

Valeur de référence pour l'humus des terres assolées

Etablissement d'une valeur de référence applicable à la teneur en matière organique des sols minéraux agricoles

La présente brochure s'adresse aux organes exécutifs de protection des sols et aux professionnels avertis. Elle présente les possibilités d'établir une valeur de référence applicable à la teneur en matière organique des sols minéraux agricoles. Elle intègre la réglementation suisse ainsi que les acquis et les avis d'un atelier réunissant des acteurs de l'agriculture, de la protection de l'environnement et de l'exécution cantonale, qui s'est tenu le 16 novembre 2017.

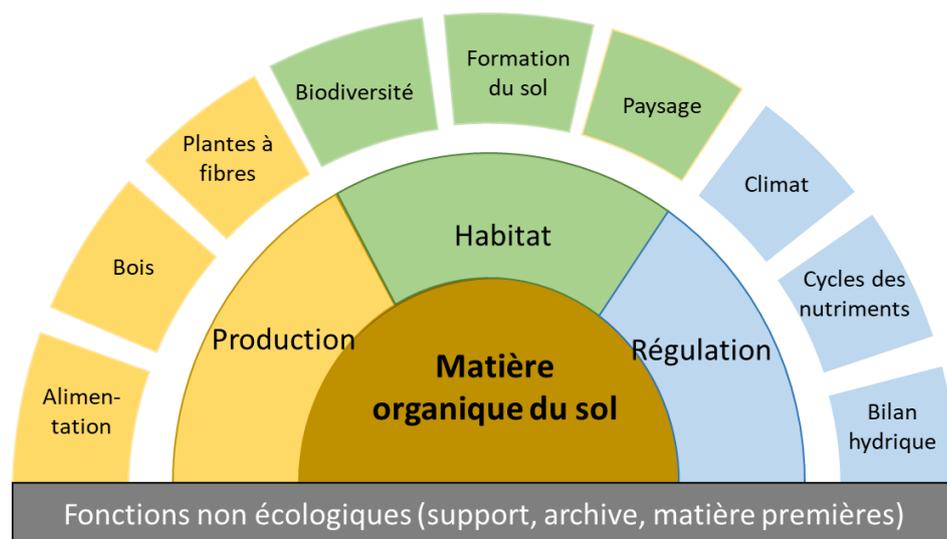


Fig. 1 : La matière organique du sol influence toutes les fonctions écologiques du sol : la **production** des plantes alimentaires, du bois et des fibres, la **régulation** incluant l'adaptation au changement climatique et son atténuation, les cycles de nutriments et l'importance pour le régime hydrique en tant que réservoir et filtre, ainsi que la fonction d'habitat et de base pour la diversité biologique.

I. La matière organique

L'humus est un composant essentiel du sol, indispensable aux nombreuses fonctions du sol. Ici, le terme humus est synonyme de matière organique du sol (MOS). Il inclut les différents composés organiques du sol, à leurs différents stades de développement ou de dégradation, et comprend également les organismes vivants. L'humus contient de 55 % à 60 % de carbone (C) et il est généralement mesuré en carbone organique (C_{org}). Le facteur de 1,725 permet une conversion approximative en humus.

I.1 Les fonctions du sol

L'humus est une réserve de nutriments du sol et contribue à la stabilisation de sa structure et de sa porosité ainsi qu'à son régime hydrique (Fig. 1). Il sert de source de nourriture aux organismes du sol et leur fournit un habitat dans les micro-niches des complexes organo-minéraux. À l'inverse, les organismes du sol dégradent la matière organique et forment de l'humus. La production agricole et forestière dépend des nombreux processus qui sont favorisés par l'humus. En combinaison avec la photosynthèse des

plantes et la minéralisation par les organismes du sol, l'humus est à la fois un puits et une source de CO_2 et joue donc un rôle important dans le changement climatique.

Tab. 1: Répartition mondiale du carbone (Lal, 2008)

Sphère	Réservoir de C (10^9 tonnes, Gt)
Atmosphère	780
Hydrosphère	38 000
Biosphère	600
Sol	
C_{org}	1550
C_{inorg}	950

Avec 2500 milliards de tonnes, environ 0,005 % des réserves mondiales de C sont liées au sol, soit plus que dans l'atmosphère et la biosphère réunies (Tab. 1). Or les terres assolées ont perdu entre 50 % et 66 % d'humus avec leur mise en culture, ce qui équivaut à peu près à la différence entre les teneurs des forêts et des prairies par rapport aux terres assolées (Guo and Gifford, 2002; Lal, 2004; Kolbe, 2015). Cette perte correspond à 42 à 78 gigatonnes de carbone qui ont été libérées dans l'atmosphère par la mise en culture et

l'érosion. Quant à savoir si le niveau historique peut être de nouveau atteint en améliorant l'exploitation des sols reste un sujet controversé (Lal, 2004; Leifeld *et al.*, 2005).

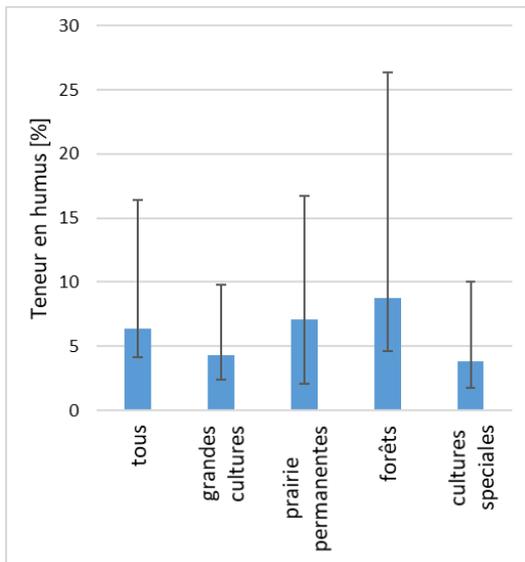


Fig. 2 : Teneur en humus des sols (0-20 cm) sur les sites NABO par catégorie d'utilisation des terres (Gubler *et al.*, 2015)

Dans le réseau de surveillance NABO en Suisse (Fig. 2), les terres assolées affichent environ 50 % de moins d'humus que les prairies permanentes et 62 % de moins que les sols forestiers (Hagedorn *et al.*, 2018). Leifeld *et al.* (2005) ont calculé des stocks de C de 40 et 50 tonnes par hectare respectivement pour les terres assolées et les prairies. Ils estiment que 17 % des stocks de C du sol ont été perdus avec le drainage et la mise en culture des marais, l'urbanisation et la déforestation.

L'utilisation intensive du sol entraîne des pertes d'humus. Les terres assolées présentent donc des teneurs assez faibles qui ne peuvent pas être utilisées pour déterminer une teneur optimale. Cette dernière doit être obtenue à partir de sites de référence naturels ou exploités de manière optimale. Mais la question qui se pose est la suivante : à partir de quelle teneur en humus les fonctions essentielles du sol sont-elles altérées et en-deçà de quelle teneur en humus les autorités devraient-elles pouvoir intervenir ?

1.2 Dynamique de l'humus

La teneur en humus d'un sol dépend principalement du site (type de sol, climat) et de la production pri-

maire des plantes. Les agriculteurs peuvent augmenter les teneurs en l'humus grâce à des mesures d'exploitation telles que la rotation des cultures, l'utilisation d'engrais organiques, et l'abandon ou la limitation du travail du sol (Fig. 3). La dynamique de l'humus est déterminée par l'apport de biomasse végétale morte et d'engrais organiques et leur dégradation par les animaux et les microorganismes du sol. Le processus de dégradation, c'est-à-dire la réaction chimique inverse à la photosynthèse, est la base de la vie des organismes hétérotrophes du sol, qui utilisent l'énergie contenue dans les résidus de récolte pour leur croissance (production secondaire) en libérant du CO₂ (respiration) et les minéraux qu'il contient (minéralisation). Les organismes vivants constituent un réservoir instable, qui est également le moteur de la dynamique de la dégradation de la matière organique. Seule une proportion de 1 à 3 % du carbone organique des sols est du carbone microbien, soit entre 5 et 30 tonnes de biomasse microbienne par hectare (Blume *et al.*, 2010; Ehlers, 2015). Les organismes vivant dans le sol n'ont pas seulement pour fonction de décomposer les résidus organiques, mais ils forment aussi des symbioses très étendues avec les plantes et colonisent leurs racines, les protégeant ainsi d'autres organismes éventuellement nuisibles.

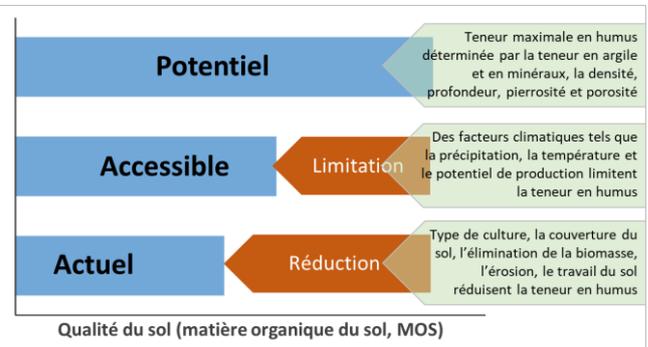


Fig. 3 : Facteurs influençant la teneur en humus (selon Ingram and Fernandes (2001))

Le travail du sol brise les agrégats dans lesquels l'humus est protégé et accélère sa minéralisation par les micro-organismes. Le manque de végétation réduit la quantité d'assimilats issus de la photosynthèse qui atteignent le sol. Le fait que les sols restent nus pendant une période de l'année dans les cultures annuelles explique que les terres assolées contiennent moins d'humus que les prairies.

2. Rôle de l'humus dans les fonctions du sol et les services écosystémiques

Le rôle global de l'humus dans les fonctions du sol détermine son importance pour les services écosystémiques du sol. Les concepts de qualité des sols citent un grand nombre d'indicateurs dans le monde entier :

la matière organique du sol occupe une position centrale (Fig. 4).

De nombreuses approches visant à rendre les systèmes de culture plus durables tendent à augmenter la valeur de référence humus pour terres assolées - 2

la teneur en humus des sols. L'agriculture de conservation et l'agriculture biologique ont mis en place des trains de mesures individuelles, ayant une influence positive sur la teneur en humus et les fonctions du sol associées (Fließbach et al., 2007; Gattinger et al., 2012; Cooper et al., 2016; Bai et al., 2018). Ces mesures n'ont pas encore permis d'atteindre le niveau des services fournis par les écosystèmes naturels, car elles ne vont apparemment pas assez loin. Néanmoins, selon la texture du sol (répartition de la taille des grains) et selon le climat (température, précipitations), la gestion des sols permet d'obtenir une certaine augmentation de la quantité d'humus. Au-delà des avantages purement agronomiques, une augmentation des stocks de C de quelques dixièmes de point de pourcentage est un objectif majeur pour la protection du climat (voir www.4p1000.org). Une croissance annuelle de seulement 0,4 % des stocks d'humus dans le monde permettrait de compenser la hausse des émissions de CO₂ dues aux activités humaines. Une agriculture qui augmente la quantité d'humus a donc non seulement des effets positifs aux niveaux local et régional, mais elle est également efficace au plan mondial où elle peut contribuer à atteindre les objectifs de protection du climat.

La société a tout intérêt à utiliser les sols sans altérer leurs fonctions. La plupart des fonctions du sol et la

productivité des cultures sont influencées par l'humus. Ainsi, les usagers des sols et la population ont pour intérêt commun évident d'assurer le potentiel des sols pour l'avenir.

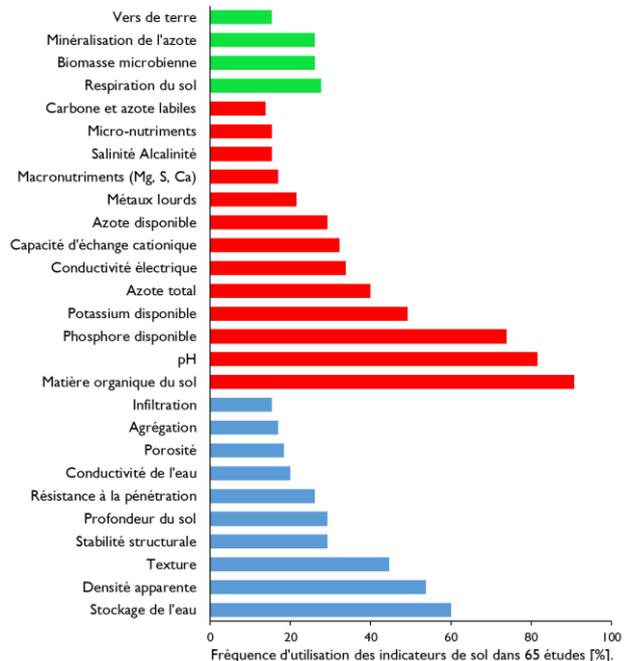


Fig. 4 : Fréquence d'utilisation des indicateurs pour évaluer la qualité des sols (Bünemann et al., 2018)

3. Réglementations en vigueur pour les sols

En Suisse, la protection des sols est régie dans la législation environnementale (LPE et OSol). Par ailleurs, l'ordonnance sur les paiements directs de la loi sur l'agriculture vise à inciter les agriculteurs à produire de manière durable.

3.1 Ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol)

Le sol est considéré comme fertile :

- s'il présente, pour sa station, une biocénose biologiquement active, une structure, une succession et une épaisseur typiques et qu'il dispose d'une capacité de décomposition intacte;
- s'il permet aux plantes et aux associations végétales naturelles ou cultivées de croître et de se développer normalement et ne nuit pas à leurs propriétés;
- si les fourrages et les denrées végétales qu'il fournit sont de bonne qualité et ne menacent pas la santé de l'homme et des animaux;
- si son ingestion ou inhalation ne menace pas la santé de l'homme et des animaux.

L'ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol, 1998) définit ce qu'est un sol fertile. Elle fixe aussi des valeurs indicatives, des seuils d'investigation et des

seuils d'assainissement pour les métaux lourds potentiellement toxiques et les polluants organiques. Cette ordonnance ne contient actuellement aucune indication sur la teneur en humus typique d'un site ni sur une valeur seuil en deçà de laquelle la fonctionnalité du sol est compromise.

3.2 Prestations écologiques requises et ordonnance sur les paiements directs

La réglementation des prestations écologiques requises (PER) prévoit l'obligation de soumettre le sol des champs à un bilan de fumure tous les dix ans pour déterminer le pH, le phosphore (P) et le potassium (K) ainsi que la teneur en humus. Dans les cultures spéciales (légumes), le bilan est pratiqué parfois à des intervalles plus courts, mais le plus souvent uniquement pour la teneur en éléments nutritifs. Alors que le pH, le P et le K sont mesurés par analyse, l'humus, pour le moment, fait l'objet d'un « test tactile ». Il s'agit d'une méthode d'estimation qui ne fournit pas de données assez précises pour détecter l'effet des

changements de pratiques agricoles. En outre, les valeurs mesurées ne sont géoréférencées que dans un petit nombre de cantons. L'office fédéral compétent reçoit les données de tous les cantons, triées par code postal de l'exploitation, mais sans les coordonnées exactes du champ. En comparaison internationale, l'obligation faite aux agriculteurs d'analyser régulièrement les sols est une réglementation exemplaire. Cependant, il est paradoxal que ces analyses ne soient pas évaluées pour des raisons de confidentialité. Ces données ont un potentiel très élevé en matière réglementaire comme scientifique et elles devraient donc être évaluées, par exemple, pour contrôler les effets des mesures PER. Les contribuables attendent une valeur ajoutée écologique par le biais des paiements directs aux agriculteurs et peuvent ainsi en déduire un droit de connaître les résultats.

3.3 Valeurs de référence humus et concepts de qualité des sols dans d'autres pays

Il n'existe aujourd'hui aucune base juridique en Suisse, en Europe ou dans le monde qui fixe une teneur cible d'humus dans le sol. Cela est dû au fait que la variabilité des teneurs dans un champ est trop grande et la dépendance au site trop importante. Toutefois, certaines approches sont déjà appliquées pour évaluer les sols et définir les teneurs en humus typiques des sites. Ces approches suivent les trois axes suivants.

Distribution normale : de nombreux concepts utilisent la distribution des valeurs mesurées et en déduisent des valeurs attendues par calcul stochastique. Ce procédé permet d'évaluer ensuite si le sol en question se situe dans une plage de variabilité prédéfinie. Cependant, la gestion précédente du sol a déjà modifié la teneur en humus. Par conséquent, la valeur la plus fréquente ou moyenne d'une population de sols n'est pas en soi la valeur optimale ou la valeur cible. Wesolek *et al.* (2008) concluent que la grande hétérogénéité géo-climatique des sols ne permet pas d'établir une teneur en humus idéale. Dans une étude portant sur un grand nombre de sites et d'échantillons en Bavière, Capriel (2010) a montré que la teneur en humus

dépend des paramètres des sites (teneur en argile, précipitations) et de l'utilisation des terres. Il conclut que le travail du sol a peu d'influence, bien que l'introduction de la fertilisation organique (Gattinger *et al.*, 2012), le travail réduit du sol (Cooper *et al.*, 2016) et la rotation des cultures (Bai *et al.*, 2018) aient un effet positif sur la teneur en humus. La détermination des valeurs attendues est un concept éprouvé pour la détection des valeurs aberrantes ou des valeurs extrêmes (Vollzug Bodenbiologie, 2009). Le programme le plus complet d'évaluation de la qualité des sols est probablement le « Comprehensive Assessment of Soil Health » (CASH), qui repose désormais sur une base de données de plus de 10 000 évaluations de sols et de 60 % des terres assolées aux États-Unis (Moebius-Clune, 2016). Un modèle d'évaluation similaire avec une approche normative (Sindi) a été développé en Nouvelle-Zélande (Lilburne *et al.*, 2004).

Site de référence : comme la teneur initiale en humus des terres assolées est inconnue et que ses propriétés peuvent être altérées par des influences naturelles ou anthropiques, des comparaisons et des références à d'autres sites sont nécessaires. Pour les terres assolées, les forêts et les landes, il peut être nécessaire de déterminer des valeurs de référence distinctes qui soient comparables sur les plans géologique et climatique. Les experts évaluent si un tel site a été bien exploité et s'il reflète une valeur idéale. Le critère d'évaluation est la mesure dans laquelle un sol a atteint l'objectif fixé par le site de référence. Le profil d'écosystème introduit aux Pays-Bas par Rutgers *et al.* (2008) est basé sur la comparaison avec des sites de référence qui ont été évalués comme étant qualitativement bons par un consortium d'experts et par un grand nombre d'analyses.

Fonctionnalité : les trois fonctions biologiques du sol (Fig. 1) sont le fil directeur des attentes liées à ce concept, qui n'a d'ailleurs pas encore été mis en place puisque les fonctions du sol ne peuvent pas être mesurées complètement. Au point 5.2., nous décrivons un concept récemment publié qui se rapproche beaucoup de cette idée.

4. Mesure de la teneur en humus

La mesure de la teneur en humus consiste à sélectionner la zone représentative du champ, puis à préparer l'échantillon de sol pour ensuite analyser l'échantillon homogénéisé. La teneur en humus sera correctement déterminée si elle se fonde sur un échantillonnage

standardisé. La mesure doit tenir compte de l'hétérogénéité du terrain et de la stratification verticale du sol. Il peut être nécessaire de prélever plusieurs échantillons de sol si le champ semble trop inhomogène.

4.1 Échantillonnage

La **variabilité spatiale** d'un champ est liée à la géologie du site, à sa topographie, qui reflète l'histoire de l'érosion et des dépôts, à l'exploitation passée et présente des terres et aux éléments de paysage associés (p. ex. cours et plans d'eau, eaux souterraines, haies et bosquets, chemins), dont certains sont difficiles à identifier. Les éléments homogènes d'une parcelle sont généralement connus de l'exploitant ; il s'agit de zones avec le même débit d'eau et la même dynamique de croissance avec des rendements similaires. Souvent, les bordures de champs sont compactées en bout de ligne, les sommets des collines sont érodés, les matériaux érodés s'accumulent au pied de la pente ou dans les creux.

La **dynamique temporelle** de l'accumulation et de la décomposition de la biomasse et de son apport dans le sol doit également être prise en compte. Le début du printemps est souvent recommandé pour le suivi des sols car c'est le moment où il n'y a plus de perturbations depuis plusieurs mois et pas encore les interventions culturales lors de la reprise de la végétation. En agriculture, l'échantillonnage est réalisé après la récolte pour évaluer la situation nutritionnelle de la culture suivante.

De nombreuses études concluent que des **intervalles** de dix ans sont suffisants pour mesurer les changements de teneur en humus après un changement d'exploitation (Post and Kwon, 2000; Post *et al.*, 2001; Saby *et al.*, 2008; Capriel, 2010).

La **couche de sol** dans laquelle l'échantillon est prélevé est généralement fonction de la profondeur de travail du sol des terres assolées. En Suisse, une profondeur de 0 à 20 cm est recommandée pour les terres assolées et de 0 à 10 cm pour les sols de prairie (mesurée à partir de la surface du sol). Les sites naturels sont également caractérisés horizontalement. Pour une surveillance standardisée, le concept d'échantillonnage défini au départ (nombre de placettes, profondeur, période de l'année) doit rester le même.

L'échantillonnage selon les **PER** consiste à former un échantillon composite avec au moins 20 piqûres verticales réparties uniformément sur la surface du champ ou de la sous-parcelle homogène. Ce type d'échantillonnage représente bien la surface totale du champ (Deluz, 2017). La dynamique temporelle est mieux représentée par l'échantillonnage selon le **NABO**. Il consiste à prélever trois échantillons composites tous les cinq ans dans une sous-parcelle de 10 × 10 m, composés de 25 piqûres de 0 à 20 cm de profondeur (Gubler *et al.*, 2015; Hug *et al.*, 2018).

Capriel (2010) recommande de définir au moins trois sous-parcelles de 10 m² par champ et de prélever un échantillon composite sur chacune. Son étude sur la teneur en humus spécifique à un site analyse séparément six piqûres dans ces sous-parcelles. Les teneurs en humus peuvent ainsi être regroupées en fonction de la texture du sol et de l'altitude (Tab. 2) (Capriel, 2010; Wiesmeier, 2017). L'importance de la teneur en argile et du microclimat pour la teneur en humus devient alors évidente. Hassink (1997) a pu démontrer que la fraction de l'humus liée à l'argile (< 20 µm) est mieux protégée contre la dégradation microbienne.

Tab. 2: Fourchettes des teneurs en humus (C_{org} , N_{total}) en fonction de la texture du sol et de l'altitude.

Type de sol	Altitude [m]	C_{org} [%]	N_{total} [%]
Léger	< 350	0,7 - 1,4	0,06 - 0,12
	350-550	0,8 - 1,6	0,07 - 0,14
Moyen	< 350	1,0 - 1,5	0,09 - 0,15
	350-550	1,1 - 2,1	0,11 - 0,19
	> 550	1,5 - 2,6	0,15 - 0,24
Lourd	< 350	1,2 - 2,1	0,12 - 0,22
	350-550	1,3 - 2,6	0,13 - 0,25
	> 550	2,3 - 3,8	0,23 - 0,40

Les méthodes géostatistiques sont utilisées à des fins scientifiques pour déterminer l'hétérogénéité d'un champ (Brus and de Gruijter, 1997).

4.2 Méthode de mesure

Au laboratoire, l'échantillon de sol est passé au tamis de 2 mm puis séché. Les méthodes de détermination des fractions fines de l'humus exigent généralement que l'échantillon soit encore finement broyé.

L'humus est généralement mesuré en carbone organique (C_{org}). Pour une teneur moyenne en carbone de 58 %, on calcule la teneur en humus en multipliant la teneur en C_{org} mesurée par 1,725. Le sol peut également contenir des quantités considérables de carbone inorganique, qui se compose de carbonates pouvant interférer avec la mesure de l'humus.

La méthode de référence en Suisse est encore l'oxydation chimique humide de l'humus avec du dichromate de potassium et de l'acide sulfurique concentré (Agroscope, 1996-2018). Elle est actuellement remplacée par l'oxydation thermique avec analyse moderne des éléments (analyse CHN). L'oxydation thermique mesure généralement le carbone et l'azote dans le gaz de combustion. Pour mesurer le carbone organique du sol avec cette méthode, il faut déterminer le carbone inorganique séparément. Il s'agit soit de traiter le sol à l'acide pour libérer les carbonates, soit de brûler les composants organiques à des températures allant jusqu'à 500° C, puis les composants inorganiques à au moins 800° C (Blume *et al.*, 2011).

Les méthodes spectroscopiques pour déterminer la teneur en humus sont de plus en plus utilisées. Elles livrent beaucoup d'informations sur la quantité et la composition chimique de l'humus ainsi que sur la matrice du sol (Reeves, 2010; Steffens *et al.*, 2014). De plus, les méthodes spectroscopiques sont adaptées à l'analyse en laboratoire et sur le terrain ainsi qu'à la télédétection.

Pour déterminer les stocks de carbone (kg ha^{-1}), la méthode correcte consiste à échantillonner à une profondeur de 100 cm et, parallèlement, à déterminer, en plus de la teneur gravimétrique de l'humus (g kg^{-1}),

la densité de stockage du sol (g cm^{-3}) à tous les niveaux de profondeur. On obtient ainsi la quantité de carbone organique par unité de surface, en tenant compte de la couche de sol échantillonnée.

Des laboratoires commerciaux en Suisse proposent des kits d'analyses pour les PER. En plus des analyses de pH et des nutriments, ces paquets standard proposent aussi des tests tactiles pour la granulométrie. La taille des particules d'argile, de limon et de sable est très stable dans le temps et doit être mesurée une fois par site. Toutefois, le test tactile est inadapté pour connaître la modification de la teneur en humus après un changement de rotation, car il est trop imprécis.

5. Établir une valeur de référence humus

Le BioSA (Biologie du Sol Appliquée) est un groupe de travail constitué des services de protection des sols de la Confédération, dont le NABO, et des cantons, ainsi que des représentants de la recherche. Son objectif est de promouvoir et d'intégrer les aspects de la biologie du sol dans l'exécution de la protection des sols. Le BioSA et d'autres groupes spécialisés du CercleSol souhaitent évaluer s'il est possible d'établir une valeur de référence de la teneur en humus du sol qui réponde à des critères scientifiques, soit acceptable d'un point de vue pratique et puisse être mise en œuvre dans le cadre de la protection des sols. L'utilisateur des sols devrait également savoir quelle teneur en humus du sol doit être la valeur cible. Les usagers des terres assolées doivent non seulement fournir des produits agricoles mais aussi prendre en compte les aspects environnementaux ; il est donc essentiel de définir les méthodes et les objectifs pour la teneur en humus. Une méthode d'analyse rigoureuse renforce la confiance dans le processus d'analyse et permet de prendre des décisions éclairées et de donner de bons conseils.

5.1 Approche normative : données des PER

Avec l'ordonnance sur les paiements directs et les directives des PER sur l'analyse des sols, la Suisse a créé un système unique en son genre. Formellement, il ne manque qu'une petite étape pour un suivi complet des stocks de carbone dans le sol sur la base des données PER, à savoir la mise à disposition des analyses à l'administration fédérale. Le bénéfice potentiel de ces données à des fins statistiques est immense. Elles seraient utiles pour l'évaluation des PER et de l'OPD et fourniraient les bases nécessaires pour étayer le rôle des sols fertiles (OSol) pour l'environnement et le

climat. La qualité des données sur les sols sera améliorée si l'on tient compte des propositions du Chapitre 4 qui visent à ce que l'échantillon soit représentatif et la mesure correcte.

Si les sols sont déjà appauvris par leur utilisation actuelle ou passée, il y a un risque qu'une approche « normative » fournisse des valeurs trop basses pour être utilisées comme normes. Une série de données normatives a donc besoin d'un objectif - une valeur de référence - pour être évaluée. La voie à suivre pour y parvenir est complexe, car elle doit non seulement tenir compte d'une évaluation précise et solide, mais aussi des intérêts respectifs des usagers des terres et de leurs représentants (Bünemann *et al.*, 2018). Par exemple, les réserves des agriculteurs ou de l'association des agriculteurs à propos de la mise à disposition des analyses de sol aux offices fédéraux présagent de quelques résistances. Une référence doit servir la comparaison et permettre une évaluation de l'analyse pour une parcelle. Les informations sur le site, son exploitation, la teneur en argile du sol peuvent permettre d'interpréter la valeur de référence purement « normative ». Le bilan d'humus peut fournir des données supplémentaires, car il permet d'équilibrer les flux de matières à destination et en provenance de l'exploitation – mais sans référence directe à la surface.

5.2 Approche fonctionnelle : structure du sol

L'humus est la plaque tournante de nombreuses fonctions du sol. Il est donc intéressant de vérifier la validité d'une valeur de référence de l'humus à partir du maintien ou de l'amélioration des fonctions du sol. L'accent peut être mis sur la fonction d'habitat, la fonction de production ou la fonction de régulation,

qui nécessitent chacune un grand nombre d'indicateurs pour être déterminées. Des connaissances spécialisées et un personnel averti sont nécessaires pour ce type d'évaluation. Cependant, une évaluation visuelle de la structure du sol, par exemple avec un échantillon de bêche (Ball *et al.*, 2017), peut établir le lien entre l'analyse du sol au laboratoire avec des résultats concrets et la fonction du sol définie de manière plutôt abstraite.

Johannes *et al.* (2017), comme Hassink (1997), ont utilisé le rapport humus/argile comme valeur de référence interne qui aide à évaluer la teneur potentielle en humus. Dexter *et al.* (2008) définissent ce potentiel de fixation de l'humus comme suit : si les minéraux argileux du sol sont liés à l'humus, on s'attend à un rapport de masse $C_{org}/argile$ de 0,1, c'est-à-dire que 10 grammes d'argile lient 1 gramme de C_{org} ou 1,7 gramme d'humus. Johannes *et al.* (2017) utilisent la « Visual Estimation of Soil Structure » (VESS) selon Ball *et al.* (2007) pour déterminer la valeur seuil à partir de laquelle la qualité structurale du sol est considérée comme bonne (Fig. 5). L'évaluation par la méthode VESS est visuelle et semi-quantitative : La personne qui l'effectue évalue la structure d'un échantillon de sol dans son intégralité, parfois même avec la contribution de l'exploitant. Le test à la bêche fournit des informations sur la structure du sol, sa vitalité (racines, vers de terre) et la décomposition des restes de plantes. Il s'agit d'un système d'évaluation des sols dont les résultats sont également cohérents avec de nombreuses méthodes beaucoup plus précises (Ball *et al.*, 2017). La collecte systématique de données, associée à une documentation photographique, peut améliorer la valeur de cette méthode pour l'agriculteur. La comparaison des tendances visuellement identifiables avec celles de l'analyse des sols est intéressante pour l'agriculteur, son conseiller, le responsable de la protection des sols et le scientifique.

L'approche fonctionnelle de Johannes *et al.* (2017) est nouvelle et prometteuse, car chaque sol a un potentiel de séquestration de l'humus en fonction de sa teneur en argile. Toutes les quantités d'humus supérieures à ce potentiel sont de la matière organique particulière et un supplément si tant est qu'une plus grande quantité d'humus soit jugée positive. Ce concept est, à

notre connaissance, le seul moyen à ce jour d'établir une valeur de référence pour l'humus qui ne s'appuie pas sur la distribution normative des teneurs en humus (Capriel, 2010).

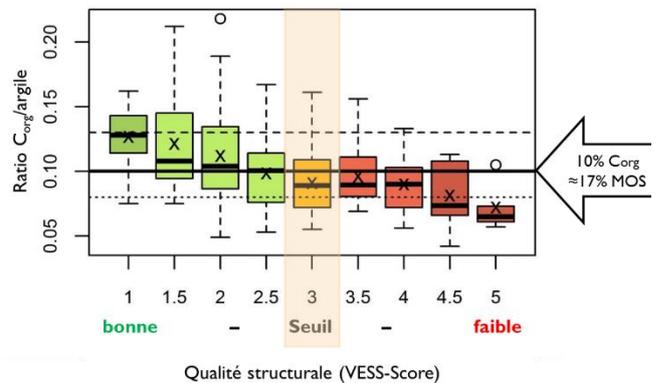


Fig. 5 Dérivation et vérification de la valeur seuil d'après Boivin *et al.* (2017) selon l'évaluation effectuée avec « Visual Estimation of Soil Structure » (VESS) selon Ball *et al.* (2007)

Le test à la bêche est une méthode limitée aux caractéristiques visibles de la structure du sol. La vérification d'une approche de surveillance axée sur les résultats nécessite de comparer la variabilité de l'échantillon du test à la bêche avec la variabilité des données de MOS, d'argile, du site et de l'exploitation dans une approche modélisée. Cette approche nécessite de sélectionner tous les sols d'après des critères géo-climatiques et pédologiques, échantillonnés selon une stratégie déterminée, de les tester d'après cette stratégie, d'analyser et interpréter le taux d'humus à l'aide de méthodes standard. Le test à la bêche sur ces parcelles devrait être effectué dans ce projet pilote par du personnel formé et expérimenté. Il peut par la suite être réalisé de manière autonome par l'agriculteur, ce qui va dans le sens d'une sensibilisation.

L'établissement d'une valeur de référence basée sur la fonctionnalité des sols est préférable à l'approche normative, car cette dernière ne tenait pas compte jusqu'à présent des fonctions des sols. Le travail est assez important au début mais peut être réalisé de manière autonome par l'agriculteur. Par conséquent, il semble raisonnable et judicieux de définir le « bon sol » en combinant l'analyse des sols avec le test à la bêche, c'est-à-dire les paramètres scientifiques avec l'évaluation visuelle et tactile sur le terrain.

6. Conclusions et recommandations

Définition d'une valeur de référence : approche normative ou fonctionnelle

- L'approche fonctionnelle, qui combine le test bêche et l'analyse des sols pour l'argile et l'humus (Johannes *et al.*, 2017), est en cours de vérification dans le cadre d'un projet pilote sur de nombreux sites en Suisse. Cette approche est un complément prometteur à l'approche normative. La participation des agriculteurs lors du test de la bêche peut les sensibiliser aux questions de protection des sols. La Confédération et les cantons peuvent organiser une formation spécifique pour les agriculteurs et les conseillers.
- Dans ce contexte, cependant, rien ne précise quelles valeurs admettre pour les sols à faible ou à très forte teneur en argile ; des études complémentaires sont nécessaires.
- Les écarts par rapport à une valeur de référence « normative » peuvent être identifiés par la dispersion des résultats, même s'il est normal d'avoir à définir une fourchette. Les valeurs très divergentes nécessitent une clarification plus précise des causes. En raison de l'exploitation passée ou actuelle, les terres assolées peuvent présenter un taux d'humus trop faible pour être considéré comme une valeur idéale.

Méthodologie

- L'humus peut être mesuré avec une grande précision dans un échantillon de sol homogénéisé. La précision et la répétabilité de la mesure avec une méthode standard doivent être régulièrement vérifiées avec des tests inter-laboratoires.
- Le schéma d'échantillonnage d'un champ est défini par rapport à la profondeur des échantillons selon le NABO et les PER. La variabilité spatiale doit être prise en compte dans l'échantillonnage, ce qui est difficile à reproduire avec la stratégie PER. La définition d'une sous-parcelle, qui est échantillonnée à plusieurs reprises, se concentre sur la dynamique temporelle et ignore l'inhomogénéité sur le terrain due au développement du sol, à la topographie ou à d'autres phénomènes.
- Outre la teneur en humus, le pH et les teneurs en P et K devraient - comme jusqu'à présent - être déterminés à l'aide de méthodes standard, tout comme des données du recensement agricole. En

outre, la teneur en argile doit être mesurée une fois pour toutes pour chaque site.

- La détermination de la teneur en argile avec la méthode standard est complexe et il convient donc de vérifier si les mesures spectroscopiques, qui permettent également de quantifier l'humus dans le même échantillon, sont réalisables et suffisamment précises.

Base de données

- Les données déterminées dans le cadre de l'OPD et des PER doivent être correctement analysées et mises à la disposition des offices fédéraux sous une forme géoréférencée. Les offices fédéraux concernés devraient émettre des directives s'y rapportant.
- La Confédération devrait mettre en place une base de données contenant des informations géo-climatiques et les valeurs d'analyse obtenues pour chaque site. La série de données est utile pour l'évaluation des programmes liés aux paiements directs et peut être utilisée à des fins de cartographie des sols.

Sensibilisation

- L'humus est l'un des principaux indicateurs de la qualité des sols, avec une pertinence à la fois agronomique, sociale, environnementale et climatique. Les usagers des sols et la population devraient être sensibilisés sur le sujet.
- Approche participative : la manière d'établir une valeur de référence est complexe, car il faut également impliquer les différents intérêts représentés.

Auteur-e-s : Andreas Fliessbach, Else Bünemann, Paul Mäder, Forschungsinstitut für Biologischen Landbau (FiBL), Frick, 11. Nov. 2020

Remerciements : nous tenons à remercier l'Office fédéral de l'environnement pour le financement de cette étude. Nous sommes très reconnaissants aux intervenants et aux participants de l'atelier « Valeurs indicatrices de l'humus » pour leurs précieuses présentations et contributions à la discussion. Un merci tout particulier à B. Seitz, E. Havlicek, G. von Rohr, P. Weisskopf, R. Meuli, S. Burgos, H. Flaig, C. Maurer et C. Fankhauser pour leurs suggestions d'améliorations de la version antérieure de cette fiche.

7. Bibliographie

- Agroscope, 1996-2018. Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten - 1. Bodenuntersuchung zur Düngeberatung. Zürich-Reckenholz.
- Bai, Z., Caspari, T., Gonzalez, M.R., Batjes, N.H., Mäder, P., Bünemann, E.K., de Goede, R., Brussaard, L., Xu, M., Ferreira, C.S.S., Reintam, E., Fan, H., Mihelič, R., Glavan, M., Tóth, Z., 2018. Effects of agricultural management practices on soil quality: A review of long-term experiments for Europe and China. *Agric. Ecosys. Environ.* 265, 1-7.
- 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 Till. Res.* 173, 114-124.
- Blume, H.-P., Brümmer, G.W., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K., Wilke, B.-M., 2010. Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde. Spektrum Akademischer Verlag.
- Blume, H.-P., Stahr, K., Leinweber, P., 2011. *Bodenkundliches Praktikum*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Boivin, P., Johannes, A., Matter, A., Gondret, K., Leopizzi, S., Deluz, C., 2017. Guide values of OM content for soil protection. Presentation at the workshop: "Humus guidance values", Bern.
- Brus, D.J., de Gruijter, J.J., 1997. Random sampling or geostatistical modelling? Choosing between design-based and model-based sampling strategies for soil (with discussion). *Geoderma* 80, 1-44.
- Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T.W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J.W., Brussaard, L., 2018. Soil quality – A critical review. *Soil Biol. Biochem.* 120, 105-125.
- Capriel, P., 2010. Standorttypische Humusgehalte von Ackerböden in Bayern. In: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Ed.), *LfL- Schriftenreihe* 16, Freising-Weihenstephan, p. 46.
- Cooper, J., Baranski, M., Stewart, G., Nobel-de Lange, M., Bärberi, P., Fließbach, A., Peigné, J., Berner, A., Brock, C., Casagrande, M., Crowley, O., David, C., Vliegheer, A., Döring, T.F., Dupont, A., Entz, M., Grosse, M., Haase, T., Halde, C., Hammerl, V., Huiting, H., Leithold, G., Messmer, M., Schloter, M., Sukkel, W., Heijden, M.G.A., Willekens, K., Wittwer, R., Mäder, P., 2016. Shallow non-inversion tillage in organic farming maintains crop yields and increases soil C stocks: a meta-analysis. *Agron. Sustain. Dev.* 36, 22.
- Deluz, C., 2017. Évaluation de la teneur en matière organique du sol d'une parcelle cultivée. Quel échantillonnage pour quel objectif? , *Filière Agronomie*. Haute École du paysage, d'ingénierie et d'architecture (hepia-GE), Genève, p. 136.
- Dexter, A.R., Richard, G., Arrouays, D., Czyż, E.A., Jolivet, C., Duval, O., 2008. Complexed organic matter controls soil physical properties. *Geoderma* 144, 620-627.
- Ehlers, K., 2015. *Untergrund: Das unsichtbare Ökosystem*.
<https://www.boell.de/de/2015/01/08/untergrund-das-unsichtbare-oekosystem>.
- Fließbach, A., Oberholzer, H.-R., Gunst, L., Mäder, P., 2007. Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming. *Agric. Ecosys. Environ.* 118, 273-284.
- Gattinger, A., Muller, A., Haeni, M., Skinner, C., Fließbach, A., Buchmann, N., Mäder, P., Stolze, M., Smith, P., Scialabba, N.E.-H., Niggli, U., 2012. Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA* 109, 18226-18231.
- Gubler, A., Schwab, P., Wächter, D., Meuli, R.G., Keller, A., 2015. Ergebnisse der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO) 1985-2009. Zustand und Veränderungen der anorganischen Schadstoffe und Bodenbegleitparameter. In: Bundesamt für Umwelt (Ed.), *Umwelt-Zustand*. NABO, Bern, p. 81.
- Guo, L.B., Gifford, R.M., 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biol.* 8, 345-360.
- Hagedorn, F., Krause, H.-M., Studer, M., Schellenberger, A., Gattinger, A., 2018. Boden und Umwelt. Organische Bodensubstanz, Treibhausgasemissionen und physikalische Belastung von Schweizer Böden. In: SNSF (Ed.), *Thematische Synthese TS2 des Nationalen Forschungsprogramms "Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden"*. SNSF, Bern.
- Hassink, J., 1997. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant Soil* 191, 77-87.
- Hug, A.-S., Gubler, A., Gschwend, F., Widmer, F., Oberholzer, H., Frey, B., Meuli, R.G., 2018. NABObio – Bodenbiologie in der Nationalen Bodenbeobachtung - Ergebnisse 2012–2016 Handlungsempfehlungen und

- Indikatoren. In: Agroscope (Ed.), Agroscope Science. Agroscope, Zürich, p. 55.
- Ingram, J.S.I., Fernandes, E.C.M., 2001. Managing carbon sequestration in soils: concepts and terminology. *Agric. Ecosys. Environ.* 87, 111-117.
- Johannes, A., Matter, A., Schulin, R., Weisskopf, P., Baveye, P.C., Boivin, P., 2017. Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? *Geoderma* 302, 14-21.
- Kolbe, H., 2015. Leitfaden zur Humusversorgung. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden, p. 70.
- Lal, R., 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science* 304, 1623-1627.
- Lal, R., 2008. Sequestration of atmospheric CO₂ in global carbon pools. *Energy & Environmental Science* 1, 86-100.
- Leifeld, J., Bassin, S., Fuhrer, J., 2005. Carbon stocks in Swiss agricultural soils predicted by land-use, soil characteristics, and altitude. *Agric. Ecosys. Environ.* 105, 255-266.
- Lilburne, L., Sparling, G., Schipper, L., 2004. Soil quality monitoring in New Zealand: development of an interpretative framework. *Agric. Ecosys. Environ.* 104, 535-544.
- Moebius-Clune, B.N., 2016. Comprehensive Assessment of Soil Health: The Cornell Framework Manual. <https://soilhealth.cals.cornell.edu/>. Cornell University.
- Post, W.M., Izaurralde, R.C., Mann, L.K., Bliss, N., 2001. Monitoring and Verifying Changes of Organic Carbon in Soil. In: Rosenberg, N.J., Izaurralde, R.C. (Eds.), *Storing Carbon in Agricultural Soils: A Multi-Purpose Environmental Strategy*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 73-99.
- Post, W.M., Kwon, K.C., 2000. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biol.* 6, 317-327.
- Reeves, J.B., 2010. Near- versus mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy for soil analysis emphasizing carbon and laboratory versus on-site analysis: Where are we and what needs to be done? *Geoderma* 158, 3-14.
- Rutgers, M., Mulder, C., Schouten, A., Bloem, J., Bogte, J., Breure, A., Brussaard, L., De Goede, R., Faber, J., op Akkerhuis, G.J., 2008. Soil ecosystem profiling in the Netherlands with ten references for biological soil quality. National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Bilthoven NL, p. 88.
- Saby, N.P.A., Bellamy, P.H., Morvan, X., Arrouays, D., Jones, R.J.A., Verheijen, F.G.A., Kibblewhite, M.G., Verdoodt, A., Üveges, J.B., Freudenschuss, A., Simota, C., 2008. Will European soil-monitoring networks be able to detect changes in topsoil organic carbon content? *Global Change Biol.* 14, 2432-2442.
- Steffens, M., Kohlpaintner, M., Buddenbaum, H., 2014. Fine spatial resolution mapping of soil organic matter quality in a Histosol profile. *Eur. J. Soil Sci.* 65, 827-839.
- VBBio, 1998. Verordnungen über Belastungen des Bodens. In: *Der Schweizerische Bundesrat* (Ed.), 814.12, Bern, p. 12.
- Vollzug Bodenbiologie, V., 2009. Arbeitshilfe zur Anwendung und Interpretation bodenbiologischer Parameter. In: (VBBioSa), V.B. (Ed.), Frick.
- Wessolek, G., Kaupenjohann, M., Dominik, P., Illg, K., Schmitt, A., Zeitz, J., Gahre, F., Schulz, E., Ellerbrock, R., Utermann, J., Düwel, O., Siebner, C., 2008. Ermittlung von Optimalgehalten an organischer Substanz landwirtschaftlich genutzter Böden nach § 17 (2) Nr. 7 BBodSchG. In: *Umweltbundesamt* (Ed.), *Publikationen des Umweltbundesamtes*, Berlin, p. 162.
- Wiesmeier, M., 2017. Site-typical humus contents of cropland soils in Bavaria – Status quo and future challenges. Presentation at the workshop: "Humus guidance values", Berne.