

Informations générales à propos du sol



Informations générales à propos du sol

Remarque :

Cette publication est un extrait des explications et informations générales du guide de l'environnement n° 10 « Construire en préservant les sols » de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP, 2001) sur le thème du sol.

Le guide de l'environnement n° 10 « Construire en préservant les sols » a été remplacé en 2022 par le module « Gestion respectueuse des sols lors de travaux de génie civil » de la nouvelle aide à l'exécution « Construire en préservant les sols ».

Sommaire

Informations générales à propos du sol

Chap. 1 La fertilité du sol	3
Chap. 2 Le sol vit	4
2.1 Interface sol/plante	4
2.2 Classification, ordre de grandeur et brève description	5
2.3 Les vers de terre	8
Chap. 3 Les types de sols	10
3.1 Les sols perméables	10
3.2 Les sols engorgés	11
3.3 Les sols hydromorphes	11
3.4 Les sols alluviaux	11
3.5 Les sols hydromorphes organiques	12
Chap. 4 La nature du sol	13
4.1 L'argile	14
4.2 Le silt	15
4.3 Le sable	16
Chap. 5 La structure du sol	18
5.1 Structures primaires	18
5.2 Mottes et assemblages (structure secondaire)	19
Chap. 6 Les pores du sol et la porosité	22
6.1 Masse volumique apparente et densité réelle	22
6.2 Espace poral : les pores et leur répartition dans le sol	23
6.3 Régimes de l'eau et de l'air : la taille des pores	25
Chap. 7 La portance du sol	27
7.1 Conductivité ou perméabilité du sol	27
7.2 Mesure de la force de succion dans le sol	28
7.3 Relation entre le poids, la surface de portance et la transmission de la pression	29
7.4 Force de succion et intervention des machines	29
Chap. 8 Les méthodes d'analyse	31
8.1 Mesure de la capacité d'infiltration	31
8.2 Mesure de la force de succion	34
8.3 Mesure de la masse volumique apparente	36
8.4 Mesure de la résistance à la pénétration	38
8.5 Démonstrations au champ	40
Littérature citée	43
Illustrations	44
Impressum	45

1. La fertilité du sol

Définitions

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

- ¹ Le sol est considéré comme fertile :
- s'il présente une biocénose diversifiée et biologiquement active, une structure typique pour sa station et une capacité de décomposition intacte;
 - 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;
 - 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;
 - 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» [2] 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 la 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.

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.

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'éco- logie du sol. Le schéma ci-dessous tente de représenter de manière simplifiée la répartition de la biomasse dans la couche superficielle du sol.

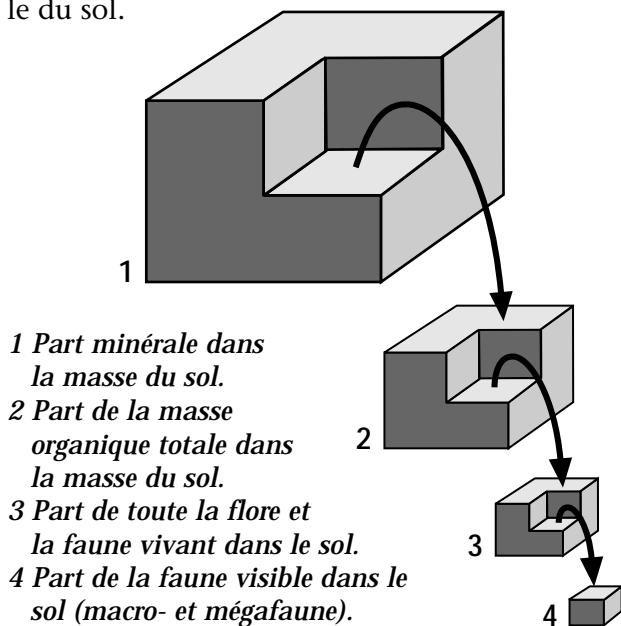


Fig. 01 : Représentation simplifiée de la distribution pondérale d'un sol.

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.

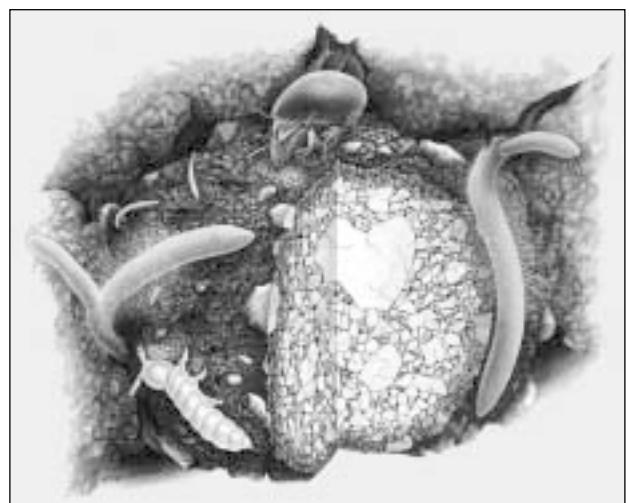


Fig. 02 : La pédofaune au niveau d'un agrégat (l'image correspond à un carré de 4 mm) On a représenté au milieu en haut un acarien et en bas à gauche un collembole. Ces animaux, classés dans la mésafaune, peuvent être encore tout juste identifiés à l'oeil nu. Le grumeau est entouré par des poils absorbants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

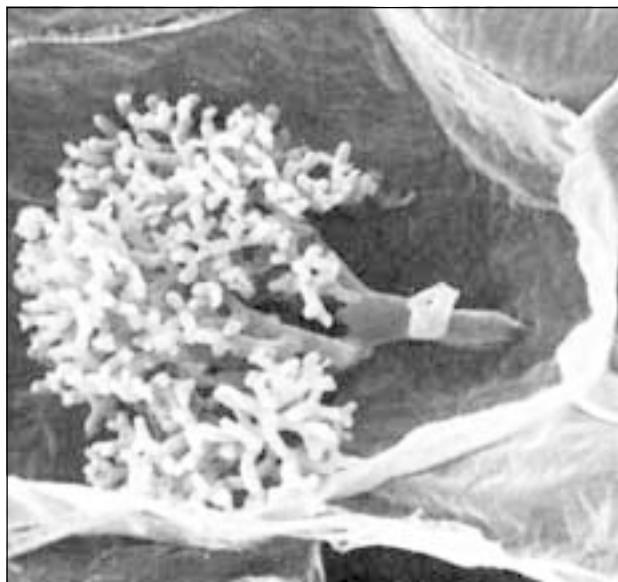


Fig. 04 : Arbuscules intracellulaires de micorhizes, qui pénètrent à l'intérieur de la racine. Les hydrates de carbone prélevés à la plante sont échangés contre des éléments nutritifs tirés du sol.

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, Ø 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.

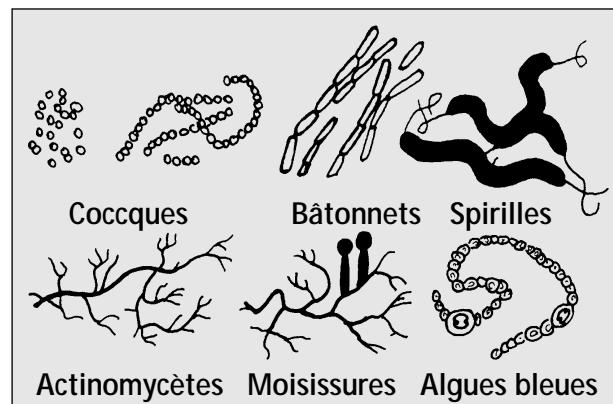


Fig. 05 : Illustrations simplifiées de représentants importants de la microflore du sol pour montrer sa diversité.

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.

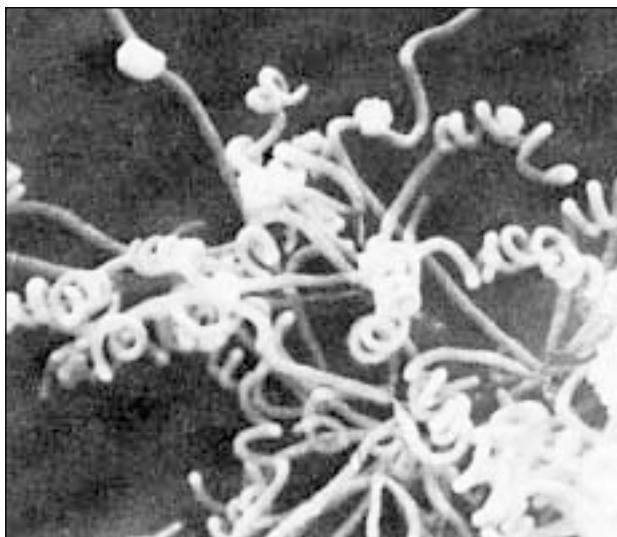


Fig. 06 : Certains microorganismes produisent des substances antibiotiques. Les plus connues sont entre autres la pénicilline et la streptomycine. Chaîne de spores en spirales d'un streptomycète (d'après Williams, 1983, grossie 6000 fois).

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 détritus (déchets de cellules, substances en suspension ou déposées), mais aussi de bactéries.

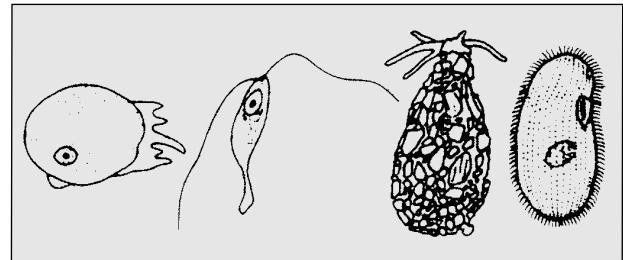


Fig. 07 : de g. à d., amibe nue (rhizopode), zooflagellé, thécamibe (amibe à coquille) et cilié.

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.

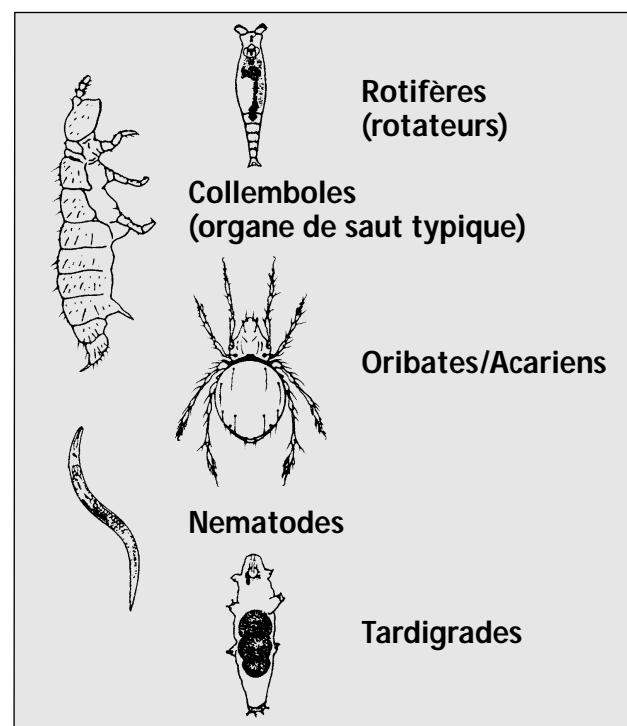


Fig. 08 : Quelques exemples de mésafaune.

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.

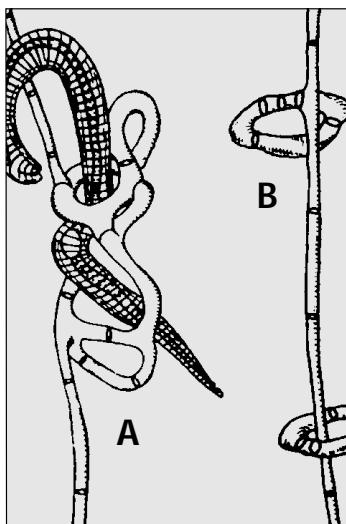


Fig. 09 : Champignon prédateur du genre entomophthora capable, grâce à la formation d'un hyphé spécial (B), d'attraper et de digérer des organismes de petite taille vivant dans le sol, p. ex. (A) un parasite (nématode).



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 (enchytréées).

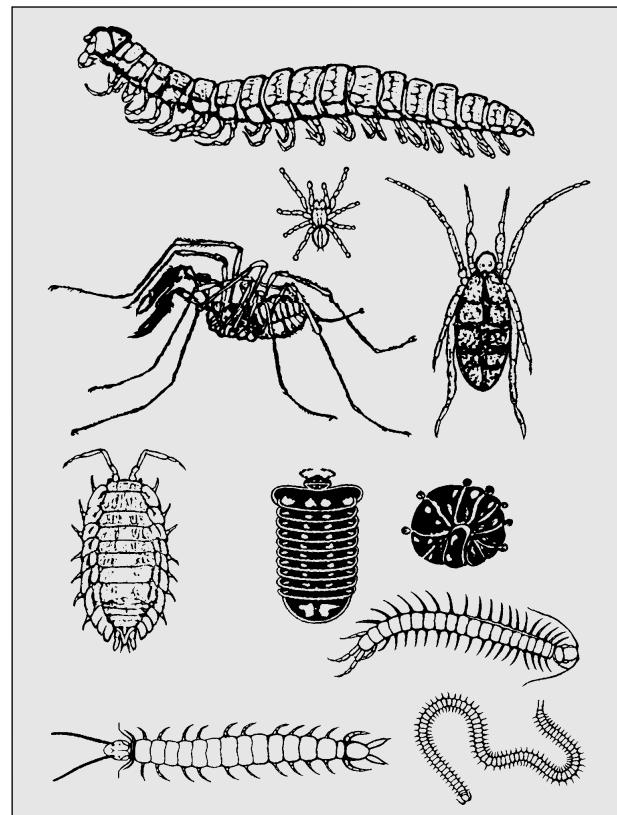


Fig. 11 : Cette illustration montre les représentants de la macrofaune qui fuient la lumière et qu'on ne rencontre pratiquement pas à la surface du sol. Il s'agit de diverses formes d'insectes, de crustacés, d'araignées, de diplopodes. Beaucoup d'entre eux sont des prédateurs (araignées, diplopodes, 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.

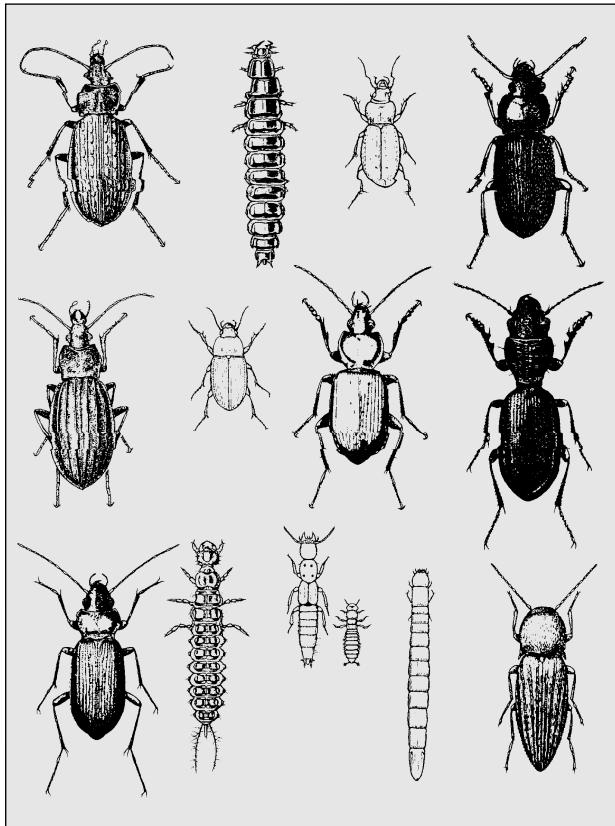


Fig. 12 : Carabes avec leur larve (Taille entre 7 et 33 mm).

Mégafaune, Ø > 20 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 clitellium (renflement circulaire de couleur claire chez les adultes), il se forme un cocon, ensuite déposé dans le sol, duquel écloront 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. Dendrobaeana, 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).

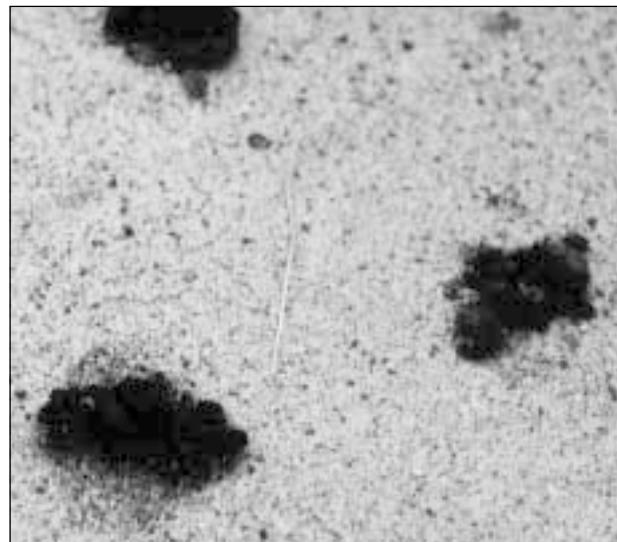


Fig. 14 : L'étonnante activité de bioturbation des vers de terre. Lors d'inondations (24/25 août 1987), la Reuss à Seedorf (UR) a déposé une épaisse couche de sable. En quelques jours, des vers se sont frayé un chemin vers la surface à travers 1 mètre de sable. Les turricules sombres provenant du sol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

Pour plus de détails :

Consulter :

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

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	
10^{-2} cm/sec	360 mm/h	sec
10^{-3} cm/sec	36 mm/h	
10^{-4} cm/sec	3,6 mm/h	humecté
10^{-5} cm/sec	0,36 mm/h	
10^{-6} cm/sec	0,036 mm/h	humide
10^{-7} cm/sec	0,0036 mm/h	
10^{-8} cm/sec	0,00036 mm/h	engorgé

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 («couche») 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 tassemement 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.

4. La nature du sol

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 placées sur la grille de lecture :

Argiles (A)	(Ø de la particule < 0,2 µm)
Silt (U)	(Ø de la particule 0,002 - 0,05 mm)
Sable (S)	(Ø de la particule 0,05 - 2 mm)

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

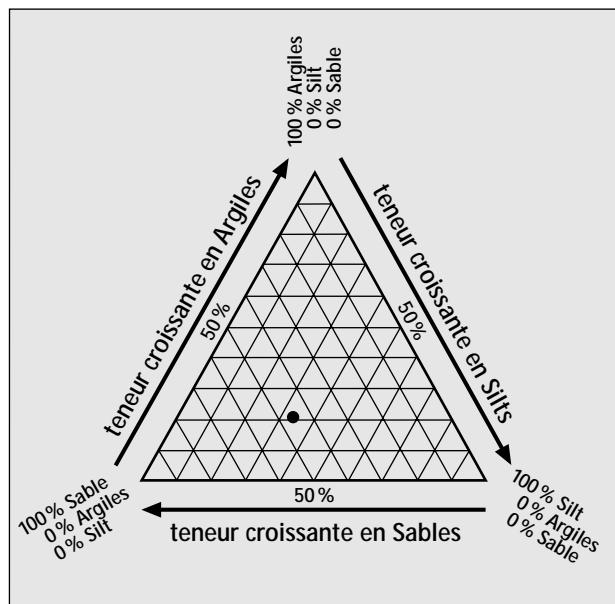
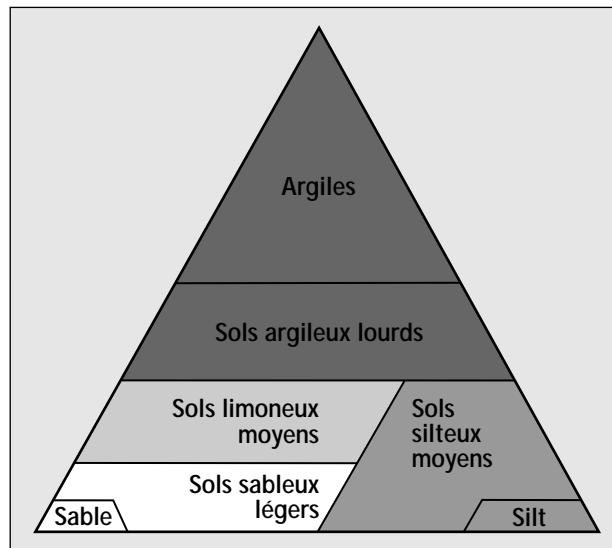


Fig. 16 : Triangle de texture [3]. Le point d'intersection des lignes de pourcentage permet de définir la nature du sol selon une classification simplifiée. Dans l'exemple (•), il s'agit donc d'un sol limoneux moyen. Classification détaillée: sol limoneux moyennement silteux.

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 µm, c.-à-d. au-dessous de 0,002 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 émettent 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 (émettement 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

Détrempee, 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 Suisse sont : Möhlinerfeld (BL) et les collines de Wallbach (AG). Des sédiments meubles peuvent également être 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.

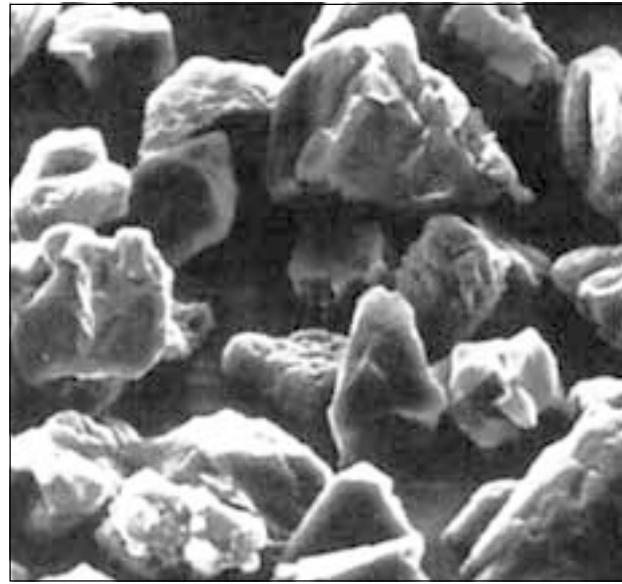


Fig. 20 : Particules de silt vues au microscope, grossies env. 1000 fois.

Propriétés mécaniques

Les sols silteux couverts de végétation sont relativement stables et bien perméables. Lorsqu'ils sont détrempeés, 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.

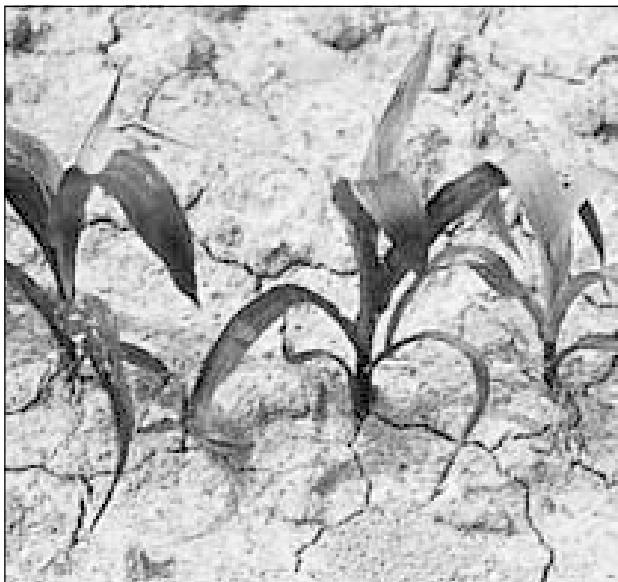


Fig. 21 : Sol de loess sous maïs conventionnel, sol nu (couverture végétale partielle) et croûté. Avec une pente faible, le risque d'érosion est déjà élevé.

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 graisseux 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. A 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).

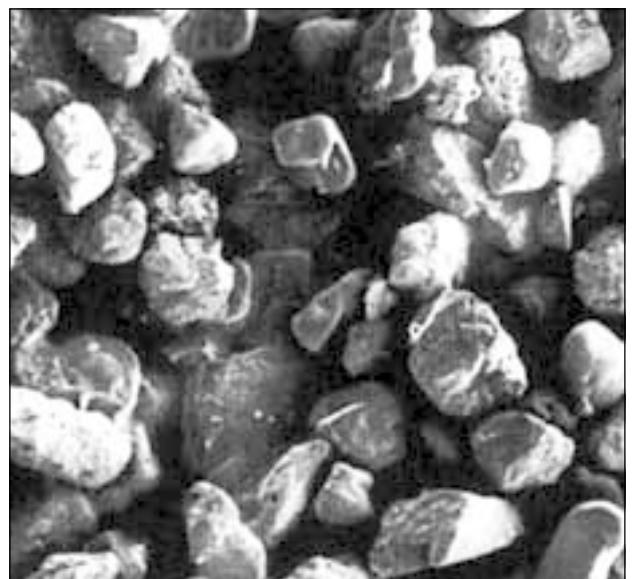


Fig. 22 : Sable (divers minéraux mélangés). L'image est grossie env. 10 fois.

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 ameublement 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 Ø 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 agro-nomiques, 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 arrangees 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 tra-vailles**. 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

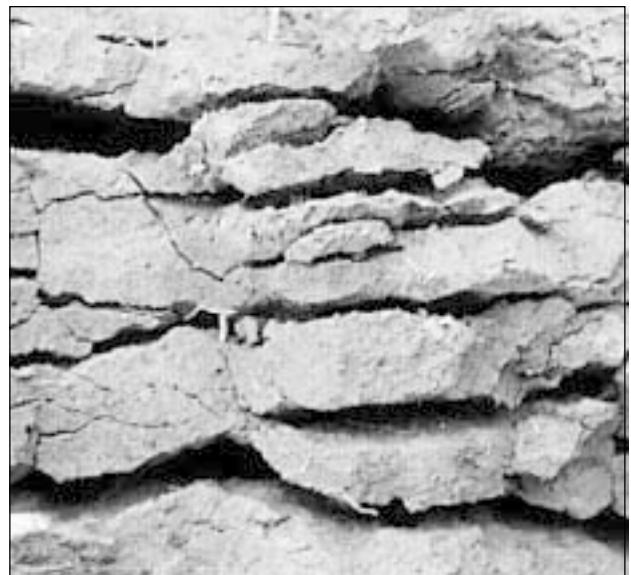


Fig. 25 : Ce sont surtout les sols silteux qui présentent une structure en feuillets, avec des fentes horizontales.

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).

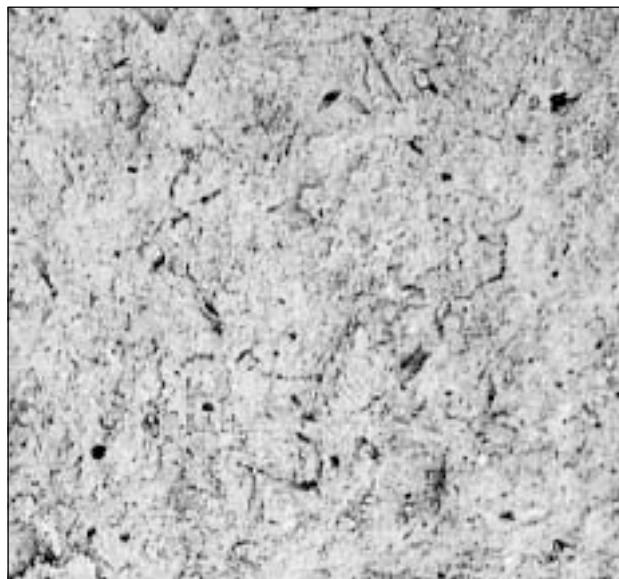


Fig. 26 : Les structures compactes peuvent être actives du point de vue biologique et très fertiles lorsque leur texture et leur assemblage sont favorables (régions de loess).

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'émiétement 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 (émiéttage, 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 poraux 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 (ρ_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 (pédo-génèse), 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.

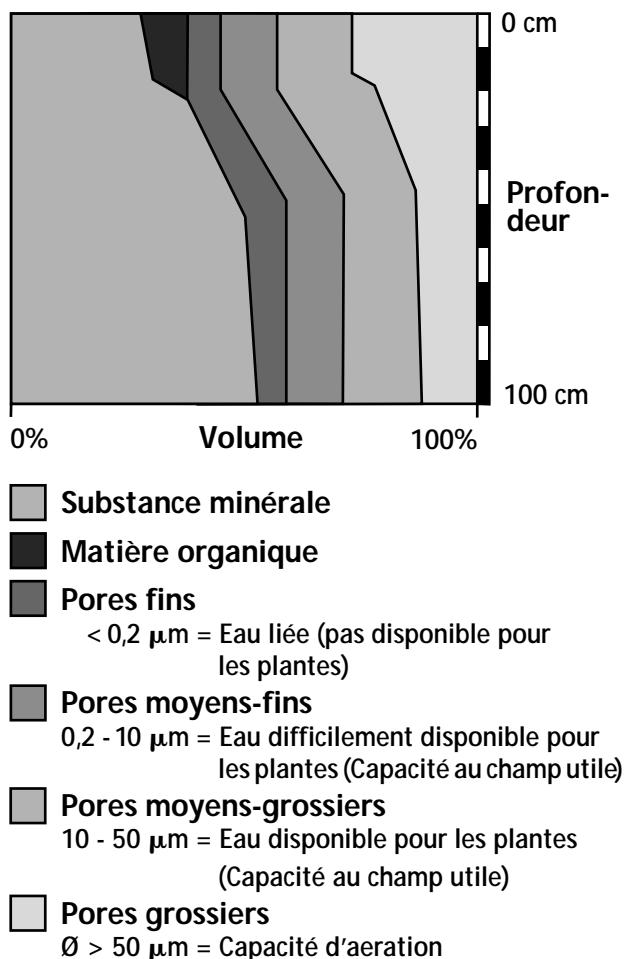


Fig. 34 : Le schéma représente la répartition des pores par classe de grandeur à différentes profondeurs pour un sol limoneux humique, labouré, et leurs parts au volume du sol. Le volume des pores grossiers (>50 µm) correspond au volume disponible pour l'air (dans la couche labourée 0 à 20 cm, ce volume 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 portant, parce que les machines lourdes y laissent moins de traces. 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 raffermissement 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 pores 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 radicelles des plantes.

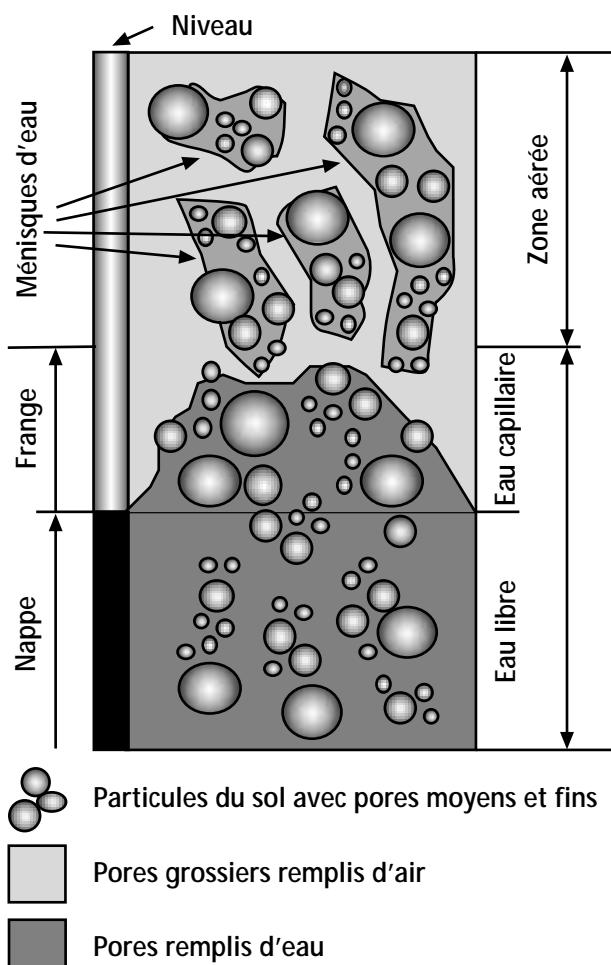
La compaction du sol peut augmenter la proportion des pores moyens au détriment des pores grossiers. C'est pourquoi les sols compactés se ressuyent en règle générale beaucoup plus lentement.

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 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 bar. A partir de 1-15 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).



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 ressue. 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.

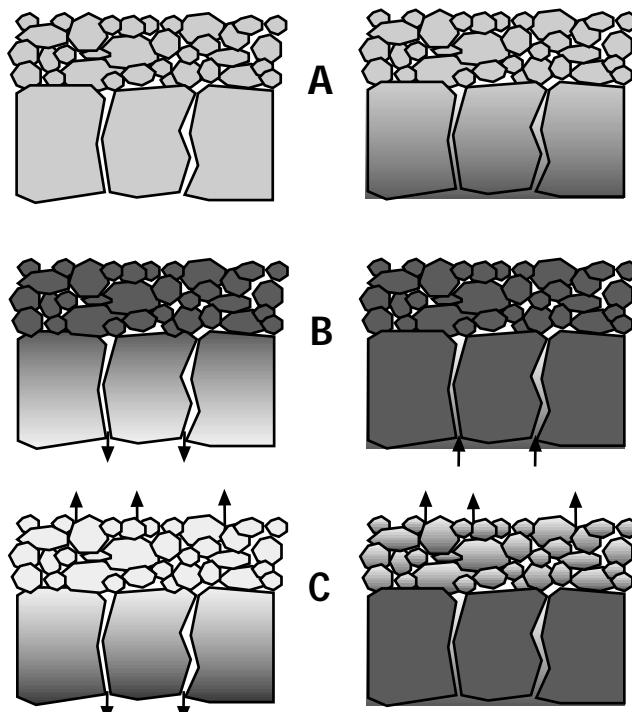


Fig. 39 : Différence de comportement au ressuyage entre un sol perméable (à gauche) et un sol engorgé (à droite).

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 d'eau dans sa partie inférieure.

B Après une période de pluie : la couche superficielle du sol est saturée dans les deux cas. À gauche, le sous-sol se met à recevoir de l'eau par le haut, tandis qu'à droite, il est déjà complètement saturé. À 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 réparaît : l'eau s'évapore. À 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 ressuyer. À 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 (4) et (5)].

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} bar = 1 kPa = 10 hPa = 10 cm H₂O = pF 1

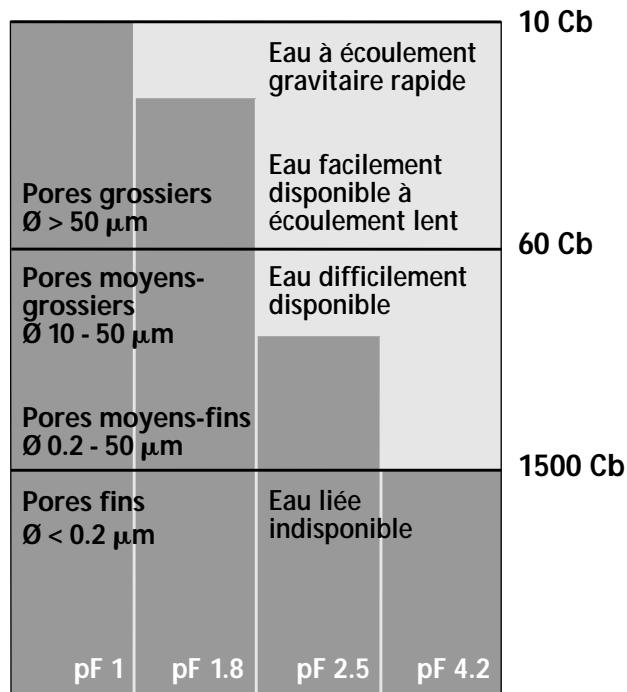


Fig. 40 : La zone ombrée indique que les pores sont remplis d'eau. La zone ressuyée comprend le domaine allant de pF 1,0 (saturée) à pF 4,2 (point de flétrissement permanent), elle figure en gris clair et son étendue varie avec le diamètre des pores. L'eau de la zone située <6 cbar est appelée eau gravitaire. 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 [5]

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:

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

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

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

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

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.

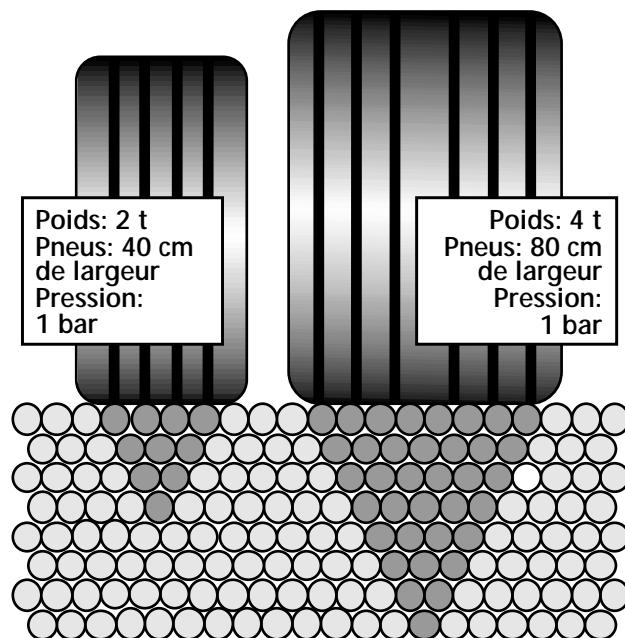


Fig. 41 : Le modèle simplifié des rouleaux montre la transmission de la pression des roues dans la profondeur du sol. Les particules du sol affectées d'une unité de poids sont indiquées en gris de manière à démontrer la propagation de la pression en profondeur. Malgré une pression au sol identique, la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

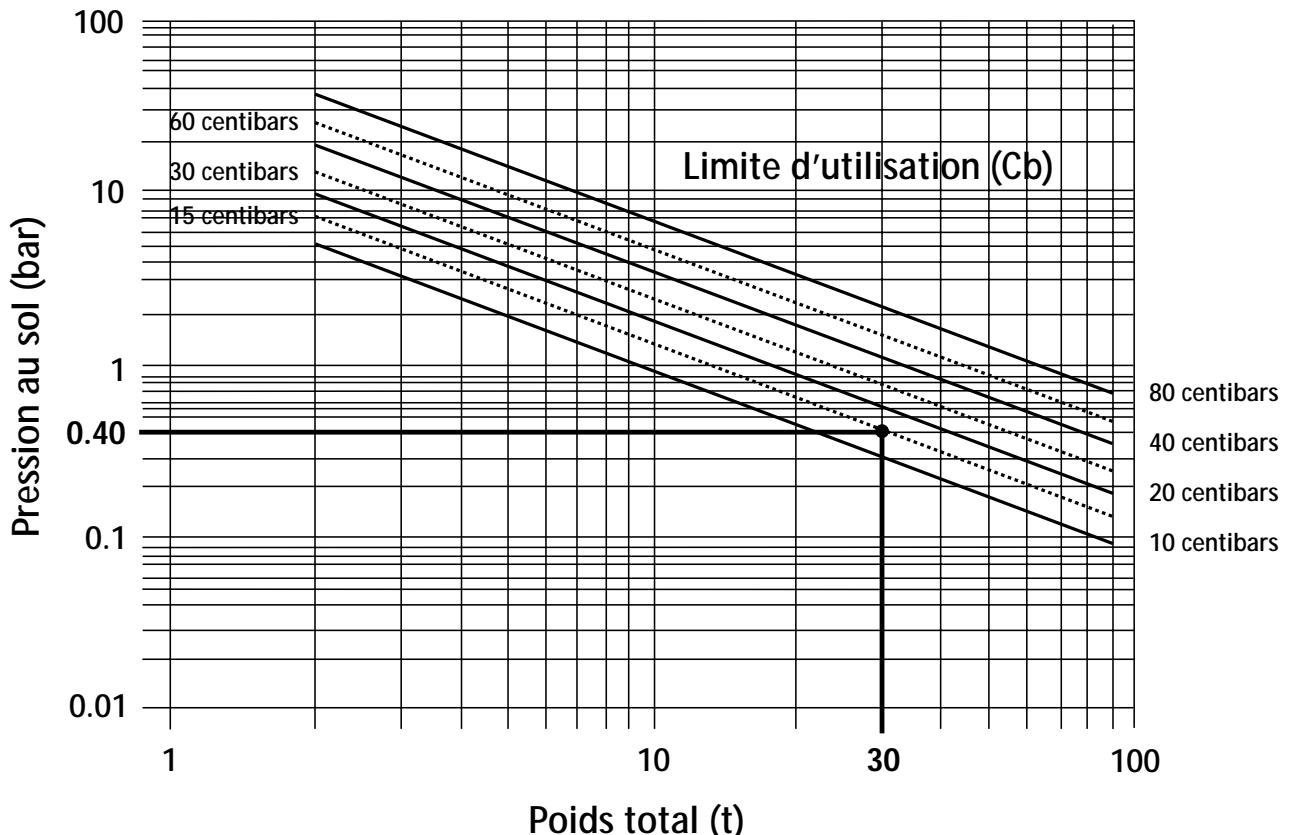
7.4 Force de succion (Ψ) et intervention des machines [4, 5]

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 :

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

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 Pression au sol Limite d'utilisation	30 Tonnes 0.4 bar 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'un 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 [4, 5, 6, 7, 8, 9].

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'infiltra 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.

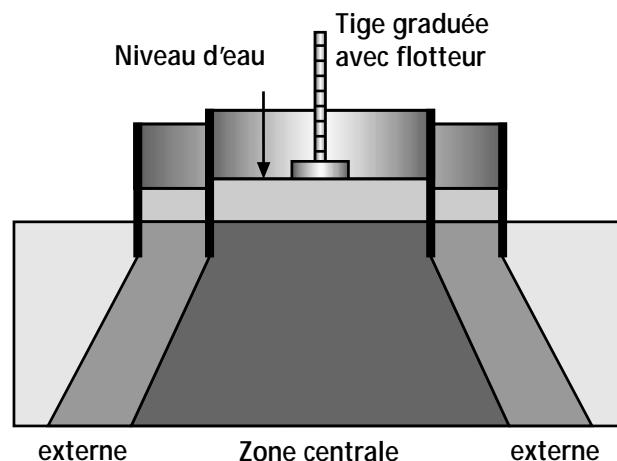
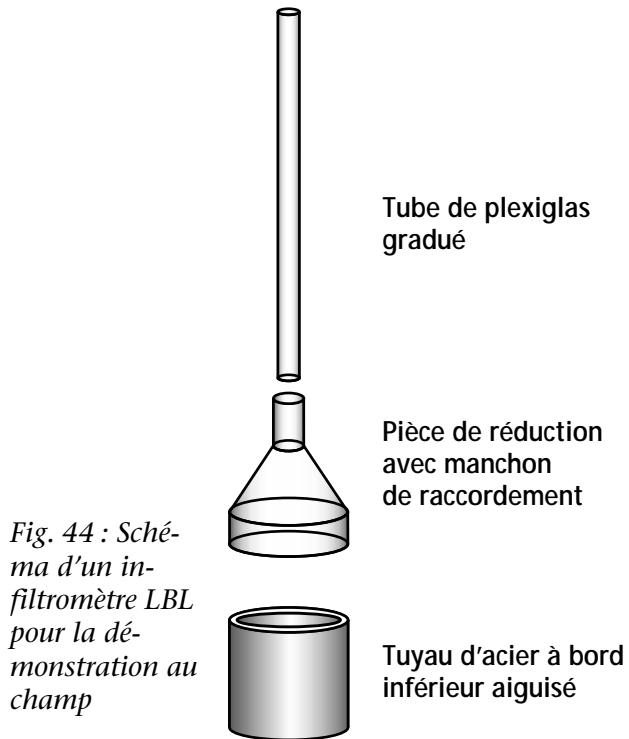


Fig. 43 : Coupe d'un infiltromètre à double cylindre

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 ~ 10^{-4} cm/s ~ 4 mm/h ~ 10 cm/jour [5, 8].

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 ~ 10^{-4} cm/s ~ 4 mm/h ~ 10 cm/jour [5].

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 [6,8] :

Classification selon la méthode PYZYL-WD - FAL (6)					Autre classification adaptée selon proposition FaBo ZH (8)
k_{sat} m/s	k_{sat} 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.

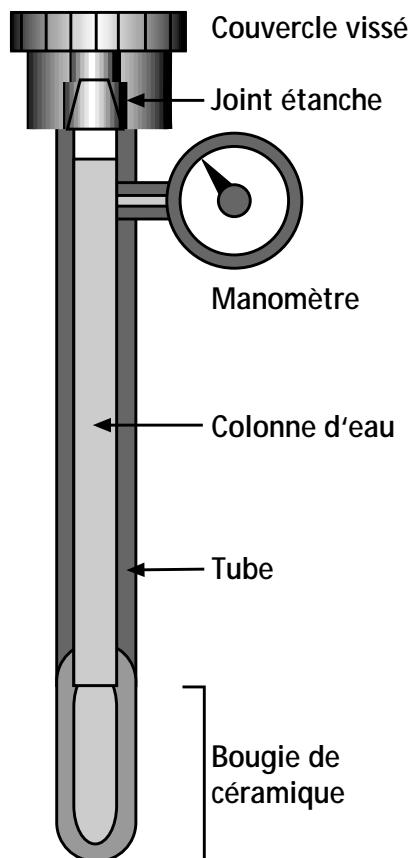


Fig. 46 : Schéma d'un tensiomètre à manomètre

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 [4, 5]. 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].

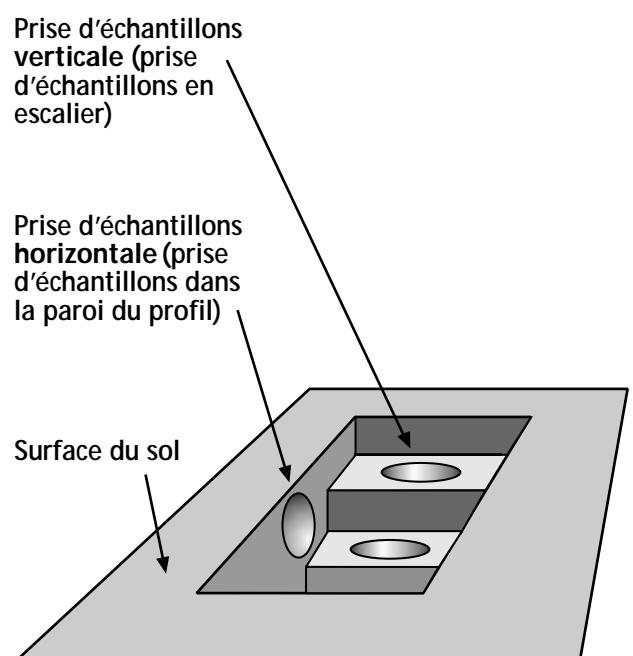


Fig. 49 : Représentation schématique de la prise d'échantillons dans un profil creusé en escalier. En pratique, il faut naturellement prendre plusieurs échantillons au niveau de chaque horizon. Les compactages et les lissages éventuellement causés par l'excavation mécanique du profil doivent être au 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/cm³. 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.

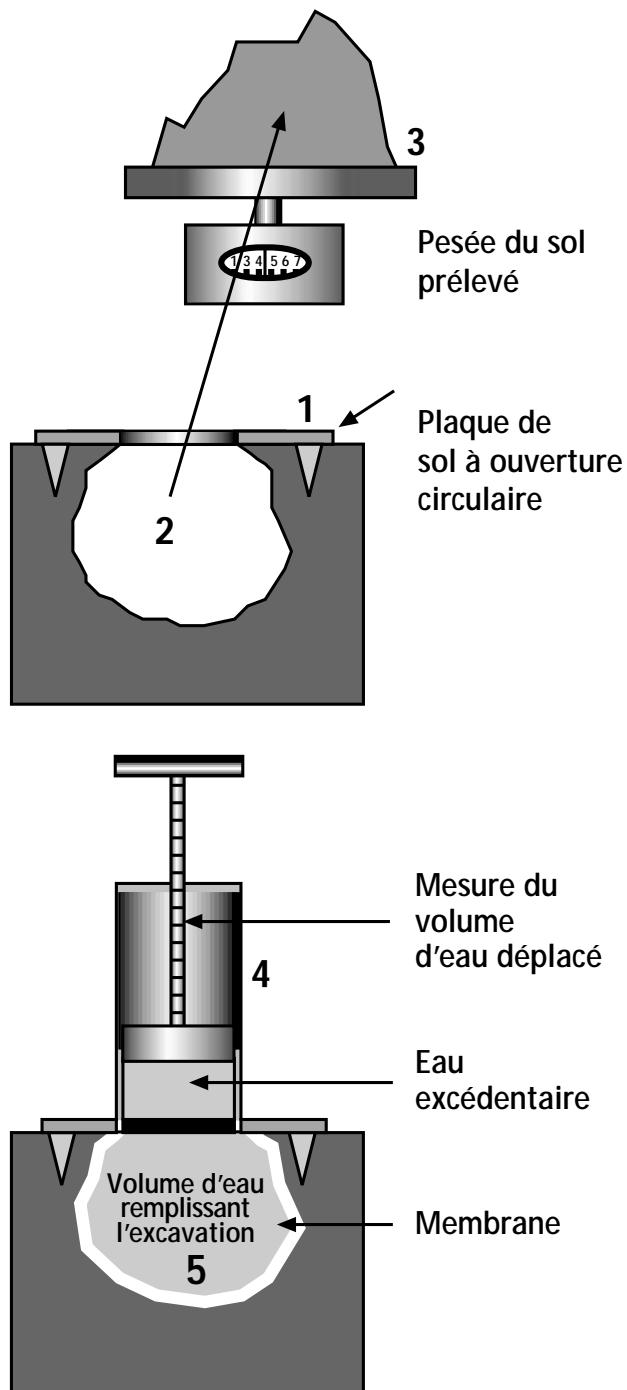


Fig. 50 : Illustration des étapes d'un prélèvement avec un densitomètre à membrane.

Procédure

1. On fixe une plaque (plaqué 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.

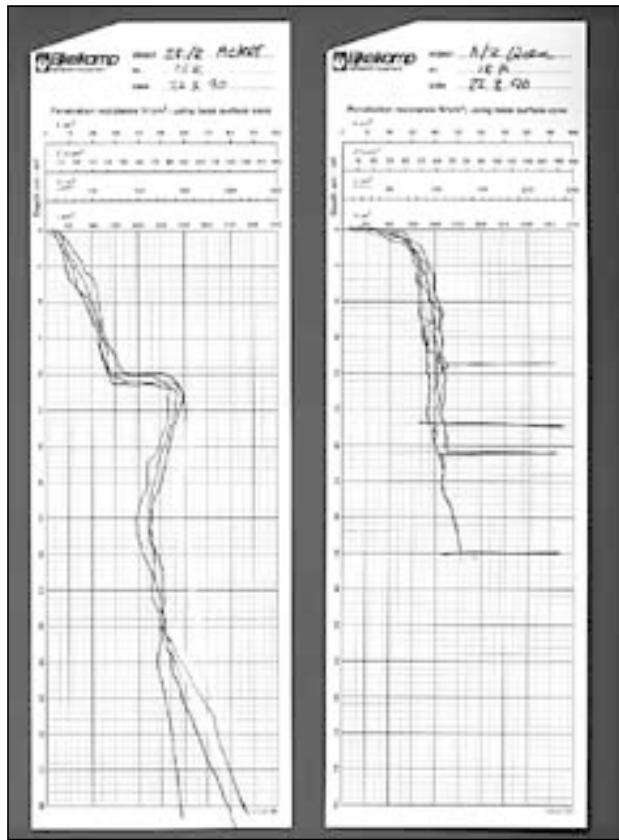


Fig. 51 : Voici un exemple de deux bandes de mesure (pénétrogrammes) directement enregistrées avec quelques mesures. A gauche : Champ labouré dans une région de loess, la zone de compactage due au travail du sol (15-25 cm de profondeur) est clairement reconnaissable. A droite : pénétrogramme effectué 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 [7], la sonde étant simplement beaucoup plus petite. Ce système réagit de manière moins sensible aux pierres et à la sécheresse.

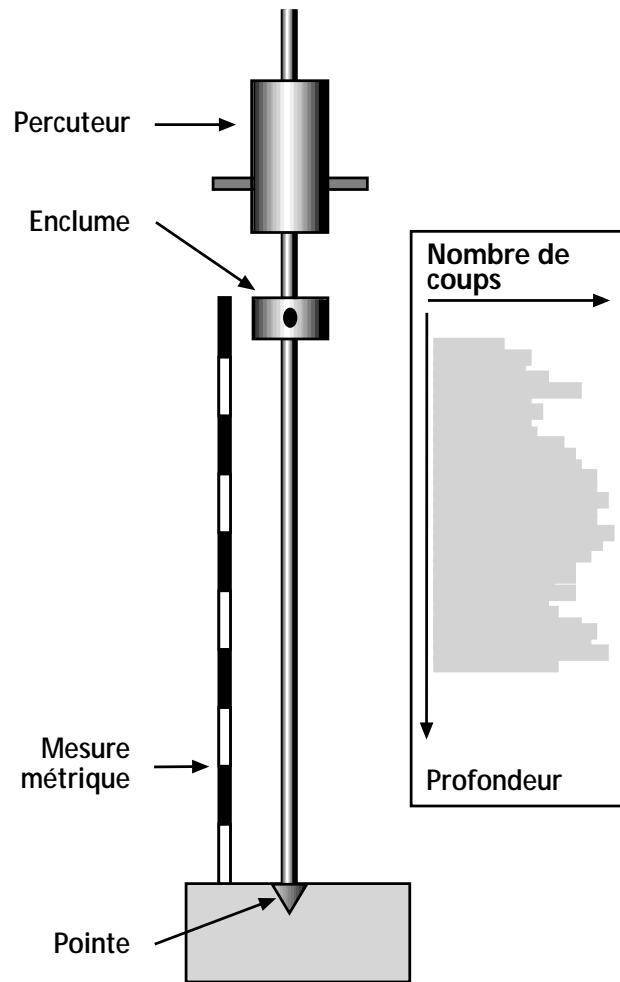


Fig. 52 : Le schéma présente une sonde à percussion simple. La représentation de la résistance à la pénétration se fait sous la forme d'histogrammes.

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) [7]. Des appareils à percuteur fixe existent également.

La sonde dite PANDA [9] représente encore un autre système. Il s'agit d'un appareil de mesure au champ portable (fig. 53).

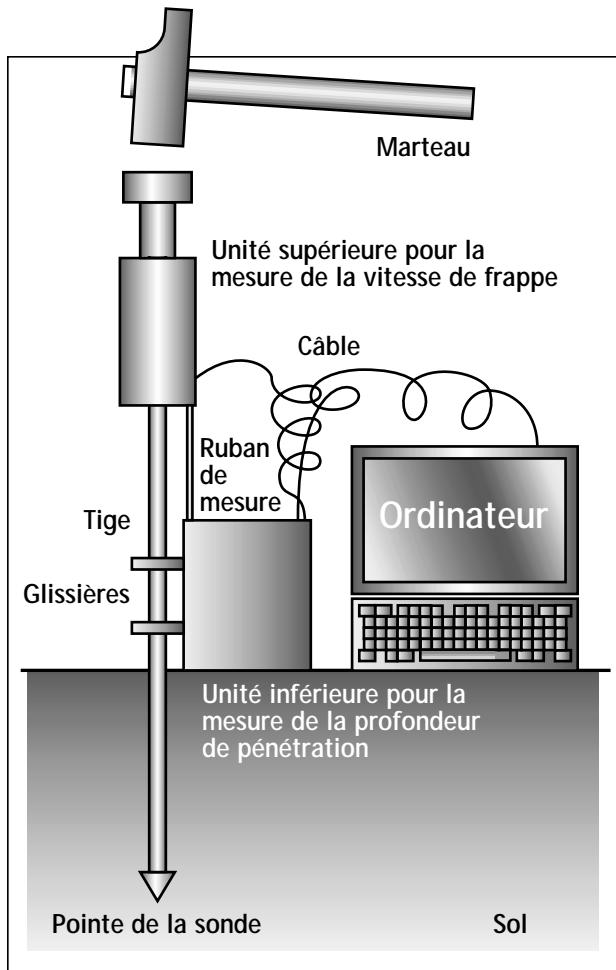


Fig. 53 : Représentation schématique de la sonde PANDA et de ses composants [9].

Le principe de base repose sur une tige de sondage enfoncee 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 mémosées.

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) [5].

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.** Ordonnance du 1er juillet 1998 sur les atteintes portées aux sols (OSol), RS 814.12.
- 2.** 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.
- 3.** VSS, SN 640 581a, Terrassement, sol – Bases, 1998.
- 4.** OFEN, Directives pour la protection des sols lors de la création de conduites souterraines de transport, 1997.
- 5.** VSS, SN 640 583, Terrassement, sol – Emprises et terrassements, entreposage, mesures de protection, remise en place et restitution, 1999.
- 6.** FAL, IUL, FAW et RAC, Méthodes de référence des stations fédérales de recherches agronomiques, Zurich - Reckenholz (mise à jour annuelle).
- 7.** H. Otto, «Geotechnik für die Praxis», 4. erweiterte Auflage, Aarau, 1990.
- 8.** Amt für Landschaft und Natur des Kantons Zürich, «Interne Berichte zur Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (ksat.)», Fachstelle Bodenschutz, Zürich, 1998, 1999, 2000.
- 9.** Fachstelle Bodenschutz des Kantons Zürich, «Fachberichte zur Messung von Bodenverdichtungen im Feld», Zürich, 1997, 1998, 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

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