

VBB♦BSA

ARBEITSGRUPPE «VOLLZUG BODENBIOLOGIE»
GROUPE DE TRAVAIL « BIOLOGIE DU SOL – APPLICATION »

Aide à la mise en œuvre

Utilisation et interprétation des paramètres biologiques du sol

Groupe de travail « Biologie du sol – application » (BSA)

IMPRESSUM

- Editeur Groupe de travail « Biologie du sol – application » (BSA)
- Collaboration Claudia Maurer-Troxler, Service de la protection des sols du canton de Berne
Gaby von Rohr, Service de la protection des sols du canton de Soleure
Hans-Rudolf Oberholzer, Station de Recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART)
Nicolas Rossier, Institut agricole de l'Etat de Fribourg
Paul Mäder, Institut de recherche de l'agriculture biologique (FiBL)
Roland von Arx, Office fédéral de l'environnement (OFEV), section Sol
Françoise Okopnik, Service de la protection des sols du canton d'Argovie
- Référence Groupe de travail « Biologie du sol – application » (BSA) 2009: Guide à l'utilisation et à l'interprétation des paramètres biologiques du sol. Frick.
- Commande Secrétariat BSA, Dr Paul Mäder, Institut de recherche de l'agriculture biologique (FiBL), case postale, CH – 5070 Frick

© Groupe de travail « Biologie du sol – application » (BSA) 2009

Table des matières

1	INTRODUCTION	4
2	PERTINENCE ET UTILISATIONS POSSIBLES DES PARAMÈTRES PÉDOBIOLOGIQUES	5
3	PARTICULARITÉS DES VALEURS DE RÉFÉRENCE PÉDOBIOLOGIQUES... 6	6
3.1	Distinction entre valeurs indicatives, valeurs de comparaison et valeurs de référence	6
3.2	Prise en considération de la variabilité naturelle et du type d'utilisation	6
3.3	Sources des valeurs de comparaison et de référence	6
4	VALEURS DE COMPARAISON ET VALEURS DE RÉFÉRENCE.....	8
4.1	Définition et champ d'application	8
4.2	Vue d'ensemble des paramètres.....	8
4.2.1	Paramètres microbiens	8
4.2.2	Mycorhizes	9
4.2.3	Paramètres faunistiques.....	10
4.2.4	Méthodes de référence	10
4.3	Valeurs de comparaison	10
4.3.1	Paramètres microbiens	10
4.3.2	Mycorhizes	13
4.3.3	Paramètres faunistiques.....	13
4.4	Valeurs de référence	14
4.4.1	Paramètres microbiens	14
4.4.2	Mycorhizes	21
4.4.3	Paramètres faunistiques.....	21
5	EVALUATION GLOBALE D'UN SITE	21
6	BIBLIOGRAPHIE	22
7	ANNEXE.....	23

1 Introduction

L'ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol) vise à garantir à long terme la fertilité du sol. Elle considère qu'un sol est fertile s'il présente une biocénose diversifiée et biologiquement active, une structure typique pour sa station et une capacité de décomposition intacte. Puisqu'ils constituent une biocénose méritant d'être protégée, qu'ils structurent les sols et en préservent la fonctionnalité, les organismes vivant dans le sol sont au centre de sa protection.

En 1991 déjà, la directive « *Wegleitung zur Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit* » (Directive sur l'évaluation de la fertilité du sol) met en évidence l'importance des paramètres biologiques lorsqu'il s'agit de caractériser la fertilité du sol. Elle recommande de s'intéresser aux paramètres pédobiologiques en parallèle aux relevés physiques, chimiques et botaniques. La nécessité d'accorder la même importance à la biologie du sol se justifie par le rôle important que jouent ces organismes dans la décomposition et la transformation de la matière organique, processus qui augmente la disponibilité en nutriments, dans la formation de l'humus et dans la structuration du sol. Cependant, les méthodes et les valeurs empiriques proposées à l'époque ne correspondent plus réellement aux connaissances actuelles.

Bien que l'importance majeure des organismes du sol soit reconnue, les responsables de la mise en œuvre de la protection des sols ne recourent guère aux paramètres pédobiologiques dans la pratique. Ceci est dû au fait que les espèces et activités typiques des différentes stations sont encore mal connues et que les méthodes et l'interprétation des données sont entachées d'incertitudes. En outre, le recours aux paramètres pédobiologiques se heurte à des obstacles d'ordre financier.

Depuis 1991, le groupe de travail « *Biologie du sol* », rebaptisé en 1995 « *Biologie du sol – application* » (BSA), s'efforce d'élaborer des bases dans ce domaine. Dans sa stratégie consacrée à la biologie et à la protection des sols (1999), il décrit les possibilités d'application des paramètres pédobiologiques, notamment pour l'observation à long terme et pour l'évaluation de la fertilité du sol en cas d'atteintes.

Les premières années, le BSA a porté son attention sur l'évaluation et la standardisation de méthodes pédobiologiques concrètes, mais aujourd'hui il se concentre sur la mise au point d'aides à l'interprétation (valeurs de comparaison et valeurs de référence). Même si ces travaux progressent lentement par manque de ressources financières et de personnel, il a été possible ces dernières années, au niveau Suisse, de recueillir les premières données à l'aide de diverses méthodes et d'élaborer des aides à l'interprétation.

Malgré les réserves qui viennent d'être émises, les membres du BSA estiment que les méthodes et bases d'interprétation recommandées sont suffisamment étayées pour être publiées sous forme du présent guide et mises ainsi à disposition d'un public d'utilisateurs plus large. Ce document propose aux services de la protection des sols et aux personnes intéressées des bases leur permettant d'utiliser les paramètres pédobiologiques. Il constitue dans ce domaine une actualisation de la directive sur l'évaluation de la fertilité du sol.

2 Pertinence et utilisations possibles des paramètres pédobiologiques

Les paramètres pédobiologiques sont des indicateurs globaux des modifications de la fertilité du sol. Au travers de paramètres spécifiques aux espèces ou à leurs activités, les organismes du sol et les plantes livrent des informations sur l'action combinée des conditions chimiques et physiques prévalant dans le sol, qui vont bien au-delà de celles fournies par les simples analyses chimiques et physiques. Les paramètres biologiques peuvent donc être considérés comme des indicateurs de la qualité du sol.

Les végétaux et les organismes du sol peuvent réagir de différentes manières aux diverses atteintes portées aux sols. Une détérioration des paramètres pédobiologiques et, en conséquence, de la fertilité du sol ne reflète pas forcément directement une perturbation de sa fonction de production (production végétale). Elle signale cependant en tous les cas un déséquilibre dans l'écosystème sol, risquant à long terme de compromettre ses fonctions et d'entraîner des pertes de production.

Les paramètres pédobiologiques peuvent notamment être utilisés dans les domaines suivants:

- **Observation permanente des sols**
Dans le cadre du projet LAZBO (Oberholzer et al. 2006; Schwab et al. 2006), il a pu être démontré que la biomasse microbienne (SIR) convient pour l'observation à long terme de l'ensemble des critères étudiés. L'adéquation des autres paramètres pédobiologiques étudiés doit encore être confirmée sur certains points; ces travaux sont en cours. Vu l'importance des organismes du sol pour sa fertilité, il est essentiel d'intégrer les paramètres pédobiologiques dans l'observation à long terme. Ceux-ci permettent d'évaluer l'état biologique du sol et d'en détecter les changements insidieux.
- **Recensement et surveillance des sols pollués, analyse des sites subissant des perturbations d'origine indéterminée**
Les atteintes d'ordre chimique ou physique portées aux sols se répercutent sur les organismes qui y vivent et par conséquent sur leur fertilité. Les paramètres pédobiologiques permettent de documenter et de surveiller certaines perturbations, comme la diminution de la capacité de décomposition ou des problèmes de structure. En cas d'atteintes d'origine indéterminée, lorsque les valeurs indicatives chimiques ou physiques sont juste atteintes ou seulement très légèrement dépassées, ces paramètres peuvent fournir des indications importantes grâce à leur pouvoir intégrateur.
- **Suivi des remises en cultures, régénérations et assainissements**
Après la remise en culture ou l'assainissement d'un sol, la biocénose adaptée à la station doit s'y rétablir progressivement. Ce n'est que lorsqu'elle est à nouveau intacte et capable d'assumer ses multiples fonctions, que la fertilité du sol est rétablie. Les paramètres pédobiologiques permettent de contrôler les résultats de tels projets.
- **Relations publiques**
Savoir que le sol est vivant et en connaître les organismes qui l'habitent amène à lui donner plus de valeur en tant que milieu vivant et à le traiter avec respect. Ainsi, un lien affectif s'établit avec le sol et la sensibilité au besoin de le protéger s'en trouve augmentée.
- **Contrôle des effets des organismes dangereux pour l'environnement**
Les paramètres pédobiologiques permettent de détecter à temps les effets que pourraient avoir les organismes pathogènes, exotiques ou génétiquement modifiés.
- **Vulgarisation agricole**
Les paramètres pédobiologiques permettent d'évaluer la fertilité d'un sol et de la mettre en relation avec la pratique agricole. Complétés par d'autres analyses, ils sont utiles dans la vulgarisation agricole, pour définir les mesures à prendre.

3 Particularités des valeurs de référence pédobiologiques

3.1 Distinction entre valeurs indicatives, valeurs de comparaison et valeurs de référence

Alors que les aides à l'exécution relatives aux atteintes chimiques et physiques portées aux sols fixent des seuils d'intervention précis en s'appuyant sur des valeurs indicatives et d'assainissement ainsi que sur des seuils d'investigation et d'intervention, les paramètres pédobiologiques sont, eux, évalués à l'aide de valeurs de comparaison et de référence, qui sont par essence différentes:

- Les valeurs indicatives fixées pour les métaux lourds et les polluants organiques sont un instrument pour détecter si la fertilité du sol est menacée par des causes chimiques. De même, les valeurs indicatives définies pour l'érosion et celles proposées pour la compaction servent à signaler les menaces dues à des causes physiques. Les valeurs indicatives sont fixées de sorte que leur dépassement indique que la fertilité du sol est menacée et qu'il faut prendre des mesures conformément à l'OSol (p. ex. en réduisant l'apport de polluants).
- A l'inverse, les valeurs de comparaison et les valeurs de référence proposées ici pour les paramètres pédobiologiques ne servent pas prioritairement à indiquer si le sol est menacé par des causes biologiques. Elles sont plutôt un outil pour en évaluer globalement la fertilité et, le cas échéant, l'impact (synergique) d'atteintes chimiques et physiques. Vu la grande variabilité naturelle des biocénoses du sol, il n'est pas possible de fixer de valeur indicative absolue pour les paramètres pédobiologiques. Il s'agit donc de proposer des valeurs qui permettent d'interpréter les résultats des mesures sous l'angle de la fertilité du sol. Si l'état biologique du sol indique que sa fertilité est perturbée, il faut en éclaircir les causes et prendre les mesures qui s'imposent.

3.2 Prise en considération de la variabilité naturelle et du type d'utilisation

Selon l'OSol, un sol est fertile s'il abrite des organismes formant une biocénose diversifiée, biologiquement active et typique pour sa station.

La composition et l'activité de la biocénose du sol sont très variables et sont influencées par une multitude de facteurs, tant naturels qu'anthropiques: les caractéristiques pédologiques, les fluctuations climatiques et saisonnières, l'utilisation du sol, ou encore les atteintes chimiques et physiques existantes. Lorsqu'il s'agit d'évaluer l'état et les éventuelles modifications pédobiologiques et de fixer les valeurs de comparaison et de référence utiles pour la protection du sol en pratique, il faut tenir compte aussi bien de cette variabilité naturelle que du type d'utilisation du sol.

Les résultats obtenus jusqu'ici en Suisse et à l'étranger, amènent à distinguer les types d'utilisation suivants:

- terres assolées: sites avec travail du sol et rotation des cultures
- herbages: sites sans travail du sol ni rotation des cultures
- forêt.

Ces trois types d'utilisation diffèrent fondamentalement par l'intensité et la périodicité des interventions humaines, lesquels influencent la biologie et la structure du sol à des degrés divers. Si le sol est utilisé de façon durable, il se développe dans chacun de ces systèmes une communauté typique d'organismes, caractérisée par des valeurs de comparaison ou de référence spécifiques. La fertilité du sol d'un site doit donc être évaluée en se basant sur les valeurs de comparaison ou de référence adaptées à son type d'utilisation.

Pour le moment, les données disponibles en Suisse permettent de fixer des valeurs de comparaison et de référence pour les terres assolées et les herbages.

3.3 Sources des valeurs de comparaison et de référence

Pour déterminer les valeurs de comparaison et celles de référence, il faudrait prendre en considération des sites les plus intacts possibles. En pratique, il n'est pas si facile de définir ce que l'on considère comme intact et ce qu'est « l'état normal ». Il n'est jamais possible de formuler des valeurs absolues et intemporelles, parce que les activités humaines influencent partout les organismes du sol. En

outre, les données manquent sur l'état biologique antérieur du sol, c'est-à-dire lorsque l'apport de polluants était moindre, que les cultures vivrières et fourragères étaient moins intensives ou que les constructions et les améliorations foncières exerçaient une emprise moindre.

Les valeurs proposées ici se basent ainsi sur la situation actuelle et intègrent inévitablement l'influence des activités humaines. D'éventuels changements, soudains ou larvés, déjà survenus au sein des biocénoses du sol suite à l'intensification de l'agriculture à partir du milieu du siècle dernier, ne peuvent pas ou plus être pris en considération.

Les données proviennent de diverses études menées ces dernières années sur des terres assolées et des herbages exploités avec une intensité normale pour l'époque. Pour ces sols agricoles, il faut bien sûr se demander quel type et quelle intensité d'utilisation, donc quels systèmes d'exploitation (grandes cultures, cultures fourragères), doivent être considérés comme « normaux » et servir de référence. Tant les valeurs de comparaison que celles de référence doivent refléter ce que serait l'état du sol lorsqu'il est soumis à une exploitation agricole durable, qui préserve sa fertilité. En conséquence, les sols exposés à des atteintes physiques ou chimiques importantes en raison d'une utilisation intensive ne sont pas pris en considération dans la définition de ces valeurs.

4 Valeurs de comparaison et valeurs de référence

4.1 Définition et champ d'application

Ce guide présente deux types d'aides à l'interprétation, les valeurs de comparaison et les valeurs de référence. Elles diffèrent par le degré de précision des conclusions qu'elles permettent de tirer:

- les valeurs de comparaison expriment la moyenne et la variabilité de l'ensemble des valeurs mesurées pour un paramètre, sans tenir compte des caractéristiques pédologiques du site. Elles permettent une appréciation générale des mesures et de repérer les valeurs basses, élevées ou aberrantes;
- les valeurs de référence permettent une appréciation différenciée, spécifique au site, des valeurs mesurées pour un paramètre, en faisant entrer dans le calcul les caractéristiques pédologiques du site qui exercent une influence.

Puisque la modélisation des valeurs de référence nécessite une quantité suffisante de données, elle n'est possible que pour quelques paramètres. Pour les autres, on dispose toutefois de valeurs empiriques permettant une interprétation générale des résultats des mesures. Elles sont proposées en tant que valeurs de comparaison afin de servir au plus grand nombre. Lorsque plus de données auront été accumulées, des valeurs de référence seront aussi modélisées pour ces paramètres.

Il est tenu compte de l'influence du climat sur la biologie du sol par la création de régions. Les valeurs de comparaison et les valeurs de référence proposées ici s'appliquent aux sols du Plateau Suisse et se limitent aux types d'utilisation « terres assolées » et « herbages ». Pour le moment, les données sont encore trop lacunaires pour qu'il soit possible de définir des valeurs de comparaison et de référence s'appliquant aux terres assolées et aux herbages des autres régions ou aux sols forestiers. Celles-ci seront définies progressivement, en même temps que les données seront complétées.

4.2 Vue d'ensemble des paramètres

Il existe divers paramètres et méthodes pour évaluer l'état biologique d'un sol qui sont fréquemment utilisés au niveau national ou international, et sont, de ce fait, bien étayés. Pour obtenir une appréciation globale de la biologie du sol, il est recommandé de combiner les aspects microbiologiques et faunistiques.

4.2.1 Paramètres microbiens

Les paramètres pédomicrobiologiques sont basés sur divers aspects de l'activité microbienne pertinents pour la fonctionnalité des sols. Ils livrent diverses indications.

Le BSA recommande d'utiliser en priorité les paramètres suivants: biomasse microbienne SIR et FE, respiration basale, quotient métabolique, rapport entre le carbone de la biomasse microbienne et le carbone organique total et minéralisation de l'azote. La biomasse microbienne ATP et la minéralisation du carbone sont utilisés dans divers projets, notamment dans le Réseau fribourgeois d'observation des sols (FRIBO), qui comporte de longues séries de mesures.

- Biomasse microbienne SIR, FE-C et FE-N
La biomasse microbienne est une mesure générale exprimant l'état de vitalité et d'activité du sol. Sa grandeur dépend de divers facteurs environnementaux (climat, propriétés pédologiques, utilisation et exploitation du sol). Il s'agit d'un paramètre pédologique important, puisque ces organismes jouent non seulement un rôle décisif dans la décomposition et la transformation de la matière organique, mais représentent aussi une réserve de nutriments rapidement assimilables. La biomasse microbienne peut se déterminer de deux manières. La méthode physiologique de la « respiration induite par le substrat » (SIR) consiste à mélanger les échantillons de sol avec du glucose et à les incuber jusqu'à l'obtention d'une respiration initiale maximale. Cette dernière est proportionnelle à la biomasse microbienne. La méthode de l'« extraction par fumigation » (FE-C et FE-N) consiste à gazer le sol au chloroforme afin de tuer les microorganismes qui y vivent et de détruire leurs parois cellulaires. La matière organique présente dans le sol ne se modifiant guère, on peut ensuite en extraire la teneur de la biomasse microbienne en carbone et celle en azote.

- Respiration basale
Le CO₂ produit lors de la décomposition de la matière organique reflète l'activité respiratoire aérobie de l'ensemble des organismes du sol. En l'absence de perturbation, il s'instaure un équilibre écologique dans le sol entre les organismes et leur activité de décomposition. La respiration dans cet état est qualifiée de respiration basale. Quand cet équilibre est rompu, la respiration change suite à une modification de la biomasse microbienne et de son activité de minéralisation. L'évaluation de la respiration basale se fait via le quotient métabolique.
- Quotient métabolique (qCO_2)
Le quotient métabolique exprime l'efficacité énergétique d'une communauté de microorganismes et correspond au rapport entre la respiration basale et la biomasse microbienne (SIR ou FE-C). Il caractérise l'état physiologique des microorganismes. Plus il est élevé, plus la quantité de substrat rejetée sous forme de CO₂ est grande et plus la proportion du substrat incorporé dans la biomasse microbienne est faible.
- Rapport entre le carbone de la biomasse microbienne et le carbone organique total (C_{mic}/C_{org})
Ce quotient écomorphologique fournit des informations sur la dynamique du carbone dans le sol. C'est un indicateur de la disponibilité microbienne du substrat organique, qui explicite dans quelle mesure les microorganismes peuvent utiliser le carbone du sol pour augmenter et entretenir leur biomasse. Il fournit ainsi des indications sur l'évolution à long terme de l'humus.
- Minéralisation de l'azote
La minéralisation de l'azote est une mesure de la dynamique de l'azote du sol. La méthode utilisée consiste à mesurer le potentiel de minéralisation des microorganismes actuellement présents dans le sol, aux conditions pédochimiques données, et à une température, un taux d'aération et une humidité optimale. Pour cela, les échantillons de sol sont incubés à 25 °C en conditions aérobies et la quantité d'azote minéral (NH₄-N et NO₃-N) libérée par la dégradation des composés organiques azotés est mesurée après 28 jours d'incubation.
- Biomasse microbienne ATP
L'adénosine triphosphate se trouve dans toutes les cellules biologiques vivantes. Puisque cette molécule est rapidement hydrolysée après la mort de la cellule, il s'agit d'un bon indicateur pour les organismes vivants. Elle sert au transport et au stockage de l'énergie dans la plupart des réactions biochimiques. Sa mesure permet d'estimer la masse des microorganismes vivants par unité de sol. La biomasse ATP dépend de la teneur en argile et en humus, qui représente une source d'énergie pour les microorganismes.
- Minéralisation du carbone (Min.-C)
La minéralisation du carbone est une estimation de la quantité de matière organique minéralisée par les microorganismes du sol. La valeur mesurée est la somme de CO₂ libéré durant 15 jours d'incubation. Cette valeur est ensuite transformée mathématiquement en équivalent carbone, puis en équivalent de matière organique pour être exprimée en $\mu\text{g MO g}^{-1} \text{MS du sol 15 jours}^{-1}$. La méthode d'analyse est la même que celle de la respiration basale, mais la mesure est effectuée à un intervalle de temps différent et sur des échantillons séchés puis ré-humectés.

4.2.2 Mycorhizes

En raison de leur importance pour la croissance des plantes et la structure du sol, les champignons mycorrhiziens sont un composant biologique important de la fertilité du sol. Les champignons appelés champignons mycorrhiziens arbusculaires sont largement répandus dans les sols agricoles.

- Potentiel infectieux mycorrhizogène
La méthode standard du potentiel infectieux mycorrhizogène (PIM) permet de déterminer l'activité des champignons mycorrhiziens arbusculaires dans un échantillon de sol à l'aide d'un essai biologique (bioassay). Des graines de poireaux sont semées dans des échantillons de sol frais, puis le degré de mycorhization des racines de ces plantes indicatrices est déterminé après une période de croissance de 60 jours dans des conditions standardisées.

4.2.3 Paramètres faunistiques

En Suisse, les lombrics sont le seul groupe animal pour lequel on dispose de données suffisantes pour les valeurs de comparaison. Aucune valeur de comparaison n'a encore été formulée pour les autres groupes.

- Lombrics

Par leurs activités, les lombrics (ou vers de terre) influencent divers aspects de la fertilité du sol: ils agissent sur le cycle métabolique (décomposition et transformation de la matière organique), sur les propriétés physiques et chimiques du sol (complexe argilo-humique, cycle de l'eau et de l'air, offre en nutriments dans les galeries de vers de terre) et sur les microorganismes du sol (broutage et stimulation des microbes du sol).

L'écologie de la faune lombricienne se caractérise à l'aide de la diversité et de la distribution des espèces, de la biomasse, des quatre groupes écomorphologiques et de l'abondance:

diversité et distribution des espèces: la présence des différentes espèces se lit directement sur les cartes de distribution (Cuendet et al., 1997);

biomasse: elle reflète l'effet écologique des vers de terre sur le sol (brassage, ameublissement);

groupes écomorphologiques: en fonction de leur taille, de leur couleur et de leur mode de vie, les lombrics on distingue les espèces épigées (qui habitent la litière), les espèces endogènes (qui peuplent les sols minéraux), les Lumbricus anéciques (qui creusent et se retirent en profondeur) et les Nicodrilus anéciques (qui creusent en profondeur et s'enroulent sur eux-mêmes);

abondance: elle permet d'évaluer la dynamique des populations (reproduction, potentiel de développement). Il n'existe pas de valeurs de comparaison pour l'abondance.

4.2.4 Méthodes de référence

Afin de pouvoir comparer les résultats des diverses études, il faut que les différents laboratoires effectuent les analyses de sol de manière standard, en suivant des méthodes définies et documentées. Les recueils des méthodes de référence des stations fédérales de recherches agronomiques (Agroscope 1996, actualisé chaque année) décrivent ces procédures de terrain et de laboratoire.

Les analyses pédobiologiques se trouvent dans le volume 2 consacré aux analyses de sol en vue de la caractérisation des sites (analyses pédophysiques, pédobiologiques et pédochimiques):

- Explications générales
Stratégies de prélèvement, choix des méthodes, stratégies en laboratoire (chap. 2 et 3 « Analyses pédomicrobiologiques », « Analyses de la faune du sol »: MR-EXPL-2, pp. 7 à 16).
- Chapitre A: Prélèvement et préparation des échantillons
Prélèvement, préparation, stockage et préincubation des déterminations microbiologiques (partie « Propriétés biologiques du sol »: B-M-PN, B-PAL, B-VI).
- Chapitre B: Extraction à partir des échantillons de sol
Extraction de lombrics à l'aide d'une solution de formol et extraction manuelle (partie « Propriétés biologiques du sol » : B-RW-E, B-RW-H).
- Chapitre E: Détermination des propriétés biologiques du sol
Détermination de la biomasse microbienne SIR, FE et ATP, de la respiration basale, de la minéralisation de l'azote, du potentiel infectieux mycorrhizogène et de la population lombricienne (B-BM-HM, respectivement B-BM-IS, B-BM-FE, B-BM-ATP, B-BA-IS, B-NM-BA, B-MIP, B-RW-B).

Pour procéder à l'évaluation et à l'interprétation globale des paramètres microbiologiques, il faut également déterminer sur le même échantillon les teneurs en argile et en sable, le pH et la teneur en C_{org} .

4.3 Valeurs de comparaison

4.3.1 Paramètres microbiens

Des valeurs empiriques (médiane, minimum, maximum, quartile inférieur (25%) et quartile supérieur (75%)) ont été définies pour l'ensemble des paramètres pédomicrobiologiques recommandés (voir tab.

1 et 2). Elles se basent sur l'ensemble des sites étudiés jusqu'ici et sont classées selon les trois types d'utilisation « terres assolées », « herbages intensifs » et « herbages extensifs ». Ces valeurs ne tiennent pas compte des différences de propriétés physico-chimiques du sol. Les tableaux comparatifs qui suivent permettent d'effectuer une première classification approximative des données microbiologiques, mais non de procéder à une interprétation plus nuancée tenant compte des caractéristiques pédologiques du site concerné.

Les valeurs de comparaison se fondent sur des bases de solidité variable. Actuellement, les données sont les plus nombreuses pour la biomasse microbienne SIR, FE et ATP ainsi que pour la respiration basale et la minéralisation du carbone, alors que le nombre de données relatives au potentiel infectieux mycorhizogène est encore très restreint.

Les méthodes microbiennes recommandées ne permettent pas de détecter des changements qualitatifs dans la composition de la population des microorganismes.

Champ d'application des valeurs de comparaison

Les valeurs de comparaison sont valables pour les sols du Plateau Suisse situés entre 400 et 800 m d'altitude; pour les paramètres biomasse microbienne ATP et minéralisation du carbone, elles ne sont valables que pour les sols de la partie ouest du Plateau Suisse situés entre 400 et 900 m d'altitude.

Tab. 1: Valeurs de comparaison pour la biomasse microbienne SIR, FE-C et FE-N, la respiration basale, le rapport C_{mic}/C_{org} , le quotient métabolique, la minéralisation de l'azote, la biomasse microbienne ATP et la minéralisation du carbone dans les sols utilisés comme terres assolées et comme herbages (prairies peu intensives à intensives, sans les alpages), respectivement comme herbages extensifs et intensifs (n: nombre de sites analysés; MS: matière sèche).

	Médiane	Minimum	Maximum	Quartile inférieur	Quartile supérieur
Biomasse microbienne (SIR)	[mg kg ⁻¹ MS du sol]				
Terres assolées ¹⁾ : n=220	477	189	1163	362	633
Terres assolées ²⁾ : n=32	474	214	1148	321	654
Herbages ³⁾ : n=151	659	226	2528	470	941
Herbages extensifs ²⁾ : n=8	1303	790	2094	958	1672
Herbages intensifs ²⁾ : n=8	1550	914	1961	1207	1812
Biomasse microbienne (FE-C)	[mg kg ⁻¹ MS du sol]				
Terres assolées ¹⁾ : n=220	518	216	1692	412	744
Terres assolées ²⁾ : n=32	548	269	1254	402	737
Terres assolées ⁴⁾ : n=98	601	220	1286	440	741
Herbages extensifs ²⁾ : n=8	2077	1407	2898	1760	2482
Herbages intensifs ²⁾ : n=8	2282	1445	3001	1552	2837
Biomasse microbienne (FE-N)	[mg kg ⁻¹ MS du sol]				
Terres assolées ¹⁾ : n=220	78	25	231	59	107
Terres assolées ²⁾ : n=32	150	60	379	105	197
Herbages extensifs ²⁾ : n=8	573	344	712	457	616
Herbages intensifs ²⁾ : n=8	536	346	683	407	655
Respiration basale CO₂	[mg CO ₂ -C kg ⁻¹ MS du sol h ⁻¹]				
Terres assolées ¹⁾ : n=219	0,493	0,185	1,136	0,394	0,638
Terres assolées ²⁾ : n=32	0,452	0,226	1,382	0,392	0,689
Herbages ³⁾ : n=68	0,980	0,330	2,500	0,710	1,200
Herbages extensifs ²⁾ : n=8	1,597	1,008	1,976	1,210	1,820
Herbages intensifs ²⁾ : n=8	1,590	0,923	1,725	1,286	1,654
Rapport C_{mic}/C_{org}	[mg C _{mic} g ⁻¹ C _{org}]				
Terres assolées ¹⁾ : n=219 (SIR)	27,1	6,5	52,0	23,3	31,0
Terres assolées ²⁾ : n=32 (SIR)	27,7	19,0	40,7	21,2	30,9
Terres assolées ⁴⁾ : n=98 (FE-C)	23,8	4,5	39,7	21,3	28,2
Herbages ³⁾ : n=151 (SIR)	27,3	14,1	60,0	23,3	34,0
Herbages extensifs ²⁾ : n=8 (SIR)	26,4	17,7	35,9	20,0	34,5
Herbages intensifs ²⁾ : n=8 (SIR)	34,1	28,5	47,7	29,4	39,6
Quotient métabolique qCO₂ (SIR)	[mg CO ₂ -C g ⁻¹ C _{mic}]				
Terres assolées ¹⁾ : n=220	1,05	0,71	1,94	0,92	1,22
Terres assolées ²⁾ : n=32	1,06	0,78	1,76	0,97	1,19
Herbages ³⁾ : n=68	1,13	0,70	2,14	0,91	1,32
Herbages extensifs ²⁾ : n=8	1,21	0,73	1,80	0,90	1,51
Herbages intensifs ²⁾ : n=8	1,02	0,74	1,17	0,91	1,10
Minéralisation de l'azote	[mg N _{min} kg ⁻¹ MS du sol 24 h ⁻¹]				
Terres assolées ¹⁾ : n=219	1,22	0,62	2,73	1,00	1,42
Biomasse microbienne (ATP)	[ng g ⁻¹ MS du sol]				
Terres assolées ⁵⁾ : n=135	926	102	4354	664	1498
Terres assolées ⁶⁾ : n=136	775	102	4354	522	1179
Herbages ⁵⁾ : n=66	2070	541	5834	1339	2964
Herbages ⁶⁾ : n=67	1666	541	5087	1218	2629
Minéralisation du Carbone (Min.-C)	[µg MO g ⁻¹ MS du sol 15 jours ⁻¹] (MO = matière organique)				
Terres assolées ⁵⁾ : n= 35	633	496	1975	483	920
Terres assolées ⁶⁾ : n= 36	624	171	1744	497	898
Herbages ⁵⁾ : n=66	1451	446	3878	1236	1897
Herbages ⁶⁾ : n=67	1558	626	3428	1274	1945

Les données proviennent de diverses études menées en Suisse. 1) Oberholzer et al. 1999; 2) Oberholzer et al. 2007; 3) Oberholzer non publié; 4) Brunner et al. 1999; 5) Rossier et al. 2003; 6) Rossier et al. 2007.

4.3.2 Mycorhizes

Pour le moment, il y a encore trop peu de données pour pouvoir définir des valeurs de comparaison pour le paramètre Potentiel infectieux mycorrhizogène.

4.3.3 Paramètres faunistiques

Les valeurs de comparaison sont valables pour les biomasses lombriciennes des sols aux caractéristiques suivantes :

- herbages (sols non labourés pendant au moins 10 ans);
- teneur en humus de 2 à 15%;
- situés sur le Plateau Suisse (entre 400 et 800 m d'altitude, précipitations < 1200 mm).

La composition spécifique de la population lombricienne typique à chaque région est évaluée à l'aide des cartes de distribution de Cuendet et al. (1997).

Les biomasses du peuplement total et des quatre groupes écomorphologiques sont interprétées à l'aide des valeurs de comparaison du tableau 2.

Tab. 2: Valeurs de comparaison pour la biomasse lombricienne dans les sols d'herbages (en g m⁻² et %).

*) il peut manquer l'un ou l'autre groupe pour des raisons zoogéographiques

Source des données: Cuendet et al. 1997.

	Médiane	Minimum	Maximum	Quartile inférieur	Quartile supérieur
Biomasse lombricienne, herbages	[g m ⁻²]				
Toutes les espèces	301	130	515	250	400
Espèces épigées	4	1	20	1	9
Espèces endogées	61	10	171	37	92
Total des espèces anéciques	229	73	497	173	309
- Lumbricus anéciques	105	*	220	63	149
- Nicodrilus anéciques	121	*	365	75	198
Biomasse lombricienne, herbages	[%]				
Espèces épigées	2	1	7	1	4
Espèces endogées	22	2	50	13	30
Total des espèces anéciques	76	48	98	67	85
- Lumbricus anéciques	33	*	70	21	44
- Nicodrilus anéciques	43	*	92	27	60

Remarque : comme les valeurs de comparaison données ici ont été déterminées à l'aide d'une méthode combinant l'extraction au formol et celle manuelle, les valeurs obtenues par d'autres méthodes ne sont que partiellement comparables.

4.4 Valeurs de référence

Avant d'évaluer les paramètres microbiens d'un site à l'aide de valeurs de référence spécifiques il faut examiner le pH (CaCl_2) et la teneur en carbone organique (C_{org}) ou humus ($= 1.72 \times C_{\text{org}}$) du site étudié ainsi que l'évolution de ces paramètres: il s'agit en effet de vérifier, à l'aide de sources appropriées (valeurs cibles DBF-GCH pour le pH, valeurs cibles ou de comparaison pour la teneur en C_{org}), si les valeurs sont basses en raison du mode d'exploitation du sol. Le cas échéant, il s'agira d'intégrer ce facteur dans l'évaluation globale du site. Si les valeurs du pH ou les teneurs en C_{org} ont été perturbées par l'exploitation, il faut en tenir compte lors de l'interprétation des paramètres microbiens. Sinon, la comparaison avec des valeurs indicatives mène à de fausses conclusions. L'influence des variations du pH et de la teneur en C_{org} sur la valeur de référence peut être estimée à l'aide de la formule explicite ci-dessous.

4.4.1 Paramètres microbiens

Les données disponibles pour les paramètres pédomicrobiologiques Biomasse microbienne (SIR, FE et ATP), Respiration basale et Minéralisation du carbone ont permis de mettre au point des modèles pour calculer des valeurs de référence spécifiques aux sites. Pour le moment, ces modèles s'appliquent au plateau Suisse et aux sols utilisés comme terres assolées (et comme herbages pour la biomasse microbienne SIR et ATP ainsi que la minéralisation du carbone).

Principe

Les données mesurées sur un site sont évaluées à l'aide d'une valeur de référence spécifique. Pour déterminer cette valeur de référence, il faut connaître différentes caractéristiques pédophysiques et pédochimiques du site en question. La valeur de référence peut se calculer à l'aide d'une équation de régression. Les auteurs mettent à disposition un programme Excel qui facilite les calculs.

Pour simplifier le travail d'interprétation, on peut déduire les valeurs de référence de diagrammes spécifiques ou des tableaux correspondants (voir annexe). Notons toutefois que les valeurs données dans les diagrammes et les tableaux sont à utiliser avec prudence, car les classes et les valeurs de chaque classe utilisées pour le calcul ont été définies de manière empirique par des experts.

A) Calcul

La valeur à laquelle il faut s'attendre pour un site précis, soit la valeur spécifique de ce site, est calculée à l'aide de l'équation de régression. Cette valeur dépend des propriétés physico-chimiques du sol, notamment de sa teneur en argile et, en partie, de sa teneur en sable, de son pH (CaCl_2) et de sa teneur en C_{org} ou humus. Ces facteurs entrent dans les différentes équations de régression à des fréquences diverses. Ces paramètres de base doivent donc être connus.

La valeur de référence peut soit être calculée à l'aide de son équation de régression, soit être tirée du diagramme des valeurs de référence ou du tableau annexé.

Champ d'application des valeurs de référence modélisées

Les valeurs de référence modélisées pour la biomasse microbienne SIR et FE ainsi que pour la respiration basale CO_2 s'appliquent aux sols ayant une teneur en argile de 10 à 40%, un pH (CaCl_2) de 4,3 à 7,5 et une teneur en C_{org} de 1 à 4%.

Les valeurs de référence modélisées pour la biomasse microbienne ATP et pour la minéralisation du carbone s'appliquent aux sols ayant une teneur en argile de 8 à 60% et une teneur en humus de 1 à 20%.

Equations de régression pour les divers paramètres

- a) **Biomasse microbienne SIR, terres assolées**
 $\ln(\text{SIR}) = 3,58 + 0,823 \ln(\text{C}_{\text{org}}) + 0,154 \text{ pH} + 0,311 \ln(\text{argile}) + 0,005 (\text{sable})$
- b) **Biomasse microbienne SIR, herbages**
 $\ln(\text{SIR}) = 3,606 + 0,916 \ln(\text{C}_{\text{org}}) + 0,2848 \text{ pH} + 0,17 \ln(\text{argile})$
- c) **Biomasse microbienne FE-C, terres assolées**
 $\ln(\text{FE}) = 4,70 + 0,963 \ln(\text{C}_{\text{org}}) + 0,0637 \text{ pH} + 0,21 \ln(\text{argile}) + 0,0008 (\text{sable})$
- d) **Respiration basale CO₂, terres assolées [Unité de mesure: mg CO₂ kg⁻¹ MS du sol 24 h⁻¹]**
 $\ln(\text{CO}_2) = 2,697 + 0,625 \ln(\text{C}_{\text{org}}) + 0,199 \text{ pH} - 0,146 \ln(\text{argile}) - 0,0009 (\text{sable})$
- e) **Biomasse microbienne ATP, terres assolées**
 $\ln(\text{ATP}) = 1,5571 + 1,0826 \ln(\text{argile})$
- f) **Biomasse microbienne ATP, herbages**
 $\ln(\text{ATP}) = 2,1854 + 0,7697 \ln(\text{argile})$
- g) **Minéralisation du carbone, terres assolées**
 $\ln(\text{Min.-C}) = 2,4953 + 0,7601 \ln(\text{humus})$
- h) **Minéralisation du carbone, herbages**
 $\ln(\text{Min.-C}) = 2,6741 + 0,7476 \ln(\text{humus})$

Source des données pour la modélisation des valeurs de référence a) à d)

- Oberholzer et al. 1999: Untersuchungen der FAL zur Definition typischer Bereiche bodenmikrobiologischer Kennwerte in Abhängigkeit von chemisch-physikalischen Bodeneigenschaften.
- Oberholzer et al. 2007: Bodenmikrobiologische Kennwerte: Erfassung des Zustands landwirtschaftlicher Böden im NABO-Referenzmessnetz anhand biologischer Parameter (NABObio).

Source des données pour la modélisation des valeurs de référence e) à h)

- Rossier et al. 2007: Réseau fribourgeois d'observation des sols (FRIBO).

Evaluation

La valeur mesurée est comparée à la valeur de référence déterminée individuellement pour un site précis, puis évaluée. Les intervalles de confiance à 95% et 67% constituent les plages de référence du schéma d'évaluation. Les valeurs considérées comme « normales » sont celles qui se trouvent dans l'intervalle de confiance à 67%. Au-dessus, elles sont « élevées » et au-dessous, « faibles ». Les valeurs supérieures à l'intervalle de confiance à 95% sont considérées comme « très élevées », les valeurs inférieures comme « très faibles ».

B) Diagrammes des valeurs de référence

Ces diagrammes constituent la représentation graphique des modèles de valeurs de référence (diagrammes en boîte) pour des classes de sol définies. Ils permettent une lecture facile de la valeur de référence spécifique d'un site et de sa variabilité.

Les données de base des diagrammes des valeurs de référence sont présentées en annexe sous forme de tableaux.

Pour réaliser ces diagrammes, on définit des classes pour chacun des facteurs qui influencent le paramètre considéré (chaque classe correspondant à une plage de valeurs que peut prendre le facteur), on définit quelle valeur de chaque classe sera utilisée pour le calcul, puis, sur cette base, on établit à l'aide de l'équation de régression correspondante les diagrammes en boîte (boxplots) pour toutes les combinaisons de ces classes.

Facteurs influençant les paramètres biomasse microbienne SIR et FE et respiration basale:

Les critères utilisés pour la classification des trois facteurs Teneur en C_{org} , pH ($CaCl_2$) et Teneur en argile sont représentés dans le tableau 3. Si la teneur en sable entre dans l'équation de régression, on a alors utilisé pour ce facteur une valeur typique de la classe granulométrique définie sur la base de la teneur en argile (pour les sols sableux: 40% de sable, pour les sols limoneux: 20% de sable et pour les sols argileux: 10% de sable).

Tab. 3: Critères utilisés pour la classification des facteurs Teneur en C_{org} , pH ($CaCl_2$) et Teneur en argile pour les paramètres Biomasse microbienne SIR et FE et Respiration basale.

Les classes et leur dénomination sont inspirées du guide de cartographie des sols de la FAL.

En italique: classes non couvertes par le modèle de régression.

Facteur	Plage de valeurs	Code	Dénomination
Teneur en C_{org} [%]	0 - 1,2	1	Pauvre en humus
	1,2 - 2,9	2	Faiblement humifère
	3,0 - 5,9	3	Humifère
	6,0 - 11,9	-	<i>Riche en humus</i>
	> 11,9	-	<i>Très riche en humus</i>
pH ($CaCl_2$)	< 6,7	1	Acide à neutre
	> 6,7	2	Alcalin
Teneur en argile [%]	0 - 10	-	<i>Sols sableux</i>
	10 - 30	2	Sols limoneux
	> 30	3	Sols argileux

Facteurs influençant les paramètres biomasse microbienne ATP et minéralisation du carbone:

Les critères utilisés pour la classification des deux facteurs teneur en humus et teneur en argile sont représentés dans le tableau 4.

Tab. 4: Critères utilisés pour la classification des facteurs Teneur en humus et Teneur en argile pour les paramètres Biomasse microbienne ATP et Minéralisation du carbone.

Les classes et leur dénomination sont inspirées du guide de cartographie des sols de la FAL.

Paramètre	Plage de valeurs	Code	Dénomination
Teneur en humus [%]	0 - 1,9	1	Pauvre en humus
	2,0 - 4,9	2	Faiblement humifère
	5,0 - 9,9	3	Humifère
	10 - 19,9	4	Riche en humus
	> 19,9	-	<i>Tourbeux</i>
Teneur en argile [%]	0 - 10	1	Sols sableux
	10 - 20	2	Sols sablo-limoneux
	20 - 30	3	Sols limoneux
	> 30	4	Sols argileux

Voici les diagrammes des valeurs de référence existants:

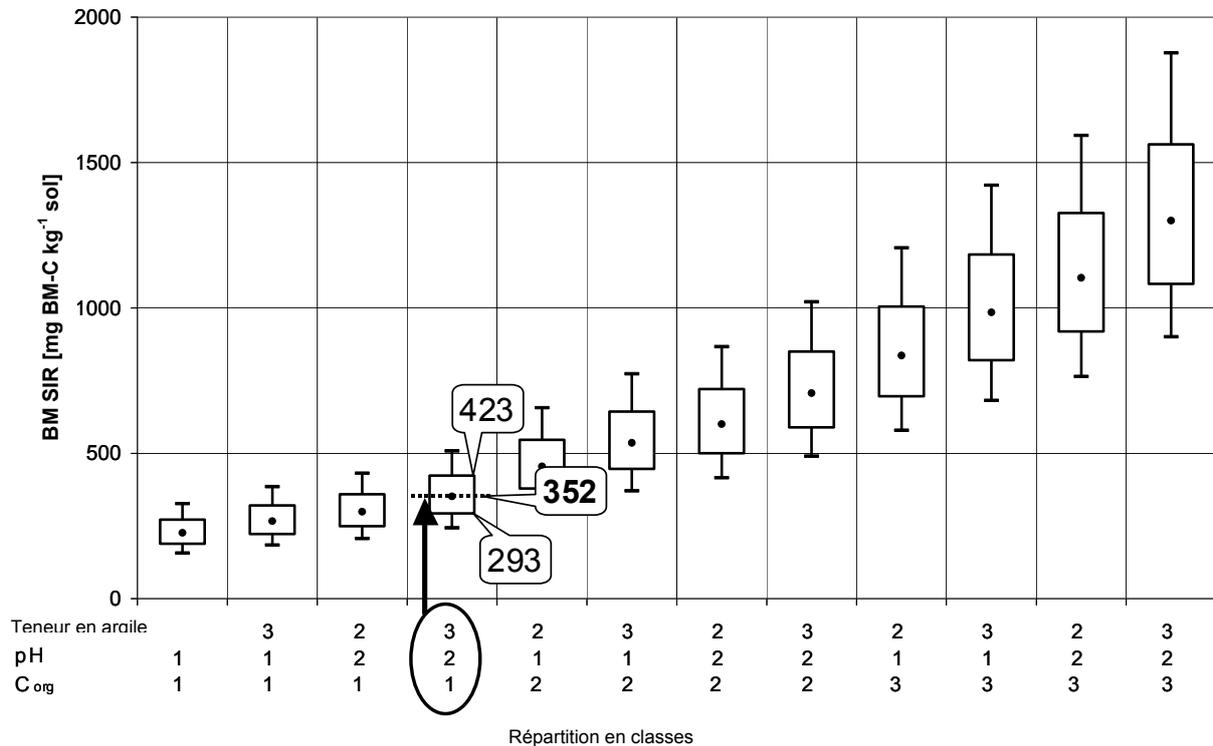


Fig. 1: Valeurs de référence pour la **biomasse microbienne SIR**, utilisation: **terres assolées**.

Légende: cercle = valeur de référence, box = intervalle de confiance à 67% de la valeur de référence, moustaches = intervalle de confiance à 95% de la valeur de référence.

Exemple de lecture

Dans un sol utilisé pour les grandes cultures présentant

- une teneur en argile > 30% classe teneur en argile 3
- un pH > 6,7 classe pH 2
- une teneur en C_{org} < 1,2% classe C_{org} 1

il faut s'attendre à 352 mg BM-C kg⁻¹ sol de biomasse microbienne SIR (intervalle de confiance à 67% de 293 à 423 mg BM-C kg⁻¹ sol).

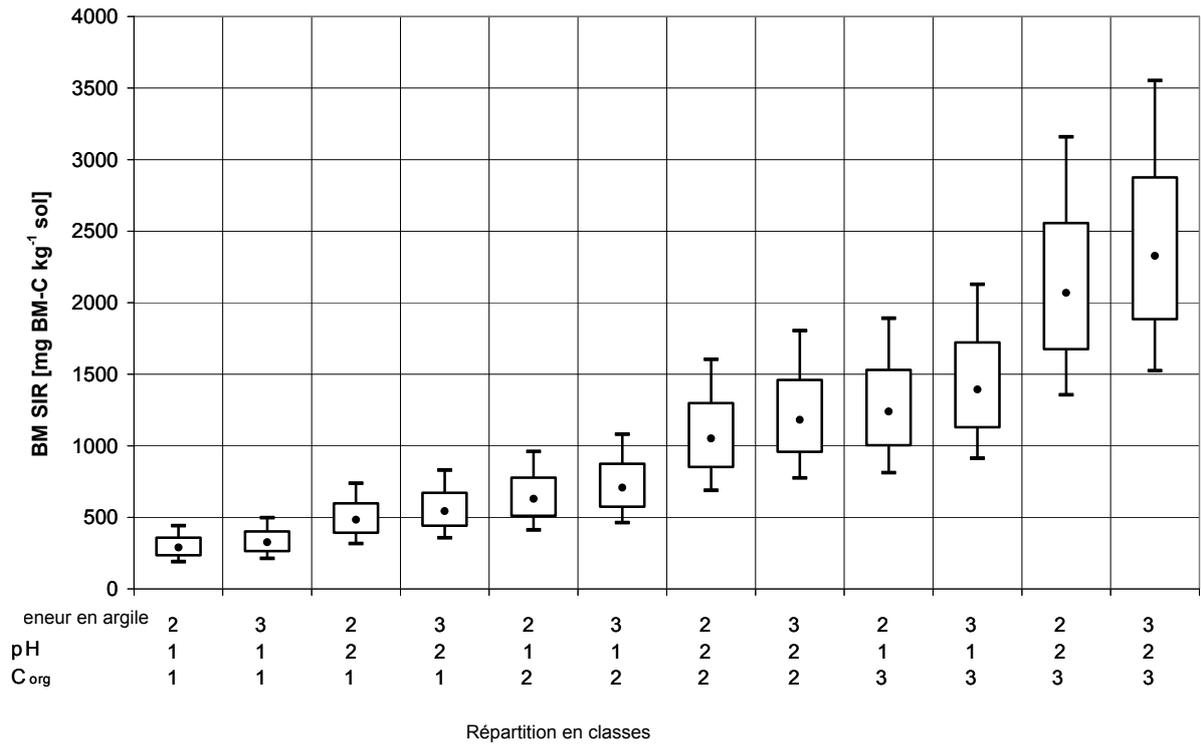


Fig. 2: Valeurs de référence pour la **biomasse microbienne SIR**, utilisation: **herbages**.
 Légende: cercle = valeur de référence, box = intervalle de confiance à 67% de la valeur de référence, moustaches = intervalle de confiance à 95% de la valeur de référence.

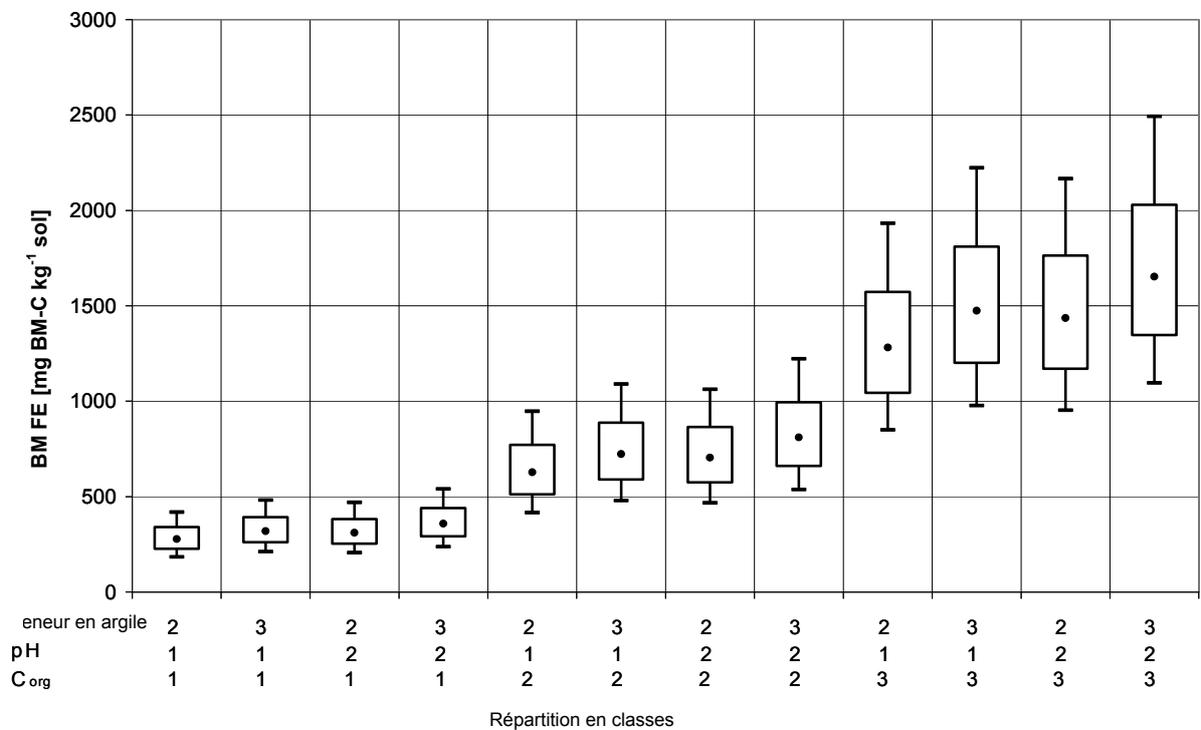


Fig. 3: Valeurs de référence pour la **biomasse microbienne FE-C**, utilisation: **terres assolées**.
 Légende: cercle = valeur de référence, box = intervalle de confiance à 67% de la valeur de référence, moustaches = intervalle de confiance à 95% de la valeur de référence.

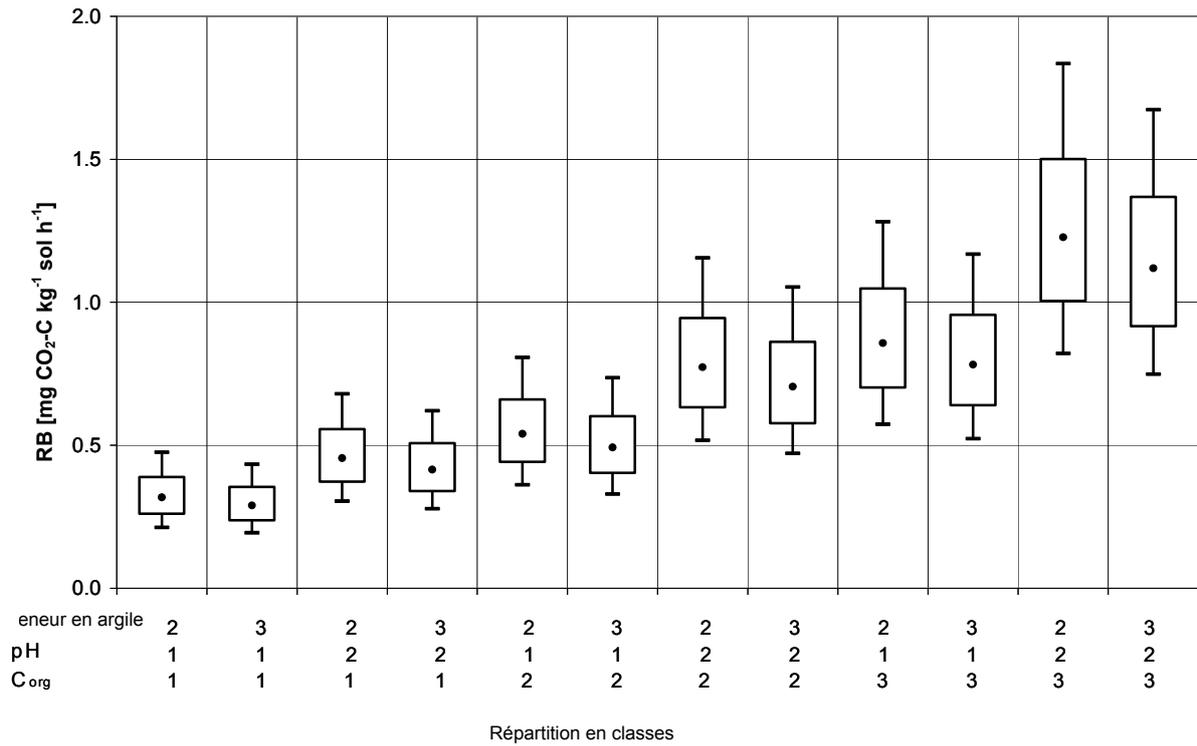


Fig. 4: Valeurs de référence pour la **respiration basale (RB)**, utilisation: **terres assolées**.
 Légende: cercle = valeur de référence, box = intervalle de confiance à 67% de la valeur de référence, moustaches = intervalle de confiance à 95% de la valeur de référence.

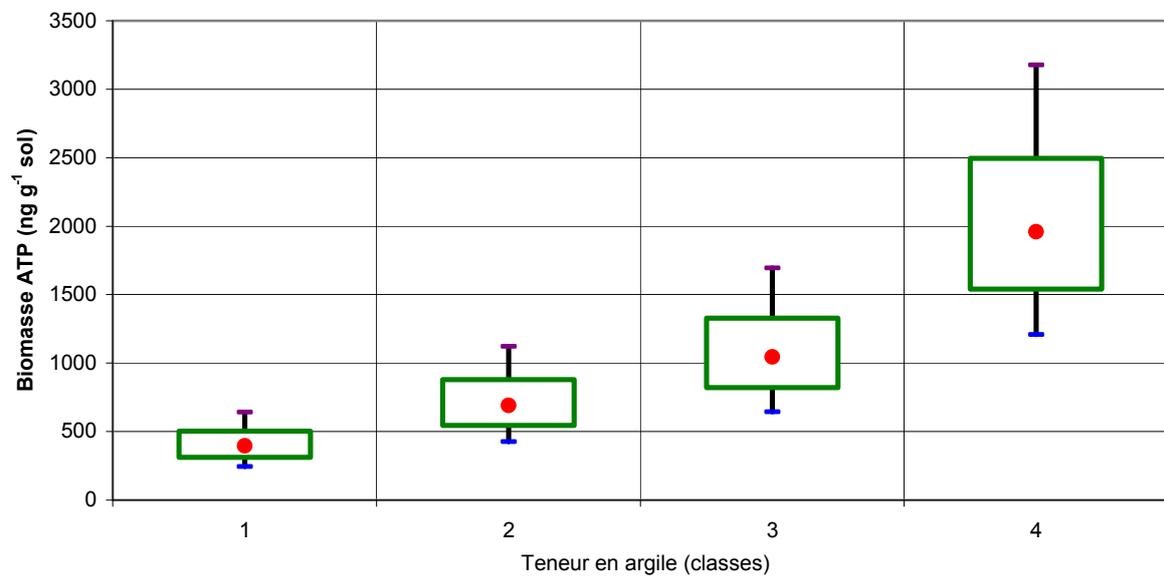


Fig. 5: Valeurs de référence pour la **biomasse microbienne ATP**, utilisation: **terres assolées**.
 Légende: cercle = valeur de référence, box = intervalle de confiance à 67% de la valeur de référence, moustaches = intervalle de confiance à 95% de la valeur de référence.

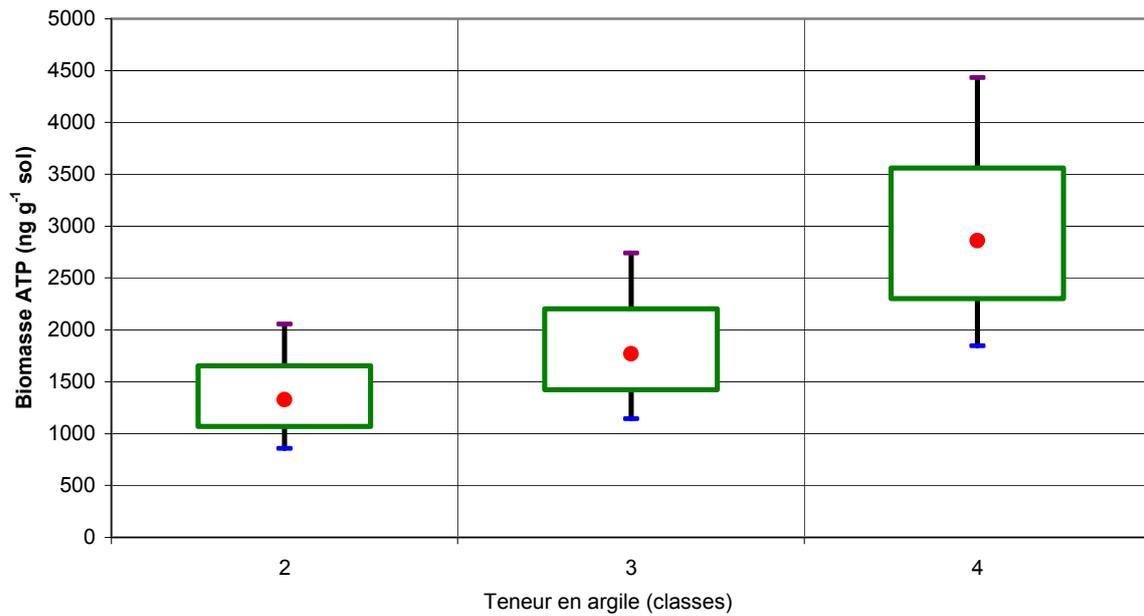


Fig. 6: Valeurs de référence pour la **biomasse microbienne ATP**, utilisation: **herbages**.
 Légende: cercle = valeur de référence, box = intervalle de confiance à 67% de la valeur de référence, moustaches = intervalle de confiance à 95% de la valeur de référence.

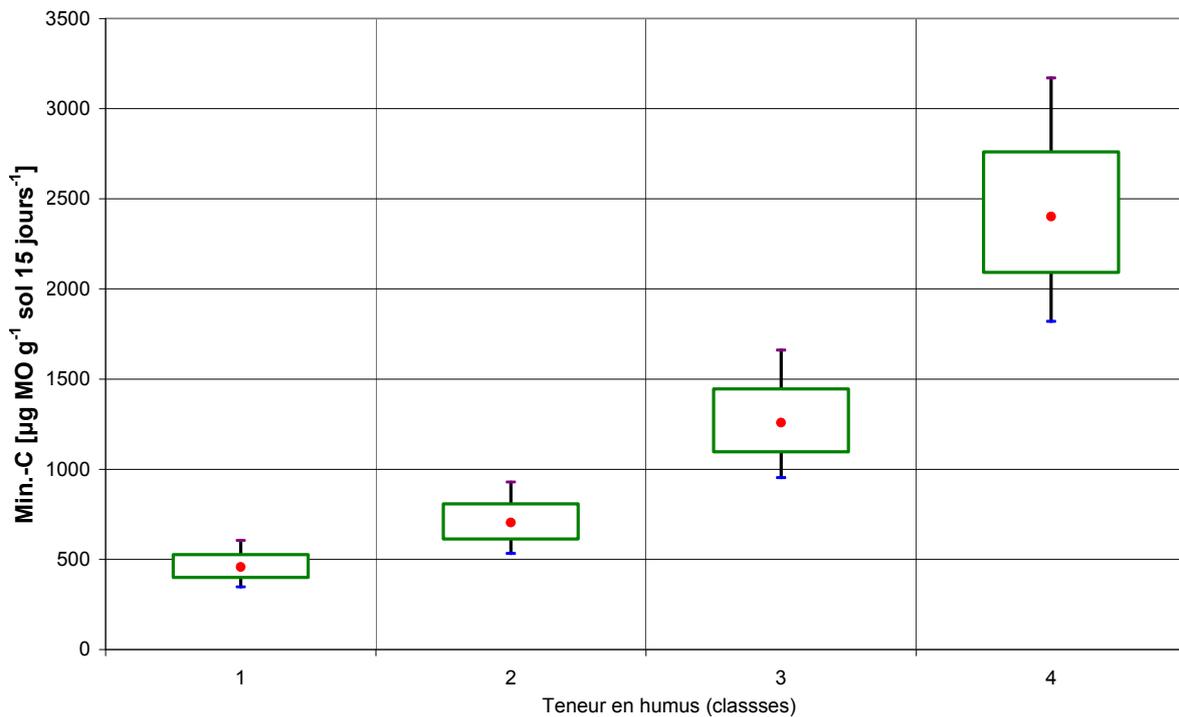


Fig. 7: Valeurs de référence pour la **minéralisation du carbone**, utilisation: **terres assolées**.
 Légende: cercle = valeur de référence, box = intervalle de confiance à 67% de la valeur de référence, moustaches = intervalle de confiance à 95% de la valeur de référence.

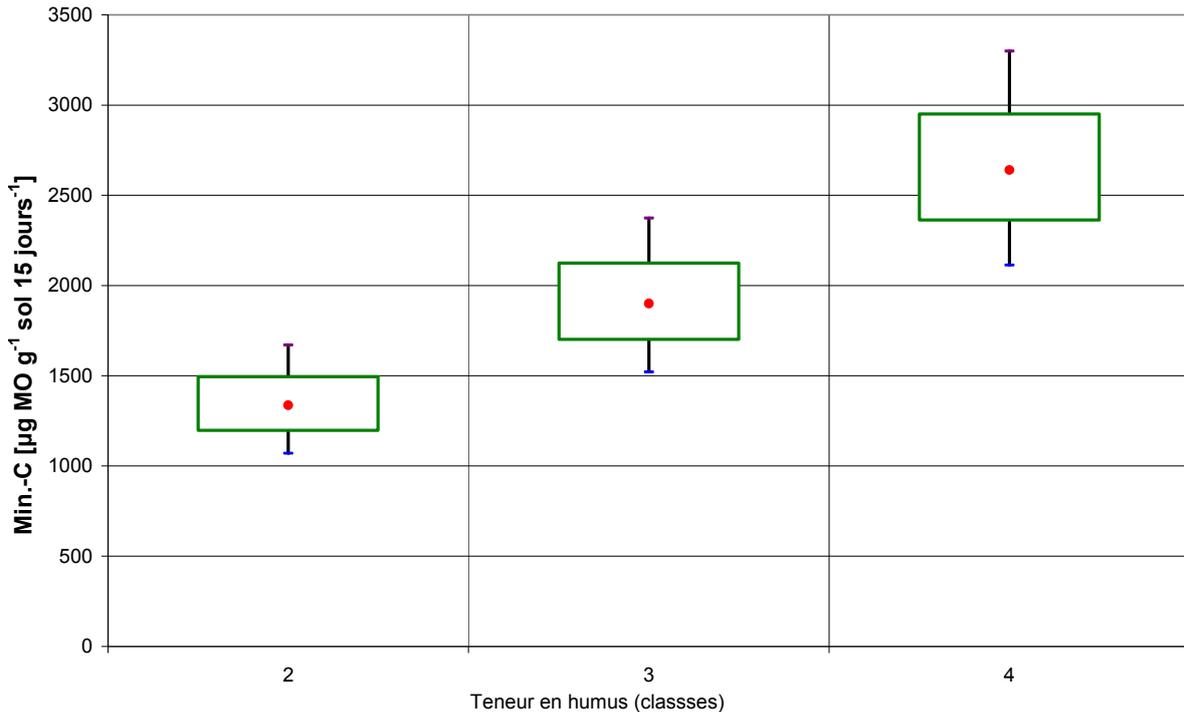


Fig. 8: Valeurs de référence pour la **minéralisation du carbone**, utilisation: **herbages**.
 Légende: cercle = valeur de référence, box = intervalle de confiance à 67% de la valeur de référence, moustache = intervalle de confiance à 95% de la valeur de référence.

4.4.2 Mycorhizes

Il n'existe à l'heure actuelle aucune valeur de référence pour le potentiel infectieux mycorhizogène.

4.4.3 Paramètres faunistiques

Il n'existe à l'heure actuelle aucune valeur de référence pour la population lombricienne.

5 Evaluation globale d'un site

Le relevé des paramètres pédobiologiques permet de caractériser un sol quant à son état biologique. Lorsque l'on interprète ces paramètres, il faut tenir compte du fait que les propriétés chimiques et physiques du sol ainsi que l'exploitation de celui-ci influencent la composition des espèces et l'activité des organismes vivant dans le sol. En conséquence, tant l'interprétation des paramètres pédobiologiques que l'évaluation globale de la fertilité du sol d'un site et la décision des mesures à prendre qui en découle impliquent de prendre en compte des aspects chimiques, physiques et agronomiques. Sans cette vue d'ensemble, il est impossible de percevoir ou d'évaluer l'état d'un site dans son ensemble, ni de solidement étayer les mesures qui s'imposent.

Le présent guide pour le domaine de la biologie du sol complète en ce sens les valeurs indicatives chimiques de l'OSol, les valeurs indicatives physiques proposées par la Société Suisse de pédologie (SSP 2004) et l'aide à l'exécution relative au relevé et à l'évaluation du compactage des sols (à paraître en 2009).

6 Bibliographie

- Anderson T.-H. et Domsch K.H. 1989: Ratios of microbial biomass carbon to total organic-C in arable soils. *Soil Biology and Biochemistry* 21, pp. 471 à 479.
- Brunner J., Jäggli F., Nievergelt J. et Peyer K. 1997: Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden, Kartieranleitung. Station fédérale de recherches en agroécologie et agriculture (FAL), Zurich-Reckenholz.
- Brunner T., Oberholzer H.-R., Bosshard C. et Mäder P. 1999: Bodenzustand und Mineralstoffgehalt von Winterweizen auf Biobetrieben in Abhängigkeit von der Umstellungszeit auf biologischen Landbau, Teilprojekt Bodenmikrobiologie. Institut de recherche de l'agriculture biologique (FiBL), Frick.
- Confédération Suisse: Ordonnance du 1^{er} juillet 1998 sur les atteintes portées aux sols (OSol) (état au 1^{er} juillet 2008). RS 814.12. Berne.
- Cuendet G., Stähli R. et Suter E. 1997: Peuplements lombriciens des prairies permanentes du Plateau Suisse. Rapport de synthèse. Cahier de l'environnement n° 291 sol, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Berne.
- Groupe de travail « Biologie du sol – application » (BSA) 1999: La biologie du sol et la protection des sols. Frick/Berne.
- Mäder P., Nowack K. et Alföldi, T. 1994: Literaturstudie zur Wahl der Methode für die Schätzung der mikrobiellen Biomasse im Boden sowie zur zeitlichen und räumlichen Variabilität der mikrobiellen Biomasse, der Bodenatmung und des Zelluloseabbaus. Frick.
- Oberholzer H.-R., Rek J., Weisskopf P. et Walther U. 1999: Evaluation of soil quality by means of microbiological parameters related to the characteristics of individual arable sites. *Agribiological Research* 52 (2), pp. 113 à 125.
- Oberholzer H.-R., Scheid S., Schwab P., Bonvicini A., Müller S. et Brunner H. 2006: Langzeitbeobachtung von physikalischen und biologischen Bodeneigenschaften – Pilotprojekt LAZBO – Teil 3 Bodenmikrobiologische Untersuchungen. Agroscope FAL Reckenholz, Station fédérale de recherches en agroécologie et agriculture, Zurich.
- Oberholzer H.-R. et Scheid S. 2007: Bodenmikrobiologische Kennwerte. Erfassung des Zustands landwirtschaftlicher Böden im NABO-Referenzmessnetz anhand biologischer Parameter (NABObio). *Connaissance de l'environnement* n° 0723. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne.
- Oberholzer H.-R., non publié: adresse de l'auteur: Oberholzer Hans-Rudolf, Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART), Reckenholzstrasse 191, 8046 Zurich. E-mail: hansrudolf.oberholzer@art.admin.ch.
- Rossier N. et Dessureault-Rompré J. 2003: Evolution des paramètres biologiques des sols agricoles fribourgeois. Réseau fribourgeois d'observation des sols agricoles (FRIBO) 1987-2001. Posieux.
- Rossier N., Altermath J. et Niggli T. 2007: Réseau fribourgeois d'observation des sols (FRIBO) 1997-2006. Posieux.
- Schwab, P., Weisskopf, P., Oberholzer, H., Scheid, S. & Berli, M., 2006c: Langzeitbeobachtung von physikalischen und biologischen Bodeneigenschaften – Pilotprojekt LAZBO – Teil 4 Folgerungen, Empfehlungen und Ausblick für die Langzeitbeobachtung. Agroscope FAL Reckenholz, Station fédérale de recherches en agroécologie et agriculture, Zurich. 27 pp.
- Société Suisse de pédologie (SSP) 2004: Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen. LmZ, Zollikofen.
- Station fédérale de recherches en chimie agricole et sur l'hygiène de l'environnement (FAC) 1991: Wegleitung zur Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit. FAC, Liebefeld-Berne.
- Stations de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon (ART) et Changins-Wädenswil (ACW) 1996: Méthodes de référence des stations fédérales de recherches agronomiques, volume 2 (actualisé chaque année). Commande: ART, Zurich.
- Von Lützw M., Leifeld J., Kainz M., Kögel-Knabner I. et Munch J.C. 2002: Indications for soil organic matter quality in soils under different management. *Geoderma* 105, pp. 243-258.

7 ANNEXE

Les tableaux de cette annexe contiennent les valeurs calculées à l'aide de leur équation de régression respective (chap. 4.4.1) qui servent de base à l'élaboration des diagrammes des valeurs de référence (chap. 4.4.1, fig. 1-4). Source des données pour les tableaux A1 à A4: Oberholzer et al. 1999: Untersuchungen der FAL zur Definition typischer Bereiche bodenmikrobiologischer Kennwerte in Abhängigkeit von chemisch-physikalischen Bodeneigenschaften. Oberholzer et al. 2007: Bodenmikrobiologische Kennwerte: Erfassung des Zustands landwirtschaftlicher Böden im NABO-Referenzmessnetz anhand biologischer Parameter (NABObio). Source des données pour les tableaux A5 à A8: Rossier et al. 2007: Réseau fribourgeois d'observation des sols (FRIBO).

Tab. A1: Valeur de référence et intervalles de confiance (IC) à 67% et à 95% pour des classes de sol définies, pour la **biomasse microbienne SIR**, utilisation: **terres assolées**.

Classe	C _{org} [%]	pH (CaCl ₂)	Argile [%]	BM (SIR)	BM (SIR)	BM (SIR)	BM (SIR)	BM (SIR)
				terres assolées	IC 95% inférieur	IC 67% inférieur	IC 67% supérieur	IC 95% supérieur
	[%]		[%]	[mg BM-C kg ⁻¹ sol]				
112	< 1,2	< 6,7	10-30	226	157	188	272	327
113			> 30	267	185	222	320	385
122		> 6,7	10-30	299	207	249	359	431
123			> 30	352	244	293	423	508
212	1,2 - 2,9	< 6,7	10-30	455	315	379	546	657
213			> 30	536	371	446	644	774
222		> 6,7	10-30	600	416	500	721	867
223			> 30	707	490	589	850	1021
312	3,0 - 5,9	< 6,7	10-30	836	579	696	1005	1207
313			> 30	985	682	820	1183	1422
322		> 6,7	10-30	1104	765	919	1326	1593
323			> 30	1300	901	1082	1562	1877

Tab. A2: Valeur de référence et intervalles de confiance (IC) à 67% et à 95% pour des classes de sol définies, pour la **biomasse microbienne SIR**, utilisation: **herbages**.

Classe	C _{org} [%]	pH (CaCl ₂)	Argile [%]	BM (SIR)	BM (SIR)	BM (SIR)	BM (SIR)	BM (SIR)
				herbages	IC 95% inférieur	IC 67% inférieur	IC 67% supérieur	IC 95% supérieur
	[%]		[%]	[mg BM-C kg ⁻¹ sol]				
112	< 1,2	< 6,7	10-30	290	190	235	358	442
113			> 30	326	214	264	403	497
122		> 6,7	10-30	484	317	392	598	738
123			> 30	544	357	441	672	831
212	1,2 - 2,9	< 6,7	10-30	630	413	510	778	961
213			> 30	708	464	573	875	1081
222		> 6,7	10-30	1051	689	851	1299	1604
223			> 30	1182	775	957	1461	1805
312	3,0 - 5,9	< 6,7	10-30	1240	812	1003	1531	1892
313			> 30	1394	913	1128	1722	2128
322		> 6,7	10-30	2070	1356	1675	2557	3159
323			> 30	2328	1525	1884	2876	3553

Tab. A3: Valeur de référence, intervalles de confiance (IC) à 67% et à 95 % pour des classes de sol définies, pour la biomasse microbienne FE-C, utilisation: terres assolées.

Classe	C _{org} [%]	pH (CaCl ₂)	Argile [%]	BM (FE-C) terres assolées	BM (FE-C)	BM (FE-C)	BM (FE-C)	BM (FE-C)
					IC 95%	IC 67%	IC 67%	IC 95%
					[mg BM-C kg ⁻¹ sol]			
					inférieur	inférieur	supérieur	supérieur
112	< 1,2	< 6,7	10-30	278	184	226	341	419
113			> 30	320	212	260	392	482
122		> 6,7	10-30	311	206	254	382	470
123			> 30	358	238	292	440	540
212	1,2 - 2,9	< 6,7	10-30	628	417	512	772	947
213			> 30	723	479	589	888	1090
222		> 6,7	10-30	704	467	574	865	1062
223			> 30	810	537	660	995	1222
312	3,0 - 5,9	< 6,7	10-30	1281	850	1043	1573	1932
313			> 30	1474	978	1201	1810	2223
322		> 6,7	10-30	1436	952	1170	1764	2166
323			> 30	1653	1096	1346	2030	2492

Tab. A4: Valeur de référence, intervalles de confiance (IC) à 67% et à 95% pour des classes de sol définies, pour la **respiration basale CO₂**, utilisation: terres assolées.

Classe	C _{org} [%]	pH (CaCl ₂)	Argile [%]	RB CO ₂ terres assolées	RB CO ₂	RB CO ₂	RB CO ₂	RB CO ₂
					IC 95%	IC 67%	IC 67%	IC 95%
					[mg CO ₂ -C kg ⁻¹ sol h ⁻¹]			
					inférieur	inférieur	supérieur	supérieur
112	< 1,2	< 6,7	10-30	0,318	0,213	0,260	0,389	0,475
113			> 30	0,290	0,194	0,237	0,354	0,433
122		> 6,7	10-30	0,455	0,304	0,372	0,556	0,680
123			> 30	0,415	0,278	0,339	0,507	0,620
212	1,2 - 2,9	< 6,7	10-30	0,540	0,361	0,442	0,660	0,807
213			> 30	0,492	0,329	0,403	0,602	0,736
222		> 6,7	10-30	0,773	0,517	0,632	0,945	1,155
223			> 30	0,705	0,471	0,576	0,862	1,053
312	3,0 - 5,9	< 6,7	10-30	0,857	0,574	0,701	1,048	1,282
313			> 30	0,782	0,523	0,639	0,956	1,169
322		> 6,7	10-30	1,227	0,821	1,004	1,501	1,835
323			> 30	1,119	0,749	0,915	1,368	1,673

Tab. A5: Valeur de référence, intervalles de confiance (IC) à 67% et à 95% pour des classes de sol définies, pour la **biomasse microbienne ATP**, utilisation: **terres assolées**.

Classe	Argile [%]	BM (ATP) terres as- solées	BM (ATP) IC 95% inférieur	BM (ATP) IC 67% inférieur	BM (ATP) IC 67% supérieur	BM (ATP) IC 95% supérieur
	[%]	[ng ATP g ⁻¹ sol]				
1	0 - 10	395	244	310	504	641
2	10 - 20	691	426	543	880	1121
3	20 - 30	1044	644	820	1330	1694
4	> 30	1959	1207	1538	2495	3178

Tab. A6: Valeur de référence, intervalles de confiance (IC) à 67% et à 95% pour des classes de sol définies, pour la **biomasse microbienne ATP**, utilisation: **herbages**.

Classe	Argile [%]	BM (ATP) herbages	BM (ATP) IC 95% inférieur	BM (ATP) IC 67% inférieur	BM (ATP) IC 67% supérieur	BM (ATP) IC 95% supérieur
	[%]	[ng ATP g ⁻¹ sol]				
2	10 - 20	1328	857	1067	1653	2057
3	20 - 30	1769	1142	1421	2202	2741
4	> 30	2860	1846	2298	3561	4431

Tab. A7: Valeur de référence, intervalles de confiance (IC) à 67% et à 95% pour des classes de sol définies, pour la **minéralisation du carbone**, utilisation: **terres assolées**.

Classe	humus [%]	Min.-C terres assolées	Min.-C IC 95% inférieur	Min.-C IC 67% inférieur	Min.-C IC 67% supérieur	Min.-C IC 95% supérieur
	[%]	[µg MO g ⁻¹ sol 15 jours ⁻¹]				
1	< 2	458	347	398	526	604
2	2 – 4,9	704	533	613	808	929
3	5,0 – 9,9	1258	953	1095	1445	1661
4	10 – 19,9	2402	1820	2091	2759	3170

Tab. A8: Valeur de référence, intervalles de confiance (IC) à 67% et à 95% pour des classes de sol définies, pour la **minéralisation du carbone**, utilisation: **herbages**.

Classe	humus [%]	Min.-C herbages	Min.-C IC 95% inférieur	Min.-C IC 67% inférieur	Min.-C IC 67% supérieur	Min.-C IC 95% supérieur
	[%]	[µg MO g ⁻¹ sol 15 jours ⁻¹]				
2	2 – 4,9	1337	1070	1196	1495	1670
3	5,0 – 9,9	1900	1521	1700	2124	2374
4	10 – 19,9	2640	2114	2362	2951	3298