

Décembre 2019
volume n° 9 / numéro 2
www.agronomie.asso.fr

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. BOIFFIN



Évaluer visuellement la structure à l'échelle de l'échantillon : méthode et exemple d'application

Alice Johannes¹ et Pascal Boivin²

¹Agroscope Station fédérale de recherche agronomique, Département d'Agroécologie en Environnement, groupe de qualité et gestion des sols, Reckenholzstrasse 191, 8046 Zürich, Suisse

²HES-SO Haute Ecole spécialisée de Suisse occidentale (hepia), Institut Terre-Nature-Environnement, groupe sols et substrats, 150 route de Presinge, 1254 Jussy, Suisse

alice.johannes@agroscope.admin.ch ; pascal.boivin@hesge.ch

Introduction

En Suisse, la législation sur la protection des sols applique des seuils de diagnostic (valeurs indicatives, d'investigation et de remédiation), uniquement disponibles pour les polluants. Bien que la gravité des atteintes physiques aux sols soit désormais reconnue, les normes portant sur les propriétés physiques des sols sont vagues, difficilement applicables ou inexistantes, alors qu'il existe une forte demande sur le sujet (Alaoui et al., 2011). La principale raison est que la mesure des propriétés physiques est difficile, coûteuse et aléatoire. Une autre difficulté majeure est la détermination de valeurs physiques seuil. A partir de quelle référence indépendante peut-on considérer que la structure d'un sol et donc ses paramètres physiques sont acceptables ? En pratique, la référence la plus simple, la mieux acceptée et la moins coûteuse est l'évaluation visuelle effectuée par un spécialiste. Les limites physiques de référence pour la protection des sols Suisses ont été étudiées dans le projet STRUDEL (Soil sTRucural Degradation evaluation for Environmental Legislation, financé par l'Office Fédéral de l'Environnement), en prenant pour référence la méthode VESS (Ball et al., 2007 ; Guimaraes et al., 2011). La qualité de la structure du sol est notée de 1 à 5 à l'aide de critères principalement associés à la porosité structurale visible à l'œil nu. Autrement dit, les porosités et figures structurales utilisées dans le diagnostic VESS correspondent à des pores de drainage rapide et d'aération.

Pour le développement de valeurs seuil dans un cadre législatif, il est impératif de veiller à un haut degré de précision. Une difficulté importante avec les propriétés physiques des sols est leur variabilité (Gascuel-Oudoux, 1987; Nielsen et al., 1973; Vauclin,

1982) qui dépend à la fois de la technique de mesure, de la dimension de l'objet mesuré (Sisson and Wierenga, 1981), et de l'échantillonnage.

L'évaluation VESS se fait à l'échelle d'un bloc extrait à la bêche, en faisant la moyenne de différents états physiques. Des comparaisons avec des mesures physiques ont été tentées (Guimaraes et al., 2013) mais ces dernières n'adressent pas le même objet : interface ou couche limitante pour l'infiltrométrie, monodimensionnel vertical pour le pénétromètre. La plupart des paramètres physiques sont déterminés au laboratoire sur des échantillons de sol non remaniés prélevés dans des cylindres de 100 à 300 cm³ de volume. Ces incohérences au niveau de l'objet de mesure entravent la comparaison entre les mesures physiques et l'évaluation visuelle. Pour pallier ces difficultés, il a été nécessaire d'adapter l'échelle de l'évaluation visuelle à la taille d'un échantillon et de noter la structure de l'échantillon sur lequel est effectuée la mesure. De plus les mesures physiques ont été faites par analyse du retrait (Boivin et al., 2004 ; Schaeffer et al., 2008, 2013), dont les résultats affichent une variance analytique beaucoup plus faible que les autres mesures physiques (Boivin, 2007). La méthode CoreVESS (Johannes et al., 2017b) a été développée pour ces raisons. Puisque l'observation visuelle de l'échantillon CoreVESS se déroule en laboratoire, il devient également possible de standardiser les conditions d'observations (potentiel matriciel du sol) et de rendre l'observation moins subjective (évaluation d'échantillons anonymes). Ces aspects augmentent la fiabilité de la méthode de laboratoire CoreVESS par rapport à une évaluation sur le terrain.

Dans ce témoignage, nous décrivons la méthode CoreVESS et présentons le résultat des mesures faites sur une série d'échantillons prélevés lors de différentes études. Nous montrons que l'évaluation visuelle est fortement corrélée aux propriétés physico-chimiques du sol et nous décrivons comment il est possible d'utiliser les évaluations visuelles pour définir des valeurs seuils de qualité physique ou des valeurs cibles de gestion de matière organique.

Méthode CoreVESS

Prélèvement d'échantillons non remaniés

La première étape de mise en œuvre consiste à récolter des échantillons non remaniés. Il peut s'agir de mottes. Dans ce cas, il faut prendre garde au fait que les mottes apparentes ne sont pas toujours représentatives de l'état structural moyen. Le plus souvent on prélèvera des échantillons de sol non remaniés. Mais ces derniers doivent être en parfait état, et doivent être faciles à extraire du cylindre de prélèvement, pour examen de la structure après équilibrage à un potentiel matriciel standard. Or ceci n'est en général pas possible avec les cylindres en acier. C'est pourquoi un préleveur spécial a été mis au point (P. Zante et P. Boivin – non publié) qui permet de libérer l'échantillon au laboratoire avant sa ré-humectation. La plupart des échantillons ont une cohésion suffisante, mais cette manipulation nécessite une grande précaution dans le cas d'échantillons instables. Un échantillon libre est indispensable, car équilibrer l'échantillon à un potentiel standard dans le cylindre reviendrait à le contraindre sous la

pression de gonflement, ce qui se ferait au dépend de la porosité structurale. En outre avec ce préleveur les échantillons n'ont pas besoin d'être recoupés, car le volume est mesuré au laboratoire (ci-dessous) dans de meilleures conditions que par arasement sur le terrain.

Équilibrage à un potentiel matriciel de -100 hPa

Le but de cette opération, qui se réalise sur une table à succion (sandbox), est de porter tous les échantillons à un potentiel matriciel homogène, ceci afin de limiter l'impact de l'hétérogénéité de l'état d'humectation sur le diagnostic visuel (difficulté à rompre les structures en particulier). La teneur en eau aux faibles potentiels est fortement corrélée à la teneur en carbone organique du sol (Goutal-Pousse et al., 2016) et c'est à -100 hPa que la meilleure corrélation est observée (Johannes et al., 2019). C'est par ailleurs un potentiel communément utilisé pour évaluer l'humidité à la capacité au champ. Dans ce qui suit, les échantillons libres de contrainte ont d'abord été portés à -10 hPa puis équilibrés à -100 hPa sur une table à succion.

Evaluation CoreVESS

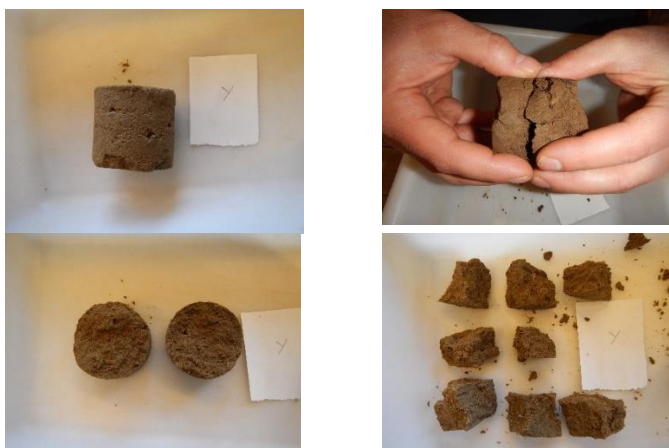


Figure 1. Ouverture et fragmentation manuelle d'un échantillon non remanié, pour notation CoreVESS

Après équilibrage, l'échantillon est ouvert pour pouvoir observer la structure (Figure 1). La notation de la qualité de la structure se fait, comme pour le VESS, à l'aide d'une charte illustrée qui décrit des notes de 1 à 5 (1 étant la meilleure note et 5 la moins bonne). Avant d'attribuer une note générale, trois observations sont faites de façon systématique : (i) la difficulté à rompre, (ii) la porosité visible à l'œil nu et (iii) la forme des agrégats. Outre l'intérêt de pouvoir noter l'échantillon ayant fait l'objet de mesures physiques, ou de s'affranchir des problèmes d'états d'humidité différents, les échantillons peuvent être évalués anonymement. Attribuer la note indépendamment de la provenance de l'échantillon permet de se soustraire à la critique principale adressée aux méthodes d'évaluation visuelles, la subjectivité.

Propriétés analytiques des échantillons

Les notes de qualité structurale des échantillons ont été comparées aux caractéristiques de ces mêmes échantillons prélevés lors de différentes expérimentations, notamment rapportées dans (Johannes et al., 2017b, 2019). Dans ce qui suit, les données analytiques ont bien été obtenues, préalablement à l'observation CoreVESS sur les mêmes échantillons et non sur de la terre prélevée simultanément. Compte tenu de la sensibilité des mesures physiques effectuées en analyse du retrait et de l'influence du carbone organique sur ces propriétés, cette disposition est importante pour éviter une perte d'information due aux micro-variations locales.

Le carbone organique total (TOC) a été analysé par oxydation au dichromate selon Walkley and Black (1934). La teneur en argile a été déterminée par granulométrie en 5 fractions en sédimentation avec la méthode de la pipette. L'indice de vulnérabilité de la structure a été calculé comme le rapport TOC sur argile (Fell et al., 2018 ; Johannes et al., 2017a).

Les propriétés physiques présentées ici sont issues de l'analyse de la courbe de retrait d'échantillons de sol non remaniés, technique dont la capacité à établir un diagnostic d'atteinte physique à l'échelle du cylindre de sol non remanié a été largement établie (Boivin et al., 2006; Goutal-Pousse et al., 2016; Schäffer et al., 2013, 2008). Le volume spécifique ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$) des échantillons a été mesuré à la poche plastique sous vide selon Boivin et al. (1990). Cette méthode permet de mesurer de façon non destructive le volume quelle que soit la forme des échantillons. Elle permet donc de mesurer le volume apparent de mottes, ou de cylindres de sol non recoupés, ce qui est un net avantage en présence d'éléments grossiers. Le volume apparent et la masse sèche de terre fine tamisée à 2 mm permettent de déterminer la densité apparente. La densité apparente à -100 hPa est la densité apparente pour le volume mesuré à ce potentiel V_{-100} et est notée D_{-100} . De même la teneur en eau gravimétrique à -100 hPa, déterminée par pesée, est notée W_{-100} . Le volume des solides (V_{solide}) est estimé à $0,377 \text{cm}^3 \text{g}^{-1}$. La teneur en air pondérale ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$) à -100 hPa (A_{-100}) a été calculée comme suit :

$$A_{-100} = V_{-100} - W_{-100} - V_{\text{solide}}$$

Comparaison entre CoreVESS et propriétés analytiques des échantillons et exemples d'utilisation

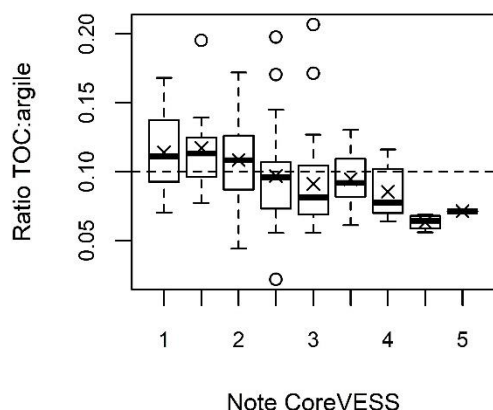


Figure 2 : Relation entre le ratio carbone organique total (TOC) sur teneur en argile et les différentes notes CoreVESS. Les valeurs moyennes sont représentées par une croix, les valeurs médianes par un trait épais, les 50^e percentiles par les limites des boîtes et les valeurs minimums et maximums par les traits. La ligne traitillée indique un ratio TOC:argile de 0.10, considéré comme un seuil de vulnérabilité pour la structure du sol. Les ronds représentent les données aberrantes.

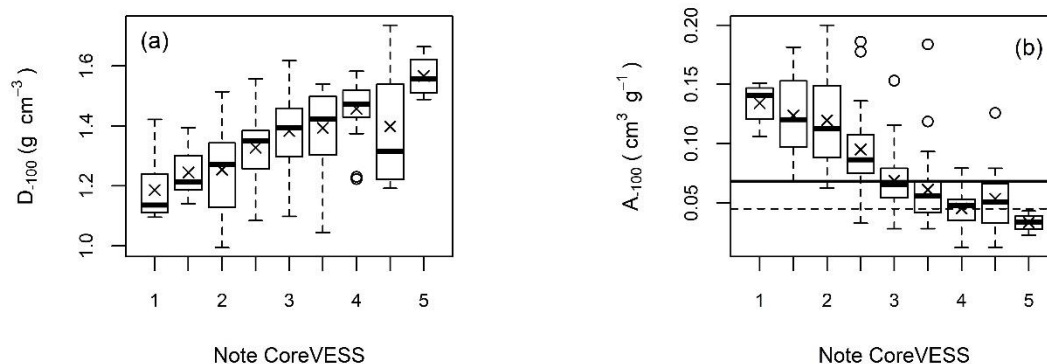


Figure 3 : Relation entre la densité apparente à -100 hPa (D_{-100}) (a) ou la teneur en air gravimétrique à -100 hPa (A_{-100}) (b) et les notes CoreVESS. Les valeurs moyennes sont représentées par une croix, les valeurs médianes par un trait épais, les 50^e percentiles par les limites des boîtes et les valeurs minimums et maximums par les traits. Les ronds représentent les données aberrantes. La ligne épaisse de la figure 3b indique la limite de $0.068 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$, proposée comme limite acceptable (valeur indicative) de la qualité structurale et la ligne traitillée comme seuil à partir duquel des mesures de remédiation immédiates sont impératives.

La relation entre D_{-100} , A_{-100} et la note CoreVESS pour un lot de 209 échantillons provenant également de terres assolées sur Cambi-Luvisol du plateau Suisse est présentée à la Figure 3. Les propriétés physiques et les notes CoreVESS peuvent présenter des relations linéaires ou en « bâton-brisé » (Johannes et al., 2017b). Dans la Figure 3a, la densité apparente augmente linéairement avec la note (Figure 3a), et on peut voir que cette augmentation de densité apparente se fait au détriment de la teneur en air A_{-100} , c'est-à-dire des pores structuraux de rayon équivalent supérieur à $15 \mu\text{m}$. Cette observa-

La Figure 2 présente la relation entre le CoreVESS et le rapport TOC:Argile pour 16

2 échantillons prélevés dans des terres assolées sur Cambi-Luvisol (Food and Agriculture Organization, 2014) du plateau Suisse. La qualité structurale moyenne chute avec le rapport TOC:Argile, passant sous le seuil de qualité acceptable (score 3) pour un rapport de 10%. Les échantillons non remaniés ont été prélevés à une profondeur comprise entre 5 et 10 cm, en toute saison et à n'importe quel stade de la rotation. Dans cette mesure, la qualité structurale moyenne observée reflète la vulnérabilité de la structure aux opérations culturales, définie comme la combinaison de sa résistance et de sa résilience (Kay, 1998 ; Seybold et al., 1999). En d'autres termes la vulnérabilité de la structure augmente avec la diminution du rapport TOC:argile. Ces résultats, basés sur des évaluations visuelles, ont permis de proposer des valeurs de référence pour la gestion de la matière organique (Johannes et al., 2017a). Les qualités structurales moyennes de <2, =3 et >4 évaluées avec CoreVESS correspondent à des ratio TOC :argile de 0.12, 0.10 et 0.08 respectivement et définissent les seuils de vulnérabilité. En dessous d'un ratio TOC :argile de 0.1, le sol est considéré très vulnérable à la dégradation structurale. Pour parler en termes de valeur cible, un sol avec 20% d'argile devrait avoir un taux de carbone organique de 2.0 %, soit un taux de 3.4 % de matière organique.

tion est cohérente puisque la note est en grande partie attribuée à partir de l'observation de la porosité structurale. Des relations fortes ont également été mises en évidence entre la note CoreVESS et la porosité structurale (Johannes et al., 2017b). Johannes et al. (2019) ont montré que parmi une large gamme de paramètres physiques, la porosité structurale (déterminée par analyse du retrait) et A_{-100} (qui reflète une large part de la porosité structurale) permettent de réaliser la meilleure classification des différentes qualités structurales évaluées avec CoreVESS. Dans la méthode VESS, les notes infé-

rieures à 3 décrivent des structures en bon état, des notes supérieures à 3 décrivent des structures en mauvais état et la note de 3 est la limite entre une bonne et une mauvaise structure (Ball *et al.*, 2007, 2017). Nous avons utilisé ce schéma de classification pour déterminer les valeurs seuils de qualité physique. En l'occurrence, la valeur seuil « indicative » développée dans le projet STRUDEL repose sur la valeur moyenne du paramètre A_{-100} de tous les échantillons ayant obtenu la note de 3, soit $0.068 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$. La valeur seuil de « remédiation » repose sur la valeur moyenne d' A_{-100} de tous les échantillons ayant obtenu une note de 4, soit $0.045 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$. Ces valeurs seuils sont reportées en Figure 3b. Le taux de classement correct des échantillons avec bonne ou mauvaise structure est de l'ordre de 90% pour la valeur indicative de $0.068 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ et cette valeur devrait être retenue pour la prochaine révision de l'ordonnance Suisse sur la protection des sols.

Discussion

Une bonne relation entre note CoreVESS, volume apparent, teneur en air (sur la gamme -10 hPa -100 hPa), porosité structurale et de nombreuses autres propriétés physiques (Johannes *et al.*, 2017b) a été trouvée. Cette observation est cohérente avec les critères d'attribution de la note. On sait que la compaction se produit d'abord au détriment des pores grossiers (e.g. Alaoui *et al.*, 2011; Bottinelli *et al.*, 2014; Nawaz *et al.*, 2013; Schäffer *et al.*, 2013, 2008) soit des pores structuraux bien visibles à l'œil nu. La dégradation structurale entraîne également une disparition des pores fins, tandis que la régénération notamment par l'activité biologique restitue une large gamme de pores structuraux, en particulier dans la gamme 15-150 μm de rayon de pore équivalent, soit à l'équilibre avec des potentiels de -10 à -100 hPa (Fell *et al.*, 2018; Kohler-Milleret *et al.*, 2013; Kravchenko *et al.*, 2019; Milleret *et al.*, 2009). Ces pores ne sont pas tous visibles à l'œil nu mais sont manifestement très impliqués dans la qualité structurale.

Cette relation entre des facteurs essentiels de la fertilité physique (aération, distribution de l'eau, réserve en eau) et la note CoreVESS ouvre des perspectives intéressantes en termes de diagnostic de la qualité structurale. Ceci a permis de proposer des valeurs seuils et des indicateurs de qualité structurale reposant sur des mesures physiques. Il devient possible dès lors d'identifier les volumes impactés ou dégradés visuellement, puis de réaliser un échantillonnage dirigé pour leur affecter des valeurs physiques, afin de dépasser les limitations inhérentes aux protocoles de caractérisation physique (coût, difficulté et variabilité). Ceci ouvre la voie à l'application de valeurs physiques dans le diagnostic et la régulation des atteintes aux sols, comme actuellement discuté dans le cadre de la révision des ordonnances sur la protection de l'environnement dans la loi Suisse.

Références

Alaoui, A., Lipiec, J., Gerke, H.H., 2011. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective. *Soil Tillage Res.* 115–116, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.06.002>

Ball, B.C., Batey, T., Munkholm, L.J., 2007. Field assessment of soil structural quality – a development of the Peerlkamp test. *Soil Use Manag.* 23, 329–337.

Ball, B.C., Guimarães, R.M.L., Cloy, J.M., Hargreaves, P.R., Shepherd, T.G., McKenzie, B.M., 2017. Visual soil evaluation: A summary of some applications and potential developments for agriculture. *Soil Tillage Res., Visual soil evaluation and soil compaction research* 173, 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.07.006>

Boivin, P., 2007. Anisotropy, cracking, and shrinkage of vertisol samples. *Experimental study and shrinkage modeling. Geoderma* 138, 25–38.

Boivin, P., Brunet, D., Gascuel-Oudou, C., 1990. Densité apparente d'échantillon de sol : méthode de la poche plastique (in french). *Milieux Poreux Transf. Hydr. Bull GFHN* 28, 59–71.

Boivin, P., Garnier, P., Tessier, D., 2004. Relationship between clay content, clay type and shrinkage properties of soil samples. *Soil Science Society of America Journal* 68, 1145–1153.

Boivin, P., Schaeffer, B., Temgoua, E., Gratier, M., Steinman, G., 2006. Assessment of soil compaction using shrinkage curve measurement and modeling. *Experimental data and perspectives. Soil Tillage Res.* 88, 65–79.

Bottinelli, N., Hallaire, V., Goutal, N., Bonnaud, P., Ranger, J., 2014. Impact of heavy traffic on soil macroporosity of two silty forest soils: Initial effect and short-term recovery. *Geoderma* 217–218, 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.10.025>

Brewer, R., 1964. *Fabric and Mineral Analysis of Soils*. John Wiley and Sons, New York.

Fell, V., Matter, A., Keller, T., Boivin, P., 2018. Patterns and Factors of Soil Structure Recovery as Revealed From a Tillage and Cover-Crop Experiment in a Compacted Orchard. *Front. Environ. Sci.* 6. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00134>

Food and Agriculture Organization, 2014. World reference base for soil resources 2014 international soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. FAO, Rome.

Gascuel-Oudou, C., 1987. Variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol, cas d'une seule variable: revue bibliographique. *Agron.* 7 1 61-71.

Goutal-Pousse, N., Lamy, F., Ranger, J., Boivin, P., 2016. Structural damage and recovery determined by the colloidal constituents in two forest soils compacted by heavy traffic. *Eur. J. Soil Sci.* 67, 160–172. <https://doi.org/10.1111/ejss.12323>

Guimarães, R.M.L., Ball, B.C., Tormena, C.A., 2011. Improvements in the visual evaluation of soil structure. *Soil Use Manag.* 27, 395-403. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00354.x>

Guimarães, R.M.L., Ball, B.C., Tormena, C.A., Giarola, N.F.B., da Silva, Á.P., 2013. Relating visual evaluation of soil structure to other physical properties in soils of contrasting texture and management. *Soil Tillage Res.* 127, 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.01.020>

Johannes, A., Matter, A., Schulin, R., Weiskopf, P., Baveye, P.C., Boivin, P., 2017a. Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? *Geoderma* 302, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.021>

Johannes, A., Weiskopf, P., Schulin, R., Boivin, P., 2019. Soil structure quality indicators and their limit values. *Ecol. Indic.* 104, 686–694. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.05.040>

Johannes, A., Weiskopf, P., Schulin, R., Boivin, P., 2017b. To what extent do physical measurements match with visual evaluation of soil structure? *Soil Tillage Res.* 173, 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.06.001>

Kay, B.D., 1998. Soil structure and organic carbon : a review., in: R. Lal, J.M.K. (Ed.), *Soil Processes and the Carbon Cycle*, *Advances in Soil Science*. Boca Raton, Fla. CRC Press, pp. 169–197.

Kohler-Milleret, R., Bayon, R.-C.L., Chenu, C., Gobat, J.-M., Boivin, P., 2013. Impact of two root systems, earthworms and mycorrhizae on the physical properties of an unstable silt loam Luvisol and plant production. *Plant Soil* 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1621-4>

Kravchenko, A.N., Guber, A.K., Razavi, B.S., Koestel, J., Quigley, M.Y., Robertson, G.P., Kuzyakov, Y., 2019. Microbial spatial footprint as a driver of soil carbon stabilization. *Nat. Commun.* 10, 3121. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11057-4>

Milleret, R., Le Bayon, C., Lamy, F., Gobat, J.M., Boivin, P., 2009. Impact of root, mycorrhiza and earthworm on soil physical properties as assessed by shrinkage analysis. *J. Hydrol.* 373, 499–507.

Nawaz, M.F., Bourrié, G., Trolard, F., 2013. Soil compaction impact and modelling. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 33, 291–309. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>

Nielsen, D.R., Biggar, J.W., Erb, K.T., 1973. Spatial variability of field-measured soil water properties. *Hilgardia Vol42* 215-259.

Schäffer, B., Schulin, R., Boivin, P., 2013. Shrinkage Properties of Repacked Soil at Different States of Uniaxial Compression. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 77, 1930–1943. <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.01.0035>

Schäffer, B., Schulin, R., Boivin, P., 2008. Changes in shrinkage of restored soil caused by compaction beneath heavy agricultural machinery. *Eur. J. Soil Sci.* 59, 771–783.

Seybold, C.A., Herrick, J.E., Brejda, J.J., 1999. Soil resilience: a fundamental component of soil quality. *Soil Sci.* 164, 224.

Sisson, J.B., Wierenga, P.J., 1981. Spatial Variability of Steady-State Infiltration Rates as a Stochastic Process. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45, 699–704.

Vauclin, M., 1982. Méthodes d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol. *Colloq. SHF-INRA Avignon Juin 1982* Pp 9-45.

Walkley, A., Black, I.A., 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37,

29–38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>