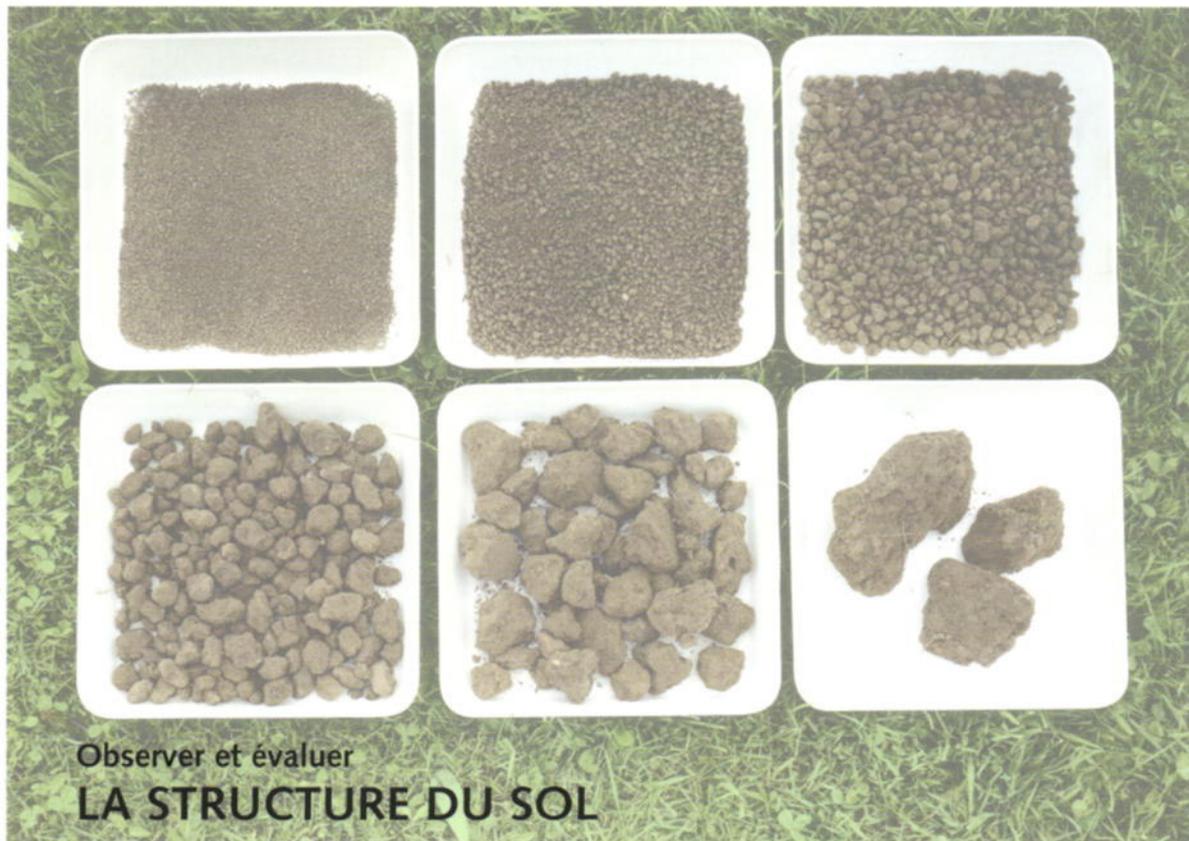


Les cahiers de la FAL 50
Schriftenreihe der FAL 50



Observer et évaluer
LA STRUCTURE DU SOL

Gerhard Hasinger, SRVA
Jakob Nievergelt, Milan Petrasek, Peter Weisskopf, FAL

Remerciements

Pour leur précieuse contribution nous remercions:

Dr H.H. Becher, Chaire de pédologie, Université de Munich

Norbert Emch, service de protection des sols du canton de Soleure

Jean-Auguste Neyroud, Agroscope RAC Changins, Station fédérale de recherches agronomiques

Impressum

ISSN	1241-4393 Schriftenreihe der FAL
ISBN	3-905608-72-3
Editeur	Agroscope FAL Reckenholz, Station fédérale de recherches en agroécologie et agriculture, Reckenholzstrasse 191, CH-8046 Zurich Téléphone ++ 41 (0)44 377 71 11 info@fal.admin.ch www.reckenholz.ch
Rédaction	Gerhard Hasinger, Service Romand de Vulgarisation Agricole, CH-1000 Lausanne 6
Traduction et adaptation française	Gerhard Hasinger et Elise Saunier, Service Romand de Vulgarisation Agricole, CH-1000 Lausanne 6
Préface de l'édition française	Denis Baize, Directeur de recherche en Sciences du sol, INRA d'Orléans, Avenue de la Pomme de Pin - Ardon, BP 20619, F-45166 Olivet cedex
Résumé français	Jean-Auguste Neyroud, Agroscope RAC Changins, Station fédérale de recherches agronomiques, CH-1290 Nyon
Relecture de la version française	Denis Baize Jean-Auguste Neyroud
Concept Photos	Ursus Kaufmann/Gabriela Brändle Gabriela Brändle
Prix	CHF 45.-, € 30.-, TVA incl.



FAL RECKENHOLZ

Une recherche pour l'agriculture et la nature

Copyright by FAL 2004

Proverbe

Dans nos réflexions sur la structure du sol,
 nous avons le sentiment que des aspects importants
nous échappent encore.

(d'après «L'île de Sakhaline» de Anton Pavlovitch Tchekhov,
librement adapté)

Sommaire

Préface de l'édition française	VI
Avant-propos de l'édition française	VIII
Avant-propos de l'édition allemande	IX
Résumé en français	X
Résumé en allemand	XI
Résumé en anglais	XII
1. Notions de base	1.1-1
1.1 Conception et objectifs de la méthode	1.1-1
1.2 Termes techniques	1.2-1
1.3 Types de structure: Identification et description	1.3-1
2. Les unités structurales	2.1-1
2.1 Introduction	2.1-1
2.2 Tableaux comparatifs	2.2-1
2.3 Clé de détermination	2.3-1
2.4 Description détaillée des types d'u.s et quelques problèmes de détermination	2.4-1
3. Application de la méthode sur le terrain	3.1-1
3.1 Introduction	3.1-1
3.2 Marche à suivre: Prise d'échantillons et fractionnement	3.2-1
3.3 Fractionnement d'un échantillon	3.3-1
3.4 Propriétés mécaniques de la structure du sol	3.4-1

4. Evaluation de la qualité de la structure	4.1-1
4.1 Introduction	4.1-1
4.2 Propositions d'une évaluation chiffrée de la structure du sol par un système de notation en vue de la production végétale	4.2-1
4.3 Un exemple simple	4.3-1
4.4 Interprétation des résultats	4.4-1
4.5 Formulaire pour l'évaluation chiffrée de la structure	4.5-1
5. Notions complémentaires	5.1-1
5.1 Dynamique de la structure du sol et observation visuelle	5.1-1
5.2 Moyens de vérification	5.2-1
5.3 Deux exemples d'application de la méthode	5.3-1
5.4 Perspectives	5.4-1
6. Planches photographiques	6.0-1 – 6.7-3
Annexe 1 Liste des figures	7.1-1
Annexe 2 Glossaire franco - suisse	7.2-1
Annexe 3 Présentation graphique des critères géométriques distinctifs	7.3-1
Annexe 4 Bibliographie	7.4-1

Préface de l'édition française

Tous les pédologues, comme les agronomes et les forestiers, savent l'importance de l'état structural instantané des différents horizons d'un sol et notamment de sa partie supérieure, remaniée par les façons culturales, et que l'on peut nommer l'épisolum cultivé.

La disposition relative de la matière solide et des vides conditionne en effet la circulation de l'eau, de l'air et des autres gaz. Elle détermine donc également la présence et l'activité des organismes vivants (racines, mésofaune, microflore), le ressuage spontané des excès d'eau ainsi que l'importance du réservoir hydrique et, in fine, l'enracinement des plantes, celles-ci développant leurs racines préférentiellement dans les espaces inter-agrégats.

Cet arrangement relatif des particules solides et des vides est encore plus important dans le cas des horizons labourés où les interventions de l'agriculteur se succèdent à un rythme rapide et avec de fortes énergies, alternant des actions désagrégeantes et écrasantes ou, au contraire, tassantes et compactantes. D'autres facteurs de fragilité s'y ajoutent, tels que l'absence de protection végétale durant de longues périodes hivernales, le passage répété d'engins lourds, la baisse tendancielle des taux de matières organiques ou la diminution de l'activité biologique suite à l'apport de substances xénobiotiques tels les pesticides.

Depuis longtemps, l'étude de la structure était considérée comme un exercice purement qualitatif. Selon Daniel Hillel (1984), «Il n'y a pas de méthode pratique de mesure de la structure... C'est un concept qualitatif... Les méthodes proposées pour la caractériser sont en fait des méthodes indirectes qui mesurent telle ou telle propriété influencée par la structure plutôt que la structure elle-même».

Et pourtant, la méthode proposée dans le présent ouvrage a bien comme objectif la quantification, sur le terrain, de la qualité de la structure des horizons de surface des sols agricoles, sans oublier pour autant le rôle des horizons plus profonds, puisqu'il est prévu d'observer et d'évaluer jusqu'à une profondeur de 50 cm.

Félicitons donc les agro-pédologues suisses pour s'être lancés résolument dans cette entreprise ambitieuse, réaliser ce qui n'avait jamais été réellement fait: la quantification par un protocole standardisé de la «qualité de la structure». Mais cette entreprise est aussi fort périlleuse. Il n'est pas facile de standardiser totalement quand on opère in situ, le plus gros problème étant probablement un état d'humidité non contrôlé et variant largement dans le temps comme dans l'espace. D'autres difficultés peuvent provenir de l'abondance des racines (sous prairie) ou de la présence de nombreux graviers. Comment faire, enfin, pour minimiser le rôle joué par l'opérateur ?

Il est d'ores et déjà prévu de mettre sur pied un référentiel d'interprétation basé sur de nombreuses mesures et étalonné sur d'autres critères, notamment les types de sols, le mode d'exploitation agricole et les techniques de travail du sol employées.

Il sera utile de vérifier rapidement la répétabilité opératoire (par plusieurs personnes différentes, dans la même parcelle au même moment), mais aussi la variabilité spatiale au sein d'une même parcelle agricole et la variabilité temporelle d'une année à l'autre, évaluée au même stade du cycle cultural !

L'indice chiffré final sera un indicateur dont la sensibilité, mais aussi la robustesse, devront être testées face à ces trois

variabilités. Nos collègues suisses ont donc encore beaucoup de pain sur la planche et nous suivons leurs travaux avec le plus grand intérêt !

Cet ouvrage fait référence explicite à Gautronneau et Manichon (1987). Sa publication est l'occasion de rendre hommage à l'initiateur de cette école, Stéphane Hénin, lequel vient de s'éteindre le 4 juin 2003. C'est lui qui a formulé et explicité, dès 1960, le concept de «profil cultural», novateur à l'époque et toujours parfaitement d'actualité.

Félicitons enfin les auteurs pour une présentation claire et aérée et des illustrations fort bien venues.



Denis Baize

Directeur de recherche en Sciences du sol,
INRA d'Orléans, Avenue de la Pomme de Pin - Ardon,
BP 20619, F-45166 Olivet cedex

Orléans, le 23 mars 2004

Avant-propos de l'édition française

L'édition française du Cahier de la FAL no 41 «Bodengefüge. Ansprechen und Beurteilen mit visuellen Mitteln» n'est pas simplement une traduction ou une adaptation aux spécificités pédologiques de la Suisse romande, mais une nouvelle édition de la version allemande, profondément retravaillée à cette occasion. Ce travail a été entrepris avec l'accord et la collaboration des auteurs et n'a pas modifié les principes de la méthode. Par contre, il a apporté des améliorations au niveau de la présentation didactique et du contenu scientifique.

Au niveau de la présentation didactique, nous sommes passés de trois à six chapitres et nous avons placé les 27 planches photographiques à la fin de l'ouvrage. Chaque chapitre commence par une brève présentation du contenu et une définition des termes techniques utilisés. Nous espérons que ces modifications faciliteront l'accès à cet ouvrage.

Au niveau du contenu pédologique, nous avons introduit le terme d'unité structurale (u.s) comme terme générique pour tous les agrégats formés par les processus naturels et anthropiques.

Concernant les différents types d'u.s fortement influencés par l'intervention de l'homme, nous sommes proches de la terminologie du «profil cultural» de Gautronneau Y., Manichon H., 1987. Cette méthode est couramment utilisée en Suisse romande. Néanmoins, il y a des différences entre les deux approches et une comparaison approfondie des deux méthodes de description et de classification reste à faire. Pour éviter

des confusions, nous utilisons les termes «motte O» (comme ouverte) et «motte C» (comme compactée). Les mottes C existent sous deux formes: «motte C arrondie» et «motte C anguleuse», qui créent des espaces inter-agrégats différents et qui sont caractérisés par d'autres niveaux de cohésion. Nous utilisons en plus le terme de «résidu de la déstructuration» pour décrire la part de terre fine d'un échantillon qui résulte de la destruction des u.s par les processus naturels et anthropiques.

Nous aimerions également proposer cette méthode aux spécialistes de la structure du sol en France voisine. Pour cette raison, nous avons confié la relecture de l'ouvrage à Monsieur Denis Baize, directeur de recherche en sciences du sol à l'INRA d'Orléans. Nous le remercions très chaleureusement de sa précieuse collaboration. Sur sa proposition, nous avons introduit un glossaire franco-suisse des termes pédologiques différents. Dans cet ouvrage, ils sont signalés par une note de bas de page.

Nous avons daté chaque page et introduit une numérotation des pages par chapitre, pour permettre aux lecteurs d'intégrer dans leur classeur les futures mises à jour.

Nous rappelons que cet ouvrage est encore en plein développement, surtout en ce qui concerne les valeurs de référence pour l'évaluation chiffrée de la structure, l'extension de la méthode aux sols sous le régime du semis direct et l'extension de la méthode aux types de sol autres que ceux du Plateau suisse.



Gerhard Hasinger
Service romand de vulgarisation agricole

Lausanne, 15.3.2004

Avant-propos de l'édition allemande

Un des objectifs de l'agriculture durable est de réunir les meilleures conditions possibles pour favoriser le développement racinaire des plantes. Le travail du sol doit être conçu de manière à établir un équilibre entre les processus qui détériorent la structure du sol et ceux qui l'améliorent. Il est nécessaire d'éviter une détérioration progressive de la structure du sol.

Les conditions-cadres économiques et les évolutions techniques ne favorisent cependant pas un travail du sol conduit de manière durable: les machines agricoles sont toujours plus lourdes et les outils de travail du sol toujours plus agressifs envers la structure du sol, d'autant plus qu'ils sont parfois employés en conditions peu propices. Le risque est donc que les caractéristiques agronomiques de la structure du sol, telles que le régime air-eau, ou encore les conditions d'enracinement, évoluent vers des états défavorables, sans parler des autres fonctions écologiques du sol.

Afin de maintenir une bonne structure du sol, il est important d'identifier facilement les risques sur le terrain, par exemple grâce au test à la bêche. Avec le présent ouvrage «La structure du sol: observer et évaluer», nous voulons mettre à disposition une méthode d'appréciation standardisée qui permet, avec des moyens simples, de décrire de manière fiable la structure du sol. La méthode doit cependant remplir certaines exigences

scientifiques: la standardisation permet de comparer l'évolution de la structure du sol dans le temps et dans l'espace. Cette méthode est un outil pour les conseillers et conseillères agricoles, pour les services cantonaux de protection du sol et les bureaux privés qui conduisent des études de sol et de milieux écologiques.

Le cœur de cet ouvrage se compose de planches photographiques avec la description des différents types d'unités structurales et d'une clé de détermination du type et de l'état de la structure. La longue expérience de spécialistes de la pédologie et de la cartographie des sols est à la base de ce manuel qui utilise des caractéristiques visuelles pour la description de l'état de la structure. Comme la forme et le fonctionnement de la structure sont étroitement liés, une évaluation visuelle - et reproductible - est possible. Dans cet ouvrage, tous les types d'unités structurales rencontrés sont recensés et répartis par classe de taille. Ceci permet de réaliser une évaluation chiffrée de la structure sur le terrain.

Je remercie ici chaleureusement les auteurs ainsi que les spécialistes des administrations cantonales, des hautes écoles et des bureaux privés qui, par leurs nombreuses suggestions et remarques constructives, ont contribué à la qualité du présent ouvrage.



Franz X. Stadelmann
Responsable du domaine de recherches «Ressources
environnementales / protection de l'environnement»
Agroscope FAL Reckenholz

Zurich, avril 2002

Résumé

Une méthode est proposée pour l'appréciation visuelle et tactile de l'état structural du sol au champ. En raison du caractère partiellement empirique de l'appréciation des formes géométriques et des propriétés des constituants de la structure, des définitions précises de chaque terme utilisé sont données.

Le concept d'«unité structurale» (u.s) est développé. Une u.s est le résultat de l'action de forces antagonistes d'organisation, de transformation, de déstructuration et de réorganisation. Elle se forme par des processus naturels d'agrégation et de ségrégation et par des processus anthropiques de déformation et de fragmentation. Chaque sol contient plusieurs types d'u.s, dont la présence témoigne des contraintes auxquelles il a été soumis. La structure du sol se modifie avec le temps.

La marche à suivre pratique débute par un test de chute, effectué séparément sur chacune des couches ou horizons de l'échantillon prélevé, qui permet la mise en évidence des unités

structurales. Le matériau est ensuite tamisé sur une batterie de tamis et réparti en fractions de tailles différentes, qui sont pesées. Les unités structurales présentes dans chaque tamis sont identifiées selon des critères de contour, d'isotropie, de rugosité et de résistance. Des tests complémentaires portant sur la cohésion des u.s et la part de résidus fins sont également effectués.

Les résultats des divers tests sont interprétés selon un système de points qui débouche sur l'attribution d'une note de structure de chaque horizon analysé. Le calcul de la note est effectué par un programme informatique de traitement des données.

Une série de planches photographiques, quelques éléments d'aide à la décision et quelques exemples pratiques permettent à l'utilisateur de valider ses choix.

Jean-Auguste Neyroud
Agroscope RAC Changins

Nyon, 26.02.04

Zusammenfassung

Wir stellen eine felddaugliche Methode zur visuellen und taktilen Beschreibung des Bodengefüges vor. Eine konsistente Beurteilung von geometrischen Formen und von weiteren Merkmalen des Gefüges ist stark vom Erfahrungsschatz abhängig. Um diese Vorgänge weitgehend reproduzierbar zu machen, werden die erforderlichen Fachbegriffe präzise umschrieben und Entscheidungshilfen bereitgestellt.

Grundlegend ist die Gefügeeinheit, französisch «*unité structurale*» bzw. «*u.s.*». Gefügeeinheiten entstehen fortwährend durch ganz unterschiedliche Vorgänge im Boden, welche Veränderungen ihrer Organisation, ihre Umwandlung, Zerstörung und (Wieder)aufbau zur Folge haben. Es werden ‚natürliche‘ Prozesse, wie Aggregation oder Segregation, und ‚anthropogene‘ Prozesse, wie Verformung oder Fragmentierung, unterschieden. Jeder Boden enthält mehrere Gefügeeinheit-Typen. Das Bodengefüge verändert sich mit der Zeit.

Die Ansprache des Gefügezustandes beginnt mit einem Falltest der zu untersuchenden Schichten einer Bodenprobe. Er ermöglicht, die Gefügeeinheiten freizusetzen. Danach werden die Gefügeeinheiten mit einem Siebsatz in Grössenklassen unterteilt und die Fraktionen gewogen. In den Fraktionen werden die vorkommenden Typen der Gefügeeinheit mittels Umrissform, Durchmesser und Oberflächeneigenschaften bestimmt. Zusätzlich wird auch deren Druckfestigkeit getestet und der Anteil der kleinsten Gefügeelemente ($<0,2$ mm) bestimmt.

Die Ergebnisse werden nach einem Punktierungssystem interpretiert und jede untersuchte Schicht wird mit einer Punktzahl bewertet. Die Berechnungen werden mithilfe eines EDV-Programmes durchgeführt.

Eine Serie von Bildtafeln, Entscheidungshilfen und einige Beispiele aus unserer Untersuchungstätigkeit erleichtern dem Benutzer der Methode die Ansprache des Gefüges und die Interpretation der Untersuchungsergebnisse.

Bemerkung: Die Erstveröffentlichung der Methode erfolgte 2002 in deutscher Sprache unter dem Titel «Bodengefüge - Ansprechen und Beurteilen mit visuellen Mitteln», Schriftenreihe der FAL 41. An diesem Text nahmen wir viele didaktisch begründete, aber auch einige inhaltliche, Änderungen vor. Dabei konnten wir die Erfahrungen aus Kursen, in denen wir die Methode praktisch weitervermittelt haben, zu zahlreichen Verbesserungen nutzen. Begrifflich haben wir uns der in Frankreich gebräuchlichen Methode des «*Profil cultural*» angenähert. Zweck und Vorgehensweise der Methode sind jedoch in beiden Veröffentlichungen die gleichen.

Gerhard Hasinger, SRVA Lausanne
Jakob Nievergelt, Milan Petrusek et
Peter Weisskopf, Agroscope FAL Reckenholz

19. Juli 2004

Summary

Keywords: soil structure, visual method, soil aggregate, classification, evaluation

In this monograph the method on «visual classification of soil structure» is presented. It describes soil structure in the field as well as in the lab by using only visually seizable characteristics of a soil structure. A consistent assessment of aspects like geometrical shapes and other characteristics of soil structure depends strongly on experience. In order to attain reproducible description and assessments, the necessary technical terms and decision support tools are precisely described.

The basis of this visual classification method are structural units (s.u.'s). S.u.'s are constantly formed by very different processes in soil which lead to changes in its structure by transformation, destruction and (re-)structuration of soil particles. Natural processes like aggregation or segregation are distinguished from anthropogenic processes like deformation or fragmentation. Every soil contains several types of s.u.'s, and every soil structure is changing in time.

The visual evaluation of soil structure starts with a falling test carried out with a soil sample taken from the soil layer under investigation. This falling test allows for breaking up the whole compact soil structure in single s.u.'s. Afterwards the s.u.'s are separated in size classes by use of a battery of sieves, and the resulting size-fractions are weighed. In these size-fractions the occurring s.u.-types are characterized by their geometrical form (contour, length of axes, angles and edges) and their surface qualities (roughness and visible pores). In addition the resistance of the s.u.-types against mechanical stresses is tested

and the fraction of the smallest s.u.-elements ($< 0,2$ mm) determined.

The results of this procedure are evaluated using a point system which is partly quantitative and partly semi-quantitative; the structure of every analyzed soil layer is numerically expressed by weighted average of points. Calculations are done with the help of a computer program.

A series of photographic illustrations, a decision support scheme and a few case studies out of our practical experience may facilitate to visually assess the quality of a soil structure and to interpret the results of the procedure properly.

Remark: This method has first been published in German language as number 41 of the FAL publication series under the title «Bodengefüge - Ansprechen und Beurteilen mit visuellen Mitteln» in 2002. This French text has been modified extensively in order to improve it didactically, but also in content. These improvements are the result of our experiences gained in courses which we offered for the practical training of this method. The French terms have been adapted to the terms of the method «Profil cultural», which is widely used in France. However, objectives, notions and procedure of the method are the same in both the German and the French publication.

Gerhard Hasinger, SRVA Lausanne
Jakob Nievergelt, Milan Petrasek et
Peter Weisskopf, Agroscope FAL Reckenholz

August 13th 2004

1. Notions de base

1.1 Conception et objectifs de la méthode

La structure est l'arrangement des particules minérales et organiques du sol. On observe les unités tridimensionnelles cohérentes et distinctes des arrangements voisins. Ces unités sont appelées unités structurales (u.s) et sont caractérisées par leur forme géométrique, leur taille, leur genèse, ainsi que par leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques (fig. 1c).

La structure est le résultat d'un processus évolutif. Elle se transforme sous l'impact des processus naturels et de l'activité humaine liée à la culture du sol. A partir de la structure dite primaire¹ du matériau parental, le plus souvent particulière ou massive, une nouvelle organisation se met en place durant la pédogenèse.

L'état structural du sol est l'un des paramètres les plus importants assurant la bonne croissance des plantes. Pourtant, l'appréciation de l'état structural du sol est complexe. Elle se fait de préférence au champ et fait appel à des critères fortement dépendants de l'opérateur. Il importe par conséquent de définir avec la plus grande précision les critères de description et d'identification des u.s. Finalement, nous souhaitons encourager l'observation de la structure, parce qu'elle est aussi un outil

de pilotage précieux dans les mains des agriculteurs. Elle leur permet de naviguer entre les contraintes économiques et écologiques dans l'objectif de la gestion durable des sols.

Le but de la présente brochure est de proposer une marche à suivre pour la détermination de l'état structural du sol, directement sur le terrain. Elle utilise des critères bien définis comme le type, la taille et le poids des u.s. La méthode s'applique à un échantillon prélevé à la partie supérieure de la couverture pédologique; il mesure en général 50 cm en profondeur et il est le plus souvent subdivisé en 4 couches. Pour pouvoir apprécier la structure de toute une parcelle, il est nécessaire d'examiner plusieurs échantillons représentatifs pris dans la parcelle selon un plan défini.

Lors de la conception de la méthode, nous ne nous sommes pas appuyés uniquement sur notre propre expérience de cartographie des sols publiée dans «Cartographie et estimation des sols agricoles» (FAL, 1997), mais aussi sur les publications suivantes: Baize D., Jabiol B., 1995; Becher H.H., 2000; Diez Th., 1997; Hasinger G., 1993; Manichon H., 1982.

La brochure est publiée sous forme de classeur pour faciliter les mises à jour. Les 6 chapitres de la brochure présentent les sujets suivants:

Chap. no	Titre	Contenu
1	Notions de base	Introduction, vue d'ensemble, description des u.s, dynamique des transformations des u.s.
2	Les unités structurales	Photos et critères visuels distinctifs des différents types d'u.s, clé de détermination et description détaillée.
3	Application de la méthode sur le terrain	Démarches sur le terrain et équipement nécessaire.
4	Evaluation de la qualité de la structure	Concept d'évaluation de la qualité de la structure, leurs notes et leur correction, formulaire informatique pour noter les observations et calculer les résultats.
5	Notions complémentaires	Exemples d'application, moyens de vérification, perspectives.
6	Planches photographiques	27 planches photographiques présentant des différents types d'u.s en grandeur nature, ordonnés selon leur taille. Les u.s proviennent des sols agricoles du Plateau suisse.

Figure 1a: Contenu des chapitres

1.2 Termes techniques

Dans un souci de clarté, nous allons préciser la définition des principaux termes techniques concernant la structure du sol dans le tableau ci-dessous. D'autres termes techniques sont définis dans les commentaires de la figure 1c et dans l'introduction des chapitres 2, 3 et 4 ainsi que dans la publication Baize D., Jabiol B., 1995 «Guide pour la description des sols», INRA Editions Paris.

duction des chapitres 2, 3 et 4 ainsi que dans la publication Baize D., Jabiol B., 1995 «Guide pour la description des sols», INRA Editions Paris.

Terme technique	Définition
Observation macroscopique du sol	
Structure	Arrangement spatial des particules minérales (sable, silt, argile) et de la matière organique créant un système de pores qui peuvent accueillir l'air, l'eau, les organismes du sol et les racines. Il existe une grande variété de structures.
Structure primaire ¹	Etat d'une structure caractérisé par l'absence d'unités structurales et dépendant du matériau originel. La structure primaire peut être particulaire (dominance de sable et silt) ou massive (dominance d'argile).
Structure secondaire ¹	Etat d'une structure caractérisé par la présence d'unités structurales, formées au cours de la pédogenèse, et dont le type dépend des conditions physiques, chimiques, biologiques et hydrologiques du site ainsi que de l'action humaine.
Unité structurale (u.s)	Unité tridimensionnelle d'un arrangement cohérent et défini des particules minérales et organiques, distinct des arrangements voisins. L'unité structurale est définie par son mode de formation, sa forme géométrique et sa taille.
Type d'unités structurales	Terme permettant de qualifier et de classer les u.s: grumeau, polyèdre, motte, etc.
U.s issue de processus naturels	U.s résultant d'un arrangement de particules minérales et organiques dû à des processus pédologiques: grumeau, granule, polyèdre, polyèdre émoussé, prisme. Synonyme: agrégat (dans un sens large).
U.s issue de processus anthropiques	U.s résultant de processus naturels puis soumise à des transformations anthropiques: motte O, motte Car, motte Can, fragment (description, voir figure 1d), plaquette. Synonyme: motte (dans un sens large).
Déstructuration	Processus de destruction de la structure secondaire par choc, éclatement ou décomposition des substances liant les particules minérales et organiques entre elles.
Résidu de la déstructuration	Éléments du sol d'un diamètre < 0.2 mm (micro-agrégats, sable fin, silt, etc.) recueillis dans le récipient inférieur de la batterie de tamis.
Observation microscopique du sol	
Micro-agrégat	U.s de taille inférieure à 0.2 mm (sable non compris).
Matrice	Terme qualifiant un volume de sol non perturbé, dans lequel on observe des particules minérales et organiques et les vides. Adjectif correspondant: matriciel.

Figure 1b: Termes techniques concernant la structure du sol

¹Pour les termes utilisés en France, consulter l'annexe 2 «Glossaire».

1.3 Types de structure: identification et description

La structure d'un sol est à court terme en évolution permanente, contrairement à la texture.

La figure 1c présente la dynamique complexe de transformation d'un type d'u.s à un autre et décrit les processus qui en sont à l'origine. La figure 1d donne un inventaire de tous les

types d'u.s que l'on peut observer, ainsi que leurs critères d'identification. La figure 1e montre la localisation préférentielle des types d'u.s dans le profil. Les figures 1b, 1c, 1d et 1e forment ensemble la base de la méthode décrite dans cet ouvrage.

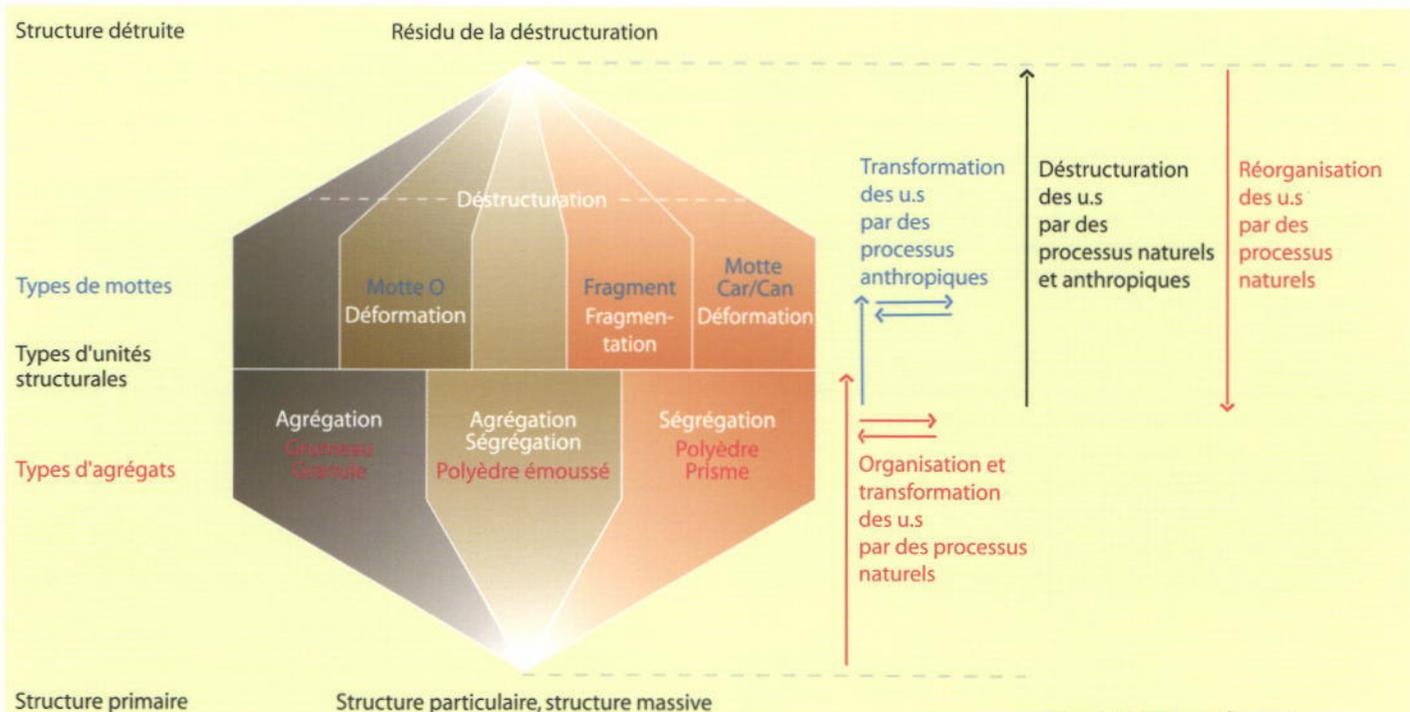


Figure 1c: Types d'u.s et processus de leur transformation dans un sol agricole

Processus naturels d'organisation et de réorganisation des u.s

a. Agrégation

Les **granules** sont formés de particules minérales et de différents colloïdes (argile, oxyde de fer, humus, etc.) liés entre eux par le mucus de la micro-flore. Les granules se présentent souvent sous forme d'excréments de la méso- et macro-faune du sol.

Les **grumeaux** sont formés de granules et d'autres particules du sol liés par les hyphes des champignons du sol et les poils absorbants des racines. Ce processus d'agrégation se déroule surtout dans les horizons biologiquement actifs (Ah, Aa)¹.

b. Ségrégation

La formation des **polyèdres** et des **prismes** résulte de processus physiques de gonflement et de rétraction des argiles. L'intensité et la fréquence de ces processus sont plus élevées dans l'horizon A que dans les horizons B et BC.

c. Agrégation et ségrégation combinées

Les surfaces des u.s issues de la ségrégation sont émoussées par des processus biologiques. Elles se couvrent d'un revêtement humique et deviennent plus rugueuses et forment des **polyèdres émoussés**. Ceux-ci sont surtout formés dans les horizons Ah et AB.

Processus anthropiques de transformation des u.s

a. Déformation

Le passage des machines agricoles, le travail du sol et la

pâturation des animaux entraînent la déformation des u.s (compactage, cisaillement, lissage). Les u.s originelles sont transformées en **mottes O**, **mottes C** et en plaquettes. Ces processus se déroulent surtout dans les horizons Ah, Ahp, AB et B.

b. Fragmentation

Les **fragments** sont formés par les outils de travail du sol à partir des mottes C (plus rarement mottes O, polyèdres et polyèdres émoussés). Ces processus se déroulent dans l'horizon Ahp (les processus physiques naturels de gel-dégel et de sécheresse fragmentent également les mottes à taux d'argile élevé).

Processus naturels et anthropiques de déstructuration des u.s

La décomposition des ciments liant les particules ainsi que les processus naturels et anthropiques (influence du climat, passage des machines agricoles, travail du sol et pâturation des animaux) déstructurent les u.s en détachant des éclats. L'ensemble des éléments obtenus < 0.2 mm (micro-agrégats, particules minérales et organiques) forme le **résidu de la déstructuration**. Ces processus ont lieu surtout en surface du sol et dans les horizons superficiels du sol (Ahp) à taux d'argile et d'humus faibles et avec une activité biologique réduite.

Les processus décrits ci-dessus se déroulent simultanément. Pour cette raison, un échantillon peut contenir plusieurs types d'u.s.

¹Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2.

La figure 1d offre une vue d'ensemble des types d'u.s et de leurs critères d'identification. Des caractéristiques telles que la taille, le contour et l'état de la surface des u.s permettent de distinguer visuellement les différents types d'u.s.

Les propriétés des u.s découlent aussi de leur genèse: par exemple des arêtes nettes sont caractéristiques des polyèdres

et prismes; mais leur formation s'explique par les forces physiques actives lors de la ségrégation.

L'horizon dont proviennent les u.s offre une seconde indication pour leur identification. Puisque certains processus d'organisation n'agissent que dans des zones définies du profil, la gamme des types d'u.s présents dans ces zones est souvent restreinte, comme il ressort de la figure 1e.

Type d'u.s	Code	Processus naturel prédominant dans la genèse de l'u.s	Description sommaire de la forme géométrique et de la surface (définition des termes techniques, voir figure 2a)	Taille typique en mm (maille du tamis, voir fig 4c, 4h)
Structure primaire (absence d'u.s)				
Structure particulaire	Sp	Sans formation d'u.s.	Particules élémentaires non liées entre elles.	-
Structure massive	Sm	Sans formation d'u.s.	Bloc massif .	-
U.s issues de processus naturels				
Prisme	Pr	Ségrégation.	Contour très souvent allongé, anguleux et droit; arêtes nettes; orientation verticale; surfaces souvent lisses.	> 20
Polyèdre	Po	Ségrégation.	Contour très souvent sphérique, rarement allongé, anguleux; arêtes souvent nettes; surfaces localement lisses.	2-100
Polyèdre émoussé	Pé	Ségrégation et agrégation.	Contour sphérique à irrégulier, localement onduleux; arêtes arrondies; surfaces rugueuses et poreuses.	2-50
Granule	Gra	Agrégation colloïdale.	Contour sphérique; surfaces rugueuses, peu poreuses.	< 5
Grumeau	Gru	Agrégation biologique.	Contour sphérique à irrégulier, onduleux; surfaces très rugueuses, très poreuses.	1-10
Type d'u.s				
Code	Processus de transformation (type d'u.s d'origine)	Description sommaire de la forme géométrique et de la surface (définition des termes techniques, voir figure 2a)	Taille typique en mm (maille du tamis, voir fig 4c, 4h)	
U.s issues de processus anthropiques				
Motte O	MO	Transformation d'u.s formées par agrégation (Gru, Gra, Pé)	Contour souvent sphérique; arêtes arrondies (u.s roulées ou pétries); surfaces peu poreuses; compaction moyenne.	5-50
Motte C arrondie	MCar	Transformation d'u.s formées par ségrégation (Pr, Po)	Contour sphérique; arêtes arrondies (u.s compactées puis roulées ou pétries); forte compaction.	> 20
Motte C anguleuse	MCan	Transformation d'u.s formées par ségrégation (Pr, Po)	Contour souvent sphérique; arêtes nettes (u.s compactées); forte compaction.	> 20
Fragment	Fr	Fragmentation d'u.s de grande taille (MCar et MCan surtout)	Contour très irrégulier; surfaces de rupture planes; arêtes très nettes.	2-20
Structure détruite (micro-agrégats et autres particules < 0.2 mm)				
Résidu de la déstructuration	Rd ou Rdb	Déstructuration des u.s des couches supérieures du sol par des processus naturels et anthropiques	Micro-agrégats et autres particules du sol (en état libre: Rd; croûte de battance en surface du sol Rdb).	< 0.2

Figure 1d: Description des différents états de la structure et des types d'u.s

		Localisation				
		Horizon anthropique ou pédologique				
Type d'u.s	Code	Horizon organo-minéral de surface, sans travail du sol (Ah) ¹	Horizon organo-minéral de surface, avec travail du sol (Ahp)	Horizon de transition (AB)	Horizon altéré et structuré (B, Bt, Bw)	Matériau parental (C)
Structure primaire (absence d'u.s)						
Structure particulaire	Sp					
Structure massive	Sm					
U.s issues de processus naturels						
Prisme	Pr					
Polyèdre	Po					
Polyèdre émousé	Pé					
Granule	Gra					
Grumeau	Gru					
U.s issues de processus anthropiques						
Motte O	MO					
Motte C arrondie	MCar					
Motte C anguleuse	MCan					
Fragment	Fr					
Structure détruite (micro-agrégats et autres particules < 0.2 mm)						
Résidu de la déstructuration	Rd, Rdb					

	Le type d'u.s apparaît très souvent
	Le type d'u.s apparaît souvent
	Le type d'u.s apparaît rarement ou en faible quantité

¹Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2 «Glossaire».

Figure 1e: Apparition préférentielle des types d'u.s dans le profil
(en cas de terrassement ou remise en culture, des variations sont possibles)

2. Les unités structurales

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, les critères visuels distinctifs utilisés pour la description des différents types d'unités structurales sont présentés (figure 2a). Deux tableaux comparatifs (figures 2b et 2c) rassemblent les différentes u.s des catégories de taille 3 (5-10 mm) et de taille 5 (20-50 mm) qui sont illustrées par des photographies et par une description de leur forme géométrique. Une clé de détermination des types d'u.s est proposée dans la figure 2d.

Dans le chapitre 2.4, un tableau (figure 2e) offre une description détaillée des u.s selon leurs principales caractéristiques

géométriques, leur genèse et leurs transformations possibles en d'autres types d'u.s.

Les types d'u.s présentés sont représentatifs des sols agricoles du Plateau suisse. Ces sols sont pour la plupart des sols bruns ou sols bruns lessivés. Ils sont profonds et leur granulométrie peut être caractérisée comme «sable riche en limon à limon argileux» (taux d'argile entre 10 et 40%). Ces sols se sont formés durant plusieurs millénaires à partir de sédimentations fluvio-glaciaires et de roches molassiques (grès) sous influence d'un climat subatlantique. Il est fort probable que ces u.s soient représentatives des régions de l'Europe de l'Ouest et de l'Europe Centrale avec des conditions pédologiques et climatiques semblables.

Critères	Définition	Spécification des critères	Remarques
Critères géométriques			
Contour	Image d'u.s créée par une projection en deux dimensions, sans tenir compte des détails du périmètre.	Sphérique	Contour relativement rond avec des éléments convexes; les diagonales traversant le centre de gravité se trouvent à l'intérieur du contour.
		Allongé Irrégulier	Contour avec une direction préférentielle. Contour irrégulier, avec des éléments concaves; les diagonales peuvent se trouver partiellement à l'extérieur.
Détail du contour	Description détaillée du périmètre. Les spécifications peuvent changer d'un endroit à l'autre. Ceci est signalé par le terme «localement».	Anguleux	Avec des angles aigus et obtus ou autre pointe de forme géométrique variable.
		Onduleux	Alternance des éléments convexes et concaves, sans angles et pointes.
		Droit	Segments du périmètre relativement droits, souvent en combinaison avec des éléments anguleux .
Longueurs des diamètres	Description en 3 dimensions de l'u.s à l'aide de la relation entre les longueurs des diamètres par le centre de gravité de l'u.s. Calcul du quotient (Q) formé par le diamètre le plus long et le plus court.	Egales	Q < 1.5 ; U.s en forme de polyèdre ou de boule.
		Différentes	Q toujours > 1.2 Q souvent > 1.5 Q rarement > 2
		Très différentes	Q > 2 ; U.s allongée ou en forme de plaquette ou de forme mixte.
Etat de la surface. A la surface de l'u.s, on observe les critères suivants: arêtes, rugosité, porosité.			
Arêtes	Intersection de 2 plans.	Très nettes	Intersection très nette.
		Nettes	Intersection encore perceptible.
		Arrondies	Intersection arrondie.
		Sans, absentes	Intersection plus perceptible.
Rugosité	Ondulation d'une amplitude d'environ 1 mm de la surface. La rugosité peut couvrir une partie ou la totalité de la surface. Ceci est signalé par le terme «localement».	Très rugueuse	Amplitude de l'ondulation > 1 mm, mais au maximum 3 mm .
		Rugueuse	Amplitude de l'ondulation environ 1 mm.
		Peu rugueuse	Amplitude de l'ondulation < 1 mm, bien visible et tactile.
		Lisse Striée	L'amplitude de l'ondulation n'est plus visible. Zone d'ondulation formée par des sillons parallèles.

Critères	Définition	Spécifications des critères	Remarques
Porosité	Le total des vides de toutes tailles (> 0.05 mm) est apprécié sur la surface de l'u.s. Estimation du pourcentage (P) des vides par unité de surface.	Très poreuse	P > 50%
		Poreuse	10% > P > 50%
		Moyennement poreuse	5% > P > 10%
		Peu poreuse	2% > P > 5%
		Très peu poreuse	1% > P > 2%
		Non poreuse	P < 1%
Critères non-géométriques			
Éclat	Manière dont la lumière est reflétée par la surface des u.s.	Luisant	Surfaces des u.s lisses et luisantes.
		Mat	Surfaces mates.
Couleur	Nuances et formes géométriques des couleurs observées.	Plus claire à l'intérieur	Différence de couleur à l'extérieur et à l'intérieur d'un u.s (avec un même taux d'humidité).
		En traînées	Bandes de couleur visibles à la surface des u.s.
Fréquence	L'observation des u.s d'un même type ne montre pas toujours la même spécification d'un critère. Une estimation de la fréquence (F) devient nécessaire.	Toujours	95% < F, « toujours » n'est en principe pas mentionné.
		Très souvent	80% < F < 95%
		Souvent	20% < F < 80%
		Rarement	5% < F < 20%
		Jamais	F < 5%, « jamais » seulement mentionné si l'absence de critère permet d'identifier l'objet.

Figure 2a: Critères visuels distinctifs utilisés pour la description des différents types d'u.s (voir annexe 3 pour les illustrations des critères géométriques)

2.2 Tableaux comparatifs



	----- U.s issues de processus naturels -----			----- U.s issues de processus anthropiques -----	
Type d'u.s	Grand grumeau	Polyèdre émoussé moyen	Très petit polyèdre	Petite motte O	Fragment moyen
Code et cat. de taille ¹	Gru 3	Pé 3	Po 3	MO 3	Fr 3
Contour	Sphérique à irrégulier.	Sphérique à irrégulier.	Souvent sphérique, <i>rarement allongé.</i>	Très souvent sphérique.	Sphérique à irrégulier.
Détail du contour	<i>Onduleux, jamais anguleux.</i>	<i>Localement onduleux, rarement anguleux.</i>	<i>Anguleux, souvent droit.</i>	Rarement anguleux, onduleux ou droit.	<i>Anguleux et droit.</i>
Longueurs des diamètres	Différentes.	Egales à différentes.	Egales à très différentes.	Très souvent <i>égales.</i>	Très souvent <i>très différentes.</i>
Arêtes	<i>Absentes.</i>	Souvent arrondies ou absentes.	Très souvent <i>nettes à très nettes, rarement arrondies.</i>	Très souvent <i>arrondies, rarement nettes.</i>	<i>Très nettes.</i>
Surface	<i>Très rugueuse; poreuse; mate.</i>	<i>Très rugueuse à rugueuse; moyennement poreuse; mate; souvent plus claire à l'intérieur.</i>	Peu rugueuse, souvent <i>localement lisse; peu poreuse.</i>	Peu rugueuse, <i>localement lisse ou striée; peu à moyennement poreuse; couleur localement en trainées.</i>	Peu rugueuse, <i>localement lisse; peu à très peu poreuse; mate.</i>

¹ Les qualifications géométriques (petit, moyen, etc.) se réfèrent à la taille moyenne du type d'u.s (voir figure 5a)

Figure 2b: Critères visuels distinctifs des types d'u.s de la catégorie de taille 3 (5-10 mm).

Les spécifications des critères écrits en italique sont spécialement adaptées pour la détermination du type d'u.s en question.



	U.s issues de processus naturels			U.s issues de processus anthropiques	
Type d'u.s	Très grand polyèdre émoussé	Polyèdre moyen	Petit prisme	Grande motte O	Petite motte C arrondie
Code et cat. de taille ¹	Pé 5	Po 5	Pr 5	MO 5	MCar 5
Contour	Sphérique à irrégulier.	Sphérique.	Très souvent allongé.	Très souvent sphérique.	Sphérique à irrégulier.
Détail du contour	<i>Localement onduleux, rarement anguleux.</i>	<i>Anguleux, souvent droit.</i>	<i>Anguleux et droit.</i>	Rarement anguleux, onduleux ou droit.	Rarement anguleux, onduleux ou droit.
Longueurs des diamètres	Egales à différentes.	Egales à différentes.	Très souvent très différentes avec <i>orientation préférentielle verticale.</i>	Très souvent <i>égales.</i>	Egales à différentes.
Arêtes	Souvent arrondies ou absentes.	<i>Très souvent nettes, rarement arrondies.</i>	<i>Nettes.</i>	Très souvent arrondies, rarement nettes.	Très souvent arrondies.
Surface	<i>Très rugueuse à rugueuse; moyennement poreuse; mate; souvent plus claire à l'intérieur.</i>	Peu rugueuse, souvent <i>localement lisse</i> ; peu à très peu poreuse; <i>souvent luisante.</i>	<i>Faces verticales lisses, souvent à revêtement argileux, autres faces peu rugueuses; peu à très peu poreuse.</i>	Peu rugueuse, <i>localement lisse ou striée</i> ; très souvent peu poreuse; couleur <i>localement en traînées.</i>	Peu rugueuse, <i>souvent lisse</i> ; très souvent très peu poreuse; couleur <i>localement en traînées.</i>

¹ Les qualifications géométriques (petit, moyen, etc.) se réfèrent à la taille moyenne du type d'u.s (voir figure 5a)

Figure 2c: critères visuels distinctifs des types d'u.s de la catégorie de taille 5 (20-50 mm).

Les spécifications des critères écrits en italique sont spécialement adaptées pour la détermination du type d'u.s en question.

Les deux tableaux ci-dessus rassemblent différentes u.s de la même taille. Les types d'u.s sont caractérisés par le contour et le quotient des diamètres, ainsi que par les propriétés de la surface et la présence ou l'absence d'arêtes.

2.3 Clé de détermination

La clé de détermination (figure 2d) se base sur des caractéristiques géométriques des u.s: contour, arêtes, quotient des diamètres de l'u.s et état de la surface. Elle permet d'identifier le type d'u.s auquel on a affaire.

Face aux u.s d'une couche, on est souvent dans la situation de devoir trancher entre plusieurs alternatives. Notamment dans les horizons soumis à l'influence anthropique, dans lesquels des transformations des u.s ont lieu en permanence, on peut trouver un ou plusieurs types d'u.s dans chaque catégorie de taille. Il faut alors relever les types majoritaires. Le formulaire (figure 4h) sur lequel on note toutes les observations est adapté à cette complexité.

Pour valider la détermination, les planches photographiques et leur texte d'accompagnement qui fournit une description détaillée des u.s peuvent aussi être mises à contribution (chapitre 6).

D'autres réflexions et observations pédologiques permettent de contrôler la pertinence de la détermination:

- la genèse et la localisation des u.s dans le profil: en effet, les différents types d'u.s se trouvent préférentiellement dans certains horizons (figure 1e);
- la texture de l'u.s, en particulier la teneur en argile (test tactile): les arêtes sont par exemple d'autant plus nettes que la teneur en argile est élevée.

Étapes d'observation	Critères observés (voir figure 2a pour les définitions des critères)	Quotient des diamètres plus long / plus court	Taille	Type d'u.s. typique
1	Surface de l'u.s sans arêtes et sans parties planes → 2			
2	Longueurs des diamètres très souvent égales; contour très souvent sphérique; surface rugueuse à peu rugueuse, porosité moyenne.	Très souvent < 1.5	< 5 mm	Granule
2*	Longueurs des diamètres différentes à très différentes; contours onduleux; surface très rugueuse, très poreuse.	Souvent > 2	1 - 10 mm	Grumeau
1*	Surface de l'u.s avec arêtes nettes ou arrondies → 3			
3	Arêtes très souvent à toujours arrondies → 4			
4	Contour sphérique à irrégulier, localement onduleux; surface très rugueuse à rugueuse, moyennement poreuse, couleur souvent plus claire à l'intérieur.	Toujours > 1.2	2 - 50 mm	Polyèdre émoussé
4*	Contour sphérique; surface peu rugueuse → 5	Très souvent < 1.5		
5	Surface souvent striée, moyennement à peu poreuse, moyennement compactée.		5 - 50 mm	Motte O
5*	Surface souvent lisse, très souvent très peu poreuse, fortement compactée.		> 20 mm	Motte C arrondie
3*	Arêtes très souvent à toujours nettes → 6			
6	Longueurs des diamètres égales à différentes → 7	Très souvent < 1.5		
7	Surface souvent avec enveloppe argileuse, souvent lisse et luisante, non compactée.		> 10 mm	Polyèdre
7*	Surface peu rugueuse, localement lisse, très souvent mate, fortement compactée.		> 20 mm	Motte C anguleuse
6*	Longueurs des diamètres très souvent très différentes → 8	Très souvent > 2		
8	Diamètres les plus longs orientés préférentiellement dans une ou deux directions → 9			
9	Orientation préférentielle verticale, faces verticales souvent à revêtement argileux brillant.		> 20 mm	Prisme
9*	Souvent irrégulièrement aplaties, contour anguleux, arêtes nettes à très nettes.		2 - 10 mm	Très petit polyèdre
8*	Diamètres les plus longs orientés sans orientation préférentielle, arêtes très nettes, surfaces localement lisses.		2 - 20 mm	Fragment
	Structures primaires et détruites: critères observés			
	Sans formation d'u.s, particules élémentaires non liées entre elles, par exemple grains de sable.			Structure particulière
	Sans formation d'u.s, bloc massif (structure du matériau d'origine parfois visible).			Structure massive
	Éléments du sol < 0.2 mm (micro-agrégats, sable fin, silt, etc.).		< 0.2 mm	Résidu de la déstructuration

2.4 Description détaillée des types d'u.s et quelques problèmes de détermination

La figure 2e offre une description détaillée des u.s selon leurs principales caractéristiques géométriques, leur genèse et leurs transformations possibles en d'autres types d'u.s. Lors de l'analyse de la structure sur le terrain (chapitre 3), les types d'u.s sont déterminés pour chaque catégorie de taille.

La description des types d'u.s se réfère toujours à des sujets bien typés. La classification est par contre moins aisée pour les formes de transition entre deux types d'u.s (caractères moins marqués). Par ailleurs, la teneur en argile (et sa nature minéralogique et chimique) influence également la forme géométrique des u.s: les arêtes des prismes et des polyèdres sont plus

marquées dans les sols argilo-limoneux que dans les sols sablo-limoneux.

Les forces mécaniques exercées lors de la prise de l'échantillon, lors du test de chute et lors du tamisage - surtout en conditions humides - peuvent entraîner des déformations des u.s (surtout des arêtes; création éventuelle d'artefacts). L'identification des types d'u.s requiert par conséquent l'observation de leur forme géométrique originelle (non altérée). La forme géométrique originelle des u.s peut s'observer dans le profil, ou dans l'échantillon avant le test de chute et le tamisage.

Type d'u.s	Genèse; description sommaire	Localisation (Horizon); Taille	Critères visuels distinctifs			Description du processus de formation	Transformations privilégiées
			Forme géométrique	Etat de la surface	Porosité visible (% vol.)		
Grumeau	U.s formée par agrégation biologique.	Couches superficielles, biologiquement très actives (Ah ¹); 0.2-10 mm.	Contour sphérique à irrégulier, onduleux; longueurs des diamètres différentes à très différentes; sans arêtes.	Très rugueuse; mate.	Porreuse, >10%.	Des granules, de très petites particules du sol, des amas d'argile et oxydes de fer (= colloïdes, formés par les processus de dessiccation) sont recouverts d'un mucilage (polysaccharides, etc.) et liés par les hyphes des champignons du sol et les poils absorbants des racines.	Transformations très rapides entre les grumeaux et le résidu de la déstructuration; possible plusieurs fois par an.
Granule	U.s formée par agrégation (cimentation colloïdale).	Couches superficielles, biologiquement très actives, et couches plus profondes; < 5 mm.	Contour sphérique; longueurs des diamètres égales à différentes; sans arêtes.	Rugueuse à peu rugueuse; mate.	Peu porreuse, 2-5%.	Différents colloïdes et des petites particules sont liés par le mucus des organismes du sol. Ils sont souvent présents sous forme d'excréments altérés de la faune du sol.	Transformations rapides entre les granules, les grumeaux et le résidu de la déstructuration; possible plusieurs fois par an.
Polyèdre émoussé	U.s formée par ségrégation et agrégation.	Couches supérieures, biologiquement actives (AB, Ahp ou Ah); 2-50 mm.	Contour sphérique à irrégulier, localement onduleux; longueurs des diamètres égales à différentes; arêtes arrondies (par formation d'enveloppes humiques).	Très rugueuse à rugueuse; mate.	Moyennement porreuse, 5-10%.	Sous l'influence des organismes du sol, la surface des u.s est recouverte de mucus, hyphes de champignons, colloïdes, micro-agrégats et excréments de la faune. Ces derniers forment ainsi une sorte d'enveloppe humique sur les u.s, elles-mêmes issues de processus physiques de gonflement-rétraction d'argile.	Transformations rapides entre les polyèdres émoussés, les grumeaux et les petits polyèdres; possible plusieurs fois par an.
Polyèdre	U.s formée par ségrégation; localement avec revêtement argileux ou signes d'hydromorphie.	Couches médianes biologiquement peu actives et couches supérieures biologiquement actives (Ah: 2-20 mm; AB: 5-50 mm; Bw: 20-100 mm, Bgx: > 100mm).	Contour souvent sphérique, rarement allongé, anguleux, souvent droit; longueurs des diamètres égales à très différentes; arêtes nettes à très nettes; les u.s voisines ont souvent des faces complémentaires.	Peu rugueuse, localement lisse; localement luisante (revêtement argileux).	Selon la densité de l'u.s ou la profondeur de la couche: très peu porreuse (< 2%, Bgx) à peu porreuse (2-5%, Bw).	Les petits polyèdres (< 20 mm) sont formés à partir de plus grosses u.s dans les couches supérieures du sol, suite à des processus de dessiccation répétés (ainsi les processus de gel-dégel donnent des polyèdres anguleux, voire en forme d'écaïlles ou aiguilles). Les plus grands polyèdres sont issus de processus épisodiques de gonflement-rétraction d'argile dans les couches moyennes du sol. La taille des polyèdres augmente en profondeur parce que l'humidité est plus constante.	Transformations rapides entre les petits polyèdres, les polyèdres émoussés et le résidu de la déstructuration dans l'horizon Ah; plus profond (horizons AB ou B) et pour des polyèdres plus grands, les transformations sont plus lentes (et affectent essentiellement la taille des u.s).
Prisme	U.s formée par ségrégation; avec revêtement argileux, localement avec signes d'hydromorphie.	Couches médianes biologiquement peu actives (Bt, It: 20-100 mm; Bgx: > 100 mm).	Contour très souvent allongé, anguleux et droit; longueurs des diamètres très souvent très différentes avec orientation préférentielle verticale; arêtes nettes; les u.s voisines ont très souvent des faces complémentaires.	Peu rugueux; lisse; mate; faces verticales souvent à revêtement argileux.	Selon la densité de l'u.s ou la profondeur de la couche: très peu porreuse (<2%, Bgx) à peu porreuse (2-5%, Bt, It).	Suite aux variations d'humidité, des processus physiques de gonflement-rétraction d'argile donnent naissance à des unités structurales à orientation préférentielle verticale. Une illuviation d'argile recouvre les prismes d'une enveloppe; des frottements donnent un aspect lisse aux faces des u.s. argileuses (lissage).	Transformations lentes entre les prismes, les polyèdres et les polyèdres émoussés dans les horizons AB et B; les transformations rapides ne concernent que des variations de taille.

Figure 2e: Description des types d'u.s – 1. Types d'u.s issus de processus naturels ¹ Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2.

Type d'u.s	Genèse; description sommaire	Localisation (Horizon); Taille	Critères visuels distinctifs			Description du processus de formation	Transformations privilégiées
			Forme géométrique	Etat de la surface	Porosité visible (% vol.)		
Motte O	Souvent issue d'u.s formées par agrégation; modérément compactée.	Couches superficielles, biologiquement actives (Ahp ¹); 5-50 mm.	Contour très souvent sphérique; longueurs des diamètres très souvent égales; arêtes très souvent arrondies (par déformation: brassage, pétrissage).	Peu rugueuse, localement lisse ou striée; très souvent mate; modérément compactée.	Peu poreuse (2-5%) à moyennement poreuse (5-10%) selon la texture.	Principalement par brassage et pétrissage de grumeaux, granules et polyèdres émoussés; les mottes O de petite taille sont plutôt issues d'u.s formées par agrégation. En semis direct, le passage répété des pneus forme des mottes O à orientation horizontale (partiellement avec des angles vifs, dans les couches superficielles).	Transformations très rapides en grumeaux, granules, polyèdres émoussés ou résidu de la déstructuration.
Motte C	Souvent issue d'u.s formées par ségrégation; fortement compactée.	Couches superficielles, biologiquement actives, et autres couches soumises à une influence anthropique; > 20 mm.	Contour très souvent sphérique, souvent anguleux et droit; longueurs des diamètres égales à différentes; arêtes arrondies (par déformation: brassage, pétrissage) ou nettes.	Peu rugueuse, localement lisse; très souvent mate; fortement compactée.	Très peu poreuse (< 2%) à peu poreuse (2-5%) selon la texture.	Par déformations plastiques intensives de polyèdres et de polyèdres émoussés, renforcées en conditions humides du sol; les mottes C de grande taille sont plutôt issues d'u.s formées par ségrégation.	Transformations lentes en polyèdres émoussés, polyèdres ou résidu de la déstructuration.
Fragment	Issu d'une fragmentation; fortement compacté.	Couches superficielles, biologiquement actives (Ahp); 2-20 mm.	Contour sphérique à irrégulier, anguleux et droit; longueurs des diamètres très souvent très différentes; arêtes très nettes.	Très souvent peu rugueuse, avec surfaces de rupture lisses; très souvent mates.	Très peu poreuse (< 2%) à peu poreuse (2-5%) selon l'u.s d'origine.	Par fragmentations mécaniques de mottes C, plus rarement de grandes mottes O, polyèdres et polyèdres émoussés ou par brisures de plaquettes; en conditions sèches du sol.	Le type d'u.s d'origine influence la durée de réorganisation par des processus naturels.
Plaquette	Formée par brassage et pétrissage; compactée.	En dessous des couches travaillées (très souvent semelle de labour) et dans les remises en culture (Ahp _x : 20-50 mm/ AB _x : > 50 mm).	Orientation préférentielle horizontale, aplatie (pression).	Lisse.	Très peu poreuse (< 2%).	Par compactage intense, renforcé en conditions humides du sol (= déformation plastique); souvent avec fissurations dues à la décompression.	La densité de l'u.s d'origine influence la durée de réorganisation à l'état originel.

¹ Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2.

Figure 2e: Description des types d'u.s – 2. Types d'u.s issus de processus anthropiques

Désignation	Description sommaire	Localisation (Horizon); Taille	Critères visuels distinctifs	Description détaillée du processus de formation	Transformations privilégiées
Structure détruite: micro-agrégats et autres particules du sol < 0.2 mm					
Résidu de la déstructuration	Micro-agrégats, particules minérales (sable fin, limon, argile) et organiques.	En surface, parfois dans la couche arable (horizon Ah ¹) si la teneur en argile et en humus est faible; < 0.2 mm.	Grande diversité de formes géométriques et d'états de la surface, très souvent non poreuse (visible à la loupe binoculaire).	Déstructuration partielle ou totale des u.s par la décomposition des substances colmatantes, les processus naturels (martèlement des gouttes de pluie, éclatement d'u.s par l'air capté lors de la réhumectation, gel-dégel) et les processus anthropiques (passage des machines, travail du sol et pâture des animaux); le résidu de la déstructuration est à tendance battante et peut former des croûtes en surface.	Transformations très rapides entre le résidu de la déstructuration, les grumeaux et les granules; la durée de la déstructuration est en fonction de l'activité biologique; transformations possibles plusieurs fois par an.
Structure primaire, sans formation d'u.s					
Structure particulaire	Particules élémentaires non reliées entre elles.	Principalement matériau d'origine avec teneur en argile < 5% et horizons hydromorphes (C et BCr).	Ensemble de particules non liées, sans cohésion (dépendant du matériau d'origine).	Composée principalement de particules minérales non reliées (sans formation d'u.s); une cohésion temporaire est exercée par les ménisques d'eau dans les sols à teneur en eau moyenne.	Transformations extrêmement lentes en structure pédique, réversibles dans de rares cas.
Structure massive	Particules élémentaires reliées entre elles.	Principalement matériau d'origine avec teneur en argile > 10% et horizons hydromorphes (C et BCr).	Bloc massif sans structure (dépendant du matériau d'origine).	Composée principalement de particules minérales sans formation d'u.s; la cohésion dépend des substances colmatantes et de la texture.	Transformations extrêmement lentes en structure secondaire, réversibles dans de rares cas.
Structure des sols organiques					
Structure spongieuse	Micro-agrégats organo-minéraux faiblement reliés entre eux.	Très souvent sols organiques avec > 30% de substances organiques, horizons O et T.	Substances organiques avec une structure fibreuse ou spongieuse; extrêmement rugueuse; mate; très poreuse, > 50%.	Des substances organiques mortes (litière) sont humifiées et minéralisées; en conditions aérobies, transformation de la litière en moder-mull; en conditions anaérobies, transformation de la litière en tourbe (en anmoor à la surface, à cause des conditions aérobies).	Une partie est décomposée en dioxyde de carbone durant l'année (non réversible).

¹ Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2.

Figure 2e: Description des types d'u.s – 3. Autres types de structure

3. Application de la méthode sur le terrain

3.1 Introduction

Ce chapitre décrit d'une manière détaillée la marche à suivre. Les termes techniques nécessaires pour effectuer l'observation sur le terrain sont définis dans la figure 3a. La figure 3b montre le déroulement des opérations qui sont décrites plus en

détail dans le texte d'accompagnement. La figure 3c montre l'aperçu visuel du résultat. Les chapitres 3.3 et 3.4 analysent les problèmes liés au fractionnement et aux propriétés mécaniques.

Terme technique	Définition
Echantillon	Volume non perturbé, prélevé à l'aide d'un louchet dans la couverture pédologique. Profondeur de l'échantillon: environ 50 cm.
Couche / horizon	Partie de l'échantillon possédant des propriétés homogènes et distinctes de celles des autres parties situées immédiatement dessous ou dessus.
Catégorie de taille	Tri des u.s selon la taille par tamisage. La plus petite section d'une u.s fait foi pour la détermination de la catégorie de taille (7 catégories, voir tableau 4c).
Fractionnement	Subdivision d'une couche ou d'un horizon d'un échantillon par séparation manuelle et tamisage, puis tri selon la taille des unités structurales et détermination de leur part pondérale.
Analyse de la structure	Ensemble des opérations conduisant à la détermination des types d'u.s, de la cohésion à l'intérieur des unités structurales et de la cohésion de la sur-structure.
Sur-structure	Volume de sol intermédiaire entre couche/horizon et u.s présentant une certaine cohésion par rapport aux volumes voisins.
Cohésion de la sur-structure	Force cohésive entre les unités structurales. Appréciation en 5 niveaux selon le comportement après une chute d'un mètre de hauteur sur une surface dure (figure 4f).
Cohésion de l'unité structurale	Force assurant l'intégrité de l'u.s. Appréciation en 5 niveaux selon la résistance de l'u.s à la pression entre deux doigts (figure 4d).
Résidu de la déstructuration	Éléments du sol d'un diamètre < 0.2 mm (micro agrégats, sable fin, silt, etc.) recueillis dans le récipient inférieur de la batterie de tamis.

Figure 3a: Termes techniques concernant l'application de la méthode sur le terrain

3.2 Marche à suivre: prise d'échantillons et fractionnement

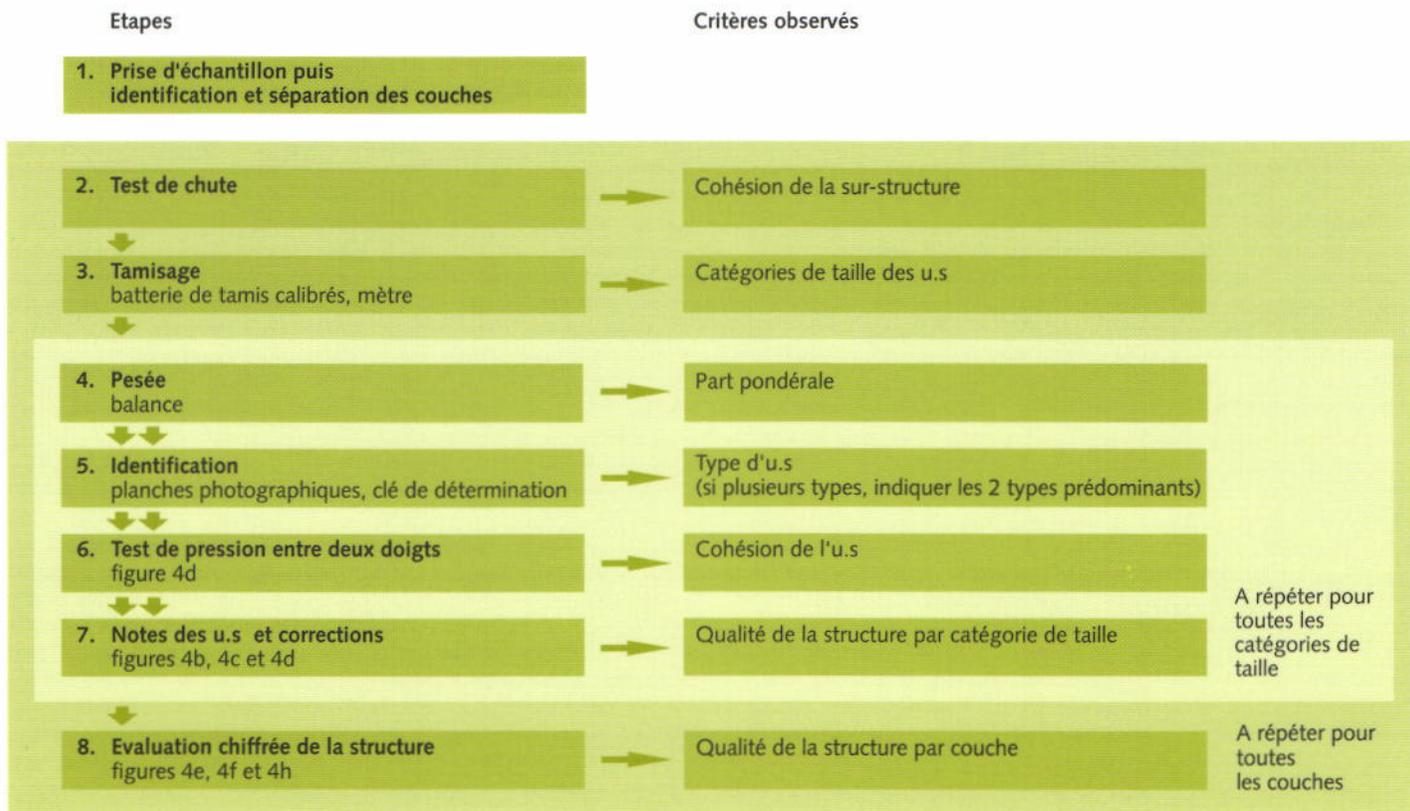


Figure 3b: Étapes de la méthode

(la numérotation des étapes correspond à la numérotation du texte explicatif qui suit.)

Matériel

L'équipement suivant est nécessaire pour l'échantillonnage:

- louchet solide avec lame de 45 à 50 cm;
- bac en plastique de couleur claire à fond plat, de dimensions: 70 x 50 x 15 cm pour effectuer le test de chute;
- 7 plateaux en plastique, identiques, de couleur claire, de dimensions: 20 x 20 x 5 cm pour recevoir le contenu d'un tamis (u.s par catégorie de taille);
- balance: capacité 1 kg, précision ± 1 g;
- mètre pliable;
- batterie de 5 tamis calibrés avec mailles carrées, diamètres: 20 mm, 10 mm, 5 mm, 2 mm, 0.2 mm; récipient final;
- formulaire pour l'évaluation chiffrée de la structure du sol (voir figure 4h);
- loupe agrandissant 4 à 10 fois.

Marche à suivre: prise d'échantillons, fractionnement et évaluation chiffrée de la structure

Prélever l'échantillon dans la couverture pédologique moyennement humide (force de succion de l'eau entre pF2.3 et pF2.8, respectivement entre 200 et 700 hPa) dont la consistance friable permet d'isoler facilement les unités structurales. Les sols très humides (plastiques) ou secs (durcis) ne se prêtent pas à une observation visuelle correcte. Eventuellement, on interviendra sur l'état hydrique du sol, afin d'avoir des conditions d'humidité du sol favorables au moment de la prise d'échantillon (protection contre la pluie ou arrosage).

1. Echantillonnage

1.1 Prise d'échantillon

Ouvrir avec le louchet un trou d'environ 50 cm de profondeur et prélever avec précaution, en un bloc, un volume d'environ 50 x 20 x 15 cm sur l'un des bords du trou. Eviter d'écraser le volume, enlever les parties lissées et déformées par le louchet afin de pouvoir identifier les différentes couches (si

nécessaire, prélever un volume plus important et selon les besoins, le sécher ou l'humidifier).

1.2 Identification et séparation des couches

Partager l'échantillon en fonction des horizons ou des couches observables: lit de semence, labour non repris, semelle de labour et couche non travaillée. Si l'on ne distingue pas ces quatre couches, on partagera le volume selon la profondeur: 0-12, 12-24, 24-36 et 36-48 cm (cette division équidistante correspond approximativement aux zones de localisation des différents travaux de sol). Enlever la masse des racines superficielles des sols sous prairie.

Examiner en premier la couche non travaillée qui est peu perturbée: les informations qu'elle livre sont précieuses pour évaluer les types d'u.s issus de processus naturels (agrégats) et les processus de transformation (mottes) qui ont lieu dans les couches du sol travaillées.

2. Test de chute (cohésion de la sur-structure)

2.1 Pour chaque couche, laisser tomber 2 à 4 kg (selon la taille des u.s) d'une hauteur d'un mètre dans un bac à fond plat. Observer une éventuelle déformation des u.s au fond du récipient et les retirer le cas échéant. Appliquer une légère pression manuelle pour défaire les gros volumes restants (ou non complètement séparés à cause des racines) le long des fissures naturelles; retirer au mieux les cailloux et les racines.

2.2 Evaluer la cohésion de la sur-structure (cohésion entre les u.s au sein de la sur-structure, en 5 niveaux) en fonction de la réponse de l'échantillon au test de chute (figure 4f).

3. Tamisage (catégories de taille des u.s)

3.1 Prélever un échantillon représentatif de 1 à 2 kg dans le volume récolté dans le bac en plastique en respectant les proportions des tailles d'u.s (par exemple en partageant en deux l'échantillon initial). Ce volume sera tamisé. La plus petite section d'une u.s fait foi pour la détermination de la catégorie de taille.

3.2 Afin de faciliter le processus de tamisage et pour éviter la création d'artefacts, déterminer préalablement les u.s appartenant aux classes de taille 7 (> 10 cm) et 6 (5-10 cm) à l'aide du mètre pliable. Retirer également les u.s qui appartiennent clairement à la catégorie de taille 5 (2-5 cm).

3.3 Placer le volume restant sur la batterie de tamis (éventuellement en deux fois pour faciliter le tamisage). En évitant autant que possible les frottements (les caractéristiques de la surface, par exemple les arêtes, sont mises à contribution dans la détermination des types d'u.s), répartir les u.s dans les étages de la batterie de tamis en l'agitant doucement. Ajouter le résidu du tamis à plus grosses mailles (20 mm) aux u.s de la catégorie de taille 5 que l'on a enlevées à la main à l'étape 3.2.

4. Pesée (part pondérale)

Retirer les éléments organiques et les cailloux, puis déterminer le poids de chaque fraction tamisée.

5. Identification (types d'u.s)

Déterminer les types d'u.s (voir chapitre 2). Si on observe un mélange de types d'u.s, indiquer les deux types majoritaires et leur proportion. En conditions humides, on compare avec les types d'u.s d'un échantillon-témoin, car le test de chute ou le tamisage peuvent produire des artefacts tels que des déformations des arêtes ou autres modifications de la surface des u.s.

6. Test de pression entre deux doigts (cohésion de l'u.s)

Déterminer la cohésion des u.s en les soumettant à une pression variable exercée avec deux doigts (pouce et index) (figure 4d).

7. Notes des u.s et corrections (qualité de la structure par catégorie de taille)

On effectue une appréciation empirique dépendant du type d'u.s et de sa taille selon une échelle de notes de 2 à 14 (figure 4c), qui sera ensuite soumise à deux types de corrections: l'une due à la cohésion des u.s (figures 4d et 4f), l'autre au résidu de la déstructuration (figure 4e).

8. Évaluation chiffrée de la structure (qualité de la structure par couche)

A l'aide d'un formulaire de l'évaluation chiffrée de la structure du sol (figure 4h), on peut évaluer la qualité de la structure de la couche d'un échantillon.

En outre, il est recommandé de faire une description pédologique du site d'échantillonnage (en suivant la méthode «Cartographie et estimation des sols agricoles», Les cahiers de la FAL 24, 1997; «Cartographie des sols forestiers», OFEFP, 1996). Il faut notamment décrire les caractéristiques déterminantes du sol, telles que le régime de l'eau, la texture, la teneur en humus et en calcaire, ainsi que le pH. D'autres caractéristiques importantes exprimant la qualité de la structure, telles que le type d'enracinement, sa profondeur et son intensité, doivent également être relevées. Elles servent de contrôle pour l'analyse de la structure.

3.3 Fractionnement d'un échantillon

Notions complémentaires

Un examen approfondi du sol montre que, dans les couches où plusieurs processus dynamiques ont lieu simultanément, on peut trouver des u.s de différents types, de différentes tailles et en proportions très variables. Ceci est particulièrement valable dans les horizons fortement modifiés par l'homme. C'est pourquoi, en général, l'homogénéité et la taille des u.s augmentent avec la profondeur dans le profil.

Grâce au fractionnement de l'échantillon en catégories de taille (voir figure 3c), on a:

- une vision d'ensemble de la répartition des u.s en fonction de leur taille;
- une identification aisée des types d'u.s, car la gamme des types d'u.s dans une catégorie de taille est en général plus restreinte que dans l'ensemble de la couche à analyser;
- la possibilité de déterminer la part pondérale des différentes catégories de tailles;
- la possibilité d'apprécier la qualité de la structure de manière semi-quantitative (voir chapitre 4).

En général, la qualité de la structure d'une u.s est liée à son type et à sa taille. Pour la plupart des u.s, la densité augmente et la porosité diminue avec l'augmentation de la taille. Pour cette raison, le fractionnement de l'échantillon (par tamisage) permet d'apprécier sa qualité structurale. Ce principe est à la base de la figure 4c «Note de l'u.s en fonction du type d'u.s et sa catégorie de taille». On constate dans ce tableau que la note attribuée à un type d'u.s varie plus ou moins avec la taille. La qualité de la structure d'une couche d'un échantillon peut être exprimée par le calcul du diamètre moyen pondéré (DMP) de toutes les catégories de taille de l'échantillon (figure 4h).

La finesse du fractionnement dépend des objectifs de l'analyse. Pour une analyse approfondie, nous recommandons de diviser les u.s d'une couche en 7 catégories de taille, auxquelles s'ajoute le résidu de la déstructuration (particules de taille < 0.2 mm). Pour ce faire, on procède à un tamisage usuel (tamis calibrés à mailles carrées de différentes grandeurs) dans lequel la plus petite section de l'u.s est déterminante pour son appartenance à une catégorie de taille. Comme les grandes u.s (> 50 mm) sont en général peu nombreuses dans les échantillons, il suffit de mesurer individuellement leur taille avec un mètre pliable.

Problèmes méthodologiques

U.s de grande taille

La subjectivité intervient nécessairement lorsque l'on exerce avec les doigts une force de pression légère sur une u.s de grande taille pour déterminer si elle est composée de plusieurs u.s liées entre elles ou si elle est une seule grande u.s.

Humidité du sol

Le fractionnement doit être réalisé dans les conditions optimales pour avoir un échantillon friable (force de succion entre 200 et 700 hPa). Dans les échantillons trop humides des sols moyens à lourds, les u.s restent collées les unes aux autres. Lors du tamisage (même avec ménagement), les arêtes et les surfaces des u.s risquent de se déformer et d'effacer des caractéristiques importantes. Dernier inconvénient, mais non le moindre: la batterie de tamis s'obstrue et devient inutilisable.

Teneur en éléments grossiers

Les cailloux qui ne font pas clairement partie des u.s doivent être retirés avant la pesée des u.s dans chaque catégorie de

taille. Si l'on a une quantité élevée de petits cailloux qu'il serait trop laborieux de retirer, on peut faire une correction en estimant puis en soustrayant la part de cailloux. La méthode la plus précise, mais aussi la plus onéreuse en temps et demandant suffisamment d'eau sur place, est la suivante: après la pesée du contenu du tamis, on élimine la terre fine du tamis avec un arrosoir jusqu'à la disparition totale de la terre fine; les cailloux restants sont pesés et leur poids déduit du poids initial du contenu du tamis.

Estimation de la part volumique

Dans une étude du sol où les exigences de précision sont moins élevées, on peut remplacer la mesure des parts pondérales avec une balance par une estimation des parts de volume des différentes catégories de taille. Ceci nécessite évidemment suffisamment d'expérience.



Figure 3c: Aperçu visuel du résultat de la méthode appliqué sur un échantillon de sol provenant du horizon Ahp¹ (0 à 12 cm). Le fractionnement a donné six catégories de taille d'u.s. Le sol,

un sol brun profond sur moraine, limono-sableux et peu pierreux provient du Plateau suisse (altitude 420 m). Il est régulièrement labouré. ¹ Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2.

3.4 Propriétés mécaniques de la structure du sol

Notions complémentaires

Par «propriétés mécaniques de la structure du sol», nous entendons les réactions de la structure à des forces statiques et/ou dynamiques. Pour analyser ces réactions, on peut utiliser des appareils de mesure comme le pénétromètre (mesure in situ), ou bien prélever des échantillons non perturbés et mesurer la stabilité de la structure en laboratoire. Le but de telles mesures est d'avoir des indications sur la stabilité de la structure face à des contraintes mécaniques, mais également sur la résistance que le sol oppose à la pénétration des racines.

Une autre propriété mécanique de la structure, qui est corrélée aux propriétés mentionnées ci-dessus, est la cohésion de la sur-structure. Celle-ci peut être directement observée sur le terrain par le test de chute. Dans ce test, on laisse tomber un échantillon de sol le moins perturbé possible (que l'on prélève par exemple en utilisant le louchet avec ménagement) d'une hauteur d'environ un mètre (niveau de la hanche) dans un bac à fond plat. En fonction de la part de l'échantillon qui se disperse à l'impact, on déduit le degré de cohésion entre les u.s au sein du volume prélevé, autrement dit la cohésion de la sur-structure. Dans notre méthode, on distingue 5 niveaux de cohésion de la sur-structure (voir figure 4f).

Pour estimer la cohésion des u.s, nous employons dans notre méthode le test de pression entre deux doigts: il s'agit de pres-

ser l'u.s entre le pouce et l'index et de déduire sa résistance à la pression, en fonction de la force nécessaire pour la désintégrer. On distingue 5 niveaux de cohésion de l'u.s (voir figure 4d).

Problèmes méthodologiques

Test de chute

Dans le test de chute d'échantillons contenant de nombreuses racines, il faut prendre en compte le fait que les racines participent beaucoup à la cohésion de la sur-structure. Il faut corriger le résultat du test en comptant les u.s visiblement liées par les racines parmi les éléments dispersés après l'impact.

Cohésion de l'u.s

L'examen de la cohésion des u.s par le test de pression entre deux doigts est réalisé pour chaque catégorie de taille et devrait être réalisé sur trois u.s au minimum par contenu de tamis. En général, pour un type d'u.s donné, la cohésion est relativement constante au sein d'une catégorie de taille et augmente avec la taille de l'u.s. Il est difficile d'estimer, par le test de pression entre deux doigts, la cohésion des petites u.s; pour cette raison, il n'est pas appliqué pour la catégorie de taille 0.2 - 2 mm. Comme le test de pression entre deux doigts est subjectif, sa reproductibilité n'est pas toujours garantie, surtout dans les domaines de valeurs moyennes de cohésion.

4. Evaluation de la qualité de la structure

4.1 Introduction

L'analyse de la structure (fractionnement de l'échantillon, identification des u.s, etc.) doit permettre de tirer des conclusions sur la qualité de la structure, si importante pour la croissance des plantes, ainsi que sur les impacts des travaux du sol et de remise en culture. Nous nous restreignons à l'interprétation de ces propriétés en lien avec les exigences des cultures, avec une attention particulière au développement racinaire. Les résultats des divers tests sont interprétés selon un système de points qui débouche sur l'attribution d'une note de structure de chaque couche analysée et qu'on désigne avec le terme «évaluation chiffrée de la structure». Le calcul de la note est effectué par le programme informatique Excel (figure 4h).

Ce résultat peut être interprété en donnant des indications par exemple sur une estimation de la somme de toutes les surfaces des u.s qui composent la couche étudiée.

On sait que la taille et la densité des unités structurales (u.s) peuvent constituer des facteurs limitants de la croissance des plantes (De Freitas, 1996), et que la longueur des racines dans les u.s est inversement corrélée à la taille et la cohésion des u.s (Misra, 1988, De Freitas, 1999). Horn (1987) a mis en évidence que la résistance des u.s à l'enracinement augmente avec leur taille, lorsque les u.s ont la capacité de gonfler.

Il serait souhaitable de disposer de valeurs de référence pour l'évaluation chiffrée de la structure pour différents types de sol et pour différents modes d'exploitation. Actuellement, ces informations ne sont pas encore disponibles, car le nombre d'échantillons étudié avec cette méthode est trop faible pour procéder à un calcul statistique.

Terme technique	Définition	Figure
Evaluation de la structure au niveau des u.s		
Note de l'u.s	Appréciation empirique dépendant du type d'u.s et de sa taille selon une échelle de notes de 2 à 14. C'est la note de base.	4c
Correction due à la cohésion de l'u.s	Correction due aux propriétés mécaniques défavorables des u.s. Une déduction de la note de l'u.s de 0 à 2 points au maximum est possible. A effectuer pour les catégories de taille 2 à 7.	4d
Correction due au résidu de la déstructuration	Correction due à la dynamique de la déstructuration et de la réorganisation. La note de la catégorie de taille 1 peut subir une déduction de 0 à 7 points selon le rapport pondéral actuel du résidu de la déstructuration et de la catégorie de taille 1. A effectuer uniquement pour la catégorie de taille 1.	4e
Note de catégorie de taille	Note corrigée pour chaque catégorie de taille après avoir effectué les corrections.	
Evaluation de la structure au niveau de la couche		
Note de la couche	Moyenne pondérée des notes des catégories de taille d'une couche étudiée.	4h
Correction due à la cohésion de la sur-structure	Correction due aux propriétés mécaniques défavorables de la sur-structure. La note de la couche peut subir une déduction de 0 à 2 points au maximum.	4f
Evaluation chiffrée de la structure	Note calculée pour chaque couche après avoir effectué la correction. Elle caractérise la qualité de la structure d'une couche.	4h
Diamètre moyen pondéré (DMP)	Moyenne pondérée des diamètres des catégories de taille d'une couche étudiée.	4h
Note d'échantillon	Quadruplet (triplet...) formé par les «évaluations chiffrées de la structure» des 4 (3...) couches d'un échantillon.	

Figure 4a: Termes techniques concernant l'évaluation de la qualité de la structure du sol

4.2 Propositions d'une évaluation chiffrée de la structure du sol par un système de notation en vue de la production végétale

Diez (1991) a proposé un schéma de cinq niveaux pour l'évaluation de la structure du sol en se référant au «test à la bêche» (Görbing, 1947). Comme notre méthode inclut des critères d'analyse supplémentaires tels que la taille et la cohésion des u.s, et que par ailleurs elle est plus détaillée dans la des-

cription des types d'u.s, nous avons besoin d'une méthode plus appropriée. La méthode est décrite en détail dans ce chapitre. La figure 4b aide à garder la vue d'ensemble. La numérotation des étapes correspond à la numérotation du texte explicatif qui suit.

Etapes

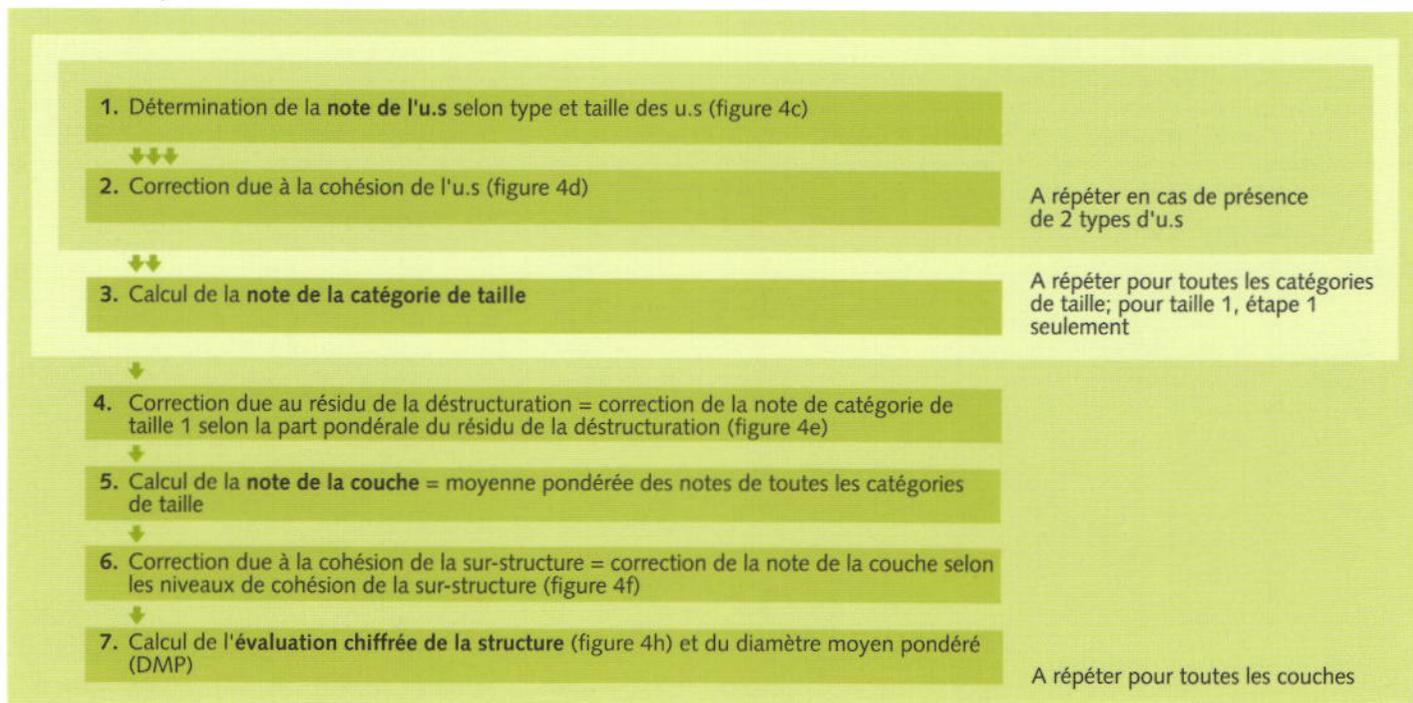


Figure 4b: Étapes de l'évaluation chiffrée de la structure du sol

Marche à suivre pour l'évaluation chiffrée de la structure du sol

La numérotation du texte ci-dessous correspond au numéro de la figure 4b. De plus, un exemple simple (fig. 4g) illustre les étapes 1 à 7.

1. Note de l'u.s

Dans notre schéma, les u.s sont le point de départ de l'appréciation de la structure du sol. Les u.s sont évaluées par des notes sur une échelle de 2 à 14 en fonction de leur type et de leur taille (figure 4c).

	Catégories de taille des u.s.						
	1 0.2 - 2 mm	2 2 - 5 mm	3 5 - 10 mm	4 10 - 20 mm	5 20 - 50 mm	6 50 - 100 mm	7 > 100 mm
U.s issues de processus naturels							
Grumeaux	14	14	14				
Granulats	13	13					
Polyèdres émoussés		12	11	10	9		
Polyèdres		10	9	8	7	6	5
Prismes					7	6	5
U.s issues de processus anthropiques							
Mottes O			11	10	9		
Mottes C arrondies					8	7	6
Mottes C anguleuses					7	6	5
Fragments (mottes O) ¹		11	10	9			
Fragment (mottes C) ¹		9	8	7	6		
Plaquettes					7	6	5
Résidus de la déstructuration							
Résidus de la déstructuration	Induit une correction de la note en relation avec la catégorie de taille d'u.s. 1 (voir étape 4, figure 4e)						
Structure primaire							
Structure massive	3						
Structure particulaire	2						

¹ La note d'un fragment diffère selon qu'il est généré par une motte O ou une motte C de petite taille. Les fragments peuvent être distingués par le test de cohésion: en général la note est < 4 pour les fragments issus de mottes O et > 3 pour les fragments issus de mottes C.

Figure 4c: Note de l'u.s en fonction du type d'u.s et de sa catégorie de taille

2. Correction due à la cohésion de l'u.s

Pour les propriétés mécaniques défavorables (cohésion des u.s classées en 5 niveaux), nous proposons une correction de la note de l'u.s en déduisant 0 à 2 points au maximum (figure 4d). Si deux ou plusieurs types d'u.s sont observés dans le

tamis, l'opération se fait pour les deux types d'u.s prédominants. Ensuite on calcule la moyenne pondérée. Ces opérations sont faites pour chaque catégorie de taille, sauf pour la catégorie de taille 1.

Niveau de cohésion des u.s	Définition Réaction des u.s à la pression	Type de pression	Correction due à la cohésion des u.s
1	L'u.s se casse très facilement.	Au simple toucher.	-2
2	L'u.s se casse facilement.	Avec une faible pression entre deux doigts.	-1
3	L'u.s se casse assez facilement.	Avec une pression moyenne entre deux doigts.	0
4	L'u.s se casse assez difficilement.	Avec une pression forte entre deux doigts.	-1
5	L'u.s se casse très difficilement.	Résiste à toutes les pressions entre deux doigts.	-2

Figure 4d: Détermination du niveau de cohésion et correction de la note de l'u.s

3. Note de la catégorie de taille

Une fois la correction déduite de la note de l'u.s, on obtient la note de la catégorie de taille. En cas de deux types d'u.s, on prend la moyenne pondérée des deux notes.

4. Correction de la note de la catégorie de taille 1 due au résidu de la déstructuration

Selon le rapport de force entre les processus de réorganisation et de déstructuration, la part du résidu de la déstructuration (particules < 0.2 mm) varie. Une grande quantité de ces micro-agrégats, de particules minérales et organiques indique une prédominance des processus de déstructuration.

Dans notre schéma, nous proposons d'intégrer ce phénomène par une correction de la catégorie de taille 1 (figure 4e):

- calcul du rapport pondéral du résidu de la déstructuration et de la catégorie de taille 1.
- déduction de la note de la catégorie de taille 1 selon la valeur du rapport pondéral: 1 point pour une augmentation de 5% du rapport pondéral.

Rapport pondéral du résidu de la déstructuration et de la catégorie de taille 1	Déduction à effectuer
< 1%	0
1% - 5%	-1
Pour chaque 5% en plus	-1 en plus, maximal -7

Figure 4e: Correction de la note de la catégorie de taille 1

5. Note de la couche

En faisant la moyenne pondérée des notes attribuées à chaque catégorie de taille, on obtient une première approximation de la qualité de la structure d'une couche d'un échantillon. Cette approximation doit être corrigée, dans une étape suivante, en fonction de la cohésion de la sur-structure.

6. Correction due à la cohésion de la sur-structure

Pour les propriétés mécaniques défavorables de la sur-structure (cohésion de la sur-structure classée en 5 niveaux), nous proposons une déduction de la note de la couche allant de 0 à 2 points au maximum (figure 4f).

Niveau de cohésion de la sur-structure	Définition	Résultat du test de chute ¹	Correction due à la cohésion de la sur-structure
1	Cohésion très faible	L'échantillon se décompose déjà à la prise, sans test de chute.	-1 (Ahp = 0)
2	Cohésion faible	L'échantillon se décompose complètement lors de l'impact de chute.	0
3	Cohésion modérée	L'échantillon se décompose majoritairement (> 50%) lors de l'impact de chute.	0
4	Cohésion forte	L'échantillon se décompose minoritairement (10-50%) lors de l'impact de chute.	-1
5	Cohésion très forte	L'échantillon se décompose très peu (<10%) lors de l'impact de chute.	-2

¹Le comportement de l'échantillon après une chute d'un mètre de hauteur sur une surface dure.

Figure 4f: Détermination de la cohésion de la sur-structure et correction de la note de la couche

7. Evaluation chiffrée de la structure

Le résultat final, l'évaluation chiffrée de la structure, présente une appréciation fiable de la qualité de la structure de la couche d'un échantillon.

4.3 Un exemple simple

L' étude de l'horizon Ah d'un échantillon prélevé dans un sol bien drainé sous prairie donne les résultats suivants (l'exemple se trouve également dans la figure 4h sous couche no. 1):

Résultats de l'observation de la couche Ah d'un échantillon								
Cohésion de la sur-structure:				niveau 1				
Catégorie de taille	7	6	5	4	3	2	1	Résidu
Poids [g]	0	0	0	233	209	227	80	3
Types d'u.s (part pondérale)	--	--	--	Pé (100%)	Pé (100%)	Gru (50%)	Gru (50%)	--
	--	--	--	--	--	Pé (50%)	Gra (50%)	--
Cohésion des u.s (niveau)	--	--	--	3	3	2	--	--
	--	--	--	--	--	2	--	--

La qualité de la structure de la couche Ah est évaluée selon le schéma suivant:

Étapes	Notes							
Catégorie de taille	7	6	5	4	3	2	1	
Note de l'u.s (selon leur type et leur taille)	--	--	--	10	11	14	14	
	--	--	--	--	--	12	13	
Correction due à la cohésion des u.s (à effectuer pour les catégories de taille 2 à 7)	--	--	--	0	0	-1		
	--	--	--	--	--	-1		
Calcul de la note des catégories de taille 2 à 7	--	--	--	10	11	12		
Correction due au résidu de la déstructuration (à effectuer pour la catégorie de taille 1)								-1
Calcul de la note de la catégorie de taille 1								12.5
Note de la couche				11.1				
Correction due à la cohésion de la sur-structure				-1				
Evaluation chiffrée de la structure				10.1				
Calcul du diamètre moyen pondéré (DMP)				7.9 mm				

Figure 4g: Exemple d'une évaluation chiffrée de la structure de l'horizon Ah d'une prairie (interprétation du résultat, se chiffrant à 10.1, voir chap. 4.4).

4.4 Interprétation des résultats

Il serait souhaitable de disposer de valeurs de référence pour l'évaluation chiffrée de la structure pour différents types de sol et pour différents modes d'exploitation. Actuellement, ces informations ne sont pas encore disponibles, car le nombre d'échantillons étudié avec cette méthode est trop faible pour procéder à un calcul statistique. La FAL gère une banque de données à cet effet et travaille à l'établissement d'une liste de valeurs de référence.

Jusqu'à présent, les résultats ont été interprétés pour des sols naturels et re-cultivés du Plateau suisse (climat subatlantique, altitude jusqu'à 600 m). On peut supposer que cette interprétation est aussi valable pour d'autres régions d'Europe Centrale et d'Europe de l'Ouest avec des conditions pédologiques et climatiques semblables. Si les techniques de travail du sol changent radicalement, par exemple l'application stricte du semis direct, une interprétation différente des résultats devient alors nécessaire.

Toutefois, nous pouvons indiquer des valeurs de références pour certains cas où nous disposons déjà de suffisamment de données. Dans les sols bien drainés, sous prairie extensive ou peu intensive, l'évaluation chiffrée de la structure se situe en général entre 11 et 12 pour l'horizon Ah et entre 6 et 8 pour l'horizon B¹. En général, une évaluation chiffrée de la structure de 10 est un peu meilleure qu'une évaluation chiffrée de la structure de 9; une évaluation chiffrée de 8 est bien meilleure qu'une évaluation chiffrée de 2.

La structure du sol sous une prairie naturelle ne subit en général que peu de contraintes. Pour cette raison, elle se prête comme point de repère et permet de comparer la structure d'un même sol, mais qui est soumis à un mode d'exploitation différent.

La méthode de notation proposée dans ce chapitre est un outil fiable pour suivre le développement de la structure d'une parcelle agricole. Elle permet une comparaison relative de la qualité de la structure lorsque peu de paramètres changent.

¹ Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2.

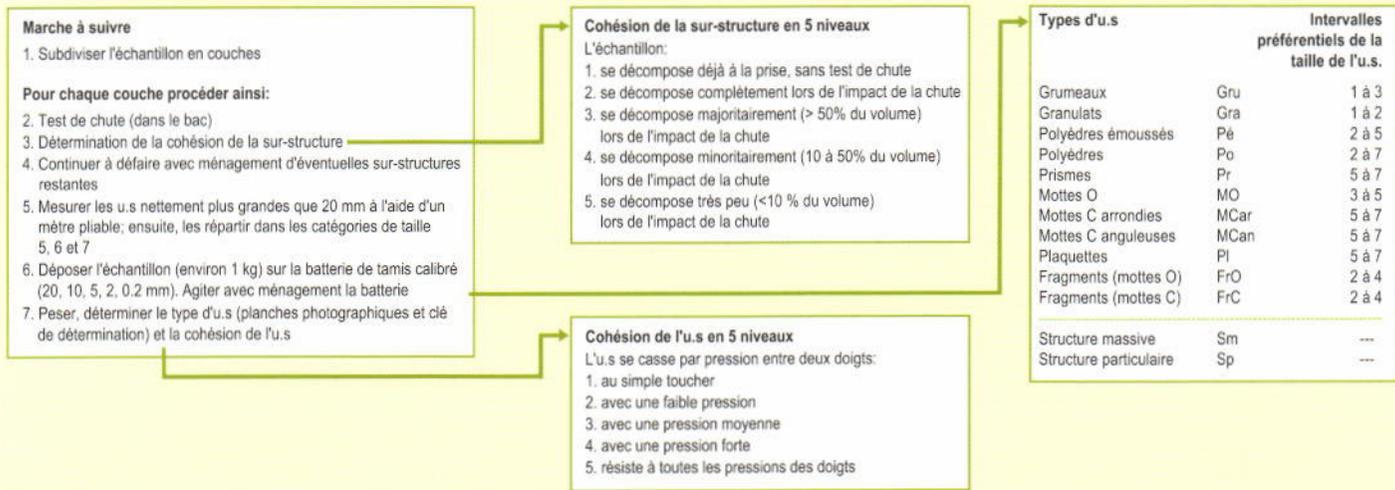


Figure 4 h: Copie du formulaire pour l'évaluation chiffrée de la structure du sol
L'original peut être obtenu sur les sites www.srva.ch et www.reckenholz.ch

5. Notions complémentaires

5.1 Dynamique de la structure du sol et observation visuelle

La structure d'un sol est constamment en évolution. D'une part, les unités structurales (u.s) se développent de manière peu perceptible dans les couches profondes. D'autre part, les u.s des couches supérieures se transforment rapidement sous l'effet de l'activité biologique, de l'influence du climat, et de manière encore plus rapide sous l'influence de l'agriculteur.

Une méthode à vocation pratique doit décrire l'état actuel de la structure du sol avec un minimum de moyens mais suffisamment de précision. Pour apprécier la structure d'un sol, on choisit comme référence un sol analogue d'une station similaire, ne subissant que des influences naturelles: par exemple le sol sous une prairie naturelle exploitée de manière durable. La comparaison du sol étudié avec cette référence permet de mesurer l'ampleur des impacts anthropiques.

Avec le concept de la transformation des différentes u.s, nous espérons fournir les bases d'une méthode reproductible pour l'appréciation des sols agricoles d'une grande partie du Plateau suisse, ainsi que pour d'autres stations similaires d'Europe occidentale et centrale.

Dans la présente version de l'ouvrage (édition 2004), nous n'avons pas encore inclus, ou seulement effleuré, certaines particularités:

- les sols forestiers et les sols organiques: structures spongieuses;
- certaines formations plus rares des horizons profonds: ortstein;
- les structures résultant de techniques culturales simplifiées (TCS): u.s de type plaquettes.

5.2 Moyens de vérification

Une fois les u.s déterminées, on peut vérifier si le résultat est cohérent avec d'autres informations et données, par exemple les facteurs ayant une influence sur la dynamique de la structure du sol, et en particulier le mode d'exploitation agricole. La connaissance du journal d'intervention des outils de travail du sol, du type de mécanisation et des autres pratiques agricoles est précieuse pour vérifier la détermination des types d'u.s dans les couches sous influence anthropique.

Le résultat doit être aussi cohérent avec les observations suivantes: localisation dans le profil (figure 1e), texture, régime de l'eau et type d'enracinement.

Dans la figure ci-après, nous trouvons les intervalles occupés de préférence par les différentes u.s par rapport aux trois critères suivants: «taille des u.s», «cohésion des u.s» et «cohésion de la sur-structure» (figure 5a).

Types d'u.s et différents états de la structure	Code	Taille de l'u.s Définition des catégories voir fig. 4c	Cohésion de l'u.s Définition des niveaux voir fig. 4d	Cohésion de la sur-structure ¹ Définition des niveaux voir fig. 4f
U.s issues de processus naturels				
Agrégats issus de processus d'agrégation				
Grumeau	Gru	1-3	1-3	1-2
Granule	Gra	1-2	2-4	1-2
Agrégats issus de processus d'agrégation et ségrégation				
Polyèdre éoussé	Pé	2-5	1-4	1-3
Agrégats issus de processus de ségrégation				
Polyèdre	Po	2-7	2-5	2-5
Prisme	Pr	5-7	2-5	2-5
U.s issues de processus anthropiques				
Mottes issues de processus de déformation				
Motte O	MO	3-5	2-4	1-3
Motte C arrondie	MCar	5-7	3-5	1-3
Motte C anguleuse	MCan	5-7	3-5	3-5
Plaquette	PI	5-7	3-5	2-5
Mottes issues de processus de fragmentation				
Fragment	Fr	2-4	2-5	1-2
Structure détruite				
Résidu de la déstructuration, état libre	Rd	<1		1
Résidu de la déstructuration, état croûte	Rdb	3-7		2-5
Structure primaire				
Structure massive	Sm			2-5
Structure particulaire	Sp			1

¹ Si la sur-structure est essentiellement composée par le type d'u.s en question.

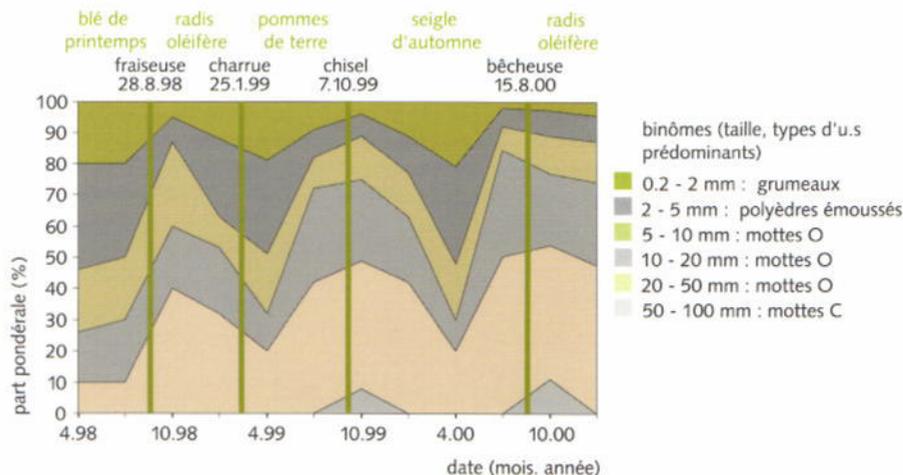
Figure 5a: Intervalles préférentiellement occupés par les trois critères «taille de l'u.s», «cohésion de l'u.s» et «cohésion de la sur-structure» en fonction des types d'u.s

5.3 Deux exemples d'application de la méthode

Le premier exemple d'application de la méthode (figure 5b) est réalisé sur les parcelles expérimentales de la FAL. On observe de cette façon les modifications du type et de la taille des u.s selon les types d'interventions sur le sol et selon les processus qui ont lieu entre les interventions (réorganisation des u.s par des processus naturels).

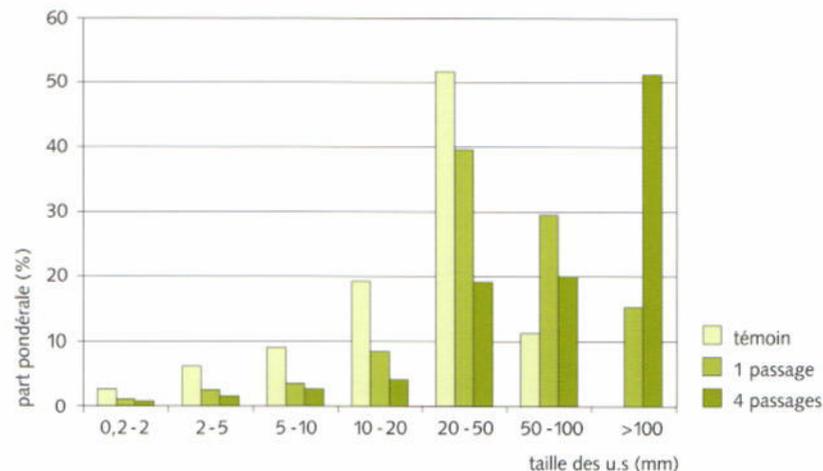
Figure 5b. Evolution de la part pondérale des binômes (taille, type d'u.s) dans l'horizon Ahp¹ d'un sol brun (Rümlang, CH, 1998 à 2000). Evolution de la structure par transformation, déstructuration et réorganisation.

¹ Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2 «Glossaire».



Le deuxième exemple d'application de la méthode est une étude des dommages causés à la structure du sol par le passage des machines agricoles. Ainsi, dans un essai réalisé avec une récolteuse de betteraves à 6 rangs, on a observé que la taille moyenne des u.s augmente fortement avec le nombre de passages de la machine (figure 5c). Les analyses de la structure des échantillons ont été conduites en aveugle, c'est-à-dire sans connaître à quel procédé ils ont été soumis.

Figure 5c: Influence du passage des machines lourdes sur la taille des u.s dans un sol calcaire brun alluvial (Frauenfeld, CH, novembre 1999).



5.4 Perspectives

Dans le domaine de la qualité de la structure, beaucoup de questions peuvent être abordées par la méthode décrite dans cet ouvrage. Nous en présentons ici quelques-unes:

- Exigences des différentes cultures vis-à-vis de la structure du sol.
- Mise en évidence de références pour les évaluations chiffrées de la structure des couches en fonction des pratiques agricoles et des agro-écosystèmes.
- Etude de la corrélation entre la part du résidu de la déstructuration (stabilité structurale, risque de battance) et l'activité biologique.
- Corrélation entre la qualité de la structure et la vie du sol (en considérant l'u.s comme un micro-biotope peuplé par une association d'organismes du sol).

Le diamètre moyen pondéré (DMP-voir figures 4a, 4g et 4h) des u.s permet une première estimation de la somme de toutes les surfaces externes des u.s qui composent le volume du sol étudié. Si on simplifie la forme géométrique d'une u.s par un cube, la surface spécifique exprimée en m^2/m^3 est inversement proportionnelle au DMP (Gisi, 1997). On peut améliorer ce modèle en prenant en considération la porosité des u.s qui correspond à des surfaces internes.

6. Planches photographiques

Dans ce chapitre sont présentées 27 planches photographiques des différents types d'u.s en grandeur nature, ordonnés selon leur taille. Ils ont été prélevés sur les sols agricoles du Plateau suisse. Ces sols sont dans la plupart des cas des sols bruns ou sols bruns lessivés. Ils sont profonds et leur granulométrie peut être caractérisée comme «sableuse limoneuse à limoneuse argileuse» (taux d'argile entre 10 et 40%). Ces sols se sont formés durant plusieurs millénaires à partir de sédimentations fluvio-glaciaires et/ou de la roche molassique (grès). Il est fortement probable que ces u.s soient aussi représentatives des régions de l'Europe de l'Ouest et de l'Europe

Centrale avec des conditions pédologiques et climatiques semblables.

Les textes accompagnant ces planches photographiques précisent les caractéristiques des u.s qui permettent leur identification sûre et reproductible.

La plupart des planches photographiques sont accompagnées d'un agrandissement situé en bas à gauche. Cet agrandissement montre en détail le contour et la surface du type d'u.s représenté. Il n'est pas forcément issu des u.s. de la planche photographique adjacente et il est parfois utilisé à plusieurs reprises.

Type d'u.s	Catégorie de taille	Page
Petits grumeaux et granules	1	6.1-1
Grumeaux moyens	2	6.2-1
Petits polyèdres émoussés	2	6.2-2
Polyèdres extrêmement petits	2	6.2-3
Petits fragments	2	6.2-4
Grands grumeaux	3	6.3-1
Polyèdres émoussés moyens	3	6.3-2
Très petits polyèdres	3	6.3-3
Petites mottes O	3	6.3-4
Fragments moyens	3	6.3-5
Grands polyèdres émoussés	4	6.4-1
Petits polyèdres	4	6.4-2
Mottes O moyennes	4	6.4-3
Grands fragments	4	6.4-4

Type d'u.s	Catégorie de taille	Page
Très grands polyèdres émoussés	5	6.5-1
Polyèdres moyens	5	6.5-2
Petits prismes	5	6.5-3
Grandes mottes O	5	6.5-4
Petites mottes C	5	6.5-5
Grands et très grands polyèdres	6-7	6.6-1
Moyens et grands prismes	6-7	6.6-2
Mottes C moyennes et grosses	6-7	6.6-3
Structure massive		6.7-1
Structure particulière		6.7-2
Résidu de la déstructuration		6.7-3

Figure 6a: Liste des planches photographiques

Gru1
Gra1

Petits grumeaux et granules (0.2 à 2 mm)

Genèse et localisation

Gru : agrégation biologique d'intensité moyenne; horizon Ah¹.

Gra : agrégation par cimentation colloïdale, souvent sous forme d'excréments de la méso- et macro-faune du sol; horizons Ah et Ahp.

Forme géométrique

Gru : contour sphérique à irrégulier, onduleux; longueurs des diamètres différentes à très différentes; sans arêtes.

Gra : contour sphérique; longueurs des diamètres égales à différentes; sans arêtes.

Surface

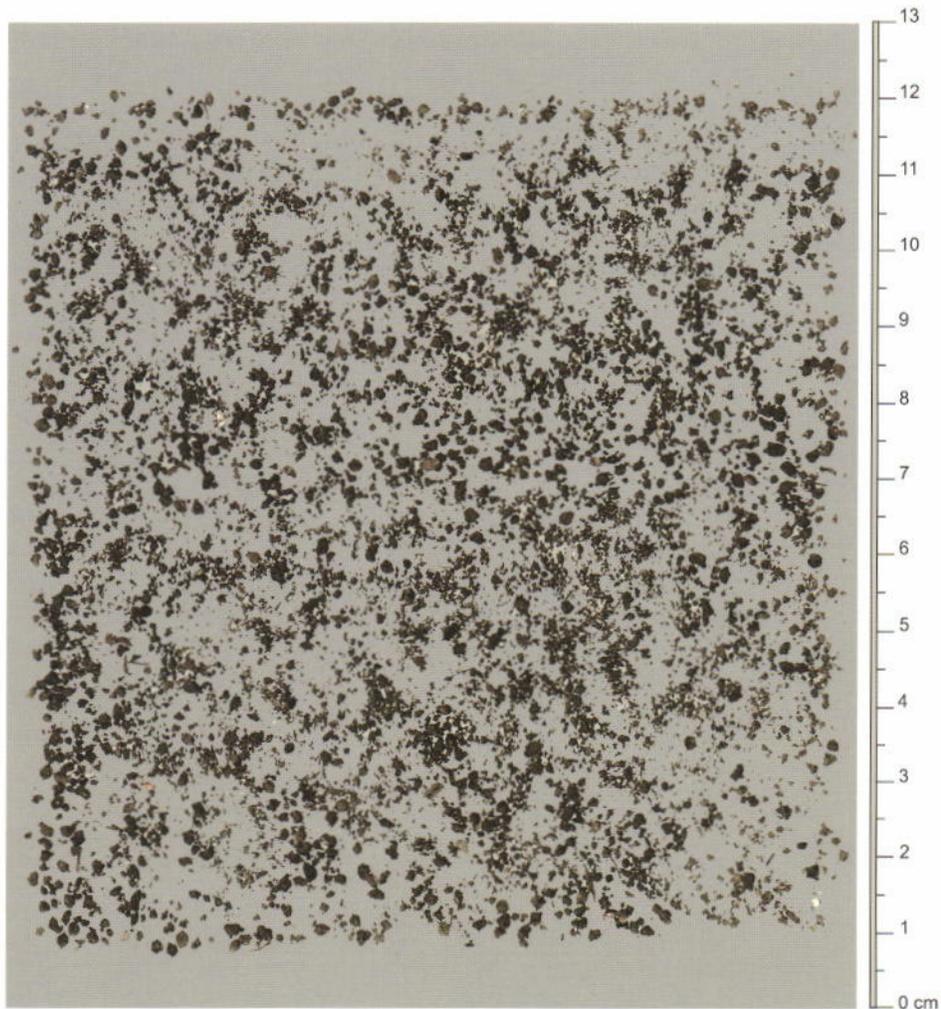
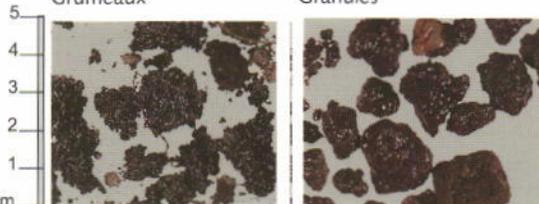
Gru : très rugueuse, poreuse.

Gra : rugueuse à peu rugueuse, peu poreuse, mate.

¹ Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2.

Grumeaux

Granules



Gru2

Grumeaux moyens (2 à 5 mm)

Genèse et localisation

Agrégation biologique de forte intensité;
horizon Ah¹.

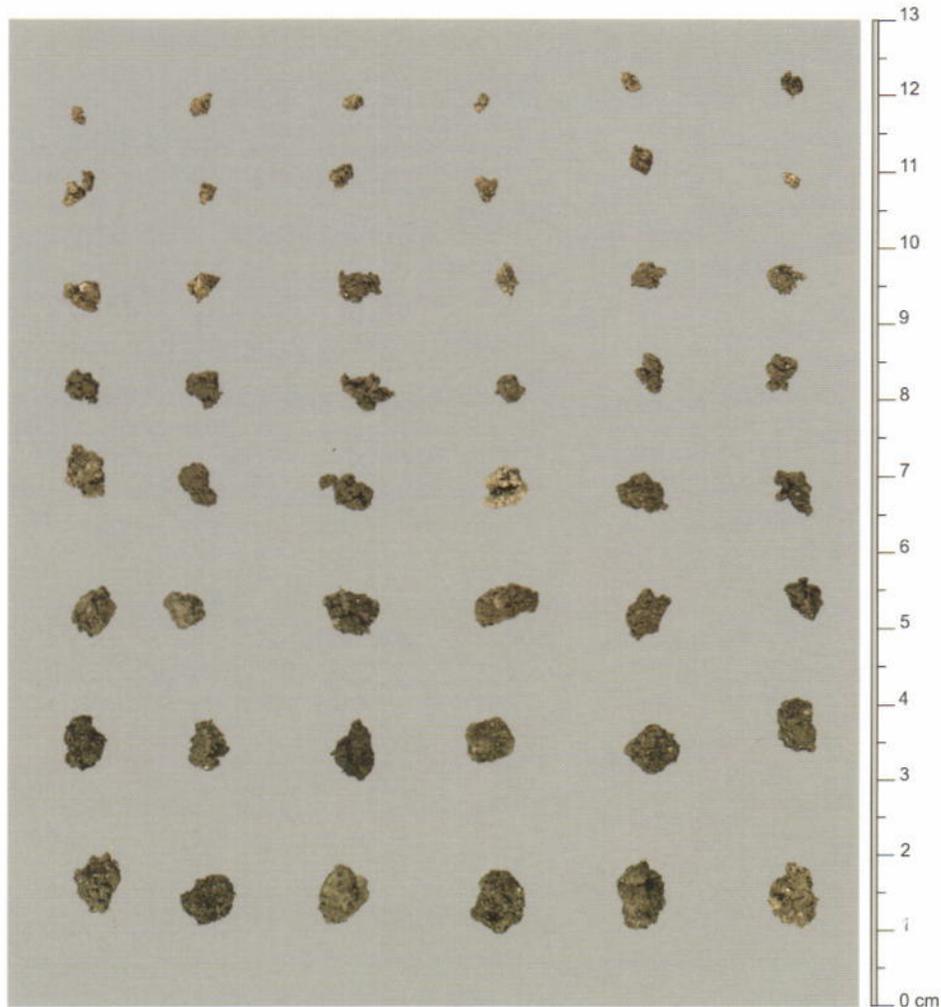
Forme géométrique

Contour sphérique à irrégulier, onduleux;
longueurs des diamètres différentes à très
différentes; sans arêtes.

Surface

Très rugueuse, poreuse, mate.

¹ Pour la codification des horizons utilisée en
France, consulter l'annexe 2.



Pé2

Petits polyèdres émoussés (2 à 5 mm)

Genèse et localisation

Ségrégation et agrégation; horizons Ah, Ahp et AB¹.

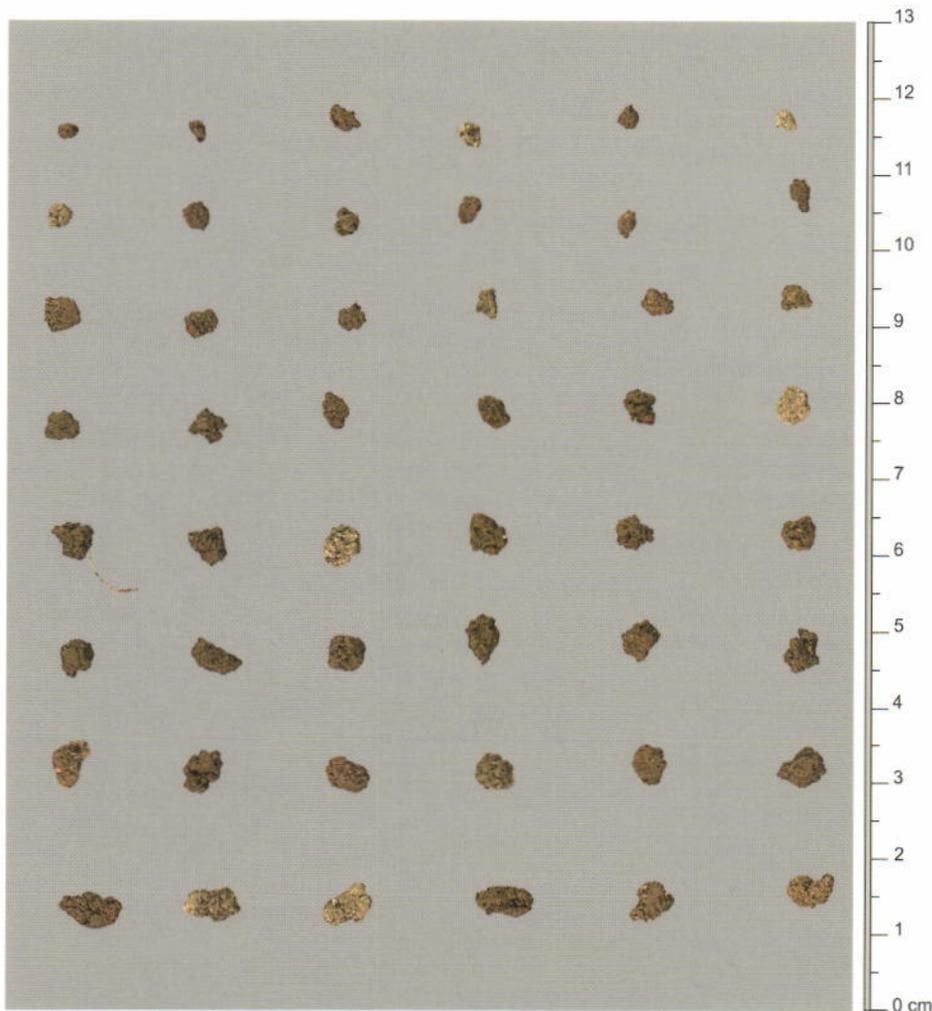
Forme géométrique

Contour sphérique à irrégulier, localement onduleux; longueurs des diamètres différentes; arêtes souvent arrondies (par agrégation biologique) ou absentes.

Surface

Très rugueuse à rugueuse, moyennement poreuse, mate; couleur souvent plus claire à l'intérieur.

¹ Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2.



Polyèdres extrêmement petits (2 à 5 mm)

Genèse et localisation

Ségrégation en général par dessiccation (par exemple gel-dégel); principalement dans les horizons Ahp¹ avec une teneur en argile élevée (> 20%).

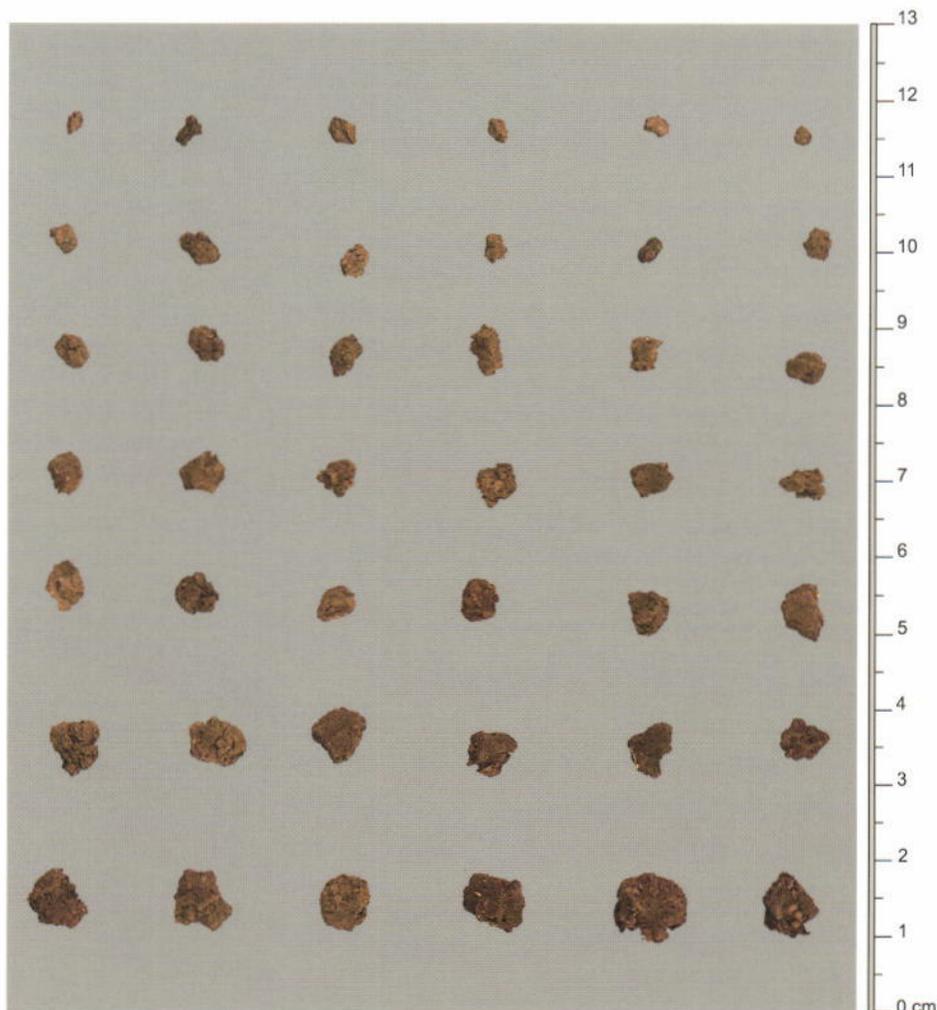
Forme géométrique

Contour sphérique à allongé (si influence gel-dégel), anguleux, souvent droit; longueurs des diamètres égales à très différentes (si influence gel-dégel); arêtes très souvent nettes à très nettes.

Surface

Peu rugueuse, peu poreuse, mate.

¹ Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2.



Petits fragments (2 à 5 mm)**Genèse et localisation**

Fragmentation mécanique d'u.s de grande taille, surtout de type MCar et MCan; horizon Ahp¹.

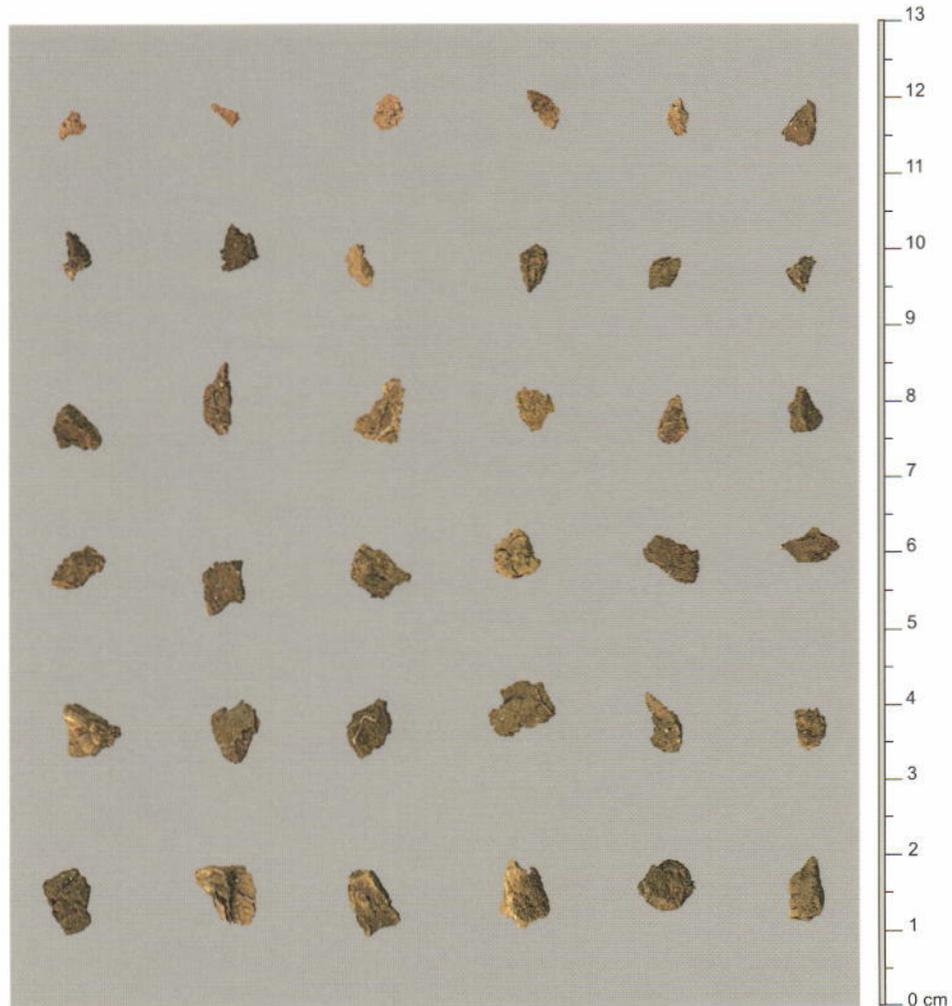
Forme géométrique

Contour sphérique à irrégulier, anguleux et droit; longueurs des diamètres très souvent très différentes; arêtes très nettes (formées par des lignes de rupture).

Surface

Très souvent peu rugueuse avec surfaces de rupture lisses, peu poreuse à très peu poreuse selon l'u.s d'origine, mate.

¹ Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2.



Gru3

Grands grumeaux (5 à 10 mm)

Genèse et localisation

Agrégation biologique très intensive;
horizon Ah¹.

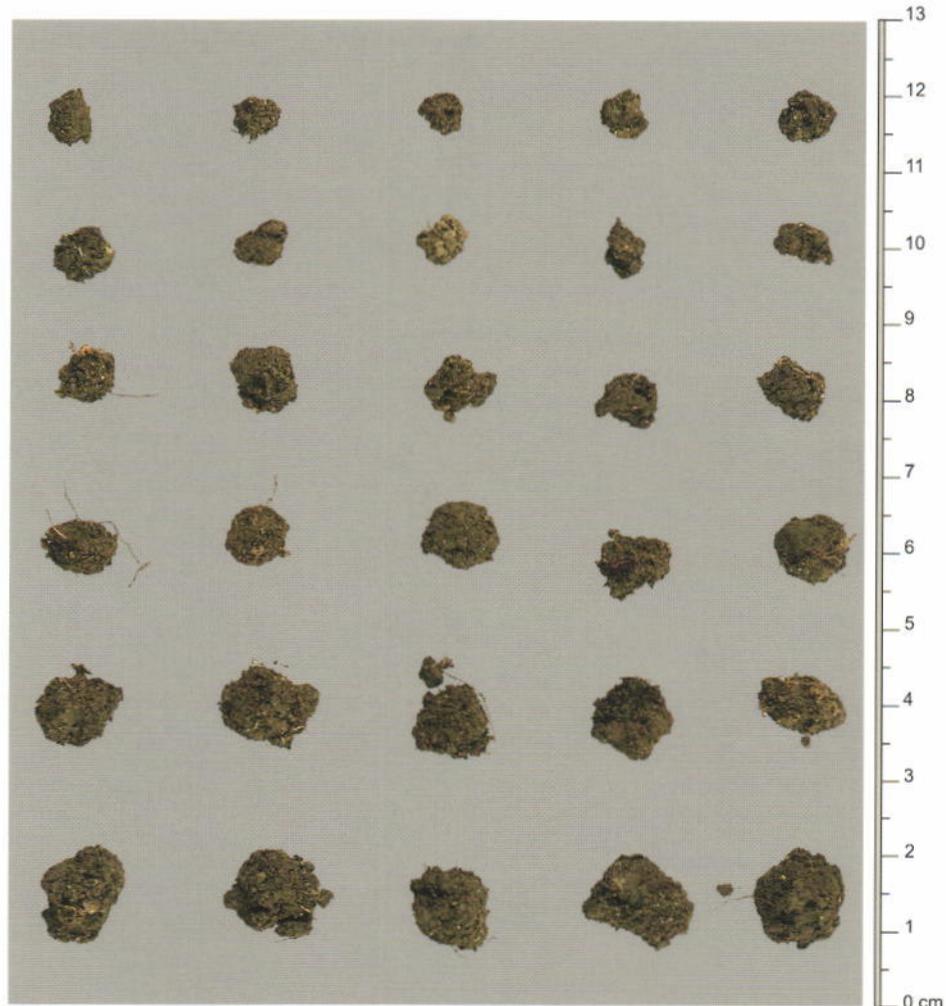
Forme géométrique

Contour sphérique à irrégulier, onduleux;
longueurs des diamètres différentes; sans
arêtes.

Surface

Très rugueuse, poreuse, mate.

¹ Pour la codification des horizons utilisée en
France, consulter l'annexe 2.



Pé3

Polyèdres émoussés moyens (5 à 10 mm)

Genèse et localisation

Ségrégation et agrégation; horizons Ah, Ahp et AB¹.

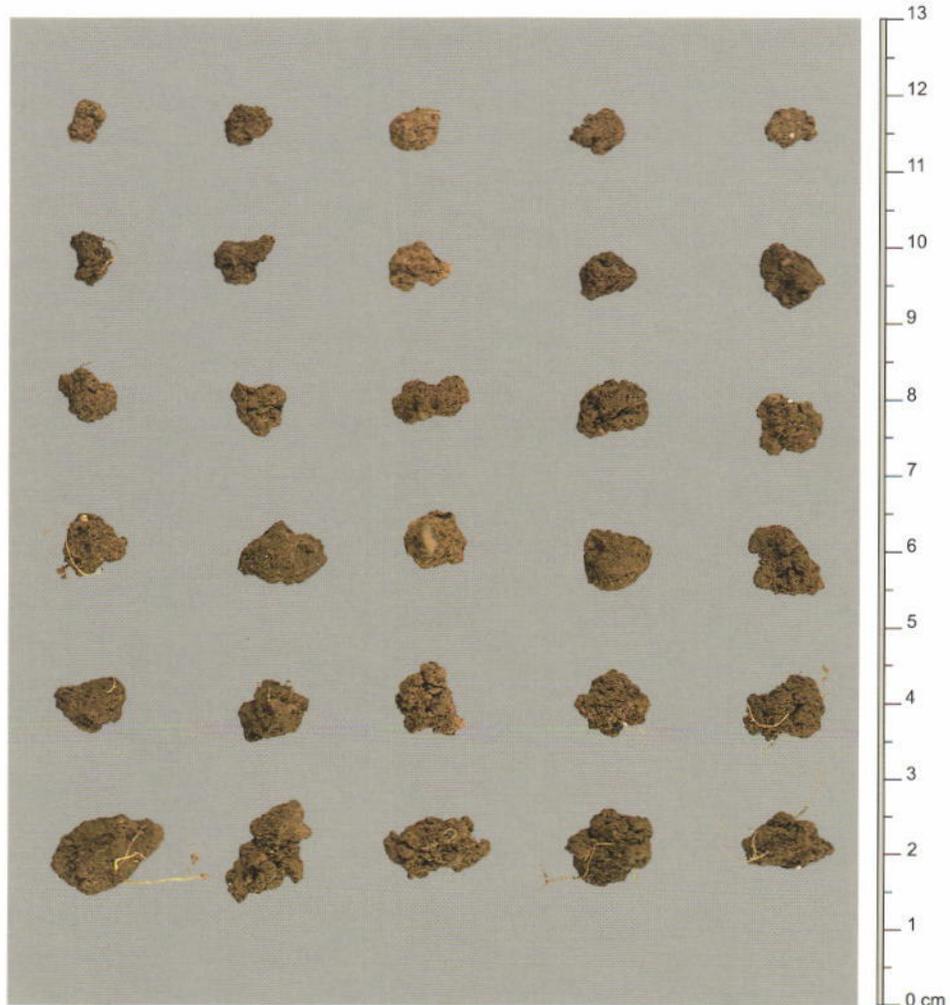
Forme géométrique

Contour sphérique à irrégulier, localement onduleux; longueurs des diamètres égales à différentes; arêtes souvent arrondies (par agrégation biologique) ou absentes.

Surface

Très rugueuse à rugueuse, moyennement poreuse, mate; couleur souvent plus claire à l'intérieur.

¹ Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2.



Po3

Très petits polyèdres (5 à 10 mm)

Genèse et localisation

Ségrégation de forte intensité; principalement dans l'horizon Bst, ou dans l'horizon Ahp¹ en cas de gel-dégel et si la teneur en argile est élevée (>20%).

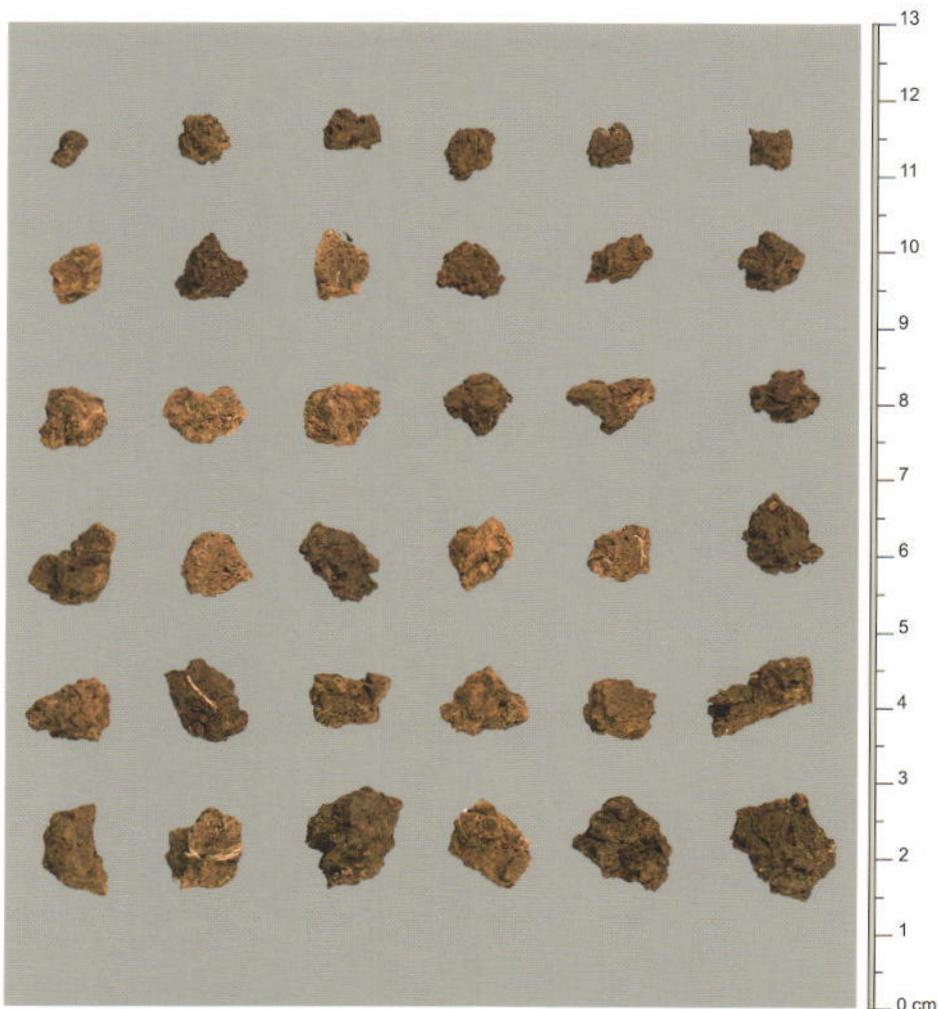
Forme géométrique

Contour souvent sphérique, rarement allongé (si influence gel-dégel), anguleux, souvent droit; longueurs des diamètres égales (très différentes si gel-dégel); arêtes très souvent nettes à très nettes.

Surface

Peu rugueuse, souvent localement lisse et luisante (enveloppe argileuse), peu poreuse.

¹ Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2.



Petites mottes O (5 à 10 mm)**Genèse et localisation**

Brassage et pétrissage (par les outils de travail du sol) d'u.s formées par agrégation; horizon Ahp¹.

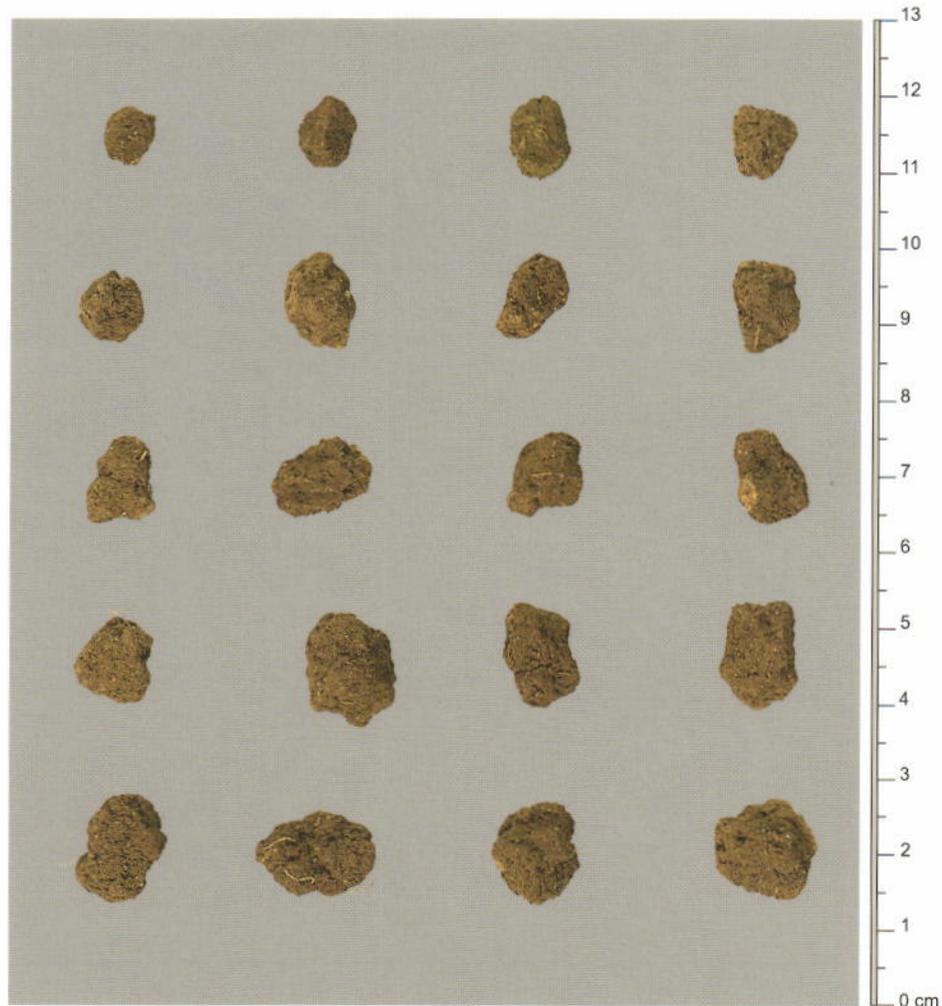
Forme géométrique

Contour très souvent sphérique, rarement anguleux, onduleux ou droit; longueurs des diamètres très souvent égales; arêtes très souvent arrondies (par déformation), rarement nettes.

Surface

Peu rugueuse, localement lisse ou striée; peu à moyennement poreuse selon la texture du sol; couleur localement en traînées.

¹ Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2.



Fragments moyens (5 à 10 mm)**Genèse et localisation**

Fragmentation mécanique d'u.s de grande taille, surtout de type MCar et MCan; horizon Ahp¹.

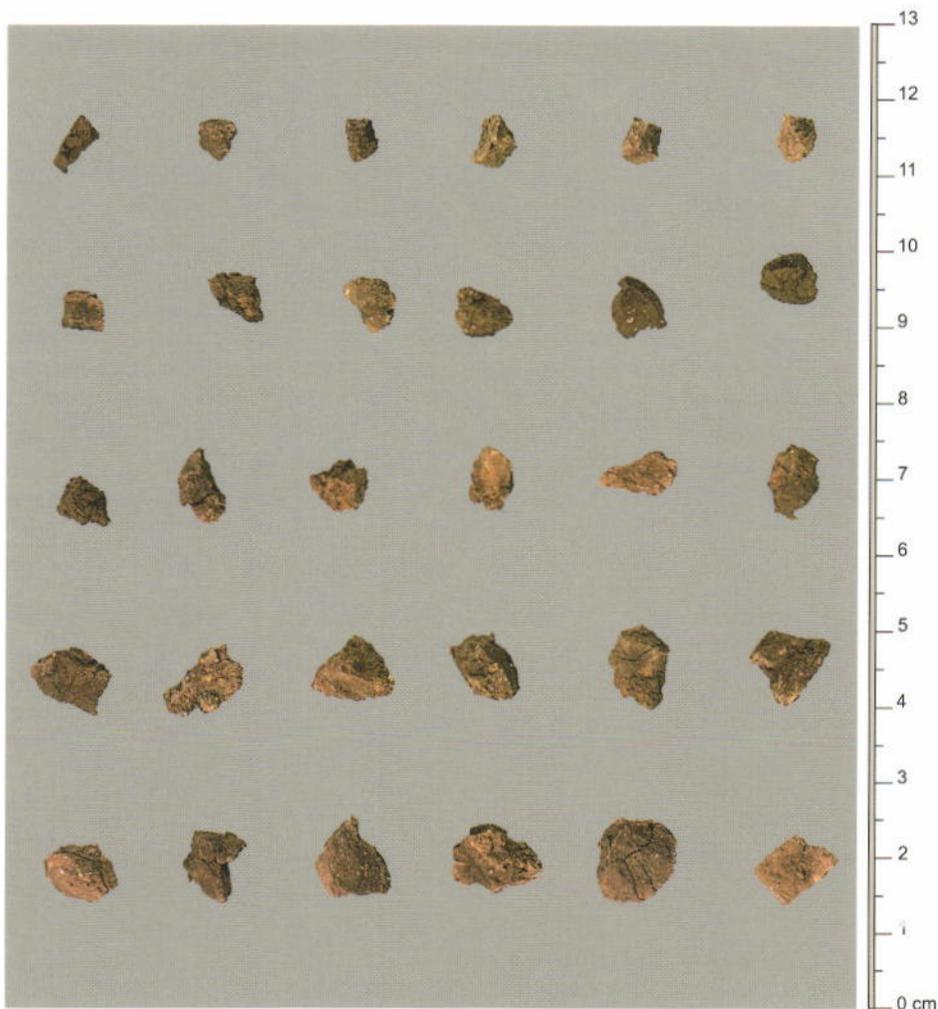
Forme géométrique

Contour sphérique à irrégulier, anguleux et droit; longueurs des diamètres très souvent très différentes; arêtes très nettes (formées par des lignes de rupture).

Surface

Très souvent peu rugueuse avec surfaces de rupture lisses, peu poreuse à très peu poreuse selon l'u.s d'origine, mate.

¹ Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2.



Grands polyèdres émoussés (10 à 20 mm)

Genèse et localisation

Ségrégation et agrégation; horizons Ah, Ahp et AB¹.

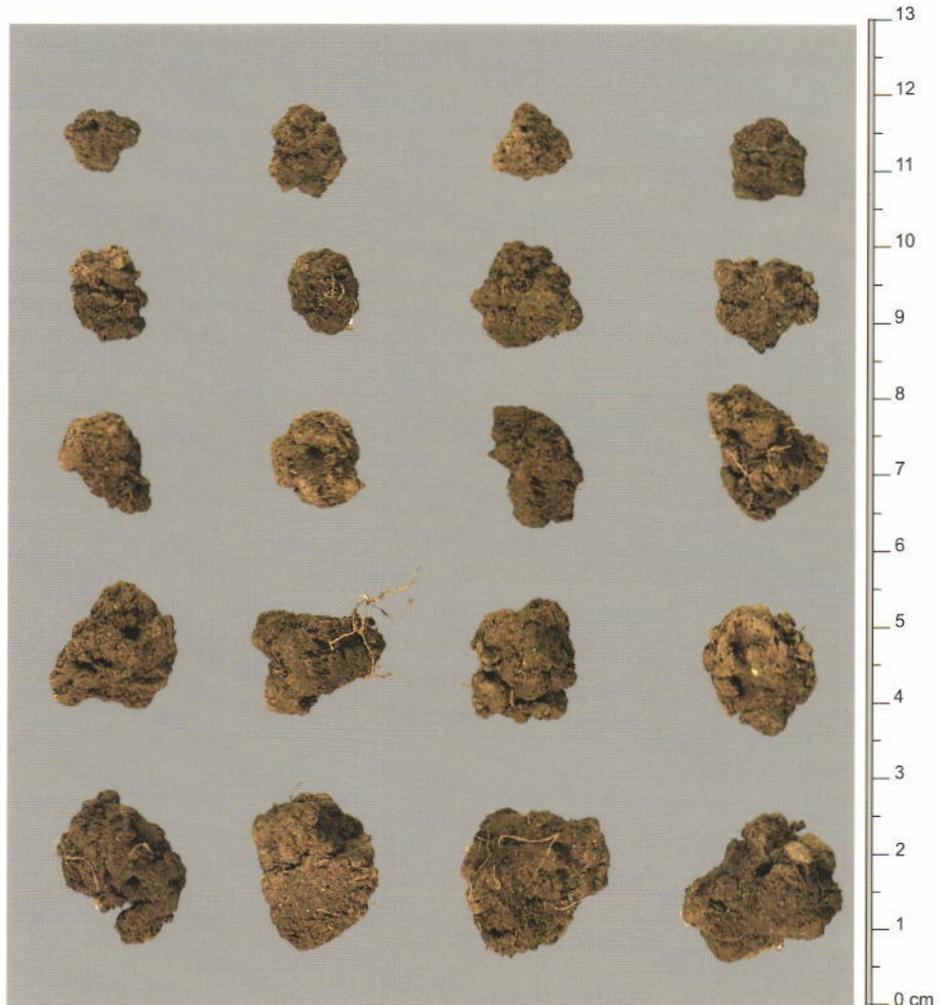
Forme géométrique

Contour très souvent sphérique, rarement irrégulier, localement onduleux; longueurs des diamètres égales à différentes; arêtes souvent arrondies (par agrégation biologique) ou absentes.

Surface

Très rugueuse à rugueuse, moyennement poreuse, mate; couleur souvent plus claire à l'intérieur.

¹ Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2.



Po4

Petits polyèdres (10 à 20 mm)

Genèse et localisation

Ségrégation de forte intensité; horizon Bw¹.

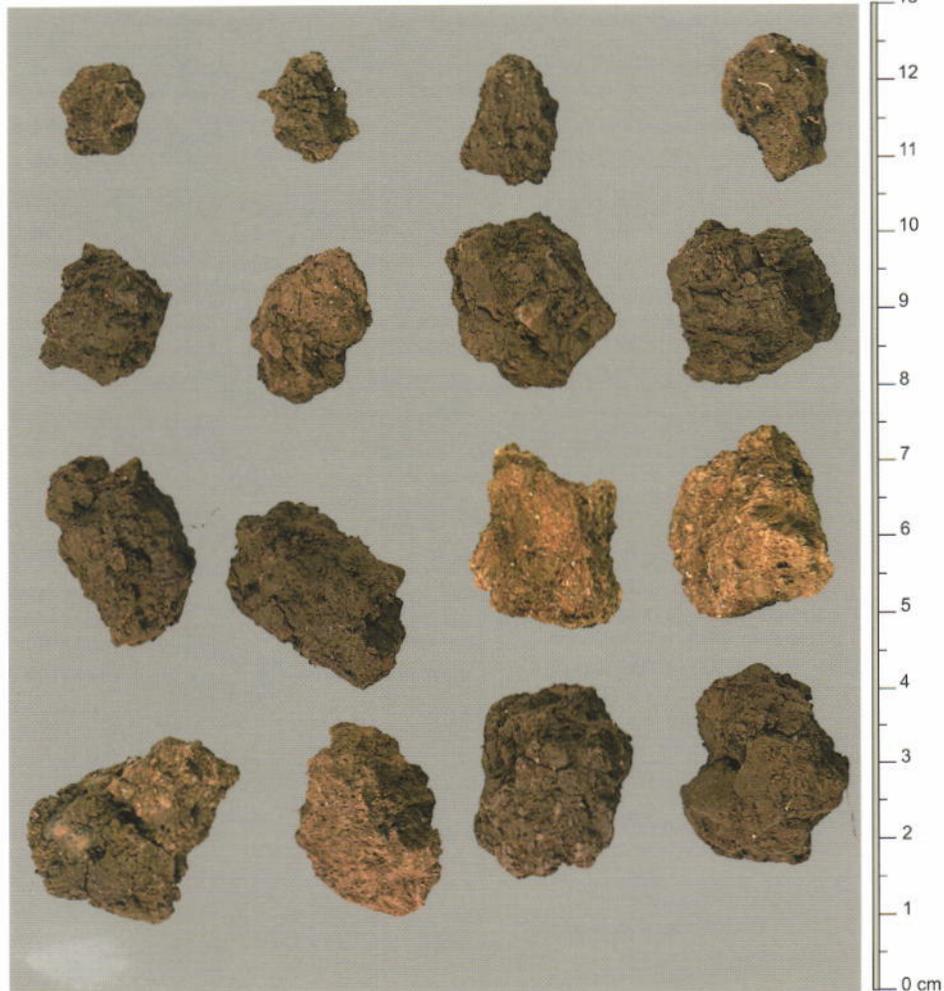
Forme géométrique

Contour très souvent sphérique, rarement irrégulier, anguleux, souvent droit; longueurs des diamètres égales à différentes; arêtes très souvent nettes; les u.s voisins ont souvent des faces complémentaires.

Surface

Peu rugueuse, souvent localement lisse et luisante (enveloppe argileuse), peu poreuse.

¹ Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2.



Mottes O moyennes (10 à 20 mm)**Genèse et localisation**

Brassage et pétrissage (par les outils de travail du sol) d'u.s formées par agrégation; horizon Ahp¹.

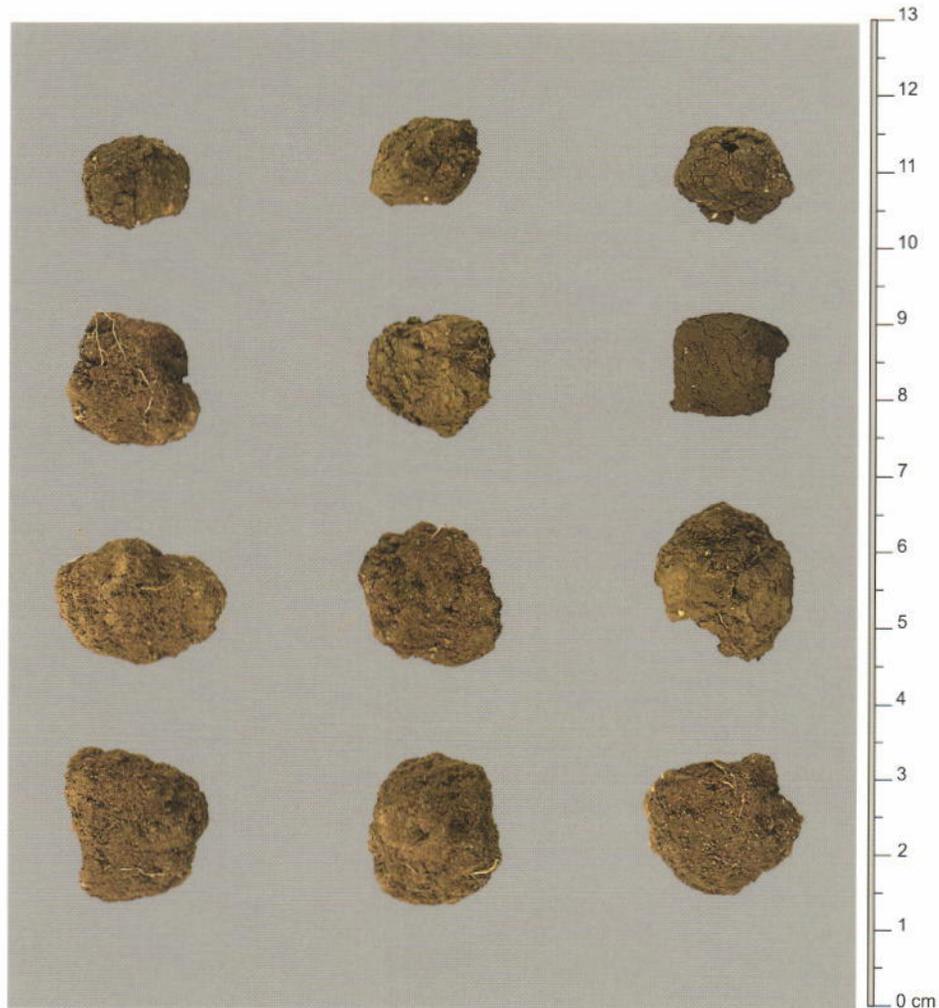
Forme géométrique

Contour très souvent sphérique; longueurs des diamètres très souvent égales; arêtes très souvent arrondies (par déformation), rarement nettes.

Surface

Peu rugueuse, localement lisse ou striée, peu à moyennement poreuse selon la texture du sol; couleur localement en traînées.

¹ Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2.



Grands fragments (10 à 20 mm)**Genèse et localisation**

Fragmentation mécanique d'u.s de grande taille, surtout de type MCar et MCan; horizon Ahp¹.

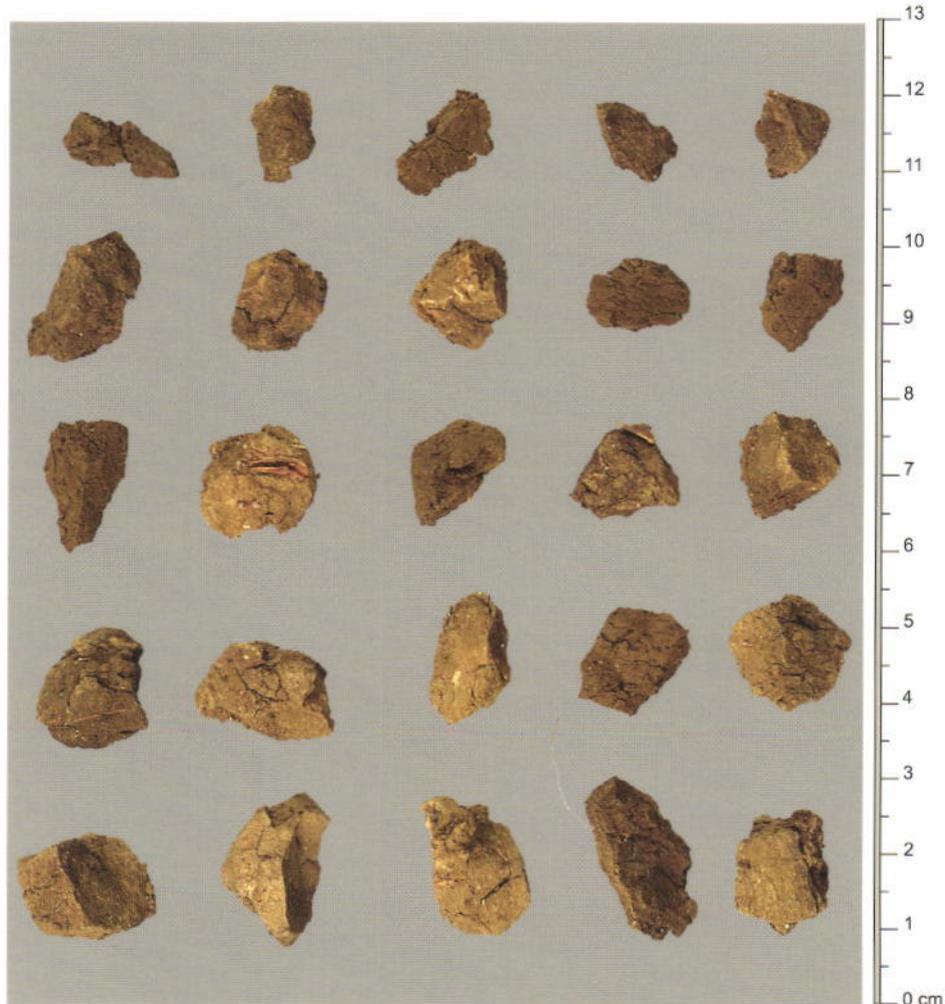
Forme géométrique

Contour sphérique à irrégulier, anguleux et droit; longueurs des diamètres très souvent très différentes; arêtes très nettes (formées par des lignes de rupture).

Surface

Très souvent peu rugueuse avec surfaces de rupture lisses, peu poreuse à très peu poreuse selon l'u.s d'origine, mate.

¹ Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2.



Pé5

**Très grands polyèdres émoussés
(20 à 50 mm)**

Genèse et localisation

Principalement par ségrégation; horizons
Ah, Ahp et AB¹.

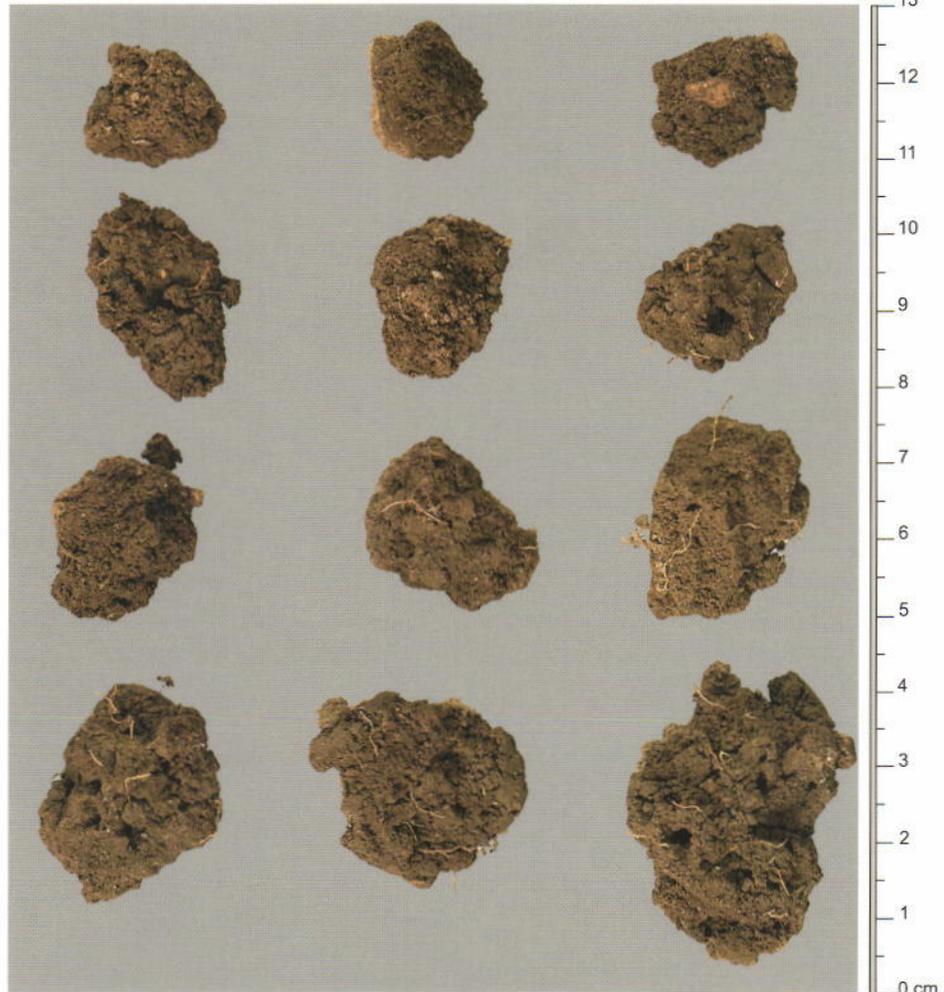
Forme géométrique

Contour très souvent sphérique, rarement
irrégulier, localement onduleux; longueurs
des diamètres égales à différentes; arêtes
souvent arrondies (par agrégation
biologique) ou absentes.

Surface

Très rugueuse à rugueuse, moyennement
poreuse, mate; couleur souvent plus claire à
l'intérieur.

¹ Pour la codification des horizons utilisée en
France, consulter l'annexe 2.



Polyèdres moyens (20 à 50 mm)

Genèse et localisation

Ségrégation d'intensité moyenne; horizons Bw et Bst, ainsi que Bg et Bgg¹ (horizons hydromorphes).

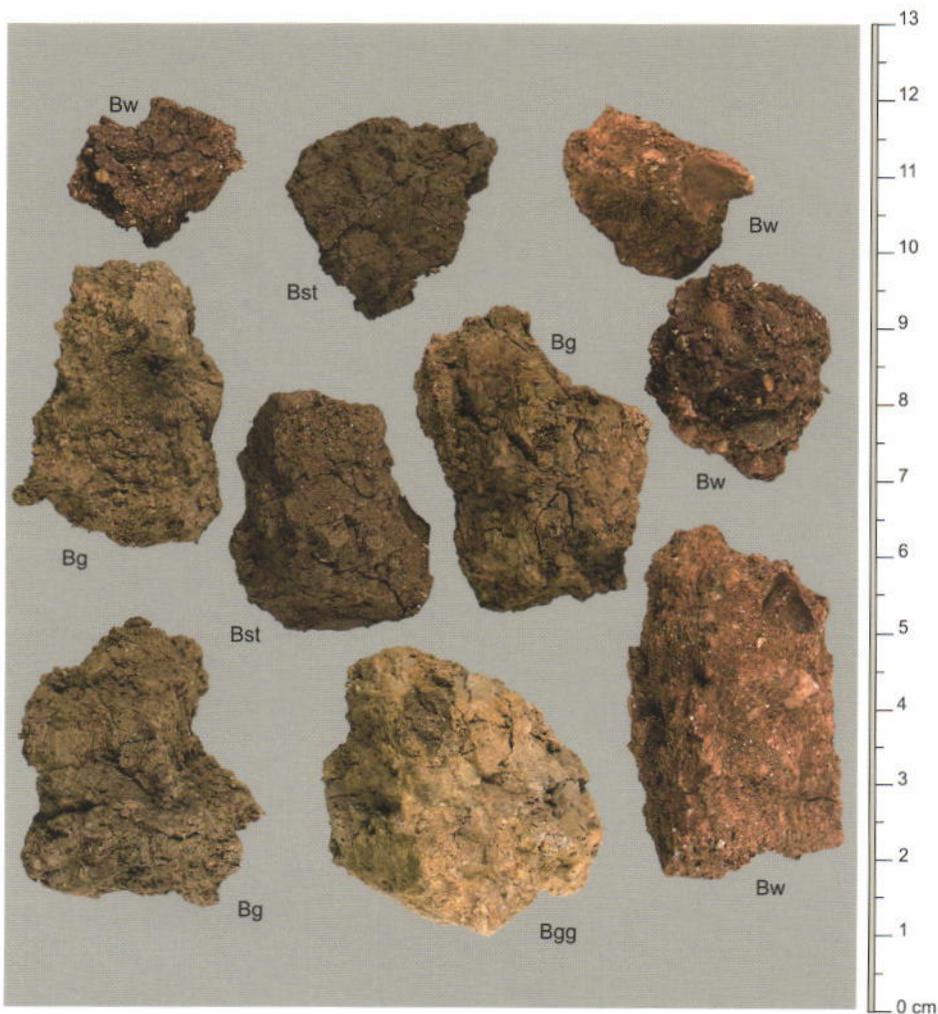
Forme géométrique

Contour sphérique, anguleux, souvent droit; longueurs des diamètres égales à différentes; arêtes très souvent nettes; les u.s voisines ont souvent des faces complémentaires.

Surface

Peu rugueuse, souvent localement lisse et luisante (enveloppe argileuse), peu poreuse (si provenant de Bw) à très peu poreuse (si provenant de Bgg).

¹ Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2.



Petits prismes (20 à 50 mm)

Genèse et localisation

Ségrégation de forte intensité, souvent avec illuviation d'argile; horizons Bt et It (horizon illuvial), ainsi que Bgg¹ (horizon hydromorphe avec taux d'argile élevé).

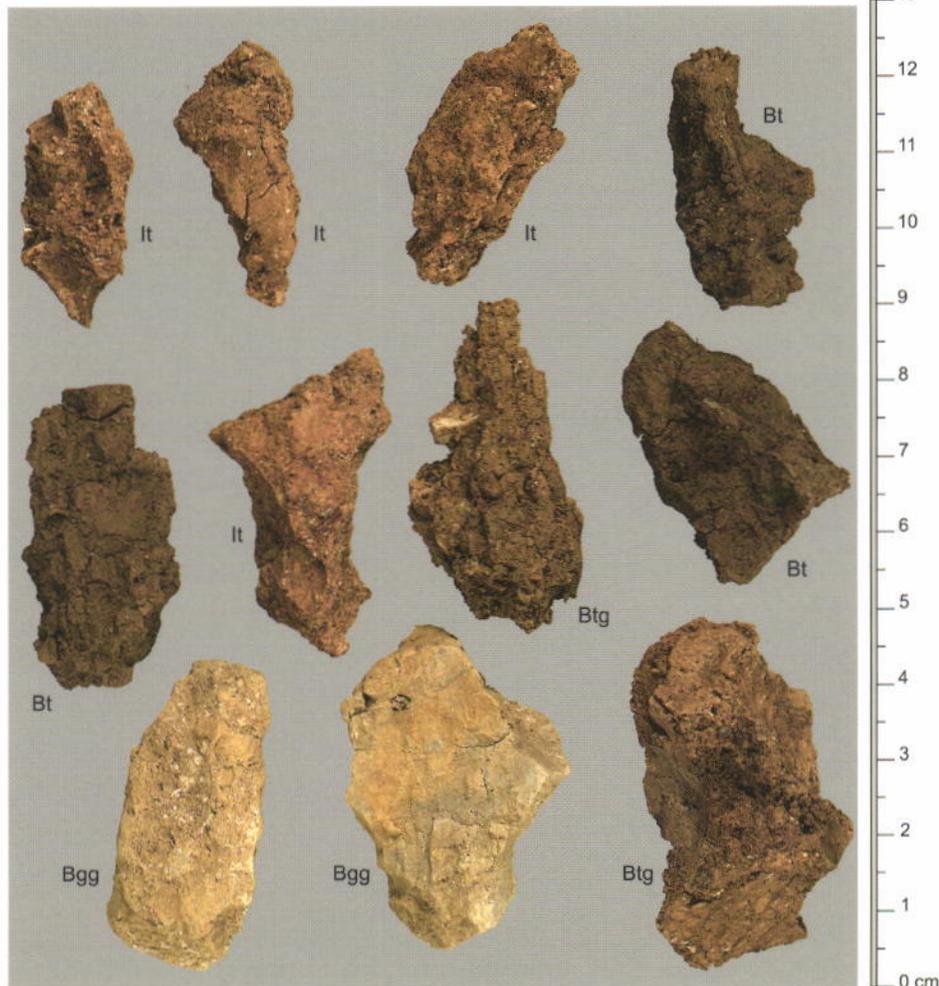
Forme géométrique

Contour très souvent allongé à orientation verticale, anguleux et droit; longueurs des diamètres très souvent très différentes; arêtes nettes; les u.s voisines ont souvent des faces complémentaires.

Surface

Faces verticales souvent à revêtement argileux lisse, autres faces peu rugueuses, peu poreuses (si provenance de Bt et It) à très peu poreuse (si provenance de Bgx et Bgg).

¹ Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2.



Grandes mottes O (20 à 50 mm)**Genèse et localisation**

Brassage et pétrissage (par les outils de travail du sol) d'u.s formées par agrégation; horizon Ahp¹.

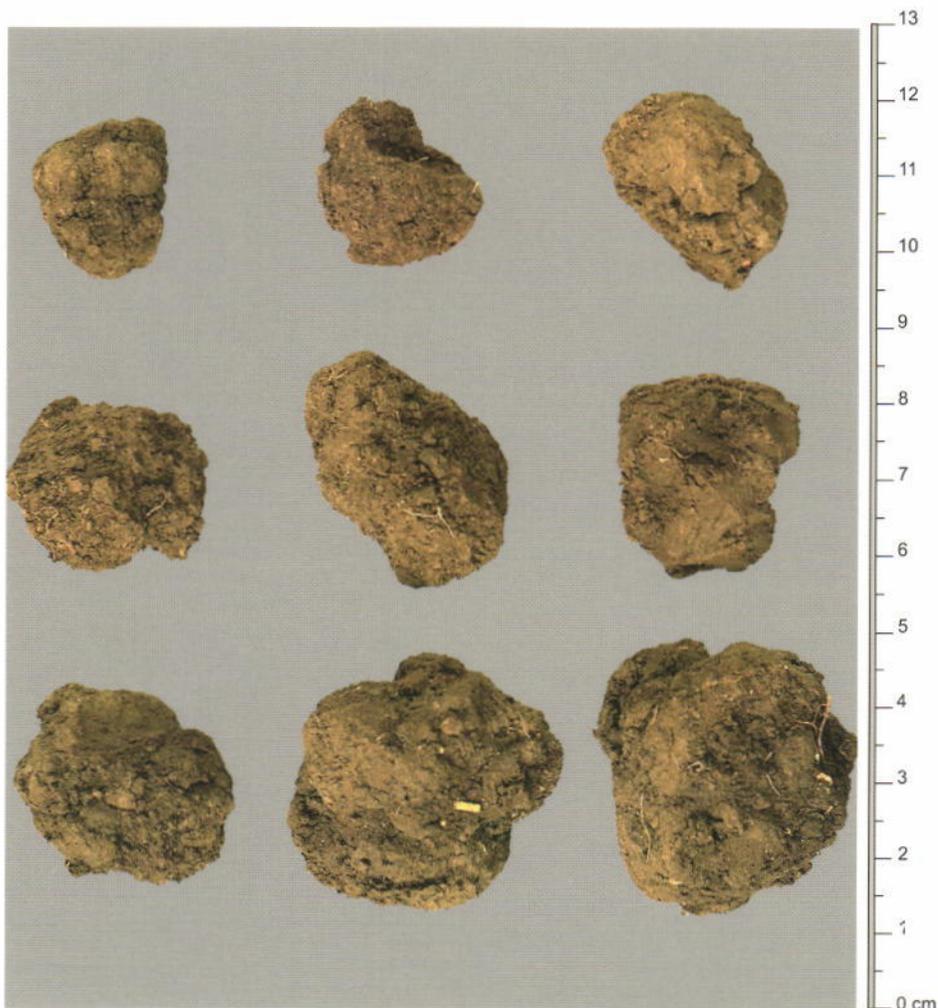
Forme géométrique

Contour très souvent sphérique; longueurs des diamètres très souvent égales; arêtes très souvent arrondies (par déformation), rarement nettes.

Surface

Peu rugueuse, localement lisse ou striée, très souvent peu poreuse; couleur localement en traînées.

¹ Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2.



MCan5
MCar5

Petites mottes C anguleuses et C arrondies (20 à 50 mm)

Genèse et localisation

Principalement issues d'u.s formées par ségrégation (Pr, Po).

MCan : compactage, principalement dans les horizons Ahp et les horizons contigus (AB à B)¹.

MCar : brassage et pétrissage; horizon Ahp¹.

Forme géométrique

MCan : contour sphérique, anguleux; longueurs des diamètres égales à différentes; arêtes nettes.

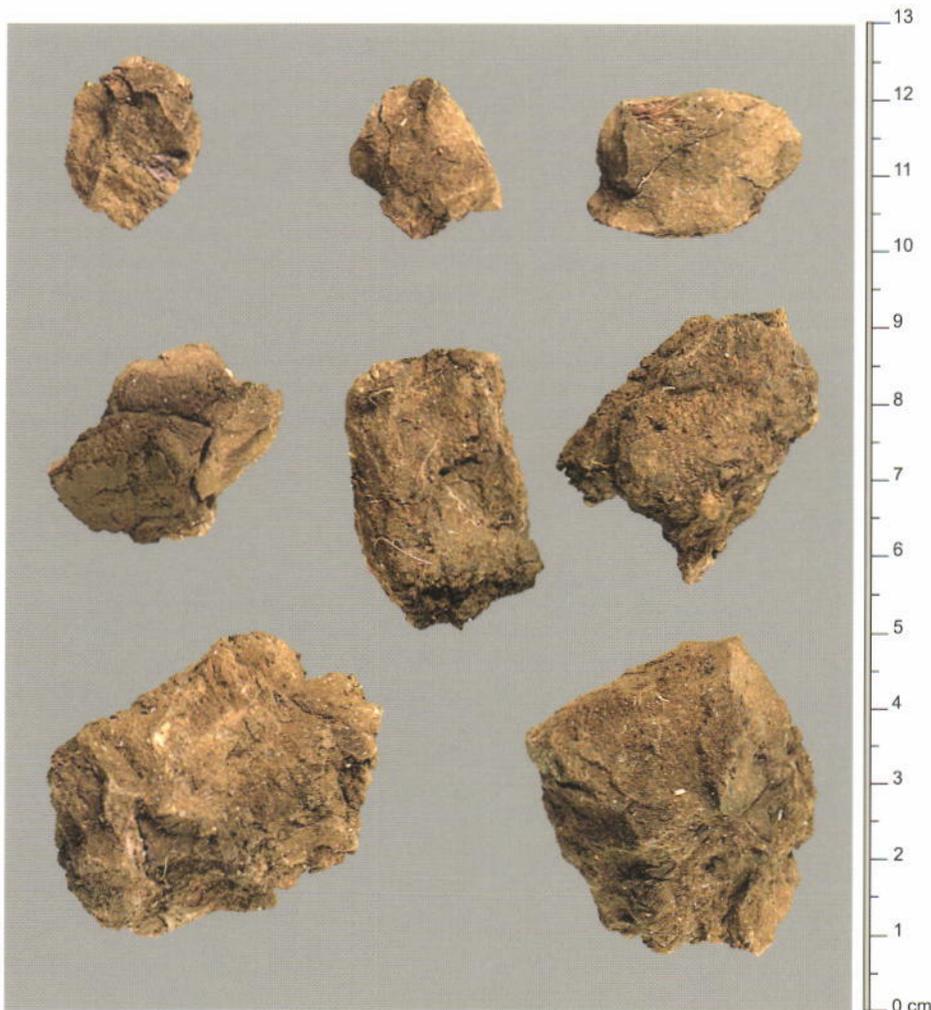
MCar : contour sphérique à irrégulier; longueurs des diamètres égales à différentes; arêtes très souvent arrondies.

Surface

MCan : peu rugueuse, très peu poreuse; fortement compactée

MCar : peu rugueuse, localement lisse, très souvent très peu poreuse; couleur localement en traînées; fortement compactée.

¹ Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2.



Po6
Po7

**Grands et très grands polyèdres
(50 à 100 mm et > 100 mm)**

Genèse et localisation

Ségrégation de faible intensité; horizons Bw situés en profondeur ainsi que Bg et Bgg¹ (horizons hydromorphes).

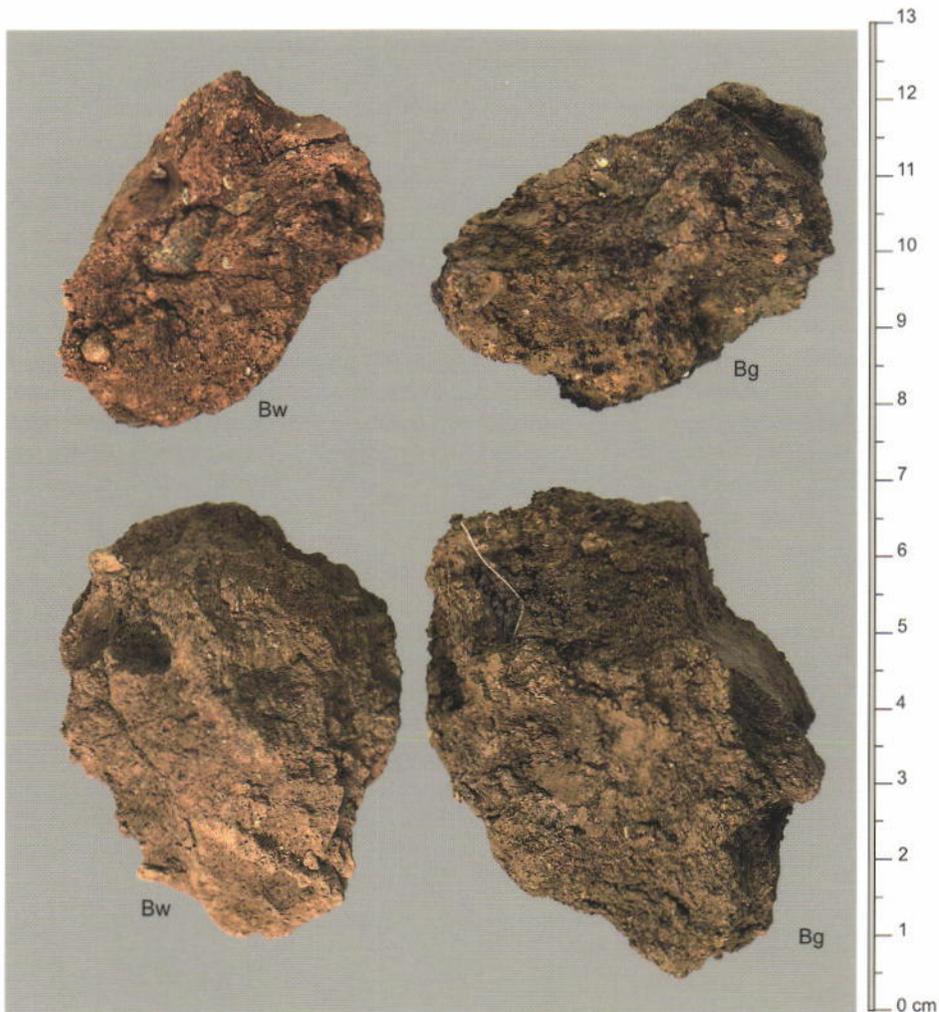
Forme géométrique

Contour sphérique, anguleux, souvent droit; longueurs des diamètres égales à différentes; arêtes très souvent nettes; les u.s voisins ont souvent des faces complémentaires.

Surface

Peu rugueuse, localement lisse et luisante (enveloppe argileuse), peu poreuse (si provenant de Bw) à très peu poreuse (si provenant de Bgg).

¹ Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2.



**Moyens et grands prismes
(50 à 100 mm et > 100 mm)**

Genèse et localisation

Ségrégation inhibée, souvent avec illuviation d'argile; horizons Bt et It, ainsi que Bgg et Itg¹.

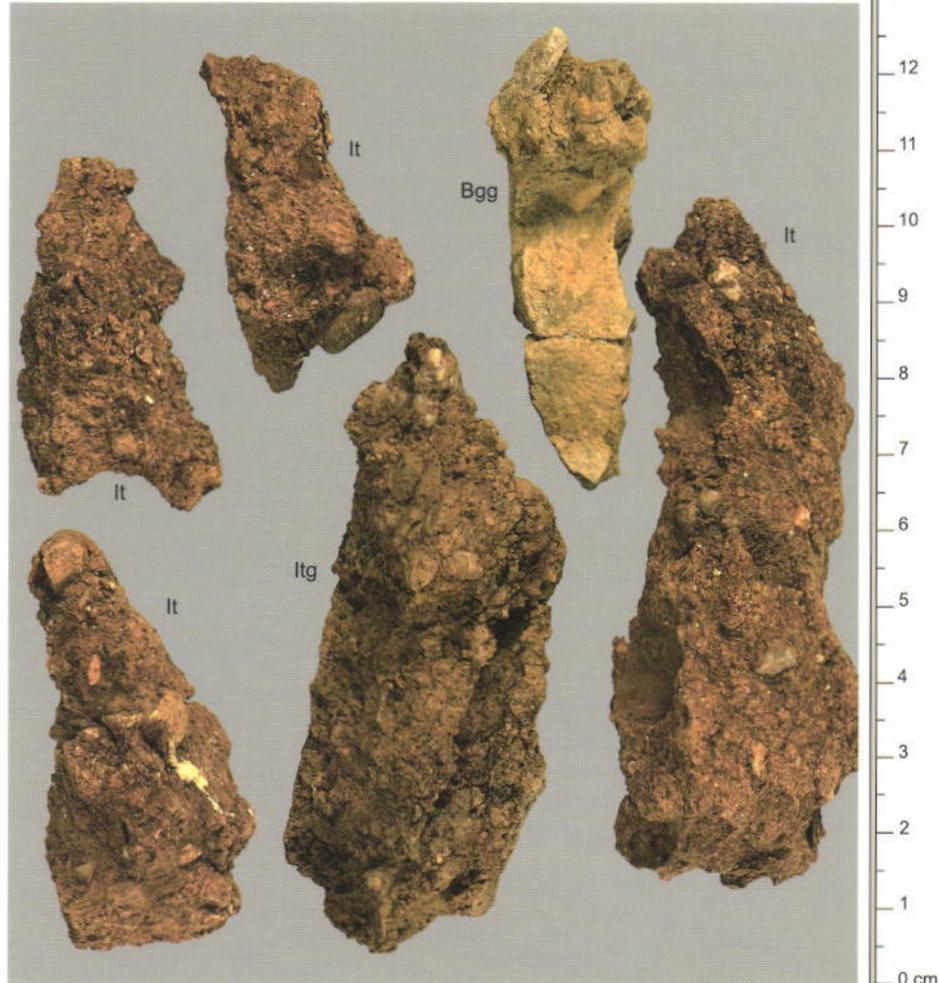
Forme géométrique

Contour très souvent allongé à orientation verticale, anguleux et droit; longueurs des diamètres très souvent très différentes; arêtes nettes; les u.s voisins ont souvent des faces complémentaires.

Surface

Faces verticales souvent à revêtement argileux lisse, autres faces peu rugueuses; peu poreuse (si provenance de Bt et It) à très peu poreuse (si provenance de Bgx et Bgg).

¹ Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2.



MCan6
MCar6
MCan7
MCar7

**Mottes C anguleuses et C arrondies moyennes;
grosses mottes C anguleuses et
C arrondies (50 à 100 mm et > 100 mm)**

Genèse et localisation

Principalement issues d'u.s formées par ségrégation (Pr, Po).

MCan : compactage, principalement dans les horizons Ahp et les horizons contigus (AB à B)¹.

MCar : brassage et pétrissage; horizon Ahp¹.

Forme géométrique

MCan : contour sphérique, anguleux; longueurs des diamètres égales à différentes; arêtes nettes.

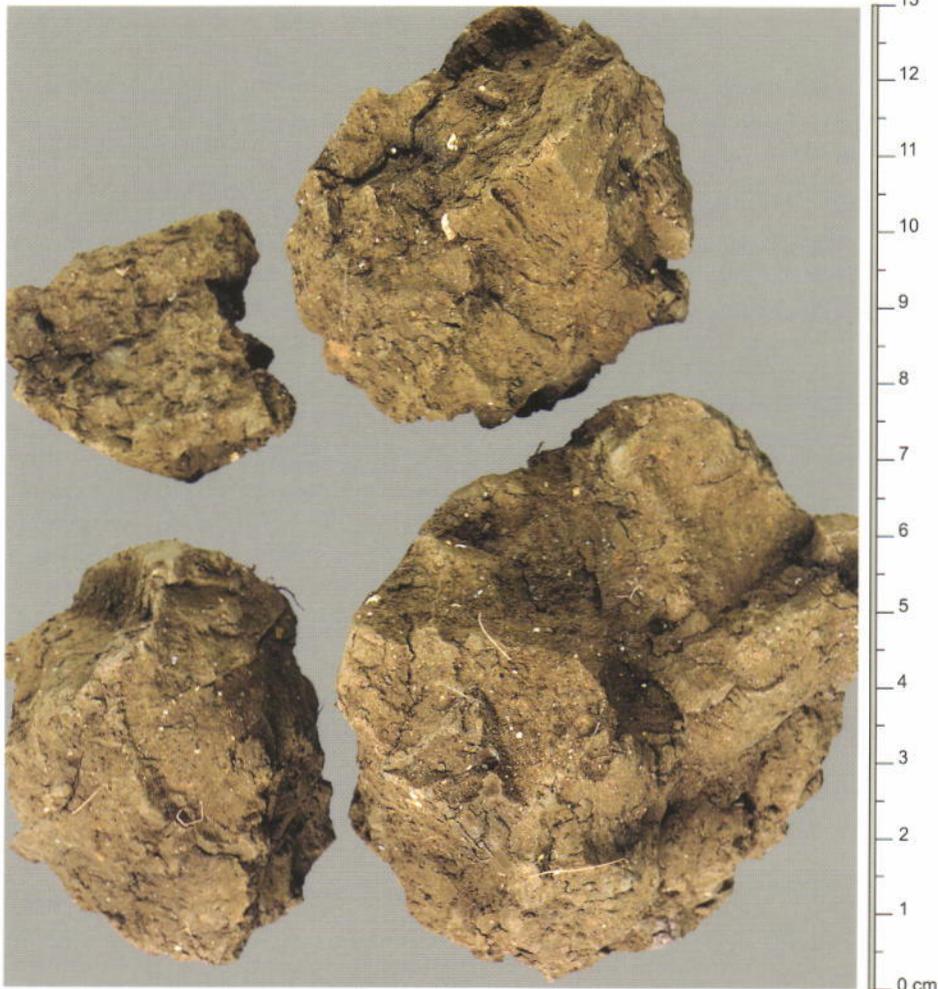
MCar : contour sphérique à irrégulier; longueurs des diamètres égales à différentes; arêtes très souvent arrondies.

Surface

MCan : peu rugueuse, très peu poreuse; fortement compactée.

MCar : peu rugueuse, localement lisse, très souvent très peu poreuse; couleur localement en traînées; fortement compactée.

¹ Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2.



Sm

Structure massive

Genèse et localisation

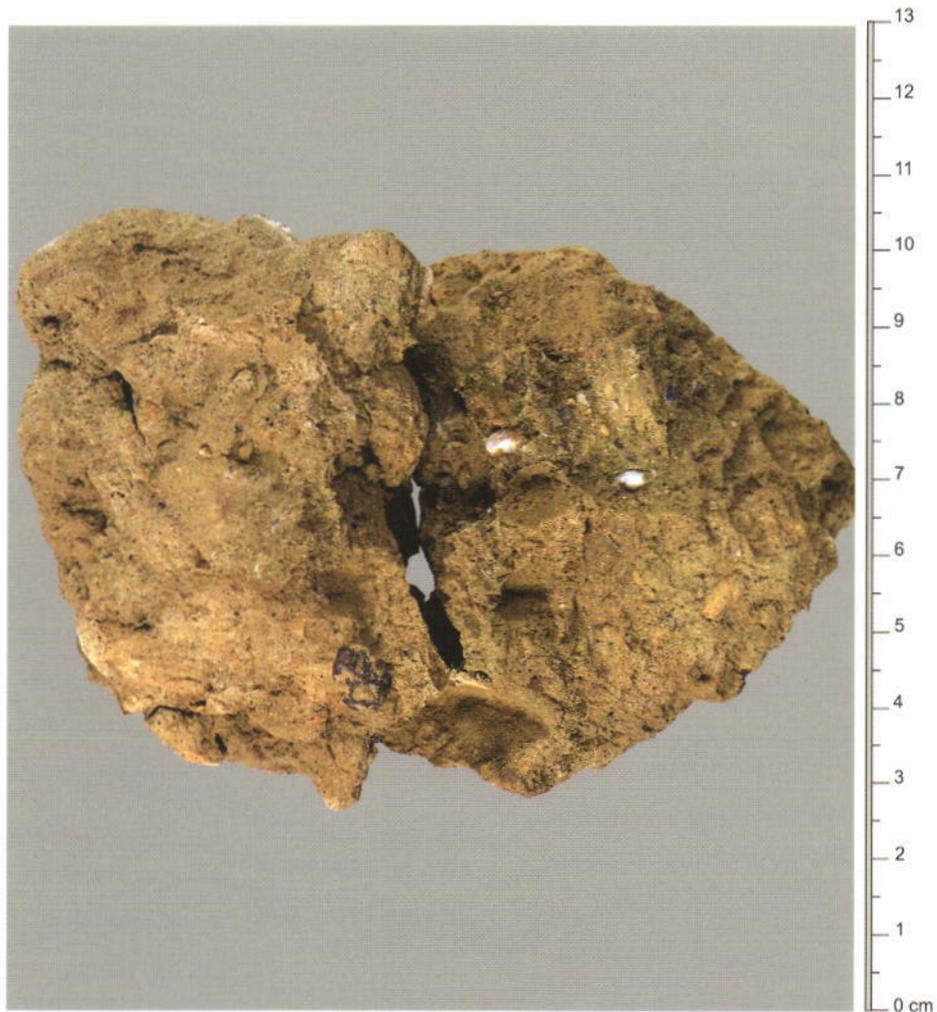
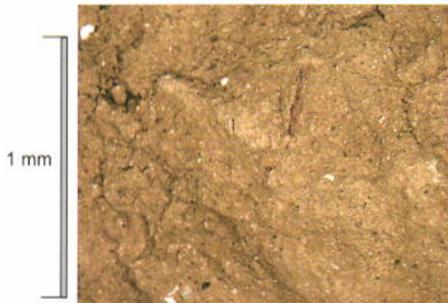
Masse cohérente, sans formation d'u.s.;
horizon C et horizons hydromorphes.

Forme géométrique

Bloc massif (structure du matériau d'origine
souvent visible).

Surface

Correspondant aux caractéristiques du
matériau d'origine.



Sp

Structure particulière

Genèse et localisation

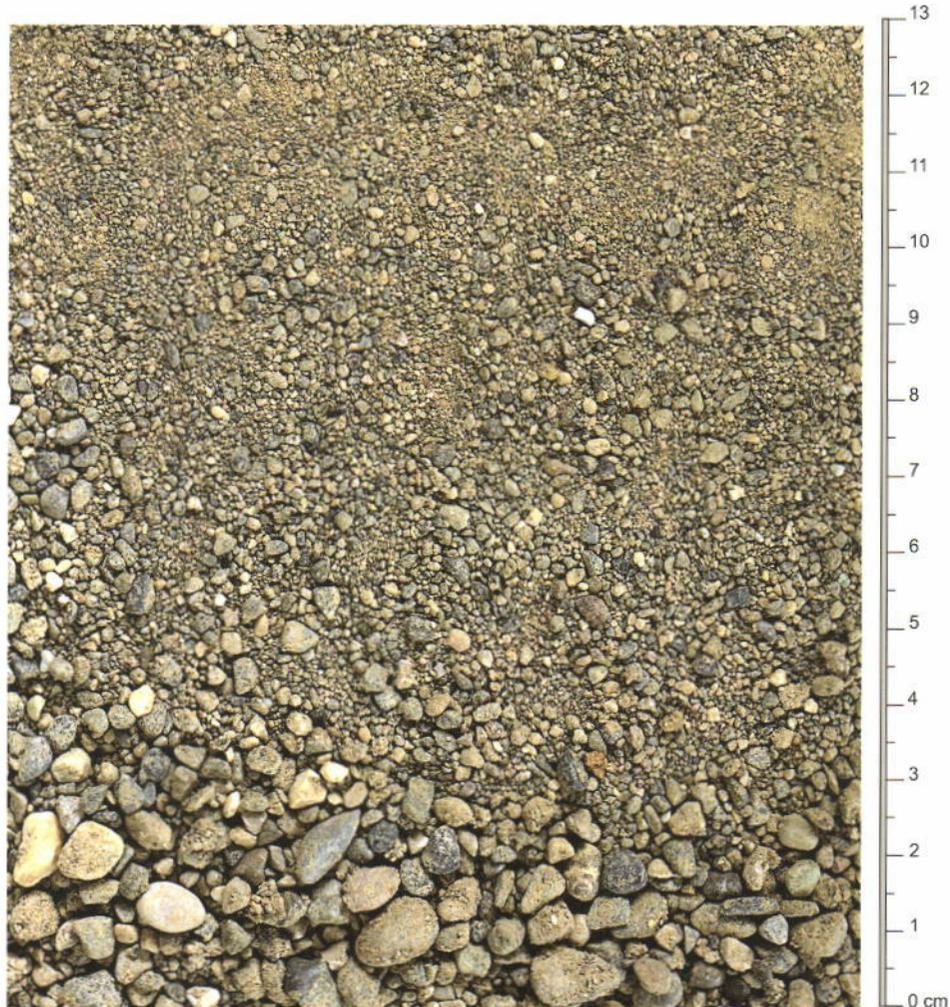
Particules sans cohésion, parfois temporairement stabilisée par des ménisques d'eau, sans formation d'u.s; horizon C et horizons hydromorphes pauvres en argile.

Forme géométrique

Dépendant du matériau d'origine.

Surface

Correspondant aux caractéristiques du matériau d'origine.



Rd
Rdb

Résidu de la déstructuration (< 0.2mm)

Genèse et localisation

Particules minérales et organiques, micro-agrégats formés par la destruction des u.s (en état libre : Rd; croûte de battance en surface: Rdb); horizon Ahp¹ ou surface du sol.

Forme géométrique

Rd : très variable (discernable à la loupe binoculaire).

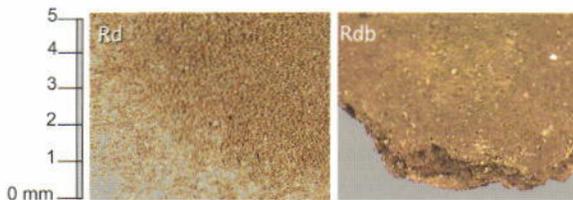
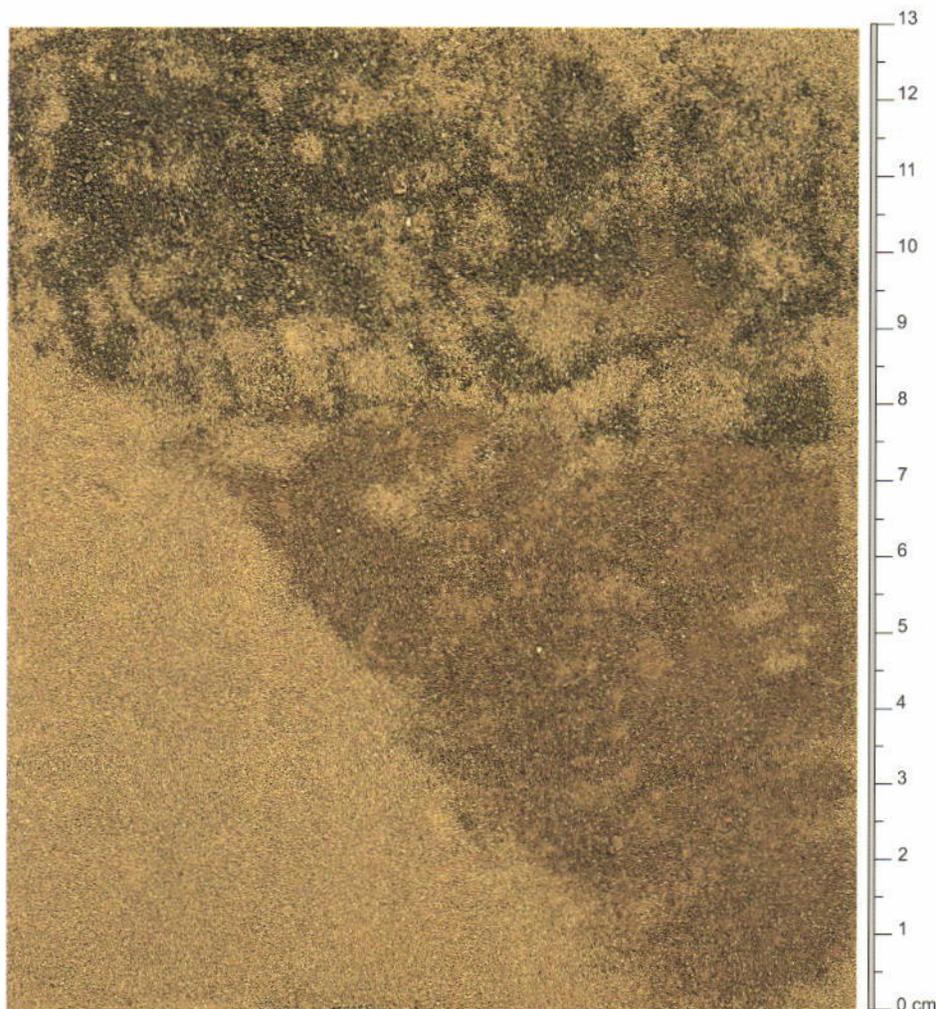
Rdb : croûte formant une mince plaque horizontale.

Surface

Rd : grande diversité (discernable à la loupe binoculaire).

Rdb : peu rugueuse; très peu poreuse.

¹ Pour la codification des horizons utilisée en France, consulter l'annexe 2.



Annexe 1: Liste des figures

	Figures	Page
Figure 1a	Contenu des chapitres	1.1-1
Figure 1b	Termes techniques concernant la structure du sol	1.2-1
Figure 1c	Types d'u.s et processus de leur transformation dans un sol agricole	1.3-1
Figure 1d	Description des différents états de la structure et des types d'u.s	1.3-3
Figure 1e	Apparition préférentielle des types d'u.s dans le profil	1.3-4
Figure 2a	Critères visuels distinctifs utilisés pour la description des différents types d'u.s	2.1-2
Figure 2b	Critères visuels distinctifs des types d'u.s de la catégorie de taille 3 (5-10 mm)	2.2-1
Figure 2c	Critères visuels distinctifs des types d'u.s de la catégorie de taille 5 (20-50 mm)	2.2-2
Figure 2d	Clé de détermination du type d'u.s à partir d'observations visuelles	2.3-2
Figure 2e	Description des types d'u.s – 1. Types d'u.s issus de processus naturels	2.4-2
	Description des types d'u.s – 2. Types d'u.s issus de processus anthropiques	2.4-3
	Description des types d'u.s – 3. Autres types de structure	2.4-4
Figure 3a	Termes techniques concernant l'application de la méthode sur le terrain	3.1-1
Figure 3b	Etapes de la méthode	3.2-1
Figure 3c	Aperçu visuel du résultat de la méthode appliqué sur un échantillon de sol provenant du horizon Ahp (0 à 12 cm).	3.3-3
Figure 4a	Termes techniques concernant l'évaluation de la qualité de la structure du sol	4.1-2
Figure 4b	Etapes de l'évaluation chiffrée de la structure du sol	4.2-1
Figure 4c	Note de l'u.s en fonction du type d'u.s et de sa catégorie de taille	4.2-2
Figure 4d	Détermination du niveau de cohésion et correction de la note de l'u.s	4.2-3
Figure 4e	Correction de la note de la catégorie de taille 1	4.2-3
Figure 4f	Détermination de la cohésion de la sur-structure et correction de la note de la couche	4.2-4
Figure 4g	Exemple d'une évaluation chiffrée de la structure de l'horizon Ah d'une prairie	4.3-1
Figure 4h	Formulaire pour l'évaluation chiffrée de la structure du sol	4.5-1
Figure 5a	Intervalles préférentiellement occupés par les trois critères «taille de l'u.s», «cohésion de l'u.s» et «cohésion de la sur-structure» en fonction des types d'u.s	5.2-2
Figure 5b	Evolution de la part pondérale des binômes (taille, type d'u.s) dans l'horizon Ahp d'un sol brun. Evolution de la structure par transformation, déstructuration et réorganisation	5.3-1
Figure 5c	Influence du passage des machines lourdes sur la taille des u.s dans un sol calcaire brun alluvial	5.3-1
Figure 6a	Liste des planches photographiques	6.0-1

Annexe 2: Glossaire franco - suisse

Les termes qui figurent dans le glossaire franco-suisse sont signalés avec une note de bas de page dans le texte de la brochure.

Sujet	Termes pédologiques généraux	
	Terme utilisé en Suisse	Terme utilisé en France
Volume effectivement observé dans une fosse dans le cadre d'une étude pédologique	Profil	Solum
Structure avant transformations pédogénétiques	Primaire	Lithologique
Structure caractérisée par l'absence d'u.s	Primaire	Apédique
Structure après transformations pédogénétiques	Secondaire	Pédologique
Structure caractérisée par la présence d'u.s	Secondaire	Pédique

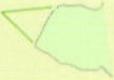
Codification des horizons dont il est fait mention dans l'ouvrage

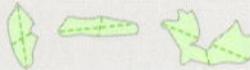
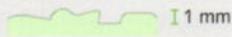
Définition des horizons selon la Société suisse de pédologie (SSP)	Codification des horizons selon la Société suisse de pédologie	Horizons du Référentiel pédologique ¹ les plus proches de la définition de la SSP	Codification des horizons selon le Référentiel pédologique
Horizon organique d'accumulation avec plus de 30% de matière organique	O	Horizon holorganique constitué principalement de débris ou fragments végétaux morts, plus ou moins transformé, formé en conditions aérobies	O
Horizon tourbeux avec plus de 30% de matière organique formé en anaérobie	T	Horizon holorganique constitué principalement de débris de végétaux hygrophiles ou sub-aquatiques, formé en milieu saturé par l'eau durant des périodes prolongées	H
Horizon de surface organo-minéral A, avec plus de 2% (<10%) de matière organique très décomposée	Ah	Horizon organo-minéral	A ou Ah
Horizon A anmoorique, hydromorphe, 10 à 30% de matière organique	Aa	Horizon noir épais des anmoors, à consistance plastique et structure massive en période d'engorgement	An
Horizon Ah labouré	Ahp	Horizon périodiquement soumis au labour ou/et autres pratiques agricoles	LA ou LAh
Horizon Ahp compacté, non cimenté	Ahpx	Semelle de labour	Pas de codification
Horizon de transition	AB	Horizon de transition	AS
Horizon AB compacté, non cimenté	ABx	Pas d'équivalent	Pas de codification
Horizon de sous-sol, peu altéré	B	Horizon d'altération pédologique	S (et variantes)
Horizon B à humidité temporaire, compacté, non cimenté	Bgx	Horizon S à engorgement temporaire	Sg
Horizon B relativement riche en argile (ne provenant pas d'illuviation)	Bt	Horizons d'altération caractérisés par une structuration pédologique généralisée et de nettes différences par rapport au matériau parental (couleur, altérations, néoformations)	S (et variantes), Sp
Horizon B à signes typiques d'altération par brunification	Bw		
Horizon d'enrichissement en argile par illuviation	It	Horizon enrichi en argile par illuviation, dit «argilluvial»	BT
Horizon It à humidité temporaire	Itg	Horizon BT à engorgement temporaire	BTg
Horizon de transition	BC	Horizon de transition	SC ou BC
BC très réduit en permanence	BCr	Horizon d'altération à engorgement quasi-permanent	SGr
Horizon de profondeur (matériau de départ) ; pas d'agrégats	C	Horizon minéral de profondeur, qui n'a pas acquis de structuration pédologique généralisée	C

¹ Baize D. et Girard M.-C., 1995

Annexe 3: Présentation graphique des critères géométriques distinctifs (sans la porosité).

Les critères permettent d'identifier les différents types d'u.s (voir chapitre 2).

Critères	Spécification des critères	Présentation graphique	Remarques
Description de la projection des u.s			
Contour	Sphérique		Contour relativement rond avec des éléments convexes; les diagonales traversant le centre de gravité se trouvent à l'intérieur du contour
	Allongé		Contour avec une direction préférentielle
	Irrégulier		Contour irrégulier, avec des éléments concaves; les diagonales peuvent se trouver partiellement à l'extérieur
Détail du contour	Anguleux		Avec des angles aigus et obtus ou autre pointe de forme géométrique variable
	Onduleux		Alternance des éléments convexes et concaves, sans angles et pointes
	Droit		Segments du périmètre relativement droits, souvent en combinaison avec des éléments anguleux
Description des u.s en trois dimensions et de la surface			
Longueurs des diamètres $Q = d_{max}/d_{min}$ $d = \text{diamètre}$	Egaux		Q toujours < 1.5 U.s en forme de polyèdre ou de boule
	Différents		Q toujours > 1.2 Q souvent > 1.5 Q rarement > 2

Critères	Spécifications des critères	Présentation graphique	Remarques
	Très différents		Q toujours > 2 U.s allongée ou en forme de plaquette ou de forme mixte
Arête (intersection de deux plans)	Très nette		Intersection très nette
	Nette		Intersection encore perceptible
	Arrondie		Intersection arrondie
	Sans, absente		Intersection nulle
Rugosité	Très rugueuse		Amplitude de l'ondulation > 1 mm, mais au maximum 2 mm
	Rugueuse		Amplitude de l'ondulation environ 1 mm
	Peu rugueuse		Amplitude de l'ondulation < 1 mm, bien visible et tactile
	Lisse		L'amplitude de l'ondulation n'est plus visible
	Striée		Zone d'ondulation formée par des sillons parallèles

Annexe 4: Bibliographie

- AG Boden, 1994. Bodenkundliche Kartieranleitung 4. Aufl., 392 S. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Baize D., Girard M.-C., 1995. Référentiel pédologique, p. 326. INRA Editions, Paris.
- Baize D., Jabiol B., 1995. Guide pour la description des sols, p. 374. INRA Editions, Paris.
- Becher H. H., 2000. Gefüge/Morphologie. In: Blume et al., Handbuch der Bodenkunde Kapitel 2.6.2.1., 19 S. ecomed, Landsberg/Lech.
- Blume H.P., 1992. Handbuch des Bodenschutzes 2. Auflage, 794 S. ecomed Landsberg/Lech.
- Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit, Band 2 Bodengefüge 1991. Berichte über Landwirtschaft 204. Sonderheft, 152 S. Paul Parey, Hamburg und Berlin.
- De Freitas P. L., Zobel R. W., Snyder V.A., 1996. A method for studying the effects of soil aggregate size and density. Soil Sci. Soc. Am. J., 60, 288-290.
- De Freitas P. L., Zobel R. W., Snyder V.A., 1999. Corn root growth in soil columns with artificially constructed aggregates. Crop Science, 39, 725-730.
- Diez Th. 1991. Beurteilung des Bodengefüges im Feld. In: Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit, Band 2 Bodengefüge 1991. Berichte über Landwirtschaft 204. Sonderheft, S. 96-103. Paul Parey, Hamburg und Berlin.
- FAL 1997. Cartographie et estimation des sols agricoles, les cahiers de la FAL 24, p. 133. Zürich-Reckenholz.
- Gautronneau Y., Manichon H., 1987. Guide méthodique du profil cultural. Diffusion CEREF-ISARA, Paris.
- Gisi U., 1997. Bodenökologie, 304 S. Georg Thieme Verlag, Stuttgart und New York.
- Görbing J., 1947. Die Grundlagen der Gare im praktischen Ackerbau. Landbuchverlag, Hannover.
- Hasinger G. et al., 1993. Bodenbeurteilung im Feld, 15 S. Landwirtschaftliche Beratungszentrale CH-Lindau.
- Henin S., Gras R., Monnier G., 1969. Le profil cultural (2ème édition). Masson éditions, Paris.
- Hillel D., 1984. L'eau et le sol, p. 288. Cabay.
- Horn R., Stork J., Dexter A.R., 1987. Untersuchungen über den Einfluss des Bodengefüges für den Eindringwiderstand in Böden. Z. Pflanzenernährung Bodenk., 150, 342-347.
- Manichon H., 1982. Influence des systèmes de culture sur le profil cultural: élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse Doct. Ing. Sc. Agronomiques INA-PG.
- Misra R., Dexter K.A.R., Alston A.M., 1988. Root growth and phosphorus uptake in relation to the size and strength of soil aggregates. Soil & Tillage Research, 11, 117-132.
- Mückenhausen E., 1985. Bodenkunde, 3. Aufl., 579 S. DLG-Verlag, Frankfurt (Main).
- OFEFP, 1996. MANUEL Cartographie des sols forestiers. OFEFP, Berne.
- Scheffer/Schachtschabel, 1998. Lehrbuch der Bodenkunde, 14. Aufl., 491 S. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart.
- Société Suisse de pédologie, groupe de travail Classification des sols, 1998. Clé de classification des sols de Suisse, p. 11.
- Tisdall J.M., Oades J.M., 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. Journal of Soil Science, 33, 141-163.