



HAL
open science

Les méthodes visuelles d'évaluation de la structure du sol au service d'une démarche clinique en agronomie

Hubert Boizard, Josephine Peigné, Jean-François Vian, Annie Duparque, Vincent Tomis, Alice Johannes, Pascale Métais, María Carolina Sasal, Pascal Boivin, Jean Roger-Estrade

► To cite this version:

Hubert Boizard, Josephine Peigné, Jean-François Vian, Annie Duparque, Vincent Tomis, et al.. Les méthodes visuelles d'évaluation de la structure du sol au service d'une démarche clinique en agronomie. *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 2019, 9 (2), pp.55-76. hal-04103319

HAL Id: hal-04103319

<https://isara.hal.science/hal-04103319v1>

Submitted on 23 May 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NoDerivatives 4.0 International License

Agronomie

environnement & sociétés



La revue de l'association française d'agronomie

**Démarches cliniques
en agronomie
et outils pour les agriculteurs
Et leurs conseillers**

Agronomie, Environnement & Sociétés

Revue éditée par l'Association française d'agronomie (Afa)

Siège : 16 rue Claude Bernard, 75231 Paris Cedex 05.
Secrétariat : 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2.
Contact : afa@inrae.fr, T : (00-33)4 99 61 26 42, F : (00-33)4 99 61 29 45
Site Internet : <http://www.agronomie.asso.fr>

Objectif

AE&S est une revue en ligne à comité de lecture et en accès libre destinée à alimenter les débats sur des thèmes clefs pour l'agriculture et l'agronomie, qui publie différents types d'articles (scientifiques sur des états des connaissances, des lieux, des études de cas, etc.) mais aussi des contributions plus en prise avec un contexte immédiat (débats, entretiens, témoignages, points de vue, controverses) ainsi que des actualités sur la discipline agronomique.

ISSN 1775-4240

Contenu sous licence Creative commons



Les articles sont publiés sous la *licence Creative Commons 2.0*. La citation ou la reproduction de tout article doit mentionner son titre, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue AE&S et de son URL, ainsi que la date de publication.

Directeur de la publication

Antoine MESSÉAN, président de l'Afa, Ingénieur de recherches, Inra

Rédacteur en chef

Olivier RÉCHAUCHÈRE, chargé d'études Direction de l'Expertise, Prospective & Etudes, Inra

Membres du bureau éditorial

Christine RAWSKI, Rédactrice en chef Cahiers Agricultures, Cirad
Guy TRÉBUIL, chercheur Cirad
Philippe PRÉVOST, Chargé des coopérations numériques à Agreenium
Danielle LANQUETUIT, consultante Triog et webmaster Afa

Comité de rédaction

- Marc BENOÎT, directeur de recherches Inra
- Héloïse BOURREAU, ingénieure à la Bergerie de Villarceaux
- Camille DUMAT, enseignante chercheuse à l'ENSAT/INPT
- Thierry DORÉ, professeur d'agronomie AgroParisTech
- Yves FRANCOIS, agriculteur
- Jean-Jacques GAILLETON, inspecteur d'agronomie de l'enseignement technique agricole
- Laure HOSSARD, ingénieure de recherche Inra Sad
- Marie-Hélène JEUFFROY, directrice de recherche Inra et agricultrice
- Aude JOMIER, enseignante d'agronomie au lycée agricole de Montpellier
- Christine LECLERCQ, professeure d'agronomie Institut Lassalle-Beauvais
- Francis MACARY, ingénieur de recherches Irstea
- Antoine MESSEAN, Ingénieur de recherches, Inra
- Adeline MICHEL, Ingénieure du service agronomie du Centre d'économie rurale de la Manche
- Marc MIQUEL, consultant
- Bertrand OMON, Chambre d'agriculture de l'Eure
- Thierry PAPILLON, enseignant au lycée agricole de Laval
- Philippe POINTEREAU, directeur du pôle agro-environnement à Solagro
- Philippe PRÉVOST, Chargé des coopérations numériques à Agreenium
- Bruno RAPIDEL, Cirad
- Jean-Marie SERONIE, consultant

Secrétaire de rédaction

Philippe PREVOST

Assistante éditoriale

Danielle LANQUETUIT

Conditions d'abonnement

Les numéros d'AE&S sont principalement diffusés en ligne. La diffusion papier n'est réalisée qu'en direction des adhérents de l'Afa ayant acquitté un supplément

(voir conditions à <http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/>)

Périodicité

Semestrielle, numéros paraissant en juin et décembre

Archivage

Tous les numéros sont accessibles à l'adresse <http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/>

Soutien à la revue

- En adhérant à l'Afa via le site Internet de l'association (<http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/>). Les adhérents peuvent être invités pour la relecture d'articles.
- En informant votre entourage au sujet de la revue AE&S, en disséminant son URL auprès de vos collègues et étudiants.
- En contactant la bibliothèque de votre institution pour vous assurer que la revue AE&S y est connue.
- Si vous avez produit un texte intéressant traitant de l'agronomie, en le soumettant à la revue. En pensant aussi à la revue AE&S pour la publication d'un numéro spécial suite à une conférence agronomique dans laquelle vous êtes impliqué.

Instructions aux auteurs

Si vous êtes intéressé(e) par la soumission d'un manuscrit à la revue AE&S, les recommandations aux auteurs sont disponibles à l'adresse suivante :

<http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/pour-les-auteurs/>

À propos de l'Afa

L'Afa a été créée pour faire en sorte que se constitue en France une véritable communauté scientifique et technique autour de cette discipline, par-delà la diversité des métiers et appartenances professionnelles des agronomes ou personnes s'intéressant à l'agronomie. Pour l'Afa, le terme agronomie désigne une discipline scientifique et technologique dont le champ est bien délimité, comme l'illustre cette définition courante : « *Etude scientifique des relations entre les plantes cultivées, le milieu [envisagé sous ses aspects physiques, chimiques et biologiques] et les techniques agricoles* ». Ainsi considérée, l'agronomie est l'une des disciplines concourant à l'étude des questions en rapport avec l'agriculture (dont l'ensemble correspond à l'agronomie au sens large). Plus qu'une société savante, l'Afa veut être avant tout un carrefour interprofessionnel, lieu d'échanges et de débats. Elle se donne deux finalités principales : (i) développer le recours aux concepts, méthodes et techniques de l'agronomie pour appréhender et résoudre les problèmes d'alimentation, d'environnement et de développement durable, aux différentes échelles où ils se posent, de la parcelle à la planète ; (ii) contribuer à ce que l'agronomie évolue en prenant en compte les nouveaux enjeux sociétaux, en intégrant les acquis scientifiques et technologiques, et en s'adaptant à l'évolution des métiers d'agronomes.

Lisez et faites lire AE&S !

Sommaire

P-7- Avant-propos

A. MESSÉAN (Président de l'Afa) et O. RÉCHAUCHÈRE (Rédacteur en chef)

P-9- Éditorial

P. PRÉVOST, H. BOIZARD, F. KOCKMANN, B. OMON et T. PAPILLON (coordonnateurs du numéro)

Mise en perspective des démarches cliniques en agronomie

P15- La démarche clinique en agronomie : sa mise en pratique entre conseiller et agriculteur

F. KOCKMANN, A. POUZET, B. OMON, L. PAVARANO et M. CERF

P27- Vers un diagnostic agronomique stratégique intégrant les enjeux environnementaux : mener l'enquête pour piloter le système de culture sur le temps long

M. CERF, V. PARNAUDEAU et R. REAU

P39- IDEA4 : une méthode de diagnostic pour une évaluation clinique de la durabilité en agriculture

F. ZAHM, J.M. BARBIER, S. COHEN, H. BOUREAU, S. GIRARD, D. CARAYON, A. ALONSO UGAGLIA, B. DEL'HOMME, M. GAFSI, P. GASSELIN, L. GUICHARD, C. LOYCE, V. MANNEVILLE et B. REDLINGSHÖFER

Les outils de diagnostic de la qualité des sols : du profil cultural aux méthodes et outils actuels

P55- Les méthodes visuelles d'évaluation de la structure du sol au service d'une démarche clinique en agronomie

H. BOIZARD, J. PEIGNE, J.F. VIAN, A. DUPARQUE, V. TOMIS, A. JOHANNES, P. METAIS, M.C. SASAL, P. BOIVIN et J. ROGER-ESTRADE

P77- Apprentissage et pratique du test bêche VESS par application mobile

A. JOHANNES, K. GONDRET, A. MATTER et P. BOIVIN

P81- Evaluer visuellement la structure à l'échelle de l'échantillon : méthode et exemple d'application

A. JOHANNES et P. BOIVIN

P87- Des méthodes bêches dérivées de la méthode du profil cultural

J. PEIGNE, S. CADOUX, P. METAIS et J.F. VIAN

P95- L'utilisation de la méthode du profil cultural en Argentine : quel apport à la connaissance du fonctionnement des systèmes de culture ?

J.J. DE BATTISTA, M.C. SASAL

P99- La complémentarité de deux méthodes : le Profil Pénétrométrique Interpolé du SOL (PPIS) et le profil cultural en contexte de chantiers lourds

O. SUC et O. ANCELIN

P101- Témoignages sur l'utilisation et la complémentarité des méthodes visuelles d'évaluation de la structure du sol dans le cadre du projet Sol-D'Phy

V. TOMIS et A. DUPARQUE

La démarche clinique au service de l'évolution d'une technique culturale : la gestion des adventices

P105- La gestion durable de la flore adventice des cultures (B. CHAUVEL, H. DARMENCY et C. MUNIER-JOLAIN et A. RODRIGUEZ, coordonnateurs, Ed. QUAE, 2019)

P. PREVOST

P111- Du champ virtuel au champ réel – Ou comment utiliser un modèle de simulation pour diagnostiquer des stratégies durables de gestion des adventices et reconcevoir des systèmes de culture

N. COLBACH, S. CORDEAU, W. QUEYREL, T. MAILLOT, J. VILLERD, D. MOREAU

P131- utilisation du modèle FLORSYS comme outil d'aide à la conception de systèmes de culture innovants performants pour la gestion durable des adventices : exemple d'un groupe DEPHY Ferme de l'Eure

N. CAVAN, B. OMON, N. COLBACH, F. ANGEVIN

P145- Agriculteurs et conseillers, réunis autour d'une source karstique, actionnent l'agronomie avec pragmatisme

A. HERMANT, A. FAIVRE, V. LE MOING, C. DIVO, V. LAVILLE

P153- Le stock de semences adventices peut-il être utilisé dans les études de terrain sur l'effet des systèmes de culture

I. MAHE, D. DERROUCH, E. VIEREN, B. CHAUVEL

D'autres expériences de terrain illustrant des démarches cliniques en agronomie

P163- Les essais systèmes, support pour accompagner le changement des pratiques

P. HUET et L. GUILLOMO

P169- La végétation des bordures de parcelles agricoles, des espaces importants pour le contrôle biologique

A. POLLIER, A. BISCHOFF, M. PLANTAGENEST, Y. TRICAULT

P175- Vers une gestion adaptée des prairies multi-espèces et une maximisation du pâturage dans les systèmes herbagers du sud-ouest de la France

X. BARAT

Varia

P187- Indésirables, tolérées, revendiquées : à chacun ses plantes messicoles. Perceptions des acteurs du monde agricole vis-à-vis des plantes des moissons

R. GARRETA, B. MORISSON, J. CAMBACEDES et A. RODRIGUEZ

Notes de lecture

P195- Les typologies agronomiques des sols, indispensables pour valoriser les référentiels régionaux en pédologie

F. KOCKMANN

P199- Agroecosystem diversity: reconciling contemporary agriculture and environmental quality

J. BOIFFI



Les méthodes visuelles d'évaluation de la structure du sol au service d'une démarche clinique en agronomie

Visual methods for assessing soil structure in support of a clinical approach in agronomy

Hubert Boizard¹ (*), Joséphine Peigné², Jean-François Vian², Annie Duparque³, Vincent Tomis³, Alice Johannes⁴, Pascale Métails⁵, María Carolina Sasal⁶, Pascal Boivin⁷ et Jean Roger-Estrade⁹

¹INRA, UPR1158 AgrolImpact, 80200 Estrées-Mons, France

²ISARA-Lyon, 69364 Lyon, France

³Agro-Transfert Ressources et Territoires, 80200 Estrées-Mons, France

⁴Agroscope Station fédérale de recherche agronomique, Département d'Agroécologie en Environnement, groupe de qualité et gestion des sols, Reckenholzstrasse 191, 8046 Zürich, Suisse

⁵Arvalis Institut du végétal, Biopôle Clermont Limagne, 63360 Saint Beauzire

⁶INTA EEA Paraná, 3101 Oro Verde Entre Rios, Argentina

⁷HEPIA - HES-SO Genève, 150 route de Presinge, 1254 Jussy, Switzerland

⁹UMR Agronomie, AgroParisTech, INRA, 78850 Thiverval-Grignon, France

⁹Université Paris-Saclay, 78850 Thiverval-Grignon, France

*Auteur correspondant :

hubert.boizard@gmail.com

Résumé

L'attention portée à la structure du sol connaît actuellement un regain d'intérêt, en relation avec l'évolution et la diversification des pratiques de travail du sol et la conception de systèmes de culture plus agro-écologiques. Les méthodes visuelles ont largement été utilisées pour évaluer et porter au champ un diagnostic sur la structure du sol. Dans ce numéro, nous passons en revue les principales méthodes et regardons leurs atouts et limites. Les méthodes se différencient en deux grands groupes suivant les modalités d'échantillonnage des volumes de sols observés : les méthodes basées sur la description de la face d'observation d'un profil de sol comme le profil cultural et les méthodes « bêche » basées sur la description de blocs de sol extraits de la parcelle. Elles utilisent toutes les mêmes types de critères pour observer l'état structural : l'analyse des vides du sol à travers une évaluation de la porosité visible à l'œil et l'organisation de la fraction so-

lide (forme, distribution des tailles, le degré de cohésion des mottes, importance de la terre fine...). Cependant, la procédure d'évaluation de la structure est très différente suivant

les méthodes. Le profil cultural privilégie une analyse spatiale de l'état structural pour inférer sur sa genèse alors que les méthodes « bêche » conduisent à une note globale de la qualité de la structure du sol. Cette revue montre que nous disposons de plusieurs méthodes fiables, qui peuvent être choisies en fonction des objectifs poursuivis et de leur plus ou moins grande facilité de mise en œuvre.

Abstract

The attention paid to soil structure is increasing in relation to the evolution and diversification of tillage systems and the move towards to more agro-ecological systems. Visual methods have been widely used to evaluate and make a diagnosis of soil structure in field conditions. In this issue we review the main methods and look at their strengths and limitations. The methods are divided into two main groups according to the sampling methods: the methods based on the description of the vertical face of a soil profile and the "spade" methods based on the description of soil blocks extracted from the plot. The different methods use the same type of criteria to evaluate the soil structure: the analysis of the voids of the soil through an evaluation of the visible porosity and the organization of the solid fraction (shape, the size distribution, the degree of cohesion of clods, proportion of fine aggregates, ...). However how to evaluate the soil structure is very different between methods. The "profil cultural" method favours a spatial analysis of the soil structure to infer on its genesis whereas the "spade" methods assign an overall score to evaluate the soil structure quality. The review shows there are several reliable visual methods, but the differences in the way to evaluate soil structure and in the implementation of the methods mean that the choice of methods must be made according to the objectives pursued and the users.

Mots-clés : évaluation visuelle du sol, structure du sol, profil cultural, VESS

Introduction

L'évaluation de l'état structural des couches superficielles du sol, qui forment le profil cultural tel que l'ont défini Hénin *et al.* en 1969, préoccupe depuis longtemps agriculteurs et agronomes. Mais l'attention portée à l'état structural du sol connaît actuellement un regain d'intérêt. Les causes sont multiples. Par exemple, l'évolution des matériels de récolte utilisés dans les systèmes de culture comprenant pommes de terre, légumes industriels et betterave à sucre, ou dans les systèmes de culture irrigués, conduisent à des risques accrus de tassement parfois très profonds (au-delà de 60 cm), malgré les précautions prises par les fabricants (passage de deux à trois essieux, roues avant et arrière décalées, pneumatiques adaptés). L'évolution et la diversification des pratiques de travail du sol, comme le non labour, le travail réduit du sol ou l'adoption des méthodes de l'agriculture de conservation modifient profondément les conditions d'évolution de la structure, ce qui nécessite une surveillance particulière de cette dernière.

L'intérêt porté à la structure du sol est justifié car cette caractéristique influence la plupart des fonctions qui sous-tendent

les services écosystémiques attendus des sols cultivés (production de biomasse, régulation de la circulation et de la qualité des eaux, réduction des émissions de gaz à effet de serre, stockage du carbone, limitation de l'érosion...). La structure du sol joue en particulier un rôle important sur les conditions de vie des organismes vivant dans le sol, car elle conditionne les régimes thermique et hydrique, la circulation de l'eau ou celle de l'oxygène (Mueller et al., 2013).

La structure du sol se définit comme l'ensemble des caractères liés à la disposition spatiale des particules du sol ainsi qu'à la nature et à l'intensité des liaisons qui existent entre elles (Stengel, 1990). Elle évolue en permanence au sein d'une parcelle, le sol étant soumis à trois types d'effets. Affectant l'agencement de la phase solide du sol, ces effets déterminent aussi l'évolution de l'espace des vides, c'est-à-dire de l'espace poral, dont ils affectent le volume et la géométrie (distribution des tailles de pores, connectivité) (Dexter, 1988). Le premier effet est celui du travail du sol. Les opérations de travail du sol fragmentent et, éventuellement, déplacent le sol (e.g. retournement par la charrue), tout en enfouissant et/ou mélangeant plus ou moins la terre avec la matière organique (Roger-estradé et al., 2004). Le second effet est celui du compactage lié aux passages d'engins. La circulation des engins peut induire un tassement plus ou moins important de la parcelle cultivée, qui se caractérise par l'intensité du tassement, la proportion de la surface touchée et la profondeur atteinte. Ce tassement varie en fonction de l'humidité au moment des passages, du poids des machines, de la largeur des outils et des pneumatiques et de la fréquence des interventions. Le troisième effet est celui des « agents naturels ». Ils sont de trois ordres : (i) les conditions climatiques (variations d'humidité du sol ou action du gel) vont favoriser la création de porosité et la fragmentation des agrégats de façon plus ou moins intense suivant le type et la teneur en argile ; de même la pluviométrie peut, suivant son intensité et le type de sol, favoriser la dégradation de l'état de surface (croûte de battance) ou la reprise en masse, plus en profondeur ; (ii) le système racinaire contribue à l'évolution de la structure du sol, de manière très variable en fonction de ses caractéristiques (perforations à l'échelle fine par le chevelu des radicelles ou perforation par des racines de diamètre plus « important ») et des conditions d'humidité lors de sa croissance ; (iii) la faune et la flore du sol enfin exercent un effet sur la structure à travers plusieurs mécanismes : contribution à l'augmentation de la stabilité structurale par la microflore du sol (Chenu et al., 2011), contribution au processus d'agrégation (Cosentino et al., 2006), création de galeries par les lombriciens (Capowiez et al., 2013 ; Bottinelli et al., 2015), réorganisation du système poral (Kravchenko et al., 2019).

De fait, la dynamique de la structure du sol est un phénomène complexe. Ainsi, deux enjeux majeurs sont attachés à l'observation de la structure : il s'agit à la fois (i) d'apprécier la part de ces différents effets (e.g. activité biologique ou roulement) sur l'état observé, y compris en tenant compte des interactions entre effets, et (ii) d'évaluer la qualité de la structure, c'est-à-dire de faire un diagnostic et un pronostic sur l'impact qu'elle a ou qu'elle aura sur les fonctions des sols cultivés mentionnées ci-dessus.

Depuis les années soixante, dans plusieurs pays à travers le monde, de très nombreux chercheurs ont mis au point des méthodes d'évaluation de l'état structural. Dans ce numéro,

consacré aux démarches d'agronomie clinique, nous comprenons ces deux termes comme la contribution de la discipline à l'évaluation *in situ* du fonctionnement des agroécosystèmes et à l'identification éventuelle de symptômes de dysfonctionnement en utilisant des moyens d'observation simples, par analogie avec la pratique d'un médecin généraliste auscultant un patient. Nous nous limiterons ici aux méthodes d'évaluation visuelle de l'état structural du sol, utilisées directement sur le terrain et pouvant permettre d'identifier les causes qui sont à l'origine des états observés.

Ces méthodes visent principalement à décrire la « macrostructure », c'est-à-dire ce qui, de la structure et de la porosité, est visible à l'œil nu ou appréciable à travers des manipulations simples (fragmentation à la main des mottes pour en apprécier la consistance par exemple) (Ball et al., 2007 ; Baize et al., 2013). Toutes ont trois défis à relever : le premier est celui de la prise en compte de la variabilité spatiale de la structure du sol, qui peut être très forte. Par exemple, les passages de roues créent une hétérogénéité dans le sens perpendiculaire au sens d'avancement des engins ou les outils successifs travaillent le sol à différentes profondeurs, ce qui crée également une hétérogénéité verticale. Ce point renvoie à la manière d'échantillonner le volume de sol observé (localisation des observations, profondeur, nombre d'échantillons prélevés). Le second défi est celui du choix du système de description de la structure. Les variables descriptives retenues doivent en effet permettre de porter un jugement sur les conséquences en termes de fonctionnement du sol (activité biologique, propriétés de transfert, résistance à la pénétration des racines, etc.) et donc pouvoir être reliées à des propriétés mesurables. Idéalement, elles doivent aussi permettre d'identifier les facteurs ayant conduit à l'état observé. Le troisième défi est celui de la reproductibilité : les observations ne doivent pas dépendre de l'observateur et doivent pouvoir être répétées d'une situation à l'autre, pour pouvoir comparer des résultats obtenus par différents observateurs à différents endroits sur une base rigoureuse. La description faite ne doit pas non plus être contingente de la date d'observation ou du type de sol et la méthode doit pouvoir être déployée sur une large gamme de situations (en termes de texture, d'humidité du sol, de pratiques culturales).

Les méthodes de caractérisation visuelle et tactile de la structure des sols cultivés se répartissent en deux grands groupes : les méthodes basées sur la description *in situ* de la face d'observation d'une fosse (en général creusée perpendiculairement au sens d'avancement des outils) ou sur la description de blocs de sol extraits de la parcelle (Boizard et al., 2005 ; Batey et al., 2015 ; Emmet-Both et al., 2016).

Nous présentons dans cet article les principales méthodes de chacun des deux groupes en les décrivant succinctement. Dans une seconde partie, nous analysons les atouts et limites des différentes méthodes pour conclure sur leur aptitude à répondre aux différents usages possibles. Une série de témoignages illustrera ensuite la manière dont ces méthodes ont été utilisées, évaluées ou améliorées dans différents contextes.

Méthodes visuelles de caractérisation de la structure basées sur la description de la face d'observation d'un profil de sol

Dans ces méthodes, la fosse fait entre 0,60 m et 1,50 m de profondeur et quelques mètres de large. Le choix des dimensions de la fosse dépend de l'objectif en termes d'analyse de la variabilité spatiale. Si plusieurs méthodes existent de par le monde, plus ou moins inspirées de la description du profil pédologique, la plus aboutie au plan conceptuel reste la méthode de description de l'état structural du profil cultural décrite dans Gautronneau et Manichon (1987) et pour laquelle Boizard *et al.* (2017) ont proposé quelques modifications pour la rendre plus apte à tenir compte des modes de travail du sol.

La méthode de description de l'état structural du profil cultural

Présentation de la méthode

Dans les années 1960, S. Hénin propose le concept de profil cultural défini comme "*l'ensemble constitué par la succession des couches de terre, individualisées par l'intervention des instruments de culture, des racines des végétaux et des facteurs naturels réagissant à ces actions*" (Hénin *et al.*, 1960 ; 1969). Le profil cultural devient ainsi un objet clairement distinct du profil pédologique. Cependant, la méthode de description de l'état structural du sol s'inspire encore largement de la description de la structure du sol définie par les pédologues (par exemple typologie de la forme des agrégats : polyédriques, arrondis, sub-anguleux...). Et pourtant, par comparaison à la démarche de description du profil pédologique, celle adoptée pour décrire le profil cultural prête peu attention aux processus pédogénétiques (même s'il y a un regard porté sur les symptômes d'engorgement ou d'acidité).

Il était donc nécessaire de proposer une méthode de description plus en accord avec les objectifs poursuivis par la description de la structure : comprendre les effets des outils et l'impact de la composante physique de l'état du sol sur le fonctionnement des plantes. Cette méthode a été formalisée par Manichon en 1982, puis présentée, avec un souci de vulgarisation, dans un guide méthodique (Gautronneau et Manichon, 1987). Elle accorde une grande importance à la prise en compte de la variabilité spatiale de la structure (qui résulte de l'effet des outils et des pneumatiques sur le sol) en réalisant une partition latérale et verticale de la face d'observation, aboutissant à la délimitation de compartiments (figure 1). Dans chacun de ces compartiments, la structure est observée avec des critères différents de ceux utilisés par les pédologues et choisis pour permettre de porter un diagnostic sur les conséquences de la structure sur le fonctionnement du

champ cultivé, l'analyse de l'origine des états observés ainsi que des pronostics sur son évolution. Deux groupes de critères ont été retenus :

- le premier porte sur l'organisation des éléments structuraux. Il s'agit de décrire le calibre et le mode d'assemblage des mottes et de la terre fine (agrégats infra centimétriques). Manichon (1982) a proposé une double nomenclature pour décrire l'arrangement des mottes et agrégats. La première repose sur la façon dont les éléments structuraux sont agrégés (F comme « fragmentaires », SF comme « soudés facilement discernables », SD comme « soudés difficilement discernables » et M comme « massifs ») ; la seconde est une appréciation plus globale au niveau de chaque compartiment : O (comme « Ouvert ») correspond à un état très fragmenté avec la présence de terre fine, de petits agrégats et de mottes ; B (comme « Bloc ») à la présence de mottes décimétriques séparées par des cavités structurales plus ou moins importantes et C (comme « Continu ») un état massif sans discontinuités structurales.

- Le second groupe de critères porte sur la caractérisation de l'espace poral. Il s'agit de caractériser l'importance et le type de porosité au sein des mottes. Les mottes de type Δ se caractérisent par une absence de porosité visible à l'œil et, par conséquent, une masse volumique élevée (De Leon, 1991 ; Guérif *et al.*, 1994). Les mottes de type Γ , à l'inverse, résultant de l'agglomération d'agrégats de sol sous l'effet de l'humidité, de contraintes modérées, de l'activité biologique présentent une porosité visible à l'œil importante et, par conséquent, une résistance à la pénétration plus faible et un taux d'infiltration plus élevé que le type Δ (de Leon, 1991 ; Boizard *et al.*, 2013a). Enfin, les mottes Φ sont des mottes Δ fissurées sous l'effet du retrait et/ou du gel qui présentent donc une porosité de type fissurale très caractéristique et aisément identifiable à l'œil nu.

La description elle-même prend la forme d'un schéma de la face d'observation qui permet de positionner les différents états identifiés, sur lequel on ajoute quelques informations complémentaires (e.g. localisation de la matière organique fraîche et état de décomposition, présence de racines, traces d'activité biologique, fentes de retrait...) (figure 2). Le schéma est accompagné de plusieurs tableaux pour noter des informations complémentaires qui permettent non seulement d'évaluer la qualité globale de la structure du profil mais également de faire des hypothèses sur l'origine des états observés, selon une démarche d'analyse qui valorise la diversité spatiale des états structuraux, car elle se fonde sur la comparaison des états des différents compartiments qui structurent la face d'observation et sur un modèle conceptuel de passage entre les types de porosité (figure 3).

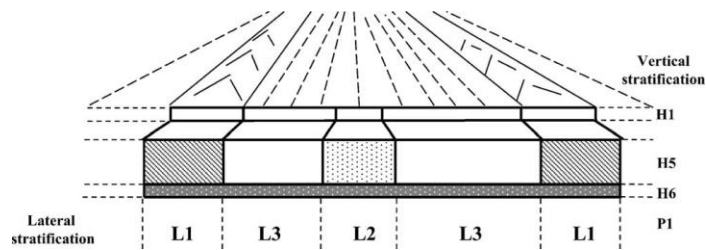


Figure 1. Principe de la stratification de la face d'observation d'un profil de sol. Stratification verticale : H1, lit de semences ; H5, horizon labouré non repris ; H6, ancien labour ; P1, premier horizon pédologique. Stratification latérale : L1, partie du profil située sous les traces de roue des opérations effectuées après la préparation superficielle du sol (visible à la surface du sol) ; L2, partie du profil située sous les traces de roues lors de la préparation superficielle du sol (non visible à la surface) ; L3, la partie du profil non affectée par les passages de roues depuis le dernier labour (d'après Gautronneau et Manichon, 1987)

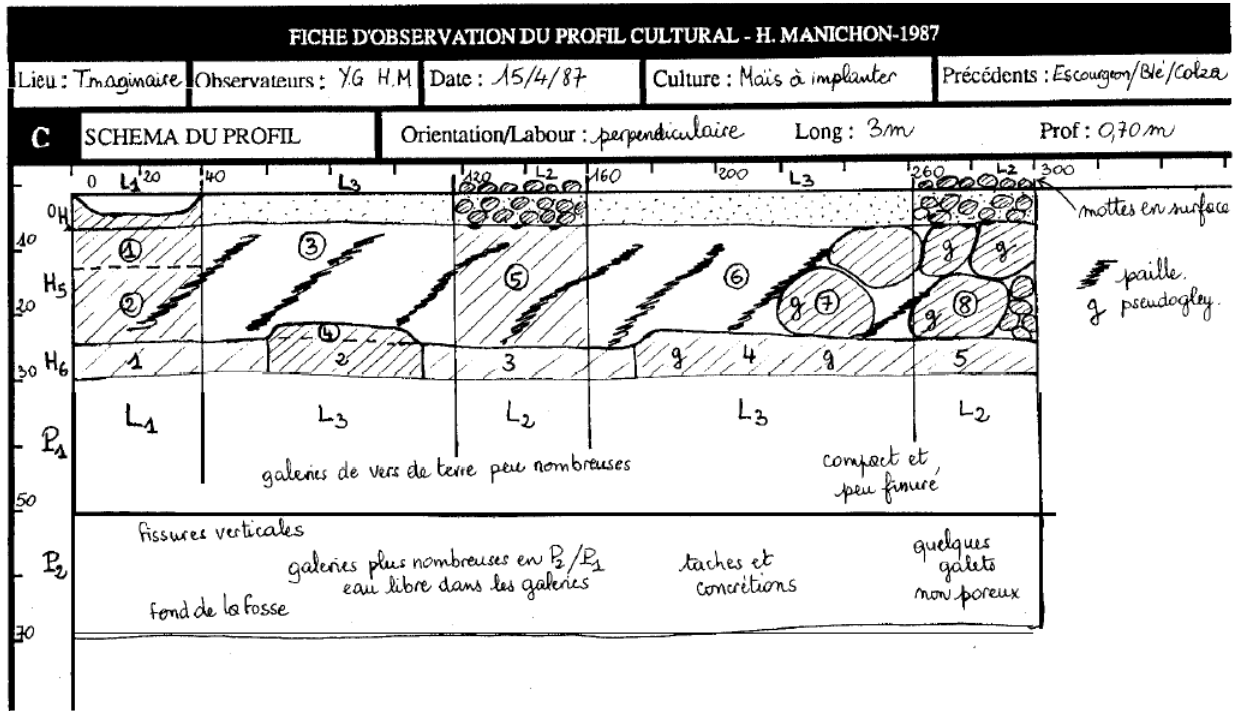


Figure 2. Schéma de la face d'observation du profil cultural (Gautronneau et Manichon, 1987)

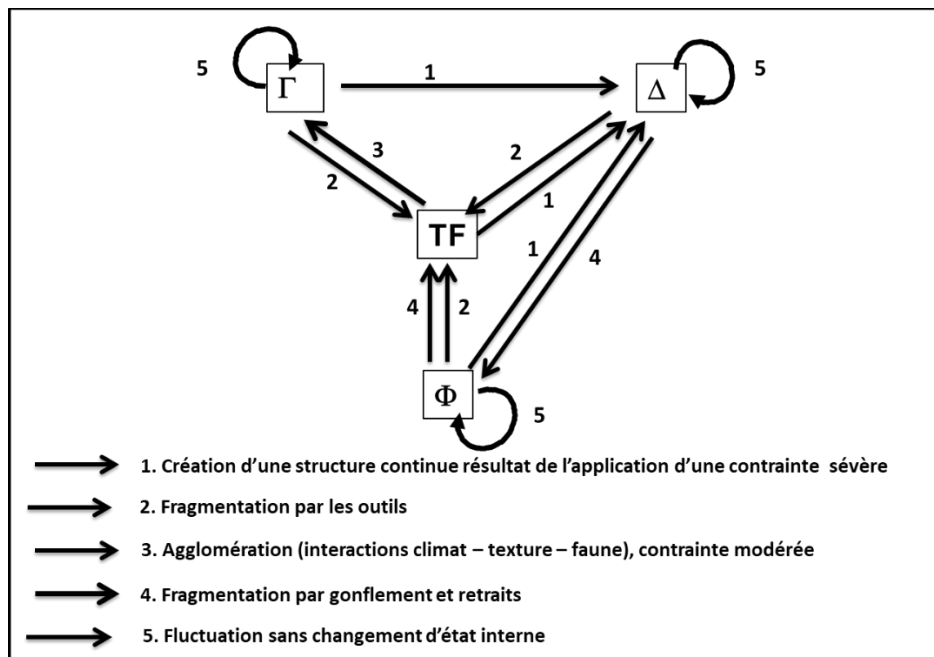


Figure 3. Schéma des interrelations entre les différents types de porosité (ou états internes) d'après Hubert Manichon (1982)

Évolution de la méthode

Dans les systèmes sans labour, où le travail du sol est très simplifié voire supprimé complètement, la dynamique de la structure du sol est principalement liée aux effets des « agents naturels » (climat, racines et faune du sol), mais peut être aussi perturbée par le tassement. Sasal (2012) en Argentine et Boizard et al. (2013a) en France ont montré l'importance de bien prendre en compte différents processus de fissuration à l'œuvre dans les situations de semis direct ou travail réduit. Ils ont ainsi distingué deux types d'état internes fissurés : (i) un état avec un système de fissures orientées dans toutes les directions (l'état Φ antérieur) et un état interne caractérisé par un système de fissuration horizontal, conduisant à une structure lamellaire, importante à repérer car elle fait obstacle à l'infiltration et à l'enracinement (état P). Cette distinction a été introduite dans la méthode en 2017 par Boizard et al. (cf annexe 1 page 2). Par ailleurs, toujours dans les systèmes en non travail du sol, de nombreux travaux ont montré l'importance du rôle des lombriciens. En France, Capowiez et al. (2012) ont étudié leur effet sur la régénération des structures tassées ; Tomis et al. (2017) ont mis en évidence l'importance des macropores créés dans les horizons profonds par les vers de terre sur l'enracinement de la pomme de terre. Pour mieux rendre compte de ces actions sur la structure, un critère complémentaire a été introduit, précisant la présence de macropores ou de traces de bioturbation créés par les racines ou les lombriciens (voir annexe 1 page 2). Ce dernier critère s'appuie beaucoup sur les travaux de Piron et al. (2017) sur la porosité d'origine lombricienne. Prenant en compte ces modifications, le modèle conceptuel indiquant les processus qui permettent le passage d'un type de porosité à l'autre, a été modifié par rapport à la version initiale publiée dans Gautronneau et Manichon (1987), pour faciliter l'interprétation. Il est présenté dans l'annexe 1 page 4.

Autres méthodes basées sur la description de la face d'observation d'un profil de sol

D'autres méthodes basées sur l'évaluation de la face d'observation d'une fosse ont été décrites par Boizard et al. (2005) et sont présentées ici succinctement.

La méthode du profil complet (*Whole profile assessment* en anglais) a été développée en Écosse par Batey (2000). La description porte sur un profil de sol d'une profondeur comprise entre 0.60 et 1.20 m. L'objectif de la description est double : (i) observer les caractères permanents du sol pour analyser sa qualité intrinsèque (e.g. aptitude au drainage, RU...) et (ii) identifier des facteurs limitants résultant des pratiques culturales, comme par exemple le tassement des sols. Aussi la première étape s'apparente à la démarche mise en œuvre pour la description du profil pédologique alors que la seconde s'intéresse à la partie supérieure du sol, pour y détecter l'effet des opérations culturales sur la structure du sol. Pour ce faire, les critères utilisés portent sur la taille et la forme des agrégats, leur résistance mécanique appréciée au toucher, le degré de fissuration, l'étude de la forme et de la disposition des racines. La méthode prend en compte la variabilité spatiale de la structure verticalement avec la mise en évidence des horizons. Concernant la variabilité latérale, l'auteur suggère seulement d'éviter les zones de roulage. La description une fois réalisée, le diagnostic s'appuie sur l'expertise de l'opérateur à partir des critères observés (Batey, 1988 ; 2006). Le

même type de démarche « expert » a été développée au Québec par Weill (2014), avec la mise en forme d'un guide pratique « Les profils de sol agronomiques – Un outil de diagnostic de l'état des sols ». Comparée à la méthode précédente, la principale différence porte sur l'aide aux utilisateurs : le diagnostic et l'interprétation s'appuient sur de nombreuses photos, visant à accompagner les conseillers dans la réalisation de profils de sol et à développer leur expertise.

L'approche développée par Batey (2000) a été reprise dans SOILpak en Australie (McKenzie, 2001a et b), qui constitue un système complet d'aide à la décision pour l'évaluation et la gestion de la qualité du sol. SOILpak peut être utilisé de différentes façons : (i) évaluer la qualité de la structure du sol, et en particulier les tassements après la récolte et (ii) évaluer l'aptitude d'un sol à recevoir de nouvelles cultures et choisir les pratiques les mieux adaptées (Batey et al., 2015). Comme pour le profil cultural, l'observation est menée à partir d'une fosse d'une profondeur de 1,5 m et d'une largeur supérieure à 3 m, perpendiculaire au sens du travail du sol. Mais contrairement aux méthodes précédentes, l'évaluation de l'état structural du sol s'appuie sur une note en fonction de la taille et de la forme des mottes, de leur résistance à la rupture, de leur porosité interne et du comportement des racines (figure 4). Lorsque SOILpak est utilisé pour évaluer le degré de tassement des sols, il est suggéré de choisir l'emplacement de la fosse par rapport aux passages de roues du matériel agricole et le diagnostic conduit à des recommandations pour améliorer la structure du sol.

SOILpak score

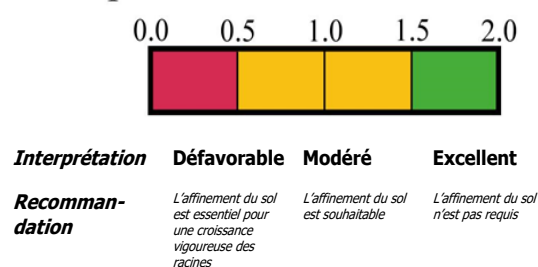


Figure 4. Relation entre la note de structure du sol donnée par SOILpak et les recommandations pour réduire le compactage d'après McKenzie (2001a)

Méthodes basées sur la description de blocs de sol extraits de la parcelle

Il existe plusieurs méthodes que l'on peut classer en deux sous-groupes : celles où l'observation porte sur l'échantillon conservé en l'état et celles où l'observation porte sur les agrégats et les mottes (taille, forme, résistance mécanique...) qui sont décrits après fragmentation des échantillons. Dans le premier groupe, Görbing a proposé dès 1947 une évaluation qualitative de la structure de blocs intacts de sol. C'est Peerlkamp en 1959 qui proposa la première procédure quantitative et, à ce titre, est à la base des méthodes les plus récentes d'après Emmet-Both et al. (2016). Dans le second groupe, les approches sont inspirées de la pédologie, donnant une importance considérable à l'aspect des agrégats et des mottes, considérés comme révélateurs des processus de

structuration du sol. Ainsi par exemple, la méthode FAL (Hasinger *et al.*, 2004) propose une typologie très précise des agrégats en fonction de leur forme, taille, couleur, aspect.

Dans cet article, nous présenterons trois méthodes, utilisées en Europe, en Nouvelle-Zélande et en Amérique du Sud. Les deux premières sont dites « méthodes bêche » en raison de la procédure de prélèvement des échantillons. L'une (VESS) appartient au premier groupe et l'autre (VSA) appartient au second. La troisième méthode repose sur l'examen d'un bloc plus important prélevé à l'aide d'une fourche télescopique montée à l'avant d'un tracteur (Mini profil 3D).

La méthode VESS (Visual Evaluation of Soil Structure)

Cette méthode a été développée initialement par des chercheurs danois et écossais avec pour objectif d'être facile d'utilisation et reproductible (Ball *et al.*, 2007 ; Guimaraes *et al.*, 2011). La procédure consiste à prélever des blocs de terre à l'aide d'une bêche, sur une profondeur un peu supérieure à la profondeur de labour. L'échantillonnage est aléatoire dans la parcelle. L'observateur attribue ensuite une note à chaque couche de sol identifiable dans le bloc. Ces notes permettent de calculer une note globale de la qualité de la structure du bloc. Le calcul de cette note est réalisé à partir de l'évaluation visuelle et tactile de quelques critères : porosité visible à l'œil, façon dont les fragments se brisent sous une légère pression, taille et forme des agrégats ou mottes qui résultent de cette action de fragmentation... Les notes sont données en utilisant une charte de référence qui permet de référer l'observation à des états structuraux types (voir page 2 de l'annexe 2). La représentativité de l'observation est assurée grâce à cinq à dix répétitions par zone homogène de la parcelle. Le guide pratique de la méthode a été diffusé en français par Boizard *et al.* (2013b), puis mise à jour par un collectif regroupé autour de Karine Gondret en Suisse. Cette dernière version est présentée en annexe 2.

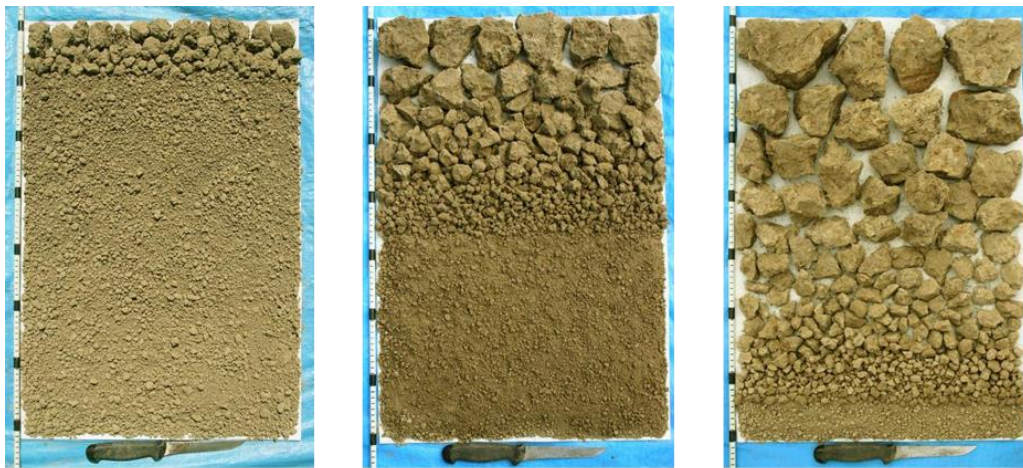
La méthode est aujourd'hui largement diffusée dans le monde (Franco *et al.*, 2019). Elle est bien adaptée pour réaliser un diagnostic rapide de la structure au champ. Dans l'objectif de faciliter la mise en œuvre de VESS dans le cadre d'un suivi agricole, un projet est conduit en Suisse pour développer une application mobile pour Smartphone à des fins de formation et d'apprentissage (témoignage de Johannes *et al.* dans ce numéro)). Guimaraes *et al.* (2017) et Pulido Moncada *et al.* (2014a) ont aussi montré l'intérêt de VESS pour le suivi de la qualité physique des sols. Johannes *et al.* (2017) ont prolongé ce travail en combinant VESS et mesures des propriétés physiques du sol, sur un cylindre de sol pris au cœur de l'échantillon, appelé CoreVESS. CoreVESS a été développé

dans le but d'établir des valeurs de référence pour la qualité structurale des sols en Suisse. L'utilisation du CoreVESS, sa corrélation avec les propriétés physiques et le développement de valeurs seuils seront approfondis dans le témoignage de Johannes et Boivin de ce numéro. En France, la méthode bêche est utilisée sous sa forme originelle, mais aussi avec des variantes en utilisant des critères provenant de la méthode du profil cultural. Dans ce cas, l'objectif est de disposer d'une méthode complémentaire du profil cultural, mais plus facile à mettre en œuvre (témoignage de Peigné *et al.* de ce numéro).

La méthode VSA

La méthode VSA (Visual Soil Assessment) a été développée en Nouvelle Zélande par Shepherd (2000 ; 2009). L'objectif de l'auteur est de proposer une méthode simple, rapide à mettre en œuvre à faible coût pour évaluer la qualité du sol et l'effet de la structure sur la croissance des plantes. Elle a été traduite en français par Boizard *et al.* (2013). La méthode utilise des indicateurs qui portent non seulement sur les caractères physiques du sol (texture, résistance mécanique, porosité, couleur) mais aussi sur son comportement (présence d'une croûte de battance, d'eau libre en surface ou de marbrures signes d'hydromorphie, traces d'érosion ou odeur du sol...), sur le comportement de la végétation (profondeur potentielle d'enracinement, taux de couverture par les plantes) et sur l'activité biologique (abondance et traces de vers de terre). Cet ensemble de critères aboutit à une évaluation synthétique de la qualité du sol, qui agrège des propriétés intrinsèques du sol avec des comportements qui dépendent en grande partie du système de culture et du climat.

Concernant l'état structural du sol, la procédure repose sur la prise de plusieurs bêchées et sur le calcul d'une note globale, comme pour VESS. La principale différence est liée à la façon dont on sépare les fragments de sol. Dans VESS, l'opérateur manipule doucement le bloc en utilisant les deux mains pour révéler les fragments cohérents, puis brise les plus grosses mottes et les fragmente jusqu'à obtenir une taille de 1.5 - 2.0 cm pour étudier leur apparence après rupture. Dans VSA, l'opérateur fait tomber le bloc d'une hauteur de 1 m et au maximum 3 fois sur une surface dure, par exemple dans un bac en matière plastique. Après avoir placé le prélèvement sur une bâche blanche, l'opérateur exerce une pression douce avec les doigts pour séparer les agrégats et regroupe les fragments en fonction de leur taille. La distribution des fragments est comparée avec des photos représentant les états types et une note est attribuée (figure 5).



BONNE QUALITÉ (SV = 2)

Il y a surtout des agrégats friables et fins avec très peu de mottes. Les agrégats sont généralement arrondis et poreux.

QUALITÉ MOYENNE (SV = 1)

Il y a autant de mottes grossières (50 %) et d'agrégats friables et fins. Les mottes sont fermes, de forme plutôt anguleuse et la porosité visible à l'œil est réduite.

MAUVAISE QUALITÉ (SV = 0)

Nette dominance des mottes grossières avec faible présence d'agrégats fins. Les mottes sont très fermes, de forme anguleuse et contiennent peu ou pas de porosité visible à l'œil.

Figure 5. Illustration des états types utilisés pour attribuer une note avec la méthode VSA (Shepherd, 2000).

Une méthode intermédiaire : le Mini Profil 3D

Cette méthode a été proposée par Tomis *et al.* (2019). Elle consiste à prélever des blocs de sol d'un mètre cube environ avec les palettes d'un chargeur télescopique. La taille du bloc permet une description de la structure et de sa variabilité qui s'inspire fortement de la méthode renouvelée de description de l'état structural du profil cultural (Boizard *et al.*, 2017). En particulier, les critères de description et le principe de stratification de la face d'observation sont conservés (Cf annexe 3). Aussi on peut considérer que cette méthode est intermédiaire entre les deux groupes « description de profils de sol » et « description de blocs de sol extraits de la parcelle ». En pratique, le bloc est soulevé doucement avec la fourche et porté à hauteur des yeux. L'observation réalisée, le bloc est reposé dans la fosse initiale, limitant les perturbations du sol. La méthode a été comparée avec celle du profil cultural : le mode de prélèvement n'occasionne pas de biais pour l'observation de l'état structural du sol. Cependant la taille de la surface à observer étant moindre, le prélèvement est répété trois fois. La méthode est très prisée des conseillers et agriculteurs.

Comparaison des atouts et limites des différentes méthodes

Nous comparons les méthodes en utilisant la grille de lecture définie par les trois défis à relever mentionnés en introduction : prise en compte de la variabilité spatiale, choix des critères, reproductibilité. Nous concluons en positionnant les méthodes suivant les usages.

Prise en compte de la variabilité spatiale

Les méthodes reposant sur l'analyse d'un profil de sol permettent de prendre en compte la variabilité spatiale de la structure dans deux dimensions de l'espace : verticalement,

en repérant les différents horizons et horizontalement, en général perpendiculairement à la direction d'avancement des outils (McKenzie, 2001a et b ; Roger-Estrade *et al.*, 2004). Toutes les méthodes accordent une attention particulière à la variabilité dans le sens vertical, à travers le repérage des horizons, comme on le fait en pédologie pour décrire un pédon. Par contre, la variabilité dans le sens horizontal est plus ou moins bien considérée. C'est la grande force de la méthode du profil cultural de bien prendre en compte la variabilité spatiale de la structure, variabilité qui de plus est valorisée dans l'élaboration du diagnostic. Pour cette méthode, la localisation de la fosse est très importante : elle doit être choisie en fonction de la géométrie des passages des outils (largeurs de travail, localisation des passages). Les indications données pour les autres méthodes quant à la largeur du profil et à la localisation de la fosse sont peu précises et, finalement, ces autres approches considèrent la variabilité spatiale comme un obstacle pour la description plutôt que comme un atout pour comprendre la genèse des états observés, quand elles ne font pas implicitement l'hypothèse que la structure est homogène.

Les méthodes basées sur des prélèvements de blocs de sol prennent en compte la variabilité spatiale de la structure à travers l'échantillonnage. Ball *et al.* (2007) suggèrent un minimum de 10 répétitions pour une zone homogène avec possibilité de réduire à 5 sur de petites parcelles expérimentales. Leopizzi *et al.* (2018) ont montré sur deux parcelles que cinq répétitions suffisaient à détecter un changement de note de 0.5. L'échantillonnage préconisé est de type aléatoire, mais Ball *et al.* (2007) suggèrent de réaliser une stratification préalable de la parcelle, par exemple en repérant les passages de roues des engins quand elles sont visibles, pour améliorer le diagnostic global. Néanmoins seul le profil cultural propose une recherche systématique des passages de roues visibles (L1) et non visibles (L2) en surface.

Validité des critères de description et du système de notation

De nombreux travaux ont porté sur la pertinence des critères par rapport à leur capacité à traduire des propriétés physiques et hydriques. Le nombre de publications scientifiques sur ces méthodes est relativement élevé : 57 études recensées pour VESS d'après Franco *et al.* (2019), plus de 30 pour le profil cultural et moins de cinq pour VSA.

Toutes les méthodes s'appuient sur deux groupes de critères principaux :

- Le premier groupe de critères porte sur les vides du sol, à travers une évaluation de la porosité visible à l'œil, dont on détermine l'importance, mais aussi l'origine (biologique, climatique ...). Aucune méthode ne propose d'évaluation directe de la connectivité ou du caractère fonctionnel ou non de la porosité, ce qui est très difficile à faire au champ. Toutefois, ceci peut être réalisé par des tests complémentaires (infiltrométrie par exemple) relativement faciles à mettre en œuvre. Plusieurs études ont été menées dans le but d'objectiver les critères de description ou de notation de la structure. À titre d'exemple, la figure 6 montre les valeurs de porosité structurale mesurée en laboratoire sur des mottes classées comme ayant un état interne Δ : les valeurs de porosité structurale mesurées sont regroupées et très faibles (< 6%) au sein de ces mottes, ce qui confirme le lien entre ce critère et le degré de tassement. Plusieurs autres études ont confirmé ce résultat. Le témoignage de Johannes et Boivin de ce numéro rend compte d'une étude sur le lien entre les valeurs de notation de la méthode VESS et les propriétés des échantillons de sol évalués au laboratoire en modélisant la courbe de retrait. Ces travaux montrent qu'il est possible de relier la notation VESS pratiquée sur de petits échantillons avec des valeurs de diffusion de l'air ou de l'eau, évaluées au potentiel hydrique – 100hPa.

- Le second type de critère porte sur la fraction solide du sol : il s'agit de décrire l'organisation de cette fraction à travers la forme, la distribution des tailles, le degré de cohésion des éléments entre eux, la résistance mécanique des mottes. La procédure d'évaluation diffère suivant la méthode. Dans VESS, le type d'agrégation est noté suivant une charte de référence après avoir brisé les fragments sous une légère pression jusqu'à obtenir une taille de 1.5 - 2.0 cm ; dans VSA, les fragments sont séparés par l'opérateur en faisant tomber le bloc d'une hauteur de 1 m ; dans le profil cultural, une première appréciation est faite lors du travail de la face du profil avec le couteau, qui permet de déterminer l'organisation des mottes (O, B et C), puis des fragments sont prélevés dans chaque unité morphologique pour préciser le type de porosité avec présence ou absence de fissures et de macropores d'origine biologique. Quelle que soit la méthode, plusieurs auteurs soulignent qu'il est difficile d'évaluer de façon fiable et répétitive le mode d'organisation de la phase solide du sol. La mise en évidence de la distribution des tailles de mottes dépend de la résistance à la rupture, qui elle-même est une fonction de l'humidité du sol (Emmet-Both *et al.*, 2016 ; Pulido Moncada *et al.*, 2017). Par ailleurs, l'application d'une pression faible sur un échantillon afin d'évaluer les tailles des fragments de sol est une procédure mal définie (Batey *et al.*, 2015). Très clairement, les recherches en ce domaine sont actuellement trop rares.

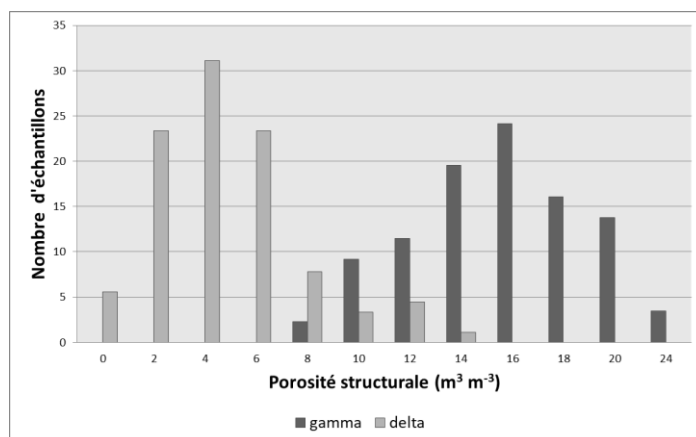


Figure 6. Diagramme de porosité des mottes Δ et Γ . Les données ont été acquises sur l'essai « systèmes de culture et structure du sol » à l'Inra d'Estrées-Mons en 2002. Chaque échantillon correspond à un cylindre de 5 cm de diamètre et 5 cm de hauteur prélevé dans des zones identifiées Δ ou Γ (Boizard, non publié).

Le système d'évaluation globale de la structure est très différent entre les trois méthodes. Avec le profil cultural ou le Mini profil 3D, l'analyse est qualitative, à partir de la localisation des états structuraux dans le profil et le modèle conceptuel d'évolution de la porosité. Il est possible toutefois d'introduire des éléments de quantification, en calculant par exemple la proportion des volumes tassés (proportion d'état interne Δ sur la face d'observation, pour estimer un degré de dégradation de l'état structural du profil (Coulomb, 1991). Avec les méthodes « bêche », l'évaluation est basée sur le principe d'un « scoring », c'est-à-dire sur l'attribution d'une note globale de qualité de la structure, en intégrant les valeurs des différents critères (porosité, taille des agrégats...). Il s'agit toujours d'une approche qualitative de la structure, mais l'esprit est différent, car il repose sur l'idée qu'il existe une « qualité » de la structure. Or ce concept ne va pas de soi : en effet un état structural donné peut être favorable pour une fonction du sol et défavorable pour une autre ; de même deux états différents peuvent être identiquement favorables à une fonction donnée. Par conséquent, la manière de construire la note de « qualité de la structure » renvoie à une conception de ce qu'est la « qualité de la structure » et l'objectif poursuivi. Elle varie donc suivant les auteurs. Dans la méthode VESS, on n'attribue pas de note à chaque critère pris individuellement, mais la note globale est basée sur une combinaison donnée de l'état de chacun des critères. Dans la méthode VSA, l'auteur introduit un système de pondération entre critères, ce qui revient non seulement à considérer que certains sont plus importants que d'autres mais également à quantifier cet écart (i.e. le degré de développement de la structure compte deux fois moins que le comptage des vers de terre ou la couleur).

De nombreux travaux ont évalué la fiabilité de ces méthodes en reliant l'évaluation de la qualité physique de la structure à ses conséquences sur le fonctionnement des plantes ou la circulation de l'eau dans le sol. C'est le cas de Tardieu (1988), Desbourdes-Coutadeur (2002) et Coquet *et al.* (2005) avec la méthode de description du profil cultural, ou de Mueller *et al.* (2013) avec VSA et VESS. McKenzie (2001b) a montré que l'approche visuelle et tactile dans SOILpak était au moins équivalente à l'utilisation d'une large gamme de tests physiques

pour apprécier la qualité de la structure. Pulido Moncada *et al.* (2014b ; 2017) ont toutefois montré certaines divergences entre l'évaluation morphologique et les propriétés physiques dans certains types de sol et suggèrent des études complémentaires pour mieux caler les indicateurs sur des mesures physiques.

Reproductibilité

Le niveau d'expertise nécessaire est un point important. Il est relativement différent d'une méthode à l'autre. VESS est la méthode la plus facile à mettre en œuvre, puisque le nombre de critères est réduit, la procédure est simple et aboutit à une note unique. De plus, une charte graphique (annexe 2) facilite la notation. Une formation de quelques heures suffit pour qu'un opérateur mette en œuvre la méthode. La méthode VSA est plus exigeante que la méthode VESS, essentiellement à cause du grand nombre de critères et de la difficulté à objectiver certaines observations comme le « degré de développement des mottes ». Le profil cultural et le Mini Profil 3D demandent une bonne expertise parce que l'identification des différents états et la préparation de la face d'observation requièrent une certaine expérience. Par ailleurs, toutes ces méthodes incluent un critère portant sur le degré de cohésion des éléments structuraux. Quelle que soit la méthode pour évaluer ce critère (l'application d'une pression faible, le « drop test », la résistance à la pointe du couteau), la résistance à la rupture est une fonction de l'humidité du sol. En conséquence les promoteurs de ces méthodes préconisent une gamme d'humidité pour pratiquer l'observation (ni trop sec, ni trop humide) qui reste à l'appréciation de l'opérateur. Néanmoins il serait souhaitable que des travaux de recherche soient conduits pour mieux évaluer les conditions optimales d'évaluation de ce critère et les biais introduits par la teneur en eau.

Enfin concernant leur utilisation dans des types de sol et des systèmes de culture variés, le principal point fort de toutes les méthodes mentionnées dans cet article est qu'elles peuvent être utilisées dans quasiment toutes les situations culturelles (excepté les sols ayant une charge trop forte en cailloux).

Conclusion : quels usages et quelles complémentarités entre ces méthodes ?

Le tableau 1 présente une synthèse des modalités d'évaluation des différentes méthodes et leurs usages respectifs avec atouts et limites (tableau 1). Celui-ci a été établi à partir de comparaison de méthodes réalisées dans le cadre du groupe de travail de l'ISTRO sur les méthodes visuelles (Boizard *et al.*, 2005), d'un mémoire de fin d'études (Renouard, 2007) et des revues de Batey *et al.* (2015) et Emmet-Both *et al.* (2016).

L'un des points forts de la méthode du profil cultural est la prise en compte de la variabilité spatiale de la structure, qui permet de remonter à l'origine des états structuraux observés. Cette méthode est très adaptée à des travaux pour évaluer l'effet des itinéraires techniques et des systèmes de culture. La description spatiale de la structure du sol fournit des informations permettant de mieux comprendre et analyser les effets du travail du sol, du compactage et des agents na-

turels sur la structure du sol et du sous-sol ainsi que leurs conséquences sur le développement et la croissance des plantes (Roger-Estrade *et al.*, 2004). On peut citer des travaux où la méthode a montré tout son intérêt : l'étude des effets cumulatifs en fonction des systèmes de culture et des modalités de travail du sol (Boizard *et al.*, 2002 et 2013), l'évaluation de l'état structural du sol et le développement de structures lamellaires en monoculture de soja en Argentine (Témoignage de De Battista et Sasal dans ce numéro) et l'évaluation des tassements profonds en systèmes avec betteraves et pomme de terre dans les Hauts de France (Tomis *et al.*, 2017). L'utilisation combinée du profil et de transects pénétrométriques a aussi montré également son intérêt dans le cadre de travaux de remédiation (Témoignage de Suc et Ancelin dans ce numéro). Néanmoins la méthode demande un certain niveau d'expertise, elle est longue à mettre en œuvre et destructive. La méthode VESS s'est beaucoup développée à travers le monde depuis quelques années. Les principaux atouts sont la facilité d'usage et la rapidité de mise en œuvre. Aussi elle est bien adaptée pour réaliser un diagnostic rapide, par exemple pour un agriculteur dans la prise de décision immédiate sur l'opportunité ou non de tel ou tel passage d'outil et son réglage. Elle s'adresse à un public très large, qui va de l'agriculteur au chercheur, d'autant que son appropriation est simple grâce à la charte s'appuyant sur des photos pour aider l'utilisateur à faire sa notation. Le développement d'une application mobile devrait encore favoriser son utilisation (Cf témoignage de Johannes *et al.* dans ce numéro). Plusieurs auteurs ont montré une assez bonne correspondance avec les propriétés physiques et hydriques du sol, même s'il existe quelques réserves suivant le type de sol (Pulido Moncada *et al.*, 2014a ; Johannes *et al.*, 2017). Elle peut donc être utilisée pour le suivi de la structure des sols dans des situations où d'autres méthodes de caractérisation sont difficiles à mettre en œuvre ou comme indicateur dans le cadre d'approche plus globale sur la qualité des sols. Mais par rapport à la méthode de description du profil cultural, elle est moins performante pour analyser l'origine des états structuraux observés. Il faudrait pour ce faire adopter une stratégie d'échantillonnage adaptée, basée sur l'analyse préalable de la géométrie des passages de roues dans la parcelle. La méthode VSA s'est aussi développée ailleurs qu'en Nouvelle-Zélande. Par rapport à VESS, l'évaluation porte davantage sur la qualité globale du sol et sa mise en œuvre est plus longue pour deux raisons : le temps nécessaire pour classer les agrégats et le nombre de critères à évaluer.

La méthode du Mini profil 3D est une innovation intéressante dans la mesure où la méthode est plus souple et attrayante, comparée au profil, pour les agents du développement. Les premiers retours des utilisateurs montrent le grand intérêt des agriculteurs pour la méthode parce qu'elle est bien adaptée à un diagnostic en temps réel sur la parcelle. Par contre on ne peut pas pratiquer, comme pour la description du profil cultural, l'analyse comparée des différents compartiments. Pour ces deux méthodes, la principale difficulté est le niveau d'expertise de l'opérateur : un apprentissage d'au moins deux jours est nécessaire et l'expérience acquise dans des situations diverses de sols et de modalités de travail du sol facilitera l'observation.

Tableau 1. Description du mode d'évaluation et des usages possibles des méthodes visuelles avec atouts et limites

Méthode	Mode d'évaluation de l'état structural	Utilisateurs cible	Facilité de mise en œuvre	Le mode d'évaluation avec atouts et limites
Le profil cultural	L'analyse est qualitative, à partir de la localisation des états structuraux et le modèle d'évolution de la porosité; possibilité de quantifier en calculant la proportion de chaque critère	Chercheurs, Agronomes du développement et experts consultants	- Nécessite une bonne expertise - La méthode est longue à mettre en œuvre incluant le creusement du profil et son rebouchage	- Permet une analyse fine de l'état structural au niveau spatial y compris l'analyse des tassements profonds - Permet une analyse des causes de variation de la structure des sols incluant travail du sol, compactage, activité biologique et conditions climatiques - Possibilité de combiner analyse morphologique et mesures physiques ou hydriques dans chaque unité morphologique
VESS	Attribution d'une note globale attribuée à partir de l'évaluation visuelle et tactile de quelques critères avec l'aide d'une charte de référence	Chercheurs, agronomes du développement, experts consultants et agriculteurs	- Facilité d'usage - Rapidité de mise en œuvre	- Méthode polyvalente utilisable aussi bien par des chercheurs que des agriculteurs - Fournit rapidement un diagnostic, mais ne donne pas d'informations sur l'origine des états structuraux - Plutôt une bonne correspondance avec les propriétés physiques et hydriques du sol - La méthode n'est pas adaptée à l'analyse des horizons profonds
VSA	Attribution d'une note globale à l'aide de chartes de référence avec une pondération entre critères	Chercheurs, agronomes du développement et experts consultants	- Utilise de nombreux critères, qui demandent une expertise - plus consommatrice en temps / VESS	- L'évaluation est plus globale que la simple évaluation de l'état structural avec plusieurs critères portant sur la qualité biologique et le comportement des sols - Intéressante pour comparer des systèmes écologiques variés comme la grande culture, la prairie ou la forêt
Mini Profil 3D	L'évaluation est similaire à l'évaluation conduite avec la méthode du profil cultural	Agronomes du développement, experts consultants et agriculteurs	- Plus facile à mettre en œuvre et plus rapide que le profil cultural - Nécessite aussi une bonne expertise	- méthode appréciée des agriculteurs parce que bien adaptée à un diagnostic en temps réel sur la parcelle, qu'il soit individuel ou en groupe - L'analyse comparée des compartiments L1, L2 et L3 est plus difficilement réalisable - La méthode ne permet pas de coupler analyse morphologique et mesures (bloc perturbé par le soulèvement)

Face à une demande croissante d'évaluation de l'état structural du sol au champ, les méthodes visuelles sont indispensables. Celles dont on dispose actuellement sont fiables et peuvent être adaptées à l'usage souhaité : il n'existe pas de méthode « passe partout », mais un choix à effectuer en fonction des objectifs poursuivis, du temps disponible pour la mise en œuvre et du niveau d'expertise de l'opérateur. Un exemple en est donné à travers le témoignage de Tomis et Duparque de ce numéro. De plus, elles peuvent être combinées ou intégrées dans des approches plus globales de la qualité physique des sols. Plusieurs exemples peuvent être cités : Turillon *et al.* (2018) reprennent et utilisent la méthode VESS pour évaluer la structure du sol en complétant cette appréciation par une notation des traces de bioturbation opérée par les vers de terre. Cette extension de la méthode VESS permet notamment de suivre plus explicitement et de façon simple, l'effet régénérant de l'activité lombricienne dans les

sols tassés ; Dans Biofunctool®, Thoumazeau *et al.* (2019a et 2019b) proposent un outil d'évaluation de la qualité globale des sols en reprenant VESS pour évaluer la structure ; L'outil SubVESS (Ball *et al.*, 2015) évalue les tassements profonds en couplant la réalisation d'un profil de sol avec une méthode de notation du type de celle proposée dans VESS.

En conclusion, face au besoin croissant d'évaluer des systèmes de culture en vue de systèmes plus autonomes, les méthodes visuelles permettent aussi bien de répondre aux besoins de diagnostics rapides au champ que de comprendre les processus induisant les changements dans les écosystèmes. Ces méthodes ont toute leur place dans la cadre d'une démarche « clinique » en agronomie.

Références bibliographiques

- Baize, D., Duval, O., Richard, G., 2013. Les Sols et Leurs Structures. Observations à différentes échelles. Editions Quae, Versailles.
- Ball, B.C., Batey, T. & Munkholm, L.J. 2007. Field assessment of soil structural quality - a development of the Peerlkamp test. *Soil Use and Management*, 23, 329–337.
- Ball, B.C., Batey, T., Munkholm, L.J., Guimarães, R.M.L., Boizard, H., McKenzie, D.C., Peigné, J., Tormena, C.A., Hargreaves, P., 2015. The numeric visual evaluation of subsoil structure (SubVESS) under agricultural production. *Soil & Tillage Research*. 148, 85–96.
- Batey, T., 1988. Soil husbandry: a practical guide to the use and management of soils. Publication: Soil & Land Use Consultants Ltd
- Batey, T., 2000. Soil profile description and evaluation. Publication : Smith K.A., Mullins C.E. (Eds), *Soil and environmental analysis*. Physical methods, 2nd edition. Marcel Dekker Inc., New-York, Basel. pp. 595-627.
- Batey, T., McKenzie, D.C., 2006. Soil compaction: identification directly in the field. *Soil Use and Management*, 23, 329–337.
- Batey, T., Guimarães, R.M.L., Peigné, J., Boizard, H., 2015. Assessing structural quality for crop performance and for agronomy (VESS, VSA, SOILpak, Profil Cultural, SubVESS). In: Ball, B.C., Munkholm, L.R. (Eds.), *Visual Soil Evaluation: Realising Potential Crop Production with Minimum Environmental Impact*. CABI, Wallingford, UK, pp. 15–30.
- Boizard, H., Batey, T., McKenzie, D., Richard, G., Roger-Estrade, J., Ball, B. C., Bradley, I., Cattle, S., Hasinger, G., Munkholm, L., Murphy, B. W., Nievergelt, J., Peigné, J., Shepherd, G., 2005. Field meeting “visual soil structure assessment” held at the INRA, Research Station, Estrées Mons, France, 642 25-27 May 2005. Detailed report. http://http://iworx5.webxtra.net/~istroorg/download/WG_Visual_Soil_Structure_Assessment_Field_meeting.pdf.
- Boizard, H., Yoon, S.W., Léonard, J., Lheureux, S., Cousin, I., Roger-Estrade, J., Richard, G., 2013a. Using a morphological approach to evaluate the effect of traffic and weather conditions on the structure of a loamy soil in reduced tillage. *Soil & Tillage Research*, 127, 34–44.
- Boizard, H., Ball, B.C., Shepherd, T. G. et Roger-Estrade, J., 2013b. Caractérisation au champ de la structure des horizons de surface des sols cultivés. Dans : Les sols et leurs structures, observations à différentes échelles (D. Baize, O. Duval, G. Richard, coord.), chapitre 8, collection synthèse, éditions Quae, 119-129.
- Boizard, H., Peigné, J., Sasal, M. C., de Fátima Guimarães, M., Piron, D., Tomis, V., Vian, J.-F., Cadoux, S., Ralisch, R., Tavares Filho, J., Heddad, D., De Battista, J., Duparque, A., Franchini, J. C., and Roger-Estrade, J., 2017. Developments in the “profil cultural” method for an improved assessment of soil structure under no-till. *Soil & Tillage Research*, 173, 92-103.
- Bottinelli, N., Jouquet, P., Capowiez, Y., Podwojewski, P., Grimaldi, M., Peng, X., 2015. Why is the influence of soil macrofauna on soil structure only considered by soil ecologists? *Soil & Tillage Research*, 146, 118–124.
- Capowiez, Y., Samartino, S., Cadoux, S., Bouchant, P., Richard, G., Boizard, H., 2012. Role of earthworms in regenerating soil structure after compaction in reduced tillage systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 55, 93–103.
- Chenu C. et Cosentino D., 2011 - Microbial regulation of soil structural dynamics. In *Architecture and biology of soils : Life in inner space*, Eds K. Ritz and I.M. Young. pp chapter 3. CABI.
- Coquet, Y., Coutadeur, C., Labat, C., Vachier, P., Roger-Estrade, J., Simunek, J., 2005. How do tillage practices affect water and solute transport? 1. A field experiment. *Vadose Zone Journal*, 4, 573-586
- Coulomb, I., 1991. Analyse quantitative du comportement du sol au labour: rôle de l'état structural initial. Thèse. Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris.
- Cosentino D., Le Bissonnais Y. et Chenu C., 2006. Aggregate stability and microbial community dynamics under drying-wetting cycles in a silt loam soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 38 : 2053-2062
- Desbourdes-Coutadeur, C., Coquet, Y., Roger-Estrade, J., 2002. Variation of hydraulic conductivity in a tilled soil. *European Journal of Soil Science*, 5:43, 619-628
- De Leon, F., 1991. Morphologie, propriétés physiques et conditions de formation des éléments structuraux de la couche labourée. Thèse. Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris.
- Dexter, A.R., 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research*, 11, 199–238.
- Emmet-Both J.P., Forristal, P.D., Fenton, O., Ball, B.C. and Holden, N.M., 2016. A review of visual soil evaluation techniques for soil structure. *Soil Use and Management*, December 2016, 32, 623–634
- Hasinger G. et al., 2004. Observer et évaluer la structure du sol. Cahiers de la FAL 50, p.105. FAL, Zürich-Reckenholz.
- Franco, H.H.S., Guimarães, R.M.L., Tormenac C. A., Cherubini, M.R., Favilla H.S., 2019. Global applications of the Visual Evaluation of Soil Structure method: A systematic review and meta-analysis. *Soil & Tillage Research*, 190, 61–69
- Gautronneau, Y., Manichon H. 1987. Guide méthodique du profil cultural. CEREF-ISARA/GEARA-INAPG. <http://profilcultural.isara.fr/>
- Gorbing, J. 1947. Die grundlagen der gare im praktischen ackerbau, Band II. Landbuch-Verlag G.M.B.H, Hannover.
- Guérif, J., De Leon Gonzales, F., Stengel, P., 1994. Variability of internal structure of clods in relation to soil conditions prior compaction, effect on soil strength. In: Jensen, H.E., Schjonning, P., Mikkelsen, S.A., Madsen, K.B. (Eds.), *Proceedings 13th international ISTRO conference Soil Tillage for Crop Production and Protection of the Environment*, 24-29 July, 1994, Aalborg, 1, 543-548.

- Guimaraes, R.M.L., Ball, B.C. & Tormena, C.A. 2011. Improvements in the visual evaluation of soil structure. *Soil Use and Management*, 27, 395–403.
- Guimaraes, R.M.L., Neves Junior, A. F., Silvac, W.G., Rogers, C.D., Ball, B.C., Montes, C.R. and Pereirac, B.F.F., 2017. The merits of the Visual Evaluation of Soil Structure method (VESS) for assessing soil physical quality in the remote, undeveloped regions of the Amazon basin. *Soil & Tillage Research* 173 (2017) 75–82
- Hénin S., Foodoroff A., Gras R., Monnier G., 1960. Le profil cultural. Principes de physique du sol. Société d'Édition des Ingénieurs Agricoles, Paris..
- Henin, S., Gras, R., Monnier, G., 1969. Le profil cultural (2e édition) - Masson Ed. Paris.
- Johannes, A., Weisskopf, P., Schulin, R., Boivin, P., 2017. To what extent do physical measurements match with visual evaluation of soil structure? *Soil & Tillage Research*, 173, pp. 24–32
- Kravchenko, A. N., A. K. Guber, B. S. Rasavi, J. Koestel, M. Y. Quigley, G. P. Robertson, and Y. Kuzyakov. 2019. Microbial spatial footprint as a driver of soil carbon stabilization. *Nature Communications* 10:3121. Link: <https://lter.kbs.msu.edu/pub/3781>
- Leopizzi, S., Gondret, K. & Boivin, P., 2018. Spatial variability and sampling requirements of the visual evaluation of soil structure in cropped fields. *Geoderma*, 314, 58–62
- Manichon, H., 1982. Influence des systèmes de culture sur le profil cultural: élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse. Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris.
- McKenzie DC (2001a) Rapid assessment of soil compaction damage. I. The SOILpak score, a semi-quantitative measure of soil structural form. *Australian Journal of Soil Research* 39, 117–125.
- McKenzie DC (2001b) Rapid assessment of soil compaction damage. II. Relationships between the SOILpak score, strength and aeration measurements, clod shrinkage parameters and image analysis data on a Vertisol. *Australian Journal of Soil Research* 39, 127–141.
- Mueller, L., Shepherd, G., Schindler, U., Ball, B.C., Munkholm, L.J., Hennings, V., Smolentseva, E., Rukhovic, O., Lukin, S., Hu, C., 2013. Evaluation of soil structure in the framework of an overall soil quality rating. *Soil and Tillage Research*, 127, 74–84.
- Peerlkamp, P.K., 1959. A visual method of soil structure evaluation. *Meded. v.d.Landbouwhogeschool en Opzoekingsstations van de Staat te Gent* 24, 216–221.
- Piron, D., Boizard, H., Heddadj, D., Pérès G., Hallaire, V., Cluzeau, D., 2017. Indicators of earthworm bioturbation for improving visual assessment of soil structure. *Soil & Tillage Research*, 173, 53–63
- Pulido Moncada, M., Gabriels, D., Lobo, D., Rey, J.C. & Cornelis, W.M. 2014a. Visual field assessment of soil structural quality in tropical soils. *Soil & Tillage Research*, 139, 8–18.
- Pulido Moncada, M., Penning, L.H., Timm, L.C., Gabriels, D. & Cornelis, W.M. 2014b. Visual examination and soil physical and hydraulic properties for assessing soil structural quality of soils with contrasting textures and land uses. *Soil & Tillage Research*, 140, 20–28.
- Pulido Moncada, M., Penning, L.H., Timm, L.C., Gabriels, D. & Cornelis, W.M. 2017. Visual examination of changes in soil structural quality due to land use. *Soil & Tillage Research*, 173, 83–91
- Renouard C., mémoire de fin d'études d'ingénieur, ESITPA, 2007
- Roger-Estrade, J., Richard, G., Caneill, J., Boizard, H., Coquet, Y., Defosse, P., Manichon, H., 2004. Morphological characterization of soil structure in tilled fields: from a diagnosis method to the modeling of structural changes over time. *Soil & Tillage Research*, 79, 33–49.
- Sasal, M.C., 2012. Factores condicionantes de la evolución estructural de suelos limosos bajo siembra directa. Efecto sobre el balance de agua. Doctoral Thesis. Escuela para Graduados Alberto Soriano, Universidad de Buenos Aires.
- Sasal, M.C., Boizard, H., Andriulo, A., Wilson, M., Léonard, J., 2017. Platy structure development under No-tillage in the northern humid pampas of Argentina and its impact on runoff. *Soil & Tillage Research*, 173, 33–41
- Shepherd, T. G. 2000: Visual soil assessment. Volume 1. Field guide for cropping and pastoral grazing on flat to rolling country. horizons.mw/Landcare Research, Palmerston North. 84 p.
- Shepherd, T.G., 2009. Visual Soil Assessment. Volume 1. Field Guide for Pastoral Grazing and Cropping on Flat to Rolling Country, 2nd ed. *Horizons Regional Council*, Palmerston North 119 pp.
- Stengel, P., 1990. Caractérisation de l'état structural du sol. Objectifs et méthodes. Les colloques de l'INRA, 1990, vol 53, pp 15–36.
- Tardieu, F., 1988. Analysis of the spatial variability of maize root density. I. Effect of wheel compaction on the spatial arrangement of roots. *Plant and Soil*, 107, 259–266.
- Tomis, V., Martin, M., Turillon, C., Hervieu, S., Duparque, A., 2017. Impact of potato planting and harvesting on soil compaction and soil development for potato and next crops, 20th EAPR Triennial Conference, Versailles, France, 9-17 July 2017
- Tomis, V., Duparque, A. and Boizard, H., 2019. Development of the “Mini 3D soil profile” – a visual method derived from the “profil cultural”. *Soil & Tillage Research*, 194, 104285
- Thoumazeau A., Bessou C., Renevier M.S., Trap J., Marichal R., Mareschal L., Decaëns T., Bottinelli N., Jaillard B., Chevalier T., Suvannang N., Sajjaphan K., Thaler P., Gay F. and Brauman A., 2019a. Biofunctool®: a new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part A: Concept and validation of the set of indicators. *Ecological Indicators*, 97, pp. 100–110
- Thoumazeau A., Bessou C., Renevier M.S., Trap J., Marichal R., Mareschal L., Decaëns T., Bottinelli N., Jaillard B., Chevalier

lier T., Suvannang N., Sajjaphan K., Thaler P., Gay F. and Brauman A., 2019b. Biofunctool®: a new framework to assess the impact of land management on soil quality. Part B: Investigating the impact of land management of rubber plantations on soil quality with the Biofunctool® index, 97, pp. 429-437

Turillon C., Crétin, V., Tomis, V., Duparque, A. 2018. Guide méthodique du test bêche « Structure et Action des vers de terre » Diagnostiquer rapidement l'état structural d'un sol en prenant en compte les traces d'activité des vers de terre. <http://www.agro-transfert-rt.org/wp-content/uploads/2018/08/Guide-m%C3%A9thode-beche-web.pdf>

Weill, A., 2009. Les profils de sol agronomiques – Un outil de diagnostic de l'état des sols. Publication : Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). <https://www.craaq.qc.ca/Publications-du-CRAAQ/les->

Annexe 1. Guide pratique de la méthode du profil cultural

Annexe 2. Guide pratique de VESS

Annexe 3. Le Mini profil 3D

Évaluation visuelle de la structure du sol par le profil cultural (1)

La structure du sol affecte les propriétés physiques et hydriques du sol avec des conséquences sur la plante et l'environnement. L'objectif de la méthode est d'évaluer l'état structural I, de porter un diagnostic sur l'origine des états observés et d'établir un pronostic sur son évolution et ses conséquences.



Équipement:

- Pelle mécanique souhaitable ou pioche et pelle : creuser et dégager la terre
- Fourche à bêcher ou bêche : rafraîchir le profil et réaliser des faces verticales lisses
- Soufflet : dégager la terre fine sur la face du profil
- Couteau : distinguer les horizons et mettre en évidence la structure. La lame ne doit être pas trop longue (< 15cm), ni trop effilée
- Mètre pliant, crayon et support papier
- Sécateur : dégager la culture présente en surface et raccourcir les racines
- Fiches : délimiter la tranchée et l'emplacement des roues
- Fiche d'observation terrain : à compléter au fur et à mesure de l'avancée de la description
- Laine, épingles triangulaires et épingles à tête plate (optionnel) : délimiter les horizons et faire ressortir les zones compactes
- Appareil photo.

A quelle période de l'année?:

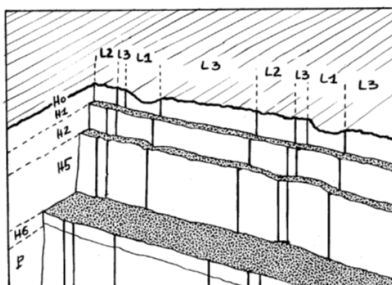
À n'importe quelle période, mais plutôt lorsque le sol est humide. Lorsque le sol est trop sec, la résistance élevée du sol ne permet pas une observation fiable. De même un sol trop humide à saturation est trop plastique pour être travaillé

Comment échantillonner? :

Choisir un zone représentative au niveau de la culture, du type de sol ou une zone à problème (végétation plus faible, hydromorphie...). A l'intérieur de cette zone, choisir l'emplacement du profil perpendiculairement au travail du sol. La largeur du profil doit permettre de prendre en compte la variabilité induite par les passages de roues. En pratique une largeur entre 3 à 4 m permettra une évaluation précise. La profondeur sera idéalement d'environ 1.50 m pour une observation sur 1 m de profondeur ou jusqu'à la profondeur de l'enracinement utile.

Mise en œuvre de l'évaluation :

Etapes	Option	Procédure
1. Réalisation de la fosse		
Creusement	à la pelle mécanique ou à la main	Ne pas tasser la zone d'observation et rejeter la terre du côté opposé à la face d'observation choisie
Avant l'observation		Procéder à un rafraîchissement du profil de sol, qui aboutisse à la création d'une surface verticale plane sur chaque horizon
2. Repérer les partitions		
Repérage de la partition latérale		Le profil est partitionné en fonction des contraintes exercées par les passages de roues lors de interventions culturales passées: L1 : roues visibles, avec présence d'ornières, comme par exemple les roues du tracteur du semoir ou les roues des appareils de récolte L2 : roues plus anciennes, qui ont été effacées par la dernière préparation superficielle. Elle sont localisées grâce à la connaissance des passages des roues par l'agriculteur ou par la position des outils (par exemple en localisant les roues par rapport à la largeur du semoir). L3 : pas de passages de roues repérées. En systèmes avec travail du sol, L3 reflète souvent l'état initial hérité des années précédentes.
Repérage de la partition verticale	Le sous-sol	La limite entre les horizons travaillés et le sous-sol est le plus souvent déterminée par le changement de couleur, avec des horizons plus organiques en surface. Les horizons pédologiques successifs sont repérés par un changement de texture, de couleur etc. et seront appelés successivement P1, P2..
	Les horizons anthropiques	Faire apparaître les horizons en créant des "marches d'escalier successives" : la transition entre horizons est mise en évidence par des différences de cohésion entre horizons (par exemple horizon H1 fragmentaire versus horizon H5 soudé) et aussi par la présence de lissages (traces de pointes de socs...) à l'interface des horizons.



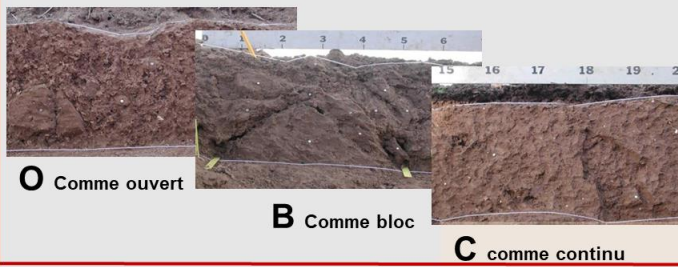
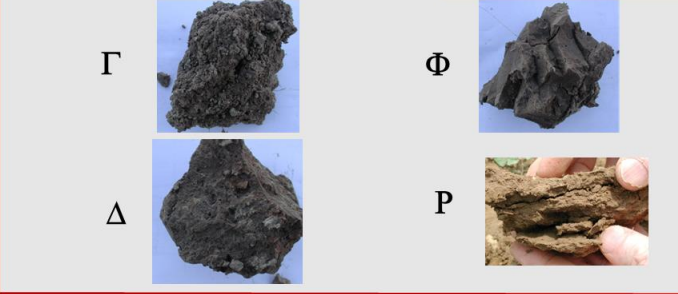



La face d'observation après les partitions verticale et latérale
Guide méthodique Gautronneau et Manichon – 1987

Dénomination des horizons anthropiques

Intitulé	Description
H0	Horizon de surface. En non travail, l'horizon de surface inclue le mulch et les premiers centimètres de sol fortement influencés par le climat et l'activité biologique
H1	Horizon de travail superficiel correspondant au passage du dernier outil
H2, H3	Horizons de travail superficiel effectué avant H1 (ex: reprise de labour)
H5	Horizon correspondant au dernier travail profond du sol (ex : labour)
H6 et plus	Horizon correspondant à un travail du sol plus ancien que le H5 : ancien labour, décompactage...

Évaluation visuelle de la structure du sol par le profil culturel (2)

Description de la structure du sol :										
Étapes	Procédure									
3. Mise en évidence des unités morphologiques définies comme des zones ayant une structure homogène		<p>La structure du sol est identifiée sur une face plane verticale sur chaque horizon. L'opérateur exerce une pression latérale avec son couteau de façon à dégager 1 cm de sol en profondeur pour faire apparaître la structure initiale. L'identification de la structure est faite à partir de différents traits :</p> <ul style="list-style-type: none"> • macropores visibles ou pas • l'aspect des faces de rupture (lisse, rugueux...) • cohésion <p>Les zones compactes sont mises légèrement en relief</p> <p>Ainsi dans chaque compartiment défini par le croisement partition latérale X partition verticale (par exemple H5L3), des unités morphologiques (UM) ayant une structure du sol homogène sont identifiées.</p>								
4. Description de la structure du sol dans les horizons anthropiques		<p>Suite à la mise en évidence du type de structure sur la face verticale de chaque horizon comme indiqué en 3, l'observation est affinée en prélevant des fragments ou blocs de sol afin de mieux observer les macropores, l'aspect des faces de rupture et la présence de l'activité biologique.</p> <p>Avant de prélever les fragments, des photos seront prises à 1 m de distance pour avoir des photos détaillées de la structure du sol, puis une photo de l'ensemble sera réalisée si possible.</p>								
4.1 Description du mode d'assemblage dans les unités morphologiques	<table border="1"> <tr> <td>O</td> <td>Très fragmenté avec la présence de terre fine, petits agrégats et mottes</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>Faible porosité, mottes décimétriques séparées par des cavités structurales plus ou moins importantes ou/et de la terre fine. Ces mottes résultent d'un tassement ancien partiellement fragmenté par le travail du sol</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>La structure du sol est massive sans discontinuités structurales. En présence de fentes de retrait, l'indice «r» est ajouté.</td> </tr> </table>	O	Très fragmenté avec la présence de terre fine, petits agrégats et mottes	B	Faible porosité, mottes décimétriques séparées par des cavités structurales plus ou moins importantes ou/et de la terre fine. Ces mottes résultent d'un tassement ancien partiellement fragmenté par le travail du sol	C	La structure du sol est massive sans discontinuités structurales. En présence de fentes de retrait, l'indice «r» est ajouté.			
O	Très fragmenté avec la présence de terre fine, petits agrégats et mottes									
B	Faible porosité, mottes décimétriques séparées par des cavités structurales plus ou moins importantes ou/et de la terre fine. Ces mottes résultent d'un tassement ancien partiellement fragmenté par le travail du sol									
C	La structure du sol est massive sans discontinuités structurales. En présence de fentes de retrait, l'indice «r» est ajouté.									
4.2 Le type de porosité Ou état interne des fragments Dans la méthode initiale	<table border="1"> <tr> <td>Γ (Gamma)</td> <td>La face de rupture est rugueuse avec présence d'une porosité visible à l'œil. Les agrégats sont arrondis. Les mottes ont une faible cohésion</td> </tr> <tr> <td>Δ (Delta)</td> <td>Les faces de rupture sont lisses, avec une quasi-absence de porosité visible à l'œil nu. La cohésion des mottes est élevée</td> </tr> <tr> <td>Φ (Phi)</td> <td>La motte «Φ» est une motte compacte «Δ», qui a été fissurée sous l'effet du retrait/gonflement des argiles ayant subi l'action du climat (pluie, gel). Les fissures sont orientées dans toutes les directions. Contrairement à l'état «Γ» les agrégats sont anguleux</td> </tr> <tr> <td>P (platy en anglais)</td> <td>Structure de forme lamellaire, se présentant comme un réseau dense de fissures horizontales</td> </tr> </table>	Γ (Gamma)	La face de rupture est rugueuse avec présence d'une porosité visible à l'œil. Les agrégats sont arrondis. Les mottes ont une faible cohésion	Δ (Delta)	Les faces de rupture sont lisses, avec une quasi-absence de porosité visible à l'œil nu. La cohésion des mottes est élevée	Φ (Phi)	La motte «Φ» est une motte compacte «Δ», qui a été fissurée sous l'effet du retrait/gonflement des argiles ayant subi l'action du climat (pluie, gel). Les fissures sont orientées dans toutes les directions. Contrairement à l'état «Γ» les agrégats sont anguleux	P (platy en anglais)	Structure de forme lamellaire, se présentant comme un réseau dense de fissures horizontales	
Γ (Gamma)	La face de rupture est rugueuse avec présence d'une porosité visible à l'œil. Les agrégats sont arrondis. Les mottes ont une faible cohésion									
Δ (Delta)	Les faces de rupture sont lisses, avec une quasi-absence de porosité visible à l'œil nu. La cohésion des mottes est élevée									
Φ (Phi)	La motte «Φ» est une motte compacte «Δ», qui a été fissurée sous l'effet du retrait/gonflement des argiles ayant subi l'action du climat (pluie, gel). Les fissures sont orientées dans toutes les directions. Contrairement à l'état «Γ» les agrégats sont anguleux									
P (platy en anglais)	Structure de forme lamellaire, se présentant comme un réseau dense de fissures horizontales									
4.2 La bioturbation	<table border="1"> <tr> <td>b1</td> <td>Présence de macropores tubulaires. L'origine est biologique (vers de terre, racines...).</td> </tr> <tr> <td>b2</td> <td>Présence de macropores et déjections</td> </tr> </table>	b1	Présence de macropores tubulaires. L'origine est biologique (vers de terre, racines...).	b2	Présence de macropores et déjections					
b1	Présence de macropores tubulaires. L'origine est biologique (vers de terre, racines...).									
b2	Présence de macropores et déjections									

Évaluation visuelle de la structure du sol par le profil culturel (3)

5. Description de la structure du sous sol

Une double évaluation est réalisée. Elle pourra être plus ou moins rapide suivant les objectifs poursuivis :

5.1 - Mise en évidence des horizons pédologiques et des caractères permanents de chaque horizon P identifié

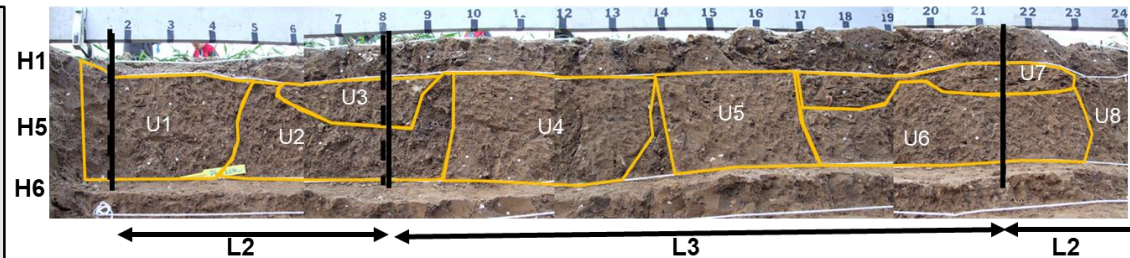
La méthode est empruntée à la pédologie en utilisant différents critères : porosité, type de structure (prismatique, polyédrique, massive...), hydromorphie, profondeur d'enracinement si possible

5.2 - Observation des modifications éventuelles du sous-sol sous l'effet des pratiques culturales

L'objectif est d'observer les modifications du sous-sol sous l'effet des pratiques culturales. Les modifications sont souvent locales : un sous-solage même ancien avec souvent dans ce cas une zone enrichie en MO, ou des tassements profonds qu'on peut détecter par une modification de la porosité, une plus grande résistance, la disparition des réseaux de fissures ou des macropores biologiques

6. En sortie : une description détaillée de la structure du sol sur le profil de sol

Exemple de partition latérale et verticale et mise en évidence des unités morphologiques observées dans l'horizon H5



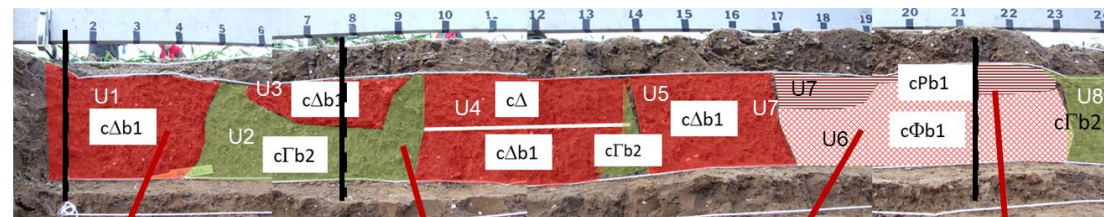
L'évaluation de l'état structural est réalisée en regroupant les trois critères : mode d'assemblage, type de porosité et bioturbation.

Le diagnostic s'appuie sur : (i) le modèle conceptuel de la dynamique de la structure et (ii) l'analyse de la variabilité spatiale de la structure observée sur le profil culturel (voir explications et exemples page suivante)

Établir un diagnostic sur les conséquences des états structuraux observés sur les plantes et l'environnement nécessite de prendre en compte :

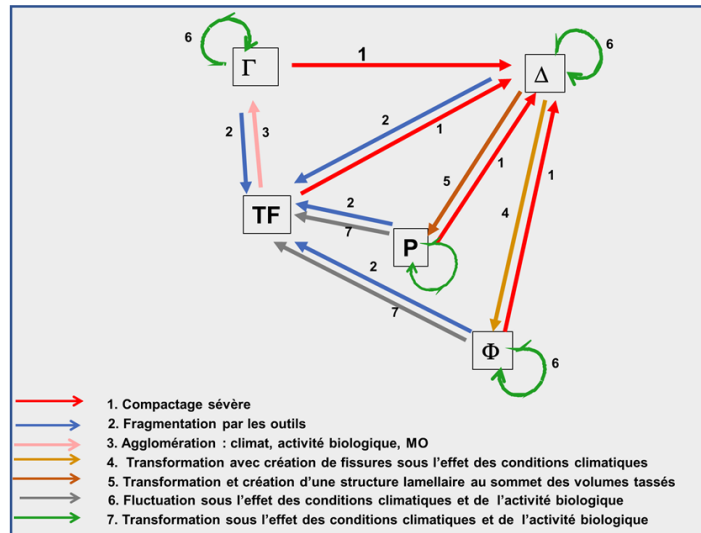
- l'importance des zones tassées, leur évolution : zones «Φ» fissurée sous l'action du climat et zone b1 ou b2 d'origine biologique
- leur répartition à l'échelle du profil
- la sensibilité des plantes, qui varie en fonction des espèces et des conditions de croissance (date de semis, conditions climatiques pendant la croissance...)
- les risques environnementaux associés aux états structuraux observés : érosion, émission de gaz à effet de serres...

Évaluation de la structure du sol à l'échelle du profil culturel



Évaluation visuelle de la structure du sol par le profil cultural (4)

Diagnostic et interprétation du profil cultural en s'appuyant sur : (i) le modèle conceptuel de la dynamique de la structure et (ii) l'analyse de la variabilité spatiale de la structure observé sur le profil cultural



Dans l'approche morphologique de la structure du sol, les différents types de porosité des mottes et des agrégats sont liés par des processus de transformation dans un modèle conceptuel de la dynamique de la structure du sol. Une représentation des hypothèses faites sur les processus impliqués est montrée par les flèches :

- F1 : un compactage sévère crée un type de porosité Δ
- F2 : de la terre fine (TF) est créée durant la préparation du sol par une fragmentation intense
- F3 : le type Γ résulte de l'effet de l'agrégation d'éléments fins du sol
- F4 et F5 : les type Φ et P résulte de l'effet des conditions climatiques fissurant les blocs Δ
- F6 et F7 : transformation progressive des zones tassées en terre fine

Plusieurs critères quantitatifs sont utilisables pour améliorer le diagnostic en calculant le proportion de chaque critère sur l'horizon ou le compartiment observé comme par exemple :

- Teneur en zones Δ pour évaluer un tassement récent après roulement
- Teneur en $(\Delta+\Phi+P)$ pour évaluer la proportion de zones tassés par exemple dans un profil
- Teneur en $(\Phi+P)$ pour évaluer la proportion de zones tassées fissurées sous l'effet du climat, par exemple sur l'ensemble des zones tassées
- Teneur des zones b1 et b2 au sein des zones tassées $(\Delta+\Phi+P)$

Contacts : jpeigne@isara.fr et hubert.boizard@gmail.com

Les différences de structure observées au niveau spatial ou dans le temps permettent d'émettre des hypothèses sur leur origine, qu'elles soient causées par des opérations culturales, les modalités de travail du sol ou les successions de culture, et prévoir les conséquences sur la culture et l'environnement

Illustration par quelques cas types

Profil cultural type	Diagnostic
<p>Système avec labour</p>	<ul style="list-style-type: none"> - H1 : structure fragmentaire - H5L3 : Etat initial très fragmentaire - H5L2 : Tassement sévère lors de la préparation
<p>Système avec labour</p>	<ul style="list-style-type: none"> - H1L3 : structure fragmentaire - H5L3 : Etat initial fragmentaire à droite et composé de mottes Δ à gauche : résulte d'un tassement, puis fragmenté par le labour - H5L1 : Tassement sévère lors du semis
<p>Système en semis direct</p>	<ul style="list-style-type: none"> - H1 : Structure lamellaire - H5L3 : Structure continue avec alternance de zones fragmentaires ($C\Gamma b2$) et zones compactes avec fissuration et macropores d'origine biologique ($C\Phi b1$) → zones tassées anciennes en cours de régénération - H5L1 : Tassement récent sévère
<p>Systèmes en labour et cultures légumières</p>	<ul style="list-style-type: none"> H1L3 : structure fragmentaire H5L3 : Structure en blocs avec alternance de mottes compactes avec fissures et macropores ($B\Phi b1$) et de mottes Δ : résulte d'un tassement ancien fragmenté par le labour H6 : horizon profond sévèrement tassé, mais en cours de régénération sous l'effet du climat et des vers de terre

Bibliographie

Gautronneau, Y., Manichon H. 1987. Guide méthodique du profil cultural. CEREF-ISARA/GEARA-INAPG. <http://profilcultural.isara.fr/>
 Boizard, H., Peigné, J., Sasal, M. C., de Fátima Guimarães, M., Piron, D., Tomis, V., Vian, J.-F., Cadoux, S., Ralisch, R., Tavares Filho, J., Heddadj, D., De Battista, J., Duparque, A., Franchini, J. C., and Roger-Estrade, J., 2017. Developments in the "profil cultural" method for an improved assessment of soil structure under no-till. Soil & Tillage Research, 173, 92-103.

Annexe 2 : Guide pratique de VESS



Evaluation Visuelle de la Structure des horizons de surface des sols cultivés (VESS)

traduction de la clé visuelle développée par Guimarães, R.M.L., Ball, B.C., and Tormena, C.A. (2011) adaptée de Boizard, H. *et al.*, in Baize, D. *et al.*, (2013)



Comment effectuer un test VESS ?	
1. Extraire	<ul style="list-style-type: none"> - Extraire un bloc de sol sur la hauteur de la bêche soit environ 25-35 cm d'épaisseur (pas moins de 20 cm sauf en présence de sols extrêmement superficiels) - Placer l'ensemble sur une bâche, une boîte ou directement sur le sol. Pour les sols labourés, ils est important que le bloc comprenne la semelle de labour.
2. Préparer et mesurer le bloc	<ul style="list-style-type: none"> - Enlever les débris et les éventuelles traces de tassement en périphérie du bloc - Mesurer l'épaisseur totale du bloc
3. Séparer et mesurer les horizons	<ul style="list-style-type: none"> - Manipuler doucement le bloc en utilisant les deux mains. Étirer/ouvrir le bloc afin de distinguer les horizons de structures différentes. - S'il y a un changement de structure visible (compacité, mottes* ou agrégats différents, abondance / comportement des racines, etc.) entre deux horizons successifs du bloc il faut distinguer et noter séparément ces derniers. - Mesurer l'épaisseur de chaque horizon - Nota : séparer par erreur deux horizons finalement identiques (de même score à la notation) n'a pas d'incidence sur le test.
4. Donner une note à chaque horizon	<ul style="list-style-type: none"> - Séparer/déliter l'horizon en éléments, en notant si la rupture est plus ou moins naturelle et facile, ou si elle nécessite une pression pour rompre un élément non subdivisé naturellement. - Relever la présence d'agrégats *, leur taille, forme et porosité interne. - Distinguer la présence de mottes fermées* en brisant les plus grosses mottes en deux et en observant surtout la localisation des racines, leurs abondances ainsi que la nature des faces de rupture (très irrégulières ou plutôt planes) et la forme des arêtes (arrondies ou plutôt anguleuses). Observer si la rupture se fait sur des faces de rupture existantes (par exemple résultant de la fissuration) ou sur des faces résultant de la contrainte exercée en brisant les mottes. - Identifier le type de structure majoritairement présent (présence majoritaire d'agrégats poreux et absence de motte fermée, présence majoritaire d'agrégats poreux et présence de quelques rares mottes fermées, ou encore présence majoritaire de mottes fermées etc...) - Plus il y a de mottes fermées* (non poreuses, anguleuses), plus la structure est de mauvaise qualité, plus le score sera élevé. - Donner une note à chaque horizon à l'aide de la fiche VESS (ci-dessus), confronter votre horizon aux photos de la clé visuelle et aux descriptions associées. - Nota : En cas d'hésitation entre deux notes choisir la plus ressemblante selon la description, ou noter au demi-point. Ne pas hésiter à prendre un second avis.
5. Calculer une note globale	<p>Score du bloc = ((épaisseur de la 1ère couche x score de la 1ère couche) + (épaisseur de la 2ème couche x score de la 2ème couche) + (épaisseur de la couche n x score de la couche n)) / épaisseur totale du bloc</p> <p>Ex : Bloc de 30 cm d'épaisseur, deux horizons de 10cm (score 2) et 20cm (score 3) Score du bloc = ((10×2) + (20×3))/30 = 80/30 = 2,7</p>

Équipement :

Bêche approx. 20 cm large, 22-25 cm de hauteur

Optionnel : feuille de plastique blanche, sac ou boîte 50 x 80 cm, couteau, appareil photo.

A quelle période de l'année ?

À n'importe quelle période, mais plutôt lorsque le **sol est humide** (sol ressuyé) et que **les racines sont bien visibles** (sous culture ou quelques mois après la récolte). Lorsque le sol est trop sec ou trop humide, il est difficile d'obtenir un échantillon représentatif.

Comment échantillonner ?

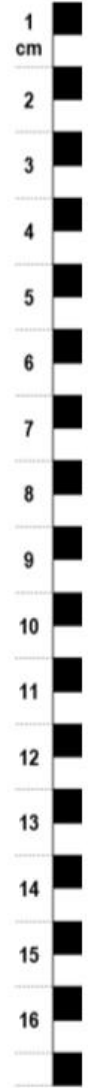
Choisir une **zone homogène** au niveau de la culture ou de la couleur du sol ou une zone présentant un problème. A l'intérieur de cette zone, réaliser au moins 3 prélèvements suivant une grille. Sur des parcelles expérimentales de petite dimension, il peut être nécessaire de limiter le nombre de prélèvements entre 3 à 5 par parcelle.



Evaluation Visuelle de la Structure des horizons de surface des sols cultivés (VESS)

traduction de la clé visuelle développée par Guimaraes, R.M.L., Ball, B.C., and Tormena, C.A. (2011) adaptée de Boizard, H. *et al.*, in Baize, D. *et al.*, (2013)

Qualité de la Structure	Apparence générale	Taille	Racines	Porosité Visible*	Apparence après extraction : même sol mais travail du sol différent	Traits distinctifs	Apparence des agrégats* ou fragments* de ≈ 1.5 cm de diamètre		
Sq1 Friable Agrégats* se désagrègent très facilement avec les doigts	Pas de motte fermée*	La plupart des agrégats* < à 0.6 cm.	Les racines colonisent l'ensemble du bloc : les racines sont bien présentes à l'intérieur et autour des agrégats*	La plupart des agrégats* sont TRES poreux			 Agrégats* très fins et poreux	 Agrégats* très poreux, composés de plus petits maintenus ensemble par les racines. Ils sont pour la plupart directement obtenus lors de l'extraction du bloc.	
Sq2 Intact Agrégats* se désagrègent facilement entre les doigts		Mélange d'agrégats* arrondis de 2mm à 7cm		La plupart des agrégats* sont poreux.			 Forte porosité des agrégats*	 Agrégats* arrondis, fragiles, poreux qui se cassent facilement.	
Sq3 Ferme La plupart des agrégats* se désagrègent facilement entre les doigts	Présence possible de mottes fermées*	Mélange d'agrégats* de 2 mm-10 cm. Moins de 30% <1cm.		Présence possible de pores grossiers visibles* et de fentes de retrait*			 Faible porosité des agrégats*	 Agrégats* avec peu de pores visibles et plutôt arrondis.	
Sq4 Compact Assez difficile de briser les mottes fermées* avec une seule main	Principalement mottes fermées* sub-angulaires	moins de 30% des mottes sont de taille <7cm ; structure lamellaire possible.		Pas ou peu de racines à l'intérieur des fragments*. Les racines présentes sont concentrées autour des mottes fermées, dans les « pores grossiers visibles »* et les fissures*	Peu de « pores grossiers visibles »* et peu de fissures*			 Racines dans les pores grossiers visibles*	 Ces fragments* de forme cubique à bords anguleux et fissures internes sont faciles à obtenir sur sol humide.
Sq5 Très Compact Très difficile de briser les mottes fermées* avec la main	Principalement mottes fermées* angulaires	mottes angulaires >10cm, très peu de taille <7cm.		Très peu de « pores grossiers »* et de fissures*. Anoxie* possible.	Très peu de « pores grossiers »* et de fissures*.			 Couleur gris-bleu possible	 Ces fragments* à bords anguleux peuvent être difficiles à obtenir même sur sol humide.



Glossaire :

Agrégat : Un agrégat (sous-entendu naturel) est le résultat d'un arrangement naturel des constituants du sol (Baize, 2004). Les agrégats se séparent spontanément lors de l'extraction du bloc ou suite à une très faible pression. Selon la qualité structurale du sol les agrégats seront plus ou moins poreux (perméable aux racines, à l'eau et à l'air).

Motte : Une motte résulte généralement du travail du sol. C'est le résultat d'un tassement/fragmentation par des outils. « **Les mottes fermées** » présentent une faible porosité (motte de type Delta d'après la méthode « profil cultural » ou structure en blocs de type « ZK » selon la classification des sols de Suisse (Groupe "classification et nomenclature" de la Société Suisse de Pédologie (SSP), 2010) (formes de structure correspondantes selon la fiche profil de la classification des sols de Suisse : Pr, Pl, Ko, Br, Klr, Kik, Fr). Ces mottes sont très peu prospectées par les racines du fait de leur compacité. En observant des mottes fermées on remarquera que les racines préfèrent courir à leur surface (en présentant un faciès en arêtes de poisson) plutôt que de s'aventurer à l'intérieur de ces mottes. Néanmoins des racines peuvent pénétrer dans des zones massives et fermées lorsque la phase d'implantation se fait en conditions humides. Ces mottes fermées sont difficiles à déliter en plus petits éléments sauf en cas de sol très humide.



Figure 1 : Racine en arêtes de poisson à la surface des structures compactées Source : (Delaunois *et al.*, 2008)

Fragment de sol : obtenu après avoir brisé une motte plutôt fermée

Anoxie : absence d'air

Fissure : espace inter-agrégats ou inter-fragments créé sous l'effet du retrait / gonflement des argiles durant les phases de dessiccation/humectation ou gel/dégel des sols

Porosité visible à l'œil : regroupe tous les pores > 0.1-0.2 mm jusqu'aux galeries de lombrics. Les « **pores visibles grossiers** » : pores de plus de 2 mm



Figure 2 : Exemples de mottes fermées (Rachel Muylaert Locks Guimarães, 2011): à gauche très peu de racines et faces pratiquement planes après rupture de la motte ; à droite : cas typique de racine traversant une motte fermée via une galerie de lombric

Bibliographie

Baize, D. (2004). Petit lexique de pédologie (Editions Quae).

Boizard, H., Ball, C.B., Shepherd, G. and Jean Roger-Estrade, 2013. Caractérisation au champ de la structure des horizons de surface des sols cultivés. In: Baize, D., Duval, O., and Richard, G. (2013). Les sols et leurs structures: Observations à différentes échelles (Editions Quae), pp 119-12

Delaunois, A., Ferrie, Y., Bouche, M., Colin, C., and Rionde, C. (2008). Guide pour la description et l'évaluation de la fertilité des sols. INRA Montp.

Groupe "classification et nomenclature" de la Société Suisse de Pédologie (SSP) (2010). Classification des sols de Suisse.

Guimarães, R.M.L., Ball, B.C., and Tormena, C.A. (2011). Improvements in the visual evaluation of soil structure. *Soil Use Manag.* 27, 395-403.

Auteurs :

Baize, D., Boivin, P., Boizard, H., Füllemann, F., Gondret, K., Johannes, A., Lamy, F., Leopizzi, S. (contacts : karine.gondret@hesge.ch ; hubert.boizard@inra.fr)

Annexe 3 : le mini-profil 3D

Prélèvement d'un bloc de sol avec les palettes d'un chargeur télescopique, afin de porter un diagnostic de la structure du sol



Équipement :

- Téléscopique ou tracteur équipé d'un chargeur frontal, avec fourche à palettes
- Couteau pour mettre en évidence la structure du sol
- Mètre, pour mesurer la profondeur de chaque horizon

Quand prélever ?

Éviter un sol trop sec pour faciliter le prélèvement et l'observation de la structure :

- Période privilégiée : en interculture, à l'automne, pour prise de décision sur le travail du sol
- Périodes possibles : après un chantier contraignant pour observer l'effet des passages de roues ou au printemps pour observer l'enracinement des cultures

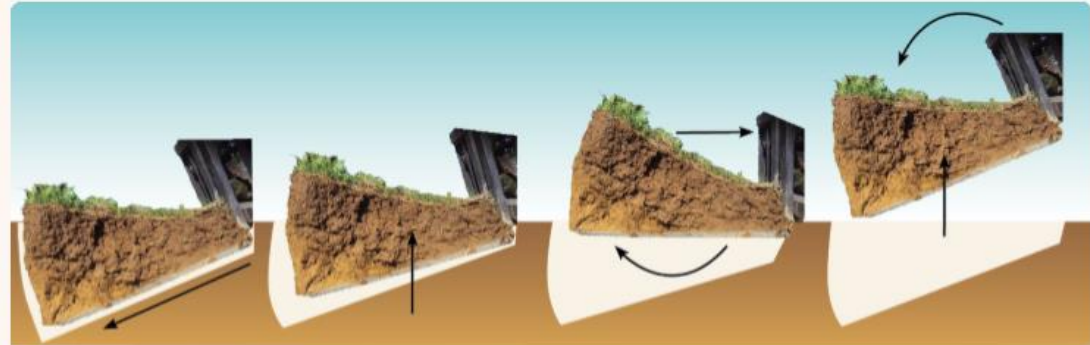
Comment échantillonner ?

- 1er prélèvement perpendiculaire au sens de travail du sol et sur une zone représentative de la parcelle, ou centré sur un passage de roue visible pour évaluer l'effet du passage ;
- 2nd et 3^e prélèvement en décalé par rapport au premier, pour couvrir la variabilité latérale de la structure du sol.

Méthode développée dans le cadre du projet multi-partenarial Sol-D'Phy, porté par Agro-Transfert

Comment prélever ?

- 1- Rapprocher les 2 palettes avec un écartement de 20 à 30 cm



- 2- Enfoncer les palettes avec un angle de 30 à 45°

- 3- Lever légèrement sans à-coups puis basculer les palettes pour éviter l'effondrement du bloc

- 4- Lever à la hauteur souhaitée et rebasculer à l'horizontal le bloc pour l'observation

Évaluation de la structure : à l'échelle du bloc

- 1- Observation des horizons de travail du sol et des transitions entre chaque horizon, mis en évidence à l'aide du couteau



- 2- Observation de l'apparence du bloc sur une face pour chaque horizon en mettant en relief les zones compactes avec un couteau



Structure grumeleuse, fragmentaire (état O)



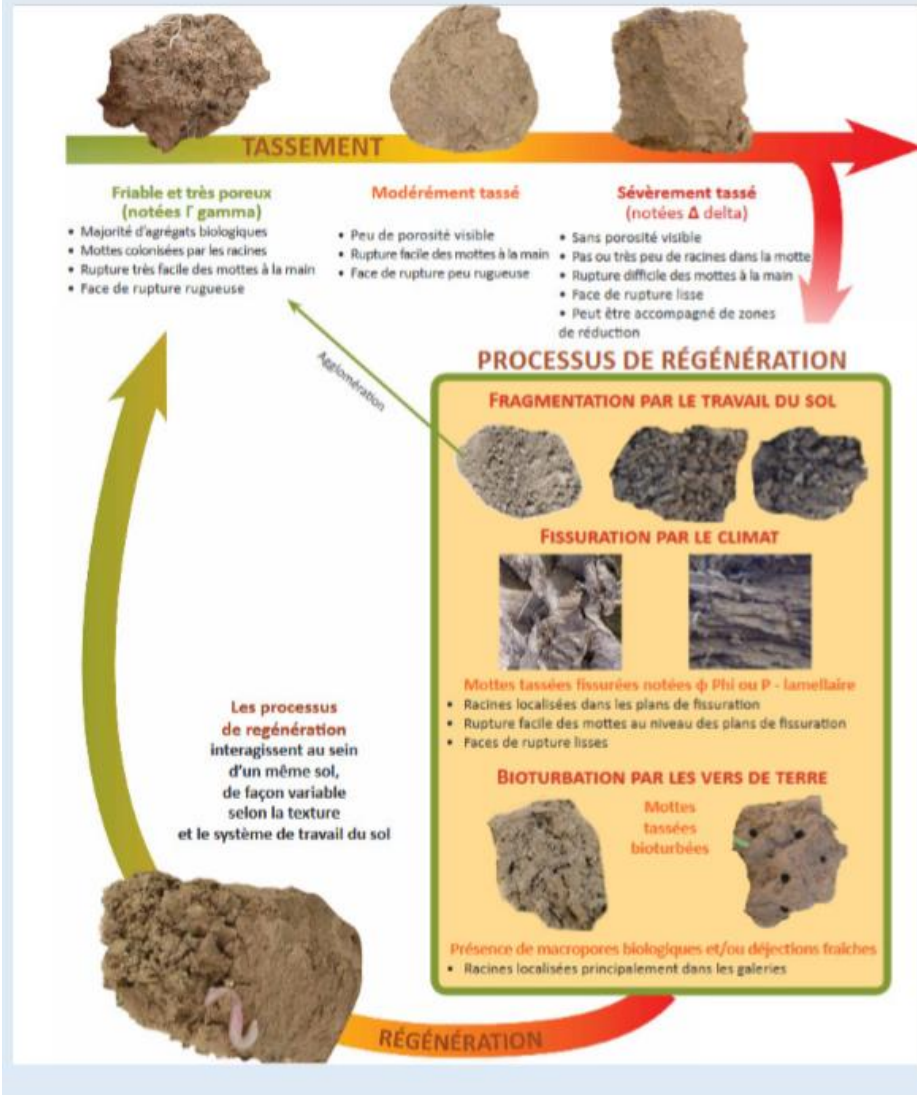
Structure en motte (état B)



Structure compacte, massive (état C)

Evaluation de la structure : à l'échelle de la motte

- 1- Prélever des mottes dans chaque horizon et zone homogène puis observer l'état de porosité
- 2- Évaluer la proportion de zones tassées dans chaque horizon identifié sur la face d'observation



Grille d'interprétation : aide à la décision vers une éventuelle intervention mécanique

Apparence globale majoritaire du bloc et porosité des mottes	Horizon	Observations par horizon	Cause probable	Conseil
État massif et continu Zones tassées majoritaires (plus des 2/3 du bloc), non fissurées et peu perforées par les vers de terre	Horizon habituellement travaillé	Structure continue massive dans l'horizon labouré	Tassement récent non repris par un travail du sol	Intervention mécanique recommandée sur l'horizon tassé, quelles que soient les cultures
	Horizon plus profond et non travaillé récemment ¹ (sous le labour actuel)	Structure continue massive sous le labour	Tassement profond issu d'un chantier lourd en conditions humides	Décompactage recommandé sous la semelle, en particulier avant cultures sensibles, en conditions bien ressuyées Identifier les causes du tassement pour les prévenir
État continu ou en bloc Alternance de mottes tassées (1/3 à 2/3 du bloc) et de zones plus fragmentaires, ou État majoritairement tassé mais fissuré et/ou avec de nombreuses galeries de vers de terre	Horizon habituellement travaillé	Structure en bloc, dans l'horizon labouré, 50 % de zones tassées	Ancien tassement repris par un labour ou un décompactage	Intervention mécanique recommandée avant cultures sensibles et avec une forte exigence de conformation racinaire
	Horizon plus profond et non travaillé récemment ¹ (sous le labour actuel)	Structure continue massive sous le labour, mais fissurée et perforée	Ancien tassement qui se restructure par le climat et/ou l'activité biologique	État structural à surveiller Pas d'intervention mécanique utile en profondeur
État fragmentaire ou en bloc Peu de zones tassées (moins de 1/3 du bloc) <i>NB : si sol trop meuble et creux > effet négatif sur le système racinaire</i>	Horizon habituellement travaillé	Structure fragmentaire dans l'horizon labouré	Pas ou peu de tassement	Pas d'intervention mécanique, sauf éventuel rappuyage, si le sol est trop meuble juste avant une implantation
	Horizon plus profond et non travaillé récemment ¹ (sous le labour actuel)	Structure en bloc, peu tassée, sous l'horizon labouré	Pas de tassement profond	Pas d'intervention mécanique utile en profondeur

¹ : Horizon entre le travail actuel et le labour ou décompactage le plus profond sur la parcelle