourbe). Un sol sain devrait avoir un volume poral de 50%. Des atteintes résultant de l'exploitation du sol (semelle de labour, compactages par des machines de récolte) ou suite à des interventions de génie civil peuvent exercer une influence considérable sur le volume et la répartition des pores.

6.1 Masse volumique apparente et densité réelle

On obtient la **masse volumique apparente d'un sol (ρ_A)** en prélevant dans le sol, avec un cylindre dont le volume est connu, un échantillon intact, en le séchant au four à 105°C et en le pesant [cf. chapitre 8]. La masse volumique apparente, dénommée également en pédologie «densité apparente» et autrefois couramment utilisée, dépend de l'espace poral d'un sol à l'état humide (volume poral). En règle générale, elle s'accroît avec la profondeur.

La **densité réelle (D_r)** est le rapport entre la masse volumique sèche des constituants solides du sol et la masse volumique d'un volume d'eau égal au volume des constituants solides séchés du sol considéré. La densité réelle dépend donc de la granulométrie de la fraction minérale, ainsi que de la teneur en humus du sol.

La masse volumique s'exprime en g/cm³ ou Mg/m³ de sol et la densité est un nombre sans dimension; elles se situent dans les limites suivantes :

Masse volumique apparente ρ_A /Densité apparente :

Sols minéraux	1.10 - 1.80 Mg/m ³
Valeurs courantes	1.30 - 1.50 Mg/m ³
Sols tourbeux entièrement organiques	env. 0.15 Mg/m ³

Masse volumique réelle/Densité réelle :

Sols minéraux	2.60 - 2.75 Mg/m ³
Sols moyennement à faiblement humiques	2.40 - 2.65 Mg/m ³
Quartz	2.65 Mg/m ³
Substance organique humifiée	env. 1.40 Mg/m ³
Matière organique non décomposée (sols tourbeux)	< 1.50 Mg/m ³

6.2 Espace poral: les pores et leur répartition dans le sol

Chaque sol, en fonction de son type (pédogenèse), de sa texture (nature du sol) et de sa structure, est caractérisé par un espace poral et une répartition des pores en classes de porosité.

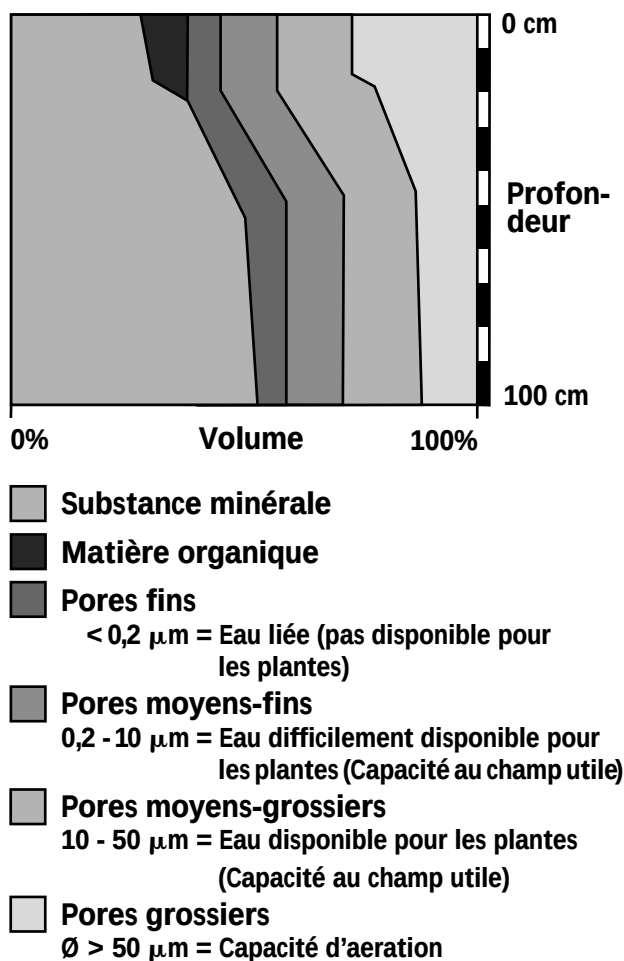


Fig. 34 : Le schéma représente la répartition des pores par classe de grandeur à différentes profondeurs pour un sol limoneux humique, labouré, et leurs parts au volume du sol. Le volume des pores grossiers ($> 50 \mu\text{m}$) correspond au volume disponible pour l'air (dans la couche labourée 0 à 20 cm, ce volume est plus élevé). La somme des pores moyens-grossiers et fins correspond à la capacité au champ utile, c.-à-d. à la quantité d'eau disponible pour les plantes, soit à l'eau s'infiltrant lentement et à l'eau stockée.

La reconstitution du réseau de pores est assurée dans les sols biologiquement actifs et se met en place immédiatement après le travail du sol (p. ex. labour) avec le processus du raffermissement. L'activité de la faune du sol est un facteur central de la création des pores. Ce sont surtout les vers de terre qui créent des pores grossiers qui sont utilisés préférentiellement par les racines. Dans les sols argileux, ils se forment grâce à l'assèchement qui provoque la formation des fentes de retrait.



Fig. 35 : Les galeries des vers de terre représentent des cheminements préférentiels pour les racines. Une partie importante de ces pores précieuses sont cependant détruites par le passage de machines lourdes sur un sol trop humide.

La formation de nouveaux pores se concentre dans la couche superficielle, biologiquement active, c.-à-d. dans la couche du sol habitée par les organismes et colonisée par les racines. Cette couche présente donc une bonne capacité de régénération, contrairement au sous-sol qui est biologiquement moins actif.

Pour assurer une bonne perméabilité et l'aération d'un sol, il est nécessaire qu'une certaine continuité de l'espace poral (connectivité) existe, et ceci jusque dans les couches profondes du sol. Les sols biologiquement actifs en profondeur sont souvent très fertiles.

La taille des pores encore colonisables par les racines s'étend jusqu'au bas du domaine des pores grossiers fins. Les pores moyens grossiers peuvent être encore explorés par les mycètes, des mycorhizes ou des actinomycètes par exemple, mais plus par le système racinaire des plantes vasculaires.



Fig. 36 : Flexion horizontale des racines suite à un compactage dû au labour d'un sol trop humide. Les semelles de labour peuvent empêcher totalement la progression des racines. Elles sont souvent si compactées que leur régénération naturelle prend plus d'une année.



Fig. 37 : Les traces de passage sur le sol sont certes inesthétiques, mais de loin pas aussi graves que des compactages du sous-sol.

Le compactage concerne en premier lieu le réseau des pores grossiers. Les couches du sous-sol étant plus compactes et par conséquent présentant moins de pores grossiers à comprimer, le sous-sol paraît plus porteur, parce que les machines lourdes y laissent moins de traces. Dans le génie civil, la pratique du décapage a une tradition aussi longue que celle du labour des champs pour l'agriculture. Les compactages en sous-sol ne se régénèrent pratiquement pas. La portance d'un sous-sol est réduite, ceci d'autant plus si l'humidité du sol est élevée; il est alors fortement menacé de compactage.

6.3 Régimes de l'eau et de l'air: la taille des pores

Les pores naturels d'un sol sont en règle générale classés selon leur taille en trois classes principales: les pores grossiers, moyens et fins. La porosité totale et les parts de chaque classe de taille au volume total des pores varient en fonction de la nature et de la structure du sol, de la pierrosité, de l'activité biologique, de la masse volumique et de la végétation en place.

Ce système de pores est modifié par le travail du sol, le décapage et la manutention des matériaux terreux. Les galeries verticales continues formées par les vers de terre, par exemple, ainsi que les fentes de retrait, sont détruites; d'autres, en particulier si le sol est très humide, sont écrasées. A court terme, il se forme une structure appelée secondaire, avec une grande part de cavités artificielles, qui s'effondrent de nouveau en grande partie en raison du phénomène de raffermisssement naturel qui suit, en particulier dans les sols sableux et silteux, pauvres en argile. Ces cavités ne sont pas des pores dans le sens décrit ci-dessous.

Pores grossiers

Grâce à la taille des pores grossiers ($> 50 \mu\text{m}$), l'eau peut s'infiltrer dans le sol. L'eau excédentaire est évacuée gravitairement (force de succion $< 0,1 \text{ bar}$) des couches supérieures du sol par le réseau des pores grossiers pour rejoindre ainsi la nappe phréatique. Par les pores grossiers, l'eau peut s'infiltrer rapidement et entraîne de l'air dans le sol. Les pores grossiers ont une fonction d'aération identique aux poumons.

Ce sont surtout les pores grossiers créés naturellement (galeries des vers de terre, canaux des racines, fentes de retrait), qui pénètrent verticalement très profondément, qui sont à l'origine de la fertilité naturelle élevée des sols profonds.

Tant que l'eau se déplace par gravité, elle se trouve dans le domaine des pores grossiers. Les ports grossiers fins freinent l'écoulement de l'eau gravitaire.

Pores moyens

Les pores moyens, $\varnothing 0,2 - 50 \mu\text{m}$, retiennent l'eau en s'opposant à son infiltration par gravitation dans le sol. Le volume des pores moyens forme ce qu'on appelle la capacité au champ (utile) d'un sol, le réservoir d'eau des plantes.

La proportion de pores moyens d'un sol est déterminée d'une part par la nature du sol (granulométrie). D'autre part, ces pores sont créés et renouvelés par l'activité de la faune et microfaune, ainsi que des racelles des plantes.

La compaction du sol peut augmenter la proportion des pores moyens au détriment des pores grossiers. C'est pourquoi les sols compactés se ressuyent en règle générale beaucoup plus lentement.

Les sols sableux forment une exception. Dans ce cas, la taille des espaces intermédiaires est déterminée par la taille des particules du sol (granulométrie). Les sols de sables grossiers ne peuvent par conséquent pas devenir imperméables suite à un compactage. Etant donné qu'ils ne contiennent que peu ou pas du tout de pores moyens, ils ne peuvent retenir l'eau et forment un type de sol séchard et peu fertile pour les plantes.

Dans les pores moyens, l'eau est retenue comme dans une éponge, avec une force de succion entre $0,1-15 \text{ bars}$; ces pores servent de réservoir à eau pour les plantes. L'eau est alors facilement disponible avec une force de succion de $0,1-1,0 \text{ bar}$. A partir de $1-15 \text{ bars}$, sa disponibilité est faible et elle est appelée eau d'absorption ou eau capillaire.

Pores fins

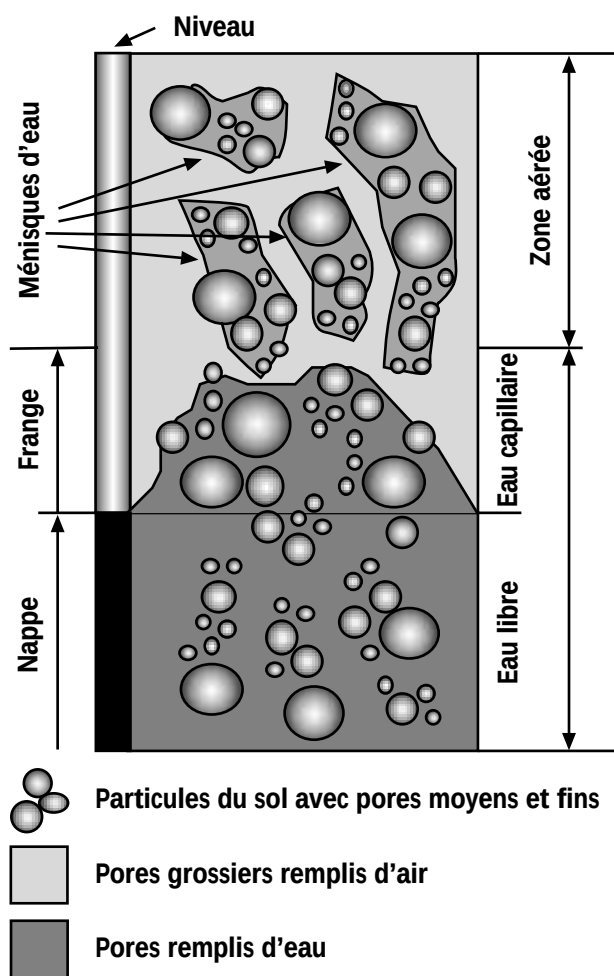
Dans les pores fins, $\varnothing < 0,2 \mu\text{m}$, se trouvent d'une part l'eau hygroscopique, c.-à-d. l'eau en équilibre avec la pression atmosphérique de l'air ambiant, et d'autre part l'eau liée chimiquement ou de manière cristalline, qui peut être extraite du sol uniquement au four à des températures supérieures au point d'ébullition. Ces eaux résiduelles inutilisables sont fixées trop fortement pour être disponible pour les racines des plantes cultivées (force de succion supérieure à 15 bars).

Fig. 38 : Représentation schématique des formes de l'eau stockée dans le sol.

Dans la zone du sol saturée par une nappe phréatique, quasiment tous les pores du sol sont remplis d'eau (eau du sol sans tension).

Dans la frange capillaire, l'eau remonte au-dessus du niveau de la nappe phréatique dans le sol, grâce à la force capillaire (eau capillaire sous tension).

Dans la zone supérieure aérée du sol, l'eau est maintenue dans les espaces vides entre les particules les plus fines, grâce à sa propre tension superficielle (ménisques).



Pour plus de détails :

Consulter :
Physique du sol, Musy et Soutter, PPUR, 1991

7. La portance du sol

La portance d'un sol dépend fortement de son état d'humidité. Plus un sol est humide, moins grande est sa capacité de charge maximale mécanique. Plus les particules d'un sol sont fines, plus ce sol se prête à une déformation plastique. Une perte notable en pores grossiers est liée à cette déformation. Plus le sol est compacté profondément, moins cette atteinte à la structure peut se régénérer.

Etant donné que la proportion de pores dans le volume du sol varie fortement selon la nature du sol, la mesure de la masse volumétrique d'eau n'est pas un instrument valable pour juger de la portance d'un sol. Il vaut beaucoup mieux observer l'état de ressuyage d'un sol avant de pratiquer une intervention planifiée ou d'y passer avec des machines.

7.1 Conductivité ou perméabilité du sol

La rapidité avec laquelle un sol se draine dépend en premier lieu du volume des pores grossiers et de leur distribution. Les sols situés sur un matériau sous-jacent très perméable (p. ex. du gravier) sont par leur nature déjà très perméables, et sont également classés en tant que sols lessivés verticalement [cf. aussi chapitre 3 «Type de sol»].

La perméabilité (K), également nommée conductivité, est la plus élevée lorsque le sol est saturé d'eau. C'est pourquoi le processus de drainage se ralentit à mesure que le sol se ressuie. La perméabilité (K) ne dépend pas seulement de la proportion de pores grossiers, mais également de leur continuité jusque dans les couches profondes du sol. Ces pores d'aération et d'infiltration sont certes toujours reformés par les vers, les racines et les fentes de retrait, mais ils sont détruits ou du moins interrompus par le compactage du sous-sol, par lissage, en particulier lors d'un labour dans un sol trop mouillé.

Le comportement au ressuyage d'un sol

Pour juger de la portance d'un sol, on doit tenir compte de son comportement au ressuyage.

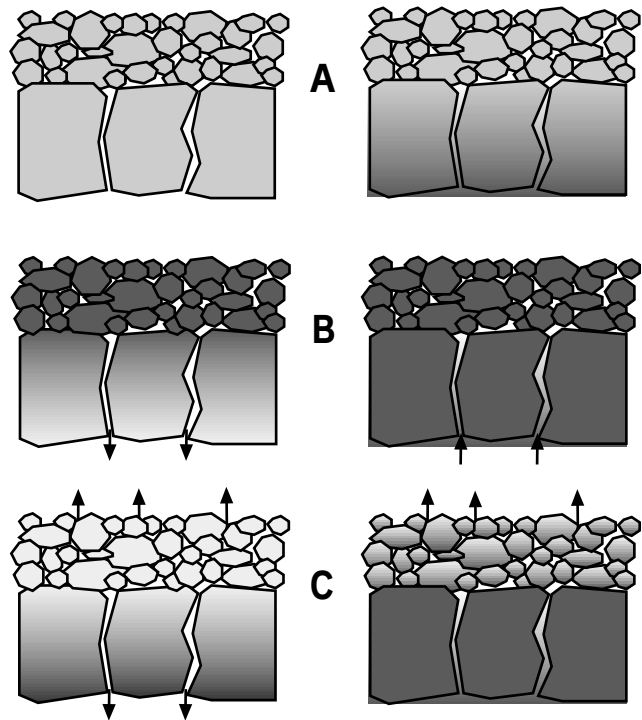


Fig. 39 : Différence de comportement au ressuyage entre un sol perméable (à gauche) et un sol engorgé (à droite).

A Après une période de sécheresse : la couche superficielle du sol est ressuyée dans les deux cas. Le sous-sol (à droite) est engorgé par l'accumulation de l'eau dans sa partie inférieure.

B Après une période de pluie : la couche superficielle du sol est saturée dans les deux cas. A gauche, le sous-sol se met à recevoir de l'eau par le haut, tandis qu'à droite, il est déjà complètement saturé. A gauche, l'eau excédentaire pénètre par les pores grossiers dans le sous-sol, tandis qu'à droite le niveau de la nappe s'élève.

C Le soleil reparaît : l'eau s'évapore. A gauche comme à droite, la couche superficielle du sol paraît ressuyée. Dans le cas d'un sol perméable (à gauche), l'eau continue de s'écouler dans les profondeurs, de sorte que le sous-sol commence à se ressuier. A droite, le sol reste humide, car il est engorgé.

7.2 Mesure de la force de succion (Ψ) dans le sol

Le degré de ressuyage peut être mesuré avec ce qu'on appelle la force de succion. L'appareil de mesure le plus répandu est le tensiomètre, qui est aussi utilisé p. ex. pour le pilotage automatique de systèmes d'irrigation et d'installations d'arrosage.

Il n'y a pas de tension dans un sol en état de saturation hydrique (comme c'est le cas par exemple dans la nappe phréatique). Dès que l'eau s'écoule en profondeur, s'évapore ou est utilisée par les plantes, en résumé que des cavités du sol (pores) se sont vidées de leur eau, il se forme un phénomène physique dit force de succion (pression inférieure à la pression atmosphérique).

Cette force de succion (Ψ) est souvent mesurée de manière unitaire à une profondeur de 35 cm pour la détermination de la portance. [Des détails pratiques sur la mise en service du tensiomètre se trouvent dans le chapitre 8, ainsi que sous (5) et (6)].

Unité de mesure

La tension est indiquée en cm de colonne d'eau (cm H₂O), en valeur pF (= log. cm H₂O), en Pascal ou en bar.

1Cb (Centibar) =
 $10^{-2} \text{ bar} = 1 \text{ kPa} = 10 \text{ hPa} = 10 \text{ cm H}_2\text{O} = \text{pF } 1$

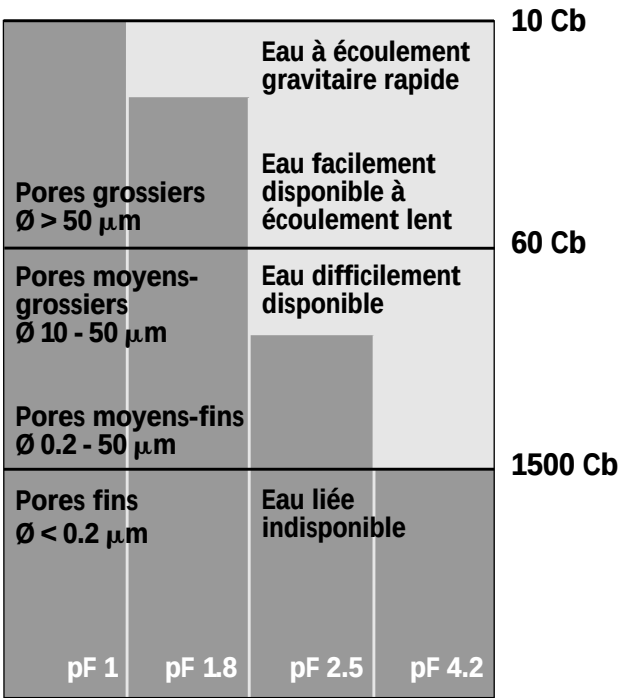


Fig. 40 : La zone ombrée indique que les pores sont remplis d'eau. La zone ressuyée comprend le domaine allant de

pF 1,0 (saturée) à pF 4,2 (point de flétrissement permanent), elle figure en gris clair et son étendue varie avec le diamètre des pores. L'eau de la zone située <6 cbar est appelée eau gravitaire. Entre 6 et 60 cbar, l'eau est facilement disponible pour les plantes. De 60 cbar à 1500 cbar environ (= point de flétrissement permanent), l'eau retenue est difficilement disponible pour les plantes.

7.3 Relation entre le poids, la surface de portance et la transmission de la pression [6]

La pression sur la surface de portance (pression au sol) d'un véhicule à chenilles se calcule à partir de son poids total divisé par la surface de contact. Dans des cas particuliers (p.ex. surfaces irrégulières du sol), on peut mesurer des pressions à la surface de contact sous les chenilles qui peuvent s'élever à 1,5 fois celles qui ont été estimées.

Pour un véhicule à pneus, l'approximation suivante pour 2 bars de pression intérieure des pneus est applicable:

$$\frac{\text{Charge des roues (kg)} \times 100}{\text{Pression à la surface de contact (kPa)}} =$$

$$\frac{\text{Diamètre des jantes (cm)} \times \text{largeur des pneus (cm)}}{}$$

Pour des pneus radiaux, la surface de contact peut être estimée avec la formule suivante:

$$\frac{\text{Surface de contact (cm}^2\text{)}}{\text{diamètre des pneus (cm)} \times \text{largeur des pneus (cm)}} = 0,27$$

Règle applicable pour tous les types de véhicules : la pression au sol (= poids total/surface de contact) est supportable pour le sol lorsqu'elle se trouve au-dessous de 50 kPa = 0,5 bar.

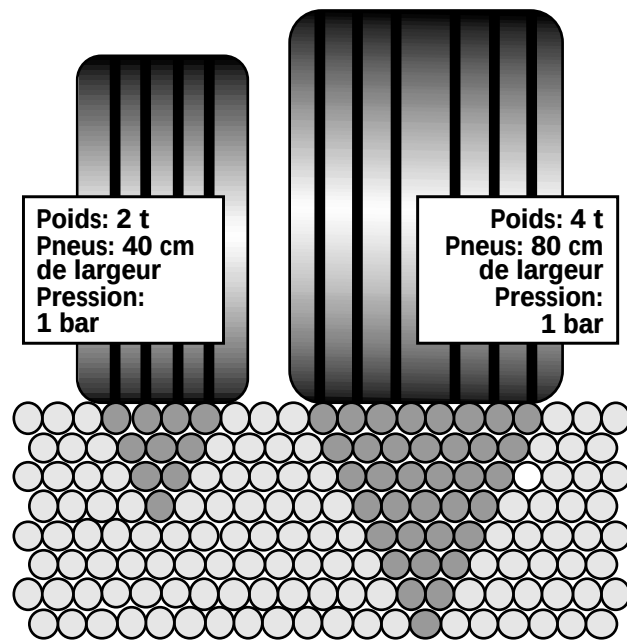


Fig. 41 : Le modèle simplifié des rouleaux montre la transmission de la pression des roues dans la profondeur du sol. Les particules du sol affectées d'une unité de poids sont indiquées en gris de manière à démontrer la propagation de la pression en profondeur. Malgré une pression au sol identique, la propagation de la pression atteint à droite une plus grande profondeur en raison d'une charge (poids total) plus élevée.

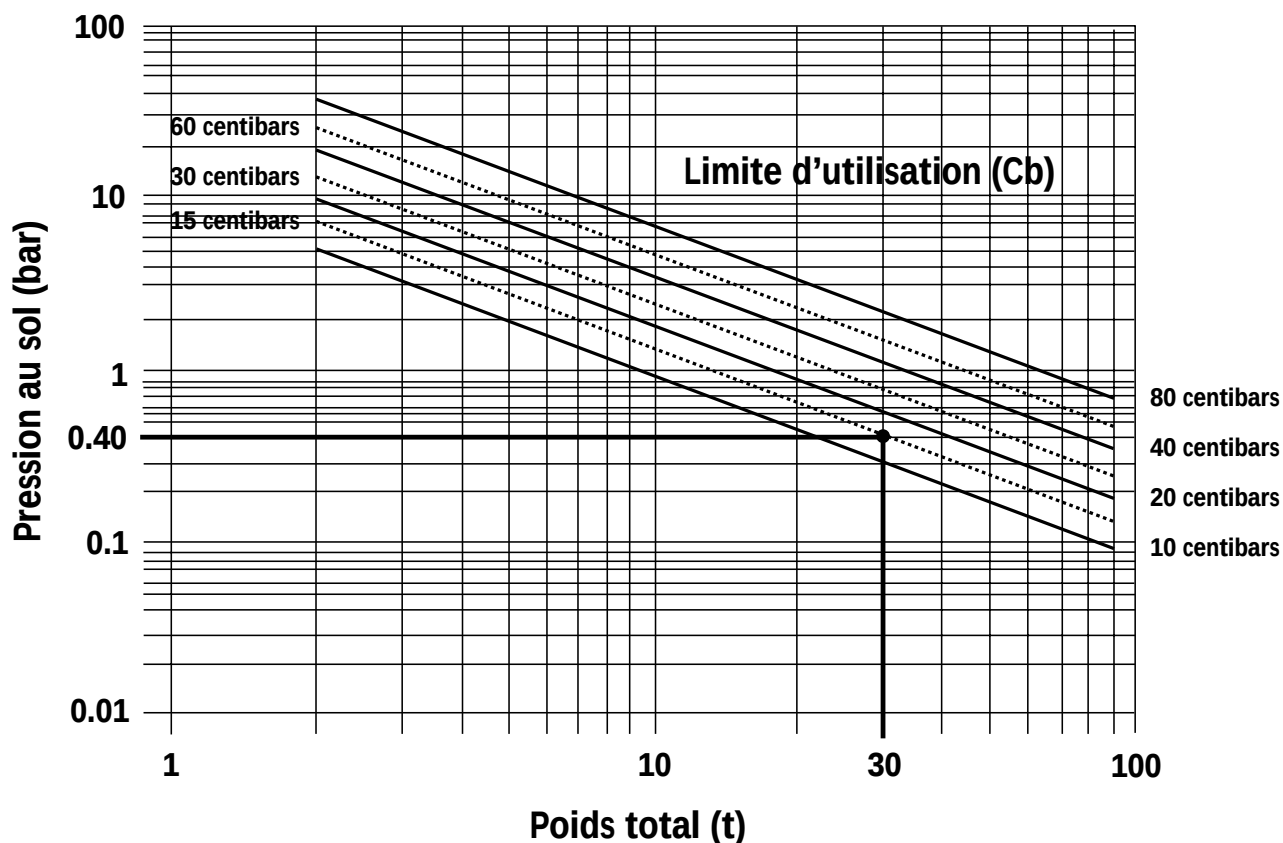
7.4 Force de succion (Ψ) et intervention des machines [5, 6]

Au-dessous d'une force de succion de 10 cbar (= pF 1), on ne peut plus circuler sur le sol. À partir d'un pF de 2,5, on peut circuler sur le sol avec des machines de chantier équipées de chenilles, légères à moyennement lourdes. Des machines particulièrement lourdes peuvent être mises en service sans mesures de protection particulières uniquement à partir d'un pF de 2,8.

La limite exacte de mise en service, c.-à-d. la force de succion admissible à partir de laquelle on peut circuler sur un sol, peut être calculée pour un véhicule à chenilles de la manière suivante :

$$\frac{\text{Limite d'utilisation (Cb)}}{\text{Poids total (t)} \times \text{Pression au sol (bar)}} = 1,25$$

Nomogramme: Limites d'utilisation des machines de chantier



$$\text{Limite d'utilisation [Cb]} = \text{Poids total [t]} \times \text{Surface de contact [bar]} \times 1.25$$

Exemple:	Poids total	30 Tonnes
	Pression au sol	0.4 bar
	Limite d'utilisation	15 centibars

Fig. 42 : On peut lire la force de succion minimum directement sur ce nomogramme.

Exemple : une machine d'un poids total de 30 t et d'une pression au sol de 0,4 bar peut être mise en service sans mesure particulière de protection à partir d'une force de succion de 15 cbar.

Une mise en service de véhicules à pneus légers qui ménage le sol n'est garantie qu'à partir d'une force de succion >25 cbar.

Pour les véhicules à pneus, on peut évaluer le risque des atteintes portées aux sols en tenant compte de la charge de la roue:

Charge des roues	>3.5 t	dommageable au sol
Charge des roues	2.5 - 3.5 t	critique pour le sol
Charge des roues	<2.5 t	ménage le sol, à condition que la force de succion >25 cbar et la pression à la surface de contact <0,5 bar.

8. Les méthodes d'analyse

Ce chapitre décrit quelques méthodes de terrain relativement faciles à appliquer. La plupart d'entre elles ont fait leurs preuves depuis longtemps. Dans la pratique, elles sont souvent décriées au lieu d'être utilisées correctement. Comme le sol est tout autre qu'homogène et que dans l'espace le plus restreint on trouve les compositions et les consistances les plus diverses, on doit procéder à plusieurs mesures, resp. prélever plusieurs échantillons par site et/ou par horizon pédologique pour obtenir des valeurs fiables.

Ce chapitre offre en premier lieu une vue d'ensemble. Il ne prétend en aucun cas être exhaustif. L'application des méthodes est l'affaire des spécialistes du sol et d'un laboratoire du sol reconnu. Les méthodes sont normées et décrites en détail dans des manuels de référence [5, 6, 11, 12, 13, 14].

Outre les instruments de contrôle classiques, nous présentons et décrivons brièvement au point 8.5 quelques expériences de terrain simples et démonstratives. Ces méthodes se prêtent surtout à des démonstrations lors d'exercices pratiques sur le terrain.

8.1 Mesure de la capacité d'infiltration

La capacité d'infiltration d'un sol donne des renseignements importants sur sa qualité en tant que support pour les végétaux. Elle est très fortement influencée par des atteintes mécaniques, en particulier par le compactage. L'observation de la capacité d'infiltration prend toute son importance lorsqu'il s'agit d'évaluer d'éventuels dégâts du sol avant (état initial) et après (contrôle ultérieur) des interventions de génie civil. Elle sert à contrôler la bonne facture de la remise en place des sols (remblais, remises en culture).

Au champ :

La mesure des taux d'infiltration, c.-à-d. de la quantité d'eau qui s'infiltre dans le sol pour une durée donnée prend beaucoup de temps. Comme les taux constants ne sont obtenus qu'à saturation d'eau du sol, un essai d'infil-

tration sur le terrain prend au moins 4 heures dans le cas où le sol est déjà pratiquement saturé avant la mesure. Quelques infiltromètres sont décrits ci-après.

L'infiltromètre à double cylindre

Le double cylindre est fiché verticalement dans le sol à une profondeur de 10 cm et rempli d'eau. On mesure un temps d'infiltration constant (après que le taux de saturation ait été atteint) pour un niveau d'eau défini dans l'anneau central, à l'aide d'une tige graduée, montée sur un flotteur. L'anneau externe rempli d'eau est destiné à limiter la diffusion latérale et permet de maintenir un flux vertical de l'eau du cylindre central, en particulier dans les sols peu homogènes.

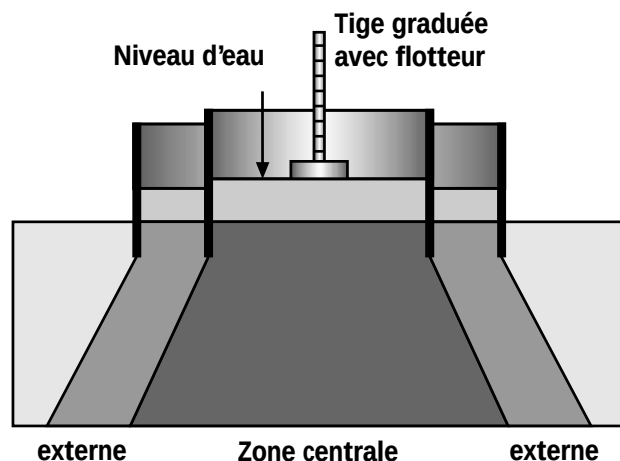
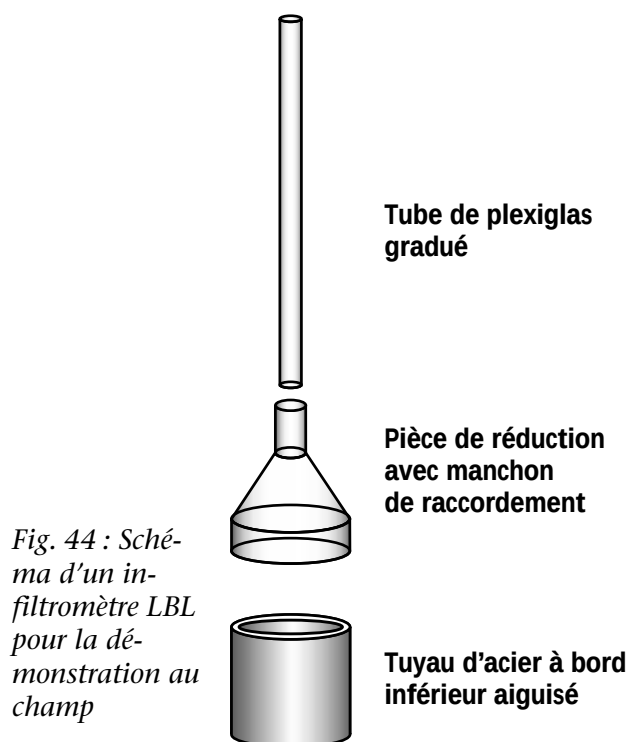


Fig. 43 : Coupe d'un infiltromètre à double cylindre

L'infiltromètre LBL

Cet appareil facile d'emploi se prête particulièrement à la démonstration de l'hétérogénéité de la perméabilité au champ. Grâce au diamètre fortement réduit du tube de mesure par rapport au tube enfoncé dans le sol, on peut mettre en évidence la rapidité d'infiltration également pour des taux d'infiltration faibles.



Lors de l'utilisation de cet appareil, il faut veiller aux points énumérés ci-dessous :

1. Le sol doit être préalablement saturé, soit le jour avant d'effectuer la mesure, ainsi qu'env. une heure avant de faire la mesure au champ.
2. Le tuyau d'acier doit être enfoncé verticalement, ce qui peut poser des problèmes dans un sol caillouteux. On couvre le tuyau d'une planchette solide en bois dur et on l'enfonce à au moins 5 cm de profondeur dans le sol, si possible en tapant avec un maillet.
3. Colorer l'eau à l'aide de colorants alimentaires pour améliorer la démonstration (visibilité dans le tube de verre).

On estime qu'une compaction est avérée lorsque la valeur médiane de 5 mesures pour une placette est inférieure à 10^{-6} m/s $\sim 10^{-4}$ cm/s ~ 4 mm/h ~ 10 cm/jour [6, 13].

Le perméamètre de Guelph

Cet appareil est originaire du Canada et son utilisation pratique est peu répandue chez nous.



Fig. 45 : Contrôle de la perméabilité d'un rehaussement de terrain important à l'occasion d'une campagne de terrain de l'IATE/EPFL (Al Carcale 1994) près de Gordola (TI).

Un système à deux chambres permet de maintenir constante la pression d'accumulation entre le réservoir d'eau et la zone de lecture des résultats, laquelle montée sur un trépied, se trouve à une hauteur commode. Le tube d'infiltration est maintenu à une profondeur constante. Toutefois celle-ci peut être modifiée.

Une tarière spéciale permet de forer la couche du sol qu'on veut étudier. Des différences de perméabilité dans le profil peuvent être ainsi mises en évidence. L'utilisation de cet instrument nécessite également un investissement en temps élevé pour sa mise en place et pour les mesures. De plus ces instruments sont coûteux à l'achat et fragiles.

La méthode de Porchet (sondage à la tarière)

En sol ressuyé, on creuse à la tarière un trou (p.ex. 8 cm de diamètre et 50 cm de profondeur). Ce faisant, il faut éviter de lisser la paroi et le fond du trou. Le trou est rempli d'eau. Suite à cela, le niveau d'eau dans le trou est

mesuré à certains intervalles (p.ex. après 5, 10, 15, 20, 25 et 30 minutes). A l'aide de la loi de Darcy (1856) on peut calculer sur la base de ces mesures faites au champ la conductivité hydraulique (valeur K). Selon la loi de Darcy, la quantité d'eau écoulée q , également appelée vitesse de filtration, est proportionnelle au gradient hydraulique i du potentiel hydraulique total :

$$q = -k i$$

Le signe négatif signifie que le flux hydraulique a lieu dans le sens contraire du gradient. Le facteur de proportionnalité K s'appelle conductibilité hydraulique, il est désigné par k_{sat} en cas de saturation. On calcule le gradient à partir de la modification du potentiel total hydraulique H sur la distance prise en considération dz :

$$i = \frac{dH}{dz}$$

Un sol est considéré comme étant compacté lorsque la valeur médiane de cinq mesures k_{sat} sont inférieures à 10^{-6} m/s $\sim 10^{-4}$ cm/s ~ 4 mm/h ~ 10 cm/jour [6].

En laboratoire :

La mesure de la conductivité hydraulique saturée (k_{sat})

On prélève au champ plusieurs échantillons de sol non remaniés dans ce qu'on appelle des cylindres de prélèvement (voir ci-après 8.3). Les échantillons sont saturés au laboratoire. Ensuite, on détermine la quantité d'eau écoulée à l'aide de ce qu'on appelle un perméamètre pendant une durée de mesure déterminée, à partir de laquelle on peut déduire la conductibilité hydraulique saturée (k_{sat}).

Cette conductibilité est évaluée selon les classes suivantes [11,13] :

Classification selon la méthode PYZYL-WD - FAL (11)					Autre classification adaptée selon proposition FaBo ZH (13)
ksat m/s	ksat mm/h	Classe de perméabilité	Etat d'humidité	Type de sol Selon l'horizon le moins perméable	
$> 3.5 \cdot 10^{-5}$	> 126	très élevée	extrêmement perméable	sol totalement aéré	Classe de perméabilité élevée, perméabilité rapide (10^{-4} à 10^{-5} m/s; 40 à 400 mm/h)
$3.5 \cdot 10^{-5}$ à $1.2 \cdot 10^{-5}$	126 à 43	très élevée	très perméable	sol totalement aéré	
$1.2 \cdot 10^{-5}$ à $4.6 \cdot 10^{-6}$	43 à 17	élevée	assez perméable	sol totalement aéré	Classe de perméabilité normale, perméabilité normale (10^{-5} à 10^{-6} m/s; 4 à 40 mm/h)
$4.6 \cdot 10^{-6}$ à $2.9 \cdot 10^{-6}$	17 à 10	normale	perméable	sol totalement aéré	
$2.9 \cdot 10^{-6}$ à $1.2 \cdot 10^{-6}$	10 à 4	ralentie	perméable avec retard	sol totalement aéré	
$1.2 \cdot 10^{-6}$ à $4.6 \cdot 10^{-7}$	4 à 1.7	entravée	faiblement mouillé	sol à pseudogley	Classe de perméabilité entravée, perméabilité ralentie (10^{-6} à 10^{-7} m/s; 0.4 à 4 mm/h)
$4.6 \cdot 10^{-7}$ à $1.2 \cdot 10^{-7}$	1.7 à 0.4	faible	mouillé	pseudogley	
$< 1.2 \cdot 10^{-7}$	< 0.4	très faible	très mouillé	gley pâle	Classe de perméabilité faible, perméabilité très faible ($< 10^{-7}$ m/s; < 0.4 mm/h)

8.2 Mesure de la force de succion

Le tensiomètre

Contrairement à toutes les autres méthodes de mesure sur le terrain tels que la résistance à la pénétration, la résistance au cisaillement et la teneur en eau, la force de succion permet indirectement une estimation fiable de la portance d'un sol.

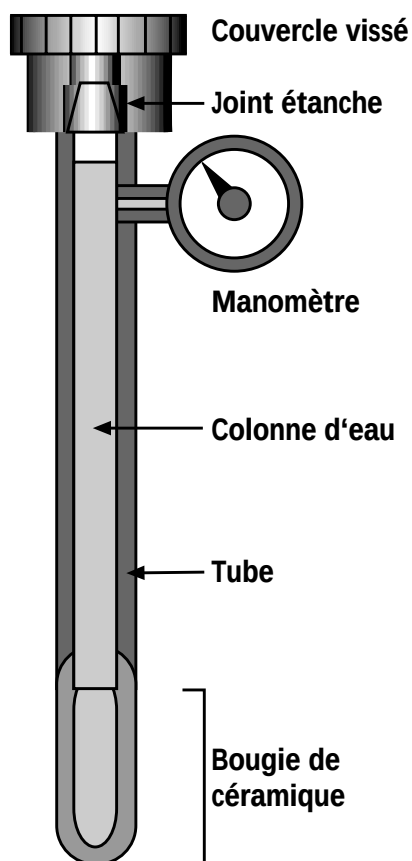


Fig. 46 : Schéma d'un tensiomètre à manomètre

Les tensiomètres se trouvent sur le marché dans les exécutions les plus diverses. Mais le principe de fonctionnement est le même pour tous. Si le sol n'est pas saturé, la tension entre l'intérieur de la bougie en céramique et le sol qui l'entoure crée une dépression qui peut être lue sur un manomètre (force de succion en centibars). Les appareils équipés d'une colonne de mercure sont certes plus précis, mais représentent un risque potentiel pour l'environnement (bris de l'appareil) et sont plus délicats à installer.

La chute de pression peut être relevée également de manière très précise à l'aide d'instruments digitaux. On introduit une aiguille d'injection à travers la membrane de fermeture. La dépression se transmet par la canule à l'appareil de mesure. Après un certain nombre de piqûres, la coiffe de caoutchouc perd de son étanchéité et doit être remplacée. C'est pourquoi ce type d'instruments est surtout adapté aux études scientifiques.

Normes d'emploi

En Suisse, la mesure de la force de succion a été fixée à la profondeur de 35 cm [5, 6]. On installe 5 tensiomètres en ligne par placette de mesure, à env. 50 cm les uns des autres. Il est préférable de relever les valeurs tôt le matin, simultanément sur les divers sites d'observation. La valeur médiane du site est déterminée chaque fois à partir des 5 mesures.

Installation des tensiomètres

Il est capital que la bougie du tensiomètre ait un bon contact avec le sol qui l'entoure et que ni l'eau ni l'air ne puissent pénétrer le long du tube. Pour le mettre en place, on fore au préalable un trou ayant exactement le diamètre du tensiomètre à l'aide d'une tarière ou d'un extracteur, en particulier dans les sols pierreux. On utilisera un peu de terre fine excavée et humectée pour faciliter l'insertion du tube et le contact de la bougie avec le sol. Le sol est ensuite pressé à la main en surface autour du tube pour prévenir les infiltrations.

Sources d'erreur

Il est possible que dans la zone de la bougie il se forme une accumulation locale d'eau ou que l'air pénètre par une fente de retrait ou entre des cailloux. Dans les deux cas, la valeur relevée sur cet appareil serait fort différente de celles des autres appareils. Dans ce cas, l'appareil incriminé doit être réinstallé. Le gel dans le sol cause généralement des dégâts au manomètre. C'est pourquoi il faut ajouter de l'antigel pour de courtes périodes de transition.

Entretien correct

Outre la lecture quotidienne des valeurs, on doit surveiller le niveau d'eau dans le tube. En particulier l'été, par force de succion élevée, il faut en général remettre de l'eau chaque jour. C'est de l'eau dégazée, c.-à-d. portée à ébullition, qui convient le mieux. Pour améliorer le contrôle, on ajoute volontiers un colorant très soluble et inoffensif, comme la fluorescéine.

A la fin de la période de mesure, les instruments sont soigneusement nettoyés et débarrassés du mucus des algues et des bactéries qui se trouve à l'intérieur du tube et dans la zone du couvercle. Les bouchons de fermeture fendillés doivent être remplacés et les bougies endommagées changées.

A l'aide d'un appareil de contrôle (pompe à vide équipée d'un manomètre), on vérifie soigneusement le fonctionnement du manomètre. Il est important que la réaction soit vive

(une réaction lente peut indiquer des dégâts dus au gel), ainsi que le retour complet de l'aiguille du manomètre sur zéro lorsque la bougie est plongée dans l'eau.



Fig. 47 : Tensiomètres à manomètre de différentes longueurs.

Contrôles complémentaires au champ

En plus des tensiomètres installés à des points fixes, on peut aussi tester à n'importe quel endroit la force de succion à l'aide d'un appareil manuel à lecture rapide (Quick-Draw). Il faut utiliser ces mesures rapides non pas en remplacement, mais en complément du réseau de mesure fixe existant. L'utilisation du Quick-Draw exige un entretien minutieux (enlever l'air tous les jours) et ne donne des résultats fiables que s'il l'on respecte les intervalles de temps prescrits par le fabricant. Non utilisé, l'appareil doit être toujours conservé dans un récipient de protection saturé d'eau. On recommande de n'utiliser que de l'eau distillée ou déminéralisée, bien dégazée.

8.3 Mesure de la masse volumique apparente (ρ_A)

Pour obtenir la masse volumique apparente du sol (également appelée en pédologie densité apparente f) au champ, différentes méthodes sont à disposition.

L'échantillonnage avec un cylindre (échantillon non remanié)

Le système le plus simple consiste à prélever de la terre avec un cylindre de volume connu (p. ex. 100/500/1000 ml), équipé d'une gaine de direction, qui est enfoncé verticalement dans le sol avec un marteau et ensuite retiré soigneusement du sol avec son contenu, sans colmater la surface de l'échantillon.



Fig. 48 : L'illustration représente un équipement d'échantillonnage de 100 ml.

Une fois le cylindre retiré, on ôte la terre qui dépasse du cylindre en la tranchant avec un couteau, et on pèse le sol resté dans le cylindre. S'il faut déterminer seulement la densité et la teneur en eau, l'échantillon peut être p. ex. pris également horizontalement dans la paroi d'un profil. En revanche, il est impératif de ne pas prendre l'échantillon horizontalement pour la mesure de la perméabilité, resp. de la répartition des pores [voir 8.1].

Prise d'échantillons verticale (prise d'échantillons en escalier)

Prise d'échantillons horizontale (prise d'échantillons dans la paroi du profil)

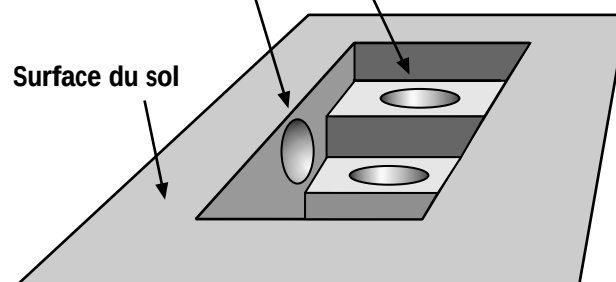


Fig. 49 : Représentation schématique de la prise d'échantillons dans un profil creusé en escalier. En pratique, il faut naturellement prendre plusieurs échantillons au niveau de chaque horizon. Les compactages et les lissages éventuellement causés par l'excavation mécanique du profil doivent être au préalable soigneusement éliminés.

Traitements ultérieurs en laboratoire

L'échantillon non remanié peut être soumis à d'autres mesures en laboratoire (p. ex. volume poral total, répartition des pores, conductivité hydraulique saturée, etc). Dans ce cas, l'échantillon doit être conservé dans le cylindre (en règle générale, il s'agit de cylindres de volume plus petit et fermés hermétiquement pour que les échantillons ne sèchent pas).

Détermination de ρ_A

La masse volumique apparente se calcule à partir du poids sec pour le volume du cylindre et est exprimée en règle générale en g/cm^3 . Pour la détermination du poids sec, l'échantillon est séché pendant plusieurs heures à 105°C au four.

Inconvénients

Cette méthode n'est utilisable que dans des sols à faible pierrosité ou dépourvus de cailloux. Pour obtenir des résultats valables, il faut examiner un grand nombre d'échantillons (hétérogénéité du sol). C'est pourquoi cette méthode demande passablement de temps et de matériel.

Le densitomètre à membrane

La densité apparente humide d'un sol peut être déterminée au champ avec la méthode dite du densitomètre à membrane. L'avantage de cette méthode réside dans le fait qu'elle livre immédiatement des résultats relativement précis.

Densité apparente avec l'humidité au champ = le rapport entre le poids de l'échantillon de terre extrait et le volume d'eau déplacé dans l'appareil.

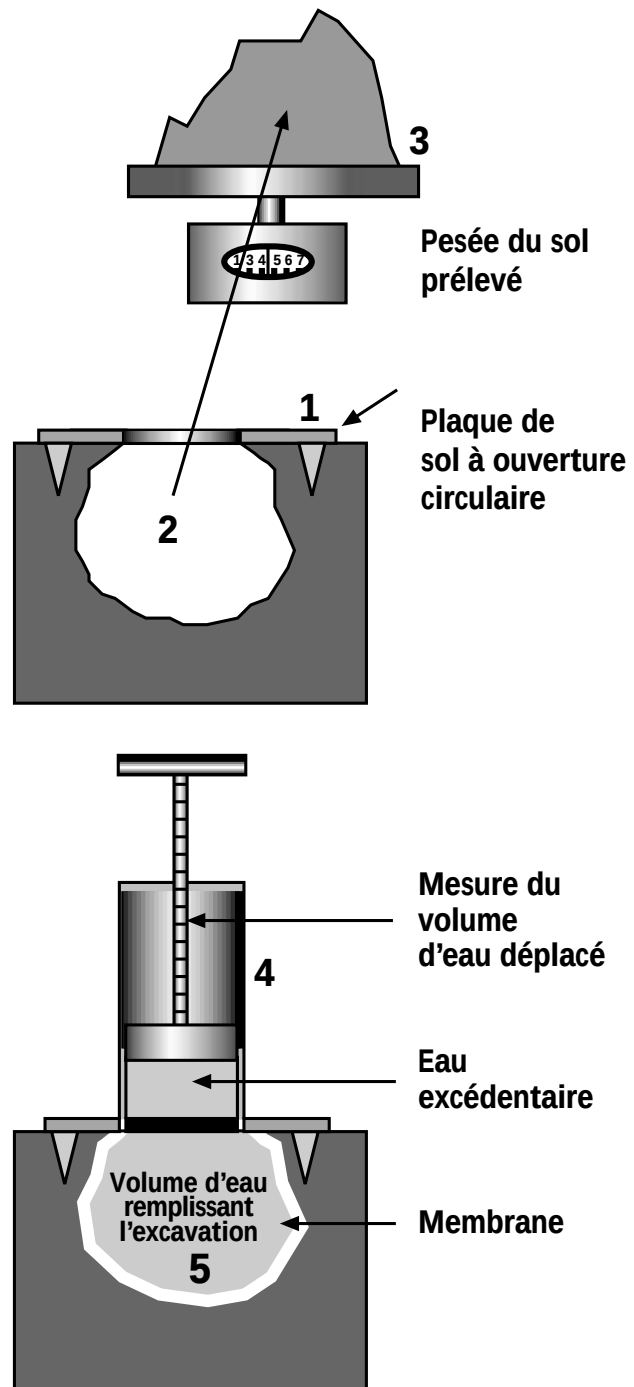


Fig. 50 : Illustration des étapes d'un prélèvement avec un densitomètre à membrane.

Procédure

1. On fixe une plaque (plaque à ouverture circulaire) sur la surface à échantillonner, bien préparée et égalisée.
2. On prélève un peu de terre par l'ouverture ronde.
3. L'échantillon de terre ainsi prélevé est déposé sur un plateau de balance et pesé.
4. Le densitomètre à membrane rempli d'eau et fermé à sa base par une membrane en caoutchouc est installé sur la plaque à ouverture circulaire.
5. L'eau est chassée du cylindre à l'aide de la pompe. Lorsque la pression prescrite est atteinte, on relève le volume d'eau déplacé.

On exécute souvent encore au champ, en même temps que la prise et la pesée du matériel d'extraction, le tamisage grossier ($\varnothing > 2$ mm) pour déterminer la fraction des pierres et du gravier, de sorte qu'on n'apporte au laboratoire que la fraction de terre fine pour des examens complémentaires (granulométrie, paramètres chimiques).

Le poids de l'échantillon peut également être déterminé au laboratoire, c'est pour cela que les échantillons sont soigneusement emballés.

La reproductibilité des conditions d'échantillonnage est assurée à l'aide du manomètre monté dans l'appareil. La méthode est relativement simple à maîtriser. La limite de son emploi se trouve dans les horizons très minces (épaisseur inférieure à 5 cm).

Inconvénient de la méthode

Prend passablement de temps (env. 1 jour/profil).

8.4 Mesure de la résistance à la pénétration

La résistance à la pénétration d'un sol peut se mesurer de différentes manières. Il existe un grand choix d'appareils à lecture directe comme à enregistrement graphique, ou digital, des valeurs.

Le système statique (pénétromètre à dynamomètre)

On enfonce dans le sol, en s'efforçant de maintenir une pression constante, la tige de mesure, à l'extrémité de laquelle est vissée une pointe avec un angle d'incidence et une section connue. Le dynamomètre met en mouvement une roulette graduée sur laquelle les valeurs doivent être relevées. Des appareils plus sophistiqués disposent d'un mécanisme d'inscription, qui enregistre continuellement la résistance d'après la charge du dynamomètre, sur une bande de papier se déroulant au fur et à mesure.

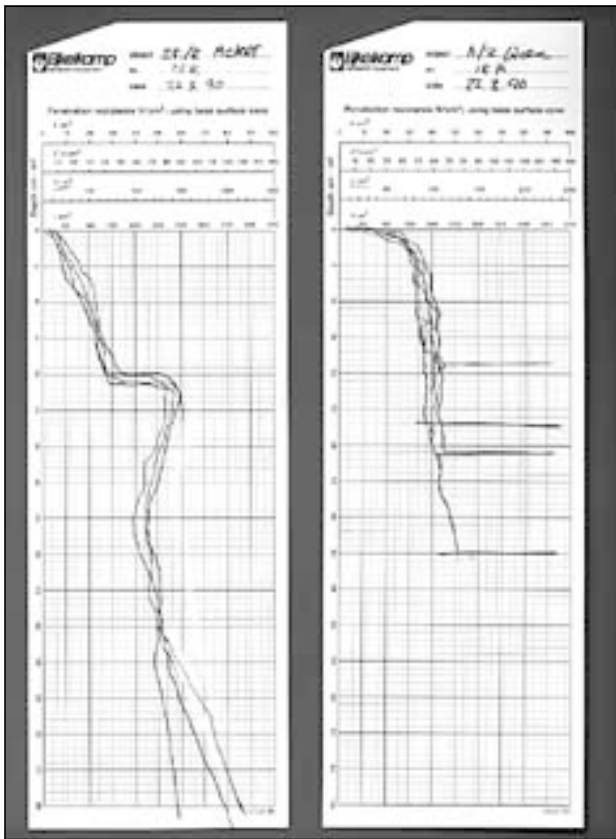


Fig. 51 : Voici un exemple de deux bandes de mesure (pénétrogrammes) directement enregistrées avec quelques mesures. A gauche : Champ labouré dans une région de loess, la zone de compactage due au travail du sol (15-25 cm de profondeur) est clairement reconnaissable. A droite : pénétrogramme effectué dans une prairie naturelle. La résistance à la pénétration de la surface du sol est considérablement plus élevée. A partir de 15 cm, les pierres empêchent de continuer les mesures.

Le système dynamique (sonde à percussion)

Ce test repose sur le principe connu et éprouvé de longue date de la foreuse à percussion [12], la sonde étant simplement beaucoup plus petite. Ce système réagit de manière moins sensible aux pierres et à la sécheresse.

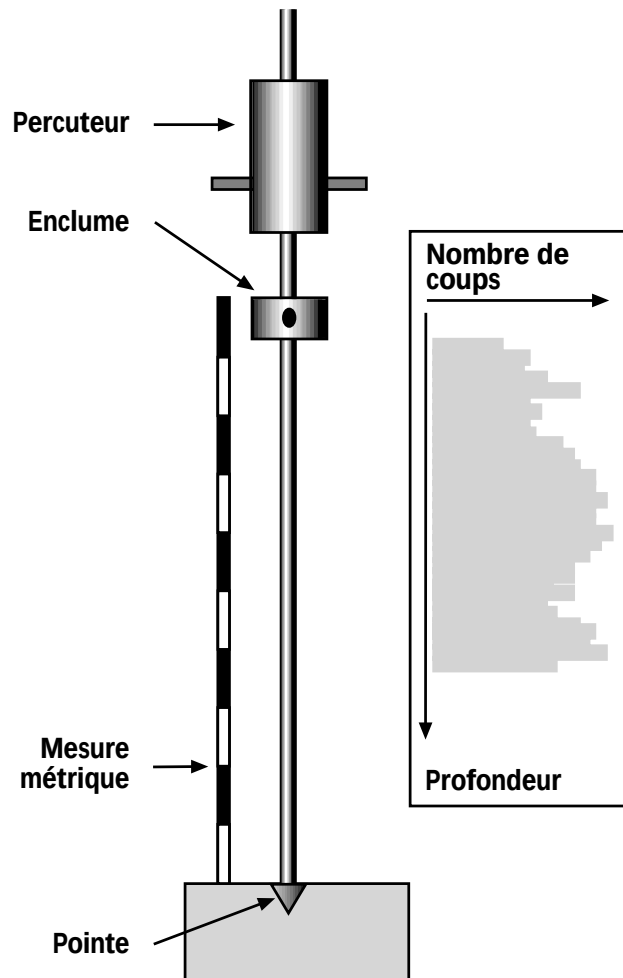


Fig. 52 : Le schéma présente une sonde à percussion simple. La représentation de la résistance à la pénétration se fait sous la forme d'histogrammes.

On remonte le percuteur le long d'une tige de métal jusqu'au butoir et on le laisse retomber sur l'enclume. Le nombre de coups nécessaires pour une unité de pénétration définie (p. ex. 2 cm) est enregistré. La représentation graphique s'appelle un histogramme. Comme l'énergie dépensée à chaque coup (poids du percuteur x hauteur de chute) et le poids de la partie immobile de l'appareil sont connus, le résultat peut être également transformé et indiqué en unités tirées de la mécanique des sols comme le STP (Standart Penetration Test) [12]. Des appareils à percuteur fixe existent également.

La sonde dite PANDA [14] représente encore un autre système. Il s'agit d'un appareil de mesure au champ portable (fig. 53).

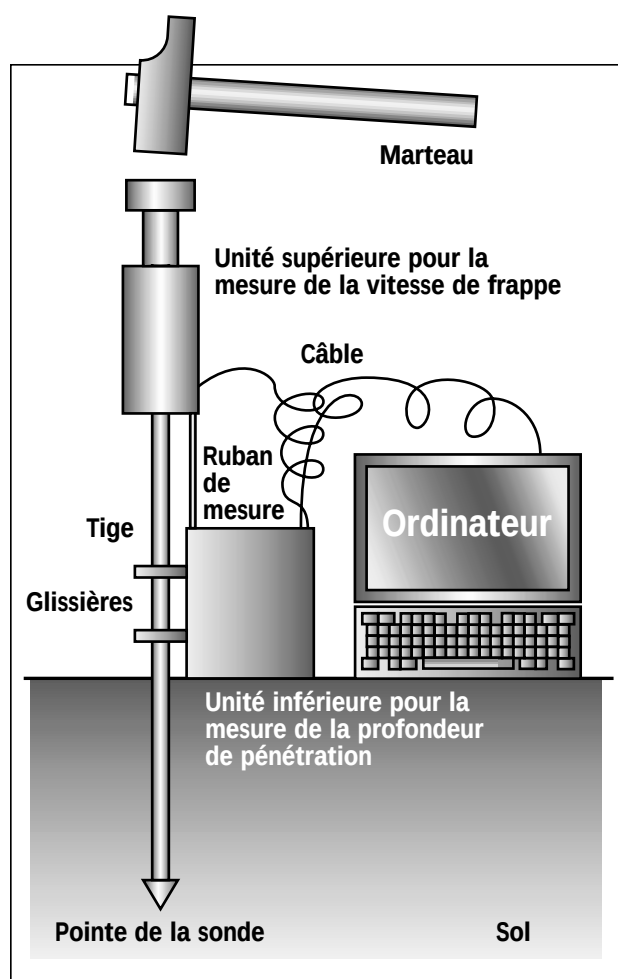


Fig. 53 : Représentation schématique de la sonde PANDA et de ses composants [14].

Le principe de base repose sur une tige de sondage enfoncée dans le sol à coups de percuteur. On obtient la résistance à la pénétration en déterminant la vitesse de frappe. Dans l'unité supérieure du système, la durée de parcours d'un aimant se déplaçant entre deux senseurs entre chaque coup de percuteur est mesurée. L'indication de la profondeur de pénétration est mesurée dans l'unité inférieure du système, ce qui permet de calculer la résistance à la pénétration pour chaque coup de percuteur, la section du cône et la masse du percuteur, de la tige et du cône étant connues, grâce à une formule programmée dans la mémoire active incorporée. Ces valeurs sont également automatiquement enregistrées et mémorisées.

On procède à dix mesures par site, à des intervalles de 10 cm, jusqu'à une profondeur de 0,5 m. Les mesures se font dans un sol ressuyé, à des forces de succion d'au moins 15 à 55 centibars au maximum. Le taux d'humidité du sol au moment des mesures est déterminé avec un tensiomètre (cf. 8.2).

Le degré de compaction jusqu'à une profondeur de 0,5 m est évalué à l'aide de la courbe de la valeur médiane ou de la valeur moyenne des résistances à la pénétration obtenues, exprimées en mégapascals (MPa) [6].

Résistance à la pénétration :	Degré de compaction, densité :
< 2 MPa	non compacté, densité normale
2.0 - 3.5 MPa	compacté, densité élevée
> 3.5 MPa	fortement compacté, densité très élevée

Lorsque la courbe dépasse à une certaine profondeur ou sur une certaine zone de profondeur les valeurs limites de 2,0, resp. 3,5 Mpa, le sol est considéré comme étant compacté, resp. fortement compacté.

8.5 Démonstrations au champ

Outre les méthodes de terrain décrites ci-dessus, qui traitent principalement de la physique des sols, il existe toute une série d'expériences qui sont particulièrement adaptées à la démonstration au champ.

Influence de la pression des pneus

On fait passer un tracteur sur un champ qui vient d'être labouré. Une des roues de arrière est normalement gonflée, la pression de l'autre est réduite d'env. 1/3. Puis on enfonce dans le sol perpendiculairement à la trace du tracteur une plaque de tôle et on décalque la forme de la trace sur la tôle en sprayant. La différence de forme et de profondeur des deux traces est généralement considérable. Du côté de la roue gonflée, c'est le sol qui cède; en re-

vanche le pneu dégonflé est «plus tendre que le sol», il s'étale et répartit le même poids sur une surface beaucoup plus grande.

Semelle de labour et perméabilité

La mécanisation toujours plus poussée a des conséquences visibles sur bien des sols. On rencontre souvent ce qu'on appelle des semelles de labour dans les sols lourds labourés chaque année. On installe des cylindres d'infiltromètres (de préférence du modèle LBL, cf. 8.1) à la surface du sol et au fond du sillon en les remplissant d'eau. Dans la mesure où les tubes sont installés correctement et qu'une importante galerie de vers de terre ou une fente de retrait ne fausse pas l'expérience, on peut souvent observer un temps d'infiltration beaucoup plus long au niveau de la semelle de labour.

Asphyxie

Suite au compactage, et particulièrement dans les sols engorgés, on peut observer une asphyxie due au manque d'oxygène. En creusant, ou même en prenant des échantillons à la tarière, on est frappé par la couleur grise et l'odeur souvent pénétrante de boue d'épuration de ces couches réduites. Cette odeur provient du développement du méthane lors de la putréfaction de la substance organique dans le sol. C'est pourquoi il vaut la peine de contrôler régulièrement les dépôts de matériaux terreux riches en humus, en particulier s'ils sont trop humides ou entassés sur une trop grande hauteur.

Stabilité

On confond souvent stabilité avec résistance. C'est ainsi par exemple que les passages sont beaucoup moins marqués lorsqu'on circule sur le sous-sol. Alors que la vie du sous-sol est moins développée, ce dernier est donc moins stable. Le test de désintégration dans un verre d'eau en est une démonstration spectaculaire. On sèche deux jours environ à température ambiante quelques blocs de sous-sol et

des mottes de la couche supérieure du sol approximativement de la même dimension. Les blocs de sous-sol sont en général plus durs et plus difficiles à briser. On dépose simultanément une motte de chaque couche dans un verre rempli d'eau. Le sous-sol se désagrège généralement en peu de temps, tandis que le sol supérieur reste en bloc. Le comportement à la désagrégation varie selon le type de sol, les teneurs en humus et en argile. La stabilité des turricules est particulièrement frappante.

Les vers de terre

Les vers de terre sont des organismes importants du sol qui sont actifs particulièrement pendant les saisons humides et fraîches (au printemps et en automne).

Test du piétinement

Lorsque le sol est saturé d'eau, une expérience simple peut servir à démontrer la présence de ces animaux :

Pénétrer doucement et délicatement dans une prairie et sauter à pieds joints. En retombant sur le sol, on provoque une vibration qui est perçue par les vers de terre dans un large rayon et qui les fait se retirer immédiatement dans leurs galeries. Ce faisant, ils aspirent de l'eau et de l'air, ce qui provoque un bruit de succion crépitant tout à fait perceptible.

Test des brindilles

Pendant les périodes favorables, la présence des espèces actives en profondeur peut être observée dans une parcelle agricole de la manière suivante :

Sur une surface de sol auparavant nettoyée et entourée d'un carton, on aligne des brins de paille humides ou de fines branches vertes provenant de feuillus (de la taille d'une allumette). L'ensemble est saupoudré d'une fine couche de craie moulue. Au matin, les brindilles que le ver a eu de la peine à faire entrer dans les galeries sont déplacées de manière visible. Le test des brindilles est, comme toutes les expériences décrites ci-dessus, peu scientifique, mais en revanche très démonstratif.

Littérature citée

1. FAL, Cartographie et estimations des sols agricoles, les cahiers de la FAL, n° 24, 1997.
2. OFEFP, Evaluation et utilisation des matériaux terreux, Instructions pratiques (remplacent l'information OSol n° 3 de 1993), 2001.
3. VSS, SN 640 581a, Terrassement, sol – Bases, 1998.
4. VSS, SN 640 582, Terrassement, sol – Inventaire de l'état initial, tri des matériaux terreux manipulés, 1999.
5. OFEN, Directives pour la protection des sols lors de la création de conduites souterraines de transport, 1997.
6. VSS, SN 640 583, Terrassement, sol – Emprises et terrassements, entreposage, mesures de protection, remise en place et restitution, 1999.
7. Ordonnance du 1^{er} juillet 1998 sur les atteintes portées aux sols (OSol), RS 814.12.
8. Loi du 7 octobre 1993 sur la protection de l'environnement (LPE), révisée en juillet 1997, RS 814.01.
9. OFEFP, Directive pour la valorisation, le traitement et le stockage des matériaux d'excavation et déblais, L'environnement pratique, 1999.
10. OFEFP & FAL, Instructions pratiques pour l'échantillonnage et l'analyse des sols, en révision, parution prévue en 2002.
11. FAL, IUL, FAW et RAC, Méthodes de référence des stations fédérales de recherches agronomiques, Zurich - Reckenholz (mise à jour annuelle).
12. H. Otto, «Geotechnik für die Praxis», 4. erweiterte Auflage, Aarau, 1990.
13. Amt für Landschaft und Natur des Kantons Zürich, «Interne Berichte zur Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (k_{sat})», Fachstelle Bodenschutz, Zürich, 1998, 1999, 2000.
14. Fachstelle Bodenschutz des Kantons Zürich, «Fachberichte zur Messung von Bodenverdichtungen im Feld», Zürich, 1997, 1998, 1999.
15. Société suisse de pédologie SSP/BGS, Protection des sols contre les atteintes physiques – stratégie pour la mise en œuvre de l'OSol, Document SSP n° 9, Dietikon, 1999.

Illustrations

Source	Fig. n°
• P. Schoch, Amt für Umweltschutz, Kanton Solothurn, 1991	02
• R. Wenger, Land- und hauswirtschaftliche Schulen Ebenrain, Sissach	03
• Honegger/Bodmer in U. Gisi, «Bodenökologie», Thieme Verlag, 1990	04
• F. Scheffer/P. Schachtschabel, «Lehrbuch der Bodenkunde», Enke Verlag, 1992	05
• S.T. Williams, «Forum Mikrobiologie 6», 1983	06
• J.C.G. Ottow, «Bild der Wissenschaft 3», 1985	07/08
• G. Bruckner, «Lebensraum Boden», Frankh-Kosmos Verlag, 1988	11/12
• R. Giovanoli, Laboratorium für Elektronenmikroskopie, Universität Bern	18/20/22
• Th. Diez/H. Weigelt, Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau	21/24-32/36
• E. Frei, «Agrarpedologie», Geographisches Institut der Universität Bern, 1983	33
• OFEN, Directives pour la protection des sols lors de la création de conduites souterraines de transport, 1997.	42

Le graphiste Hans-Peter Imhof a retravaillé toutes les illustrations, figures et tableaux de ce guide. A l'exception des illustrations mentionnées ci-dessus, tous les documents ayant servi à leur réalisation ont été fournis par les auteurs MM. C. Salm et S. Häusler, ou par l'OFEFP.

Impressum

Commande

OFCL/OCFIM, CH-3003 Berne
Fax: +41 (0)31 325 50 58
E-Mail :
edmz@bbl.admin.ch
Internet :
www.admin.ch/edmz

Numéros de commande

allemand : 319.775d
français : 319.775f

Editeur

Office fédéral de l'environnement,
des forêts et du paysage (OFEFP),
CH-3003 Berne,
www.environnement-suisse.ch

Auteurs

Stephan Häusler
Angewandte Erdwissenschaften
Rodtmattstrasse 51
3014 Berne

Christoph Salm
Terre AG
Postweg 1
5704 Egliswil

Direction du projet

Jean-Pierre Clément
Jürg Zihler
OFEFP
Section Sol et biologie générale
3003 Berne

Accompagnement

Norbert Ledergerber
OFEFP
Section Communication
3003 Berne

Conception et graphisme

Hans-Peter Imhof
Grafiker SGD
Elfenauweg 3
3006 Berne

Traduction

KADIMA ingénieur conseil,
Agronomie et environnement
1580 Avenches