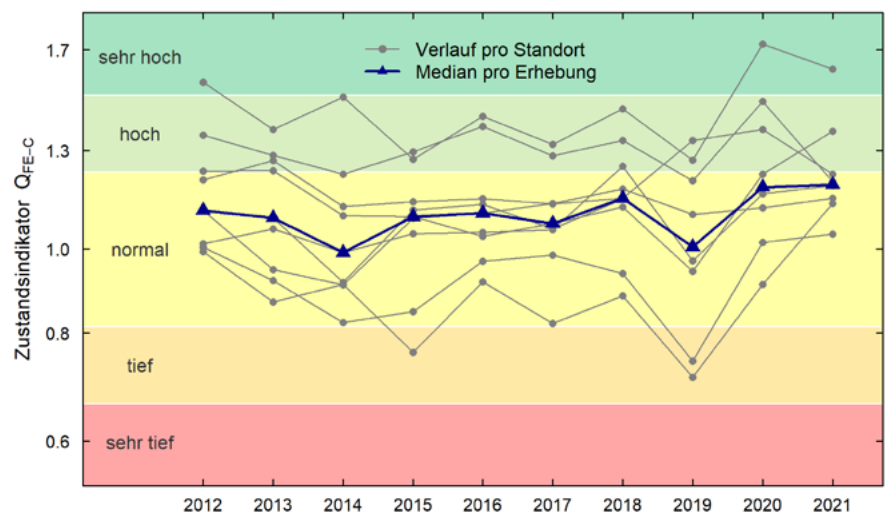


Aide au travail pour le recensement et l'évaluation de paramètres biologiques du sol



Mentions légales

Editeur	Cercle Sol : Groupe de travail Vollzug Bodenbiologie/Biologie du Sol–Application VBBio-BioSA, avec le soutien d'Agroscope
Auteurs	<i>Anna-Sofia Hug</i> , Qualité et utilisation du sol, Agroscope Reckenholz <i>Claudia Maurer</i> , Service spécialisé Sols du canton de Berne <i>Florian Gschwend</i> , Écologie moléculaire, Agroscope Reckenholz <i>Franco Widmer</i> , Écologie moléculaire, Agroscope Reckenholz <i>Gaby von Rohr</i> , Amt für Umwelt, Abteilung Boden Kanton Solothurn <i>Beat Frey</i> , Institut fédéral de recherches WSL, Birmensdorf <i>Janine Moll-Mielewczik</i> , Qualité et utilisation du sol, Agroscope Reckenholz
Proposition de citation	VBBio-BioSA (Ed.) 2025 : Arbeitshilfe zur Erhebung und Beurteilung bodenbiologischer Parameter.
Traduction	Ce rapport a été traduit de l'allemand vers le français avec deepl.
Photos de couverture	D'en haut à gauche dans le sens des aiguilles d'une montre : travaux sur le terrain pour le relevé des vers de terre (Service spécialisé Sols du canton de Berne, 2024), Prélèvement des échantillons composites pour les analyses de microbiologie et de biologie moléculaire (Agroscope, 2024), Indicateur d'état Q_{FE-C} de neuf sites de terre assolée NABO (Agroscope, 2023), Travaux de laboratoire de biologie moléculaire : Échantillons de sol dans le réactif d'extraction (Agroscope, 2013).



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF
Agroscope



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

Table des matières

Liste des abréviations	7
1 Introduction	8
1.1 Contexte	8
1.2 Objectif de l'aide au travail	8
1.3 Contexte législatif	9
1.4 Possibilités d'utilisation des paramètres biologiques du sol	10
1.5 Relevé des paramètres biologiques du sol en Suisse	11
2 Vue d'ensemble des paramètres	12
2.1 Sélection des paramètres	12
2.2 Paramètres microbiologiques	12
2.2.1 Biomasse microbienne (méthodes FE-C, ATP, quantité d'ADN, SIR)	12
2.2.2 Respiration basale	13
2.2.3 Minéralisation du C	13
2.2.4 Quotient métabolique qCO_2	13
2.2.5 Rapport biomasse microbienne-carbone/carbone organique C_{mic}/C_{org}	14
2.2.6 Diversité des bactéries et des champignons dans le sol	14
2.3 Paramètres faunistiques	15
2.3.1 Données sur la faune du sol	15
2.3.2 Communautés de vers de terre	15
3 Outils d'évaluation	16
3.1 Définition des valeurs de comparaison et de référence	16
3.2 Valeurs de comparaison de la microbiologie	16
3.3 Valeurs de comparaison de la macrofaune	19
3.3.1 Données disponibles	19
3.3.2 Communautés de vers de terre	19
3.3.3 Valeurs de comparaison de la biomasse et de l'abondance	19
3.4 Equations de valeurs de référence	20
– Equations de valeur de référence pour les terres assolées 0–20 cm (VBB/BSA, 2009 ; Oberholzer et al., 1999)	21
– Equations de valeur de référence pour les prairies permanentes 0–20 cm (Hug et Moll-Mielewczik, 2024)	21
– Equations de valeur de référence pour les prairies permanentes 0–10 cm (VBB/BSA, 2009 ; Oberholzer et al., 1999)	21
3.4.1 Indicateur d'état Q	22
4 Mesures à prendre	24
4.1 Standardisation des méthodes et du stockage des données	24
4.2 Bases d'évaluation	24
4.3 Élaboration d'indicateurs	25
4.4 Etude d'autres organismes du sol	25
4.5 Établissement de listes rouges et recensement des espèces invasives	25
4.6 Relevé exhaustif de l'état biologique des sols	26
4.7 Législation et mise en œuvre	26

5	Conclusion	27
	Remerciements	27
	Liste des figures	27
	Liste des tableaux	28
	Bibliographie	29
	Annexe	36
	Tableaux des valeurs de comparaison : Données réparties par réseaux de mesure	36
	Boxplots des valeurs de comparaison réparties par réseaux de mesure	43

Liste des abréviations

OFEV Office fédéral de l'environnement

RB Respiration basale ($\text{mg CO}_2\text{-C kg}^{-1} \text{ MS h}^{-1}$)

MBD Monitoring de la biodiversité en Suisse

OFAG Office fédéral de l'agriculture

BM FE-C biomasse microbienne (carbone) déterminée par la méthode d'extraction par fumigation ($\text{mg kg}^{-1} \text{ MS}$)

BM FE-N biomasse microbienne (azote), déterminée par la méthode d'extraction par fumigation ($\text{mg kg}^{-1} \text{ MS}$)

BM SIR biomasse microbienne (carbone) déterminée par la méthode de la respiration induite par le substrat ($\text{mg kg}^{-1} \text{ MS}$)

C_{org} carbone organique (%)

ADN acide désoxyribonucléique

FRIBO Réseau d'observation des sols du canton de Fribourg

KABO Observation cantonale des sols

NABO Observatoire nationale des sols

NABObio Suivi biologique des sols de l'Observatoire nationale des sols

CCSols Centre de compétence sur les sols

MO matière organique (comprend toutes les formes organiques du carbone du sol ; $\text{C}_{\text{org}} * 1.725$)

OTU Operational Taxonomic Unit, approche des espèces

Q indicateur d'état microbiologique

qC_{mic}/C_{org} rapport entre le carbone fixé par les microbes et le carbone organique ($\text{mg C}_{\text{mic}} \text{ g}^{-1} \text{ C}_{\text{org}}$)

qCO₂ quotient métabolique, rapport entre la respiration basale et la biomasse microbienne ($\text{mg CO}_2\text{-C g}^{-1} \text{ C}_{\text{mic}}$)

MS matière sèche de terre fine

OSol Ordonnance sur les atteintes portées aux sols

VBBio-BioSA Vollzug Bodenbiologie/Biologie du Sol – Application (groupe de travail)

1 Introduction

1.1 Contexte

Les organismes vivants du sol jouent un rôle indispensable pour la fertilité du sol et pour l'équilibre écologique. Ils jouent un rôle central dans le cycle des nutriments au sein des écosystèmes et donc dans l'ensemble de la chaîne alimentaire. Ils sont également co-responsables d'une structure du sol, qui favorise la croissance des plantes et qui permet de stocker ou d'infiltrer l'eau de pluie.

Les informations sur l'état et le développement de ces organismes sont donc importants. L'interprétation des données biologiques du sol recensées et leur communication aux politiciens, aux exploitants et aux profanes sont une étape importante et nécessaire, tant pour la science que pour l'application de la loi. Les premières bases ont été fournies par «Arbeitshilfe zur Anwendung und Interpretation bodenbiologischer Parameter» élaboré en 2009 par le groupe de travail Vollzug Bodenbiologie/Biologie du Sol–Application (VBB/BSA ; 2009). Depuis lors, la base de données permettant d'établir des valeurs de comparaison et de référence s'est considérablement élargie et les connaissances des méthodes d'observation à long terme se sont développées (Hug et al., 2021, Maurer et al., 2020 ; Hug et Moll-Mielewicz, 2024 ; FRIBO, 2024). En outre, l'application de méthodes de biologie moléculaire a également ouvert de nouvelles possibilités pour le suivi (Gschwend et al., 2018, 2021a, 2021b ; Donhauser et al., 2023 et Cuartero et al., 2024). C'est pourquoi le groupe de travail Vollzug Bodenbiologie/Biologie du Sol Application (VBBio-BioSA) a décidé de mettre à jour l'aide au travail.

Au cours des 15 dernières années, la perception des organismes vivant du sol a évolué. Aussi bien dans la Stratégie Sol Suisse (OFEV 2020) que dans l'évaluation des besoins pour un futur monitoring du sol (Gubler et al., 2020), le maintien de la biodiversité du sol a été reconnu comme un élément central des fonctions du sol. Dans le cadre des travaux de cartographie prévus, le centre de compétence Sol CCSol examine non seulement les paramètres chimiques et physiques, mais aussi le relevé des paramètres biologiques du sol. Pour la mise en œuvre et le contrôle de l'efficacité des mesures de politique environnementale, il est indispensable de disposer de valeurs de référence et de comparaison adaptés aux différents sites. Ainsi, dans le cadre de la révision prévue de l'ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol, 1998), l'introduction de valeurs de référence pour la biologie du sol est également discutée.

1.2 Objectif de l'aide au travail

L'aide au travail s'adresse en premier lieu aux personnes de l'administration, de la recherche et de la vulgarisation qui souhaitent relever et évaluer les paramètres biologiques du sol. L'aide au travail se veut un ouvrage de référence actualisé : il présente les méthodes de mesure établies et standardisées en Suisse et les bases d'évaluation existantes (valeurs de comparaison et de référence).

Ensuite, les étapes nécessaires au développement de méthodes robustes et standardisées de détection et d'évaluation des organismes du sol sont présentées. Cela concerne également les méthodes de biologie moléculaire, qui permettent notamment d'obtenir des informations sur la diversité de la vie du sol.

1.3 Contexte législatif

Ci-dessous, les bases légales et les objectifs stratégiques qui concernent la biologie du sol sont énumérés. Ils sont pertinents lors de l'élaboration de propositions de projets ou de la justification de la nécessité d'études biologiques du sol.

Loi sur la protection de l'environnement (LPE, RS 814.01, 1983, état au 1er janvier 2024) :

Art. 33

¹ «Les mesures visant à conserver à long terme la fertilité des sols en les protégeant des atteintes chimiques et biologiques sont arrêtées [...]»

Ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol, RS 814.12, 1998, état au 12 avril 2016) : 12. Avril 2016) :

Art. 1

«Afin de garantir à long terme la fertilité des sols, la présente ordonnance régit :

a. l'observation, la surveillance et l'évaluation des atteintes chimiques, biologiques et physiques portées aux sols ; [...]»

Art. 2

¹ «Le sol est considéré comme fertile :

a.³ 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; [...]»;

³ «On entend par atteintes biologiques aux sols les atteintes portées aux sols par des organismes, en particulier par des organismes génétiquement modifiés, pathogènes ou exotiques. [...]»

Art. 3

¹ «L'Office fédéral de l'environnement (OFEV) gère en collaboration avec l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG) un réseau national de référence pour l'observation des atteintes portées aux sols (NABO).

² L'OFEV informe les cantons et publie les résultats.»

Art. 4

¹ «Les cantons pourvoient à la surveillance des sols dans les régions où il est établi ou dans les régions où l'on peut craindre que des atteintes portées aux sols ne menacent leur fertilité.

² L'OFEV veille, avec l'OFAG, à ce que les cantons puissent disposer des bases techniques nécessaires à la surveillance des sols et conseille les cantons.»

Ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets (OLED, RS 814.600, 2015, état au 1er janvier 2024) :

Art. 1

«La présente ordonnance vise : a. à protéger les hommes, les animaux, les plantes et leurs biocénoses ainsi que les eaux, le sol et l'air contre les atteintes nuisibles ou incommodantes dues aux déchets ; [...]»

Stratégie Sols Suisse (2020) :

Dans la Stratégie Sols Suisse élaborée en 2020, les offices fédéraux de l'environnement, du développement territorial et de l'agriculture formulent l'objectif suivant dans le domaine «Agriculture» OA8 : «Pas de perte persistante de biodiversité et d'activité biologique du sol en raison de l'exploitation agricole.»

Pour atteindre l'OA8, les orientations stratégiques (OS) suivantes ont été formulées (p.37) :

OsA19 : «*Améliorer les informations disponibles sur la biodiversité et l'activité biologique des sols agricoles. Définir des valeurs cibles et des valeurs de référence pour la biodiversité du sol*»

OsA20 : «*Promouvoir les méthodes d'exploitation agricole permettant d'assurer une biocénose biologiquement active et typique pour la station.*»

OsA21 : «*Tenir compte de la biodiversité et de l'activité biologique du sol lors de la planification et de la délimitation de structures de mise en réseau écologique.*»

OsA22 : «*Appliquer de manière systématique les mesures permettant de réduire les émissions de substances, tel l'ammoniac, dues à l'agriculture.*»

Stratégie Biodiversité Suisse (2012) :

Objectifs stratégiques :

Objectif 1 : «*D'ici à 2020, les principes de la durabilité régissent l'utilisation des ressources naturelles et limitent les pressions exercées sur celles-ci, de manière à préserver les écosystèmes et les services écosystémiques ainsi que les espèces et la diversité génétique.*»

Objectif 7 : «*D'ici à 2020, la société possède des connaissances suffisantes sur la biodiversité pour que chacun conçoive celle-ci comme une base essentielle de la vie et la prenne en compte dans ses décisions pertinentes.*»

Objectif 10 : «*D'ici à 2020, la surveillance de l'évolution des écosystèmes, des espèces et de la diversité génétique est assurée.*»

1.4 Possibilités d'utilisation des paramètres biologiques du sol

Les organismes du sol peuvent indiquer l'état et les changements de leur environnement. Les paramètres de somme, d'activité et/ou de composition des espèces fournissent des informations sur les effets combinés des conditions chimiques et physiques du sol sur les organismes du sol. Les changements constatés des paramètres biologiques du sol peuvent éventuellement conduire à long terme à une altération des fonctions du sol et donc à des pertes de production – ce qui nécessite de prendre des mesures. Les paramètres biologiques du sol peuvent être utilisés, entre autres, dans les domaines suivants :

Détection, évaluation et surveillance de sols pollués et non pollués, par exemple pour la clarification de sites ou l'observation à long terme des sols.

Les pollutions de nature chimique et physique ont un impact sur les organismes du sol et donc sur sa fertilité (Fliessbach et al., 2007; Frey et al., 2006, 2009, 2022a; Hartmann et al., 2015; Frossard et al., 2018; Walder et al., 2022). Les dégradations, telles que la diminution de la capacité de décomposition ou des problèmes structuraux, peuvent être identifiées, documentées et surveillées à un stade précoce.

Contrôle de l'efficacité de la remise en culture et de la réhabilitation des sols.

Après la remise en culture ou l'assainissement des sols, les propriétés biologiques des sols typiques du site doivent se rétablir. Un contrôle des résultats est possible à l'aide de paramètres biologiques du sol et de valeurs de référence attendues pour le site (ökonsult, 1994).

Evaluation complète de l'état biologique dans les profils de sol.

Les informations biologiques sur les sols sont particulièrement utiles dans le contexte de la régénération des sols après des contraintes mécaniques dans le sous-sol ou du stockage de carbone dans le sous-sol (Frey et al., 2021; Frey et al., 2022b).

Vérification des effets d'organismes spécifiques

Les paramètres biologiques du sol permettent d'examiner les effets potentiels d'organismes spécifiques. Par exemple, les effets possibles sur le microbiome, le mésobiome ou le macrobiome d'organismes favorisant les plantes (Oberholzer et al., 2024), d'organismes de biocontrôle (Mayerhofer et al. 2017) ou d'organismes exotiques (introduits involontairement) (Roy et al., 2022; Stefanowicz et al., 2016).

Vulgarisation agricole

Les paramètres biologiques du sol permettent d'évaluer la fertilité du sol et d'établir un lien avec les pratiques agricoles. Par exemple, le programme de promotion des sols du canton de Berne, sous la rubrique KABO¹.

Travail de relations publiques

Le fait de savoir que le sol est vivant et de connaître la diversité, les fonctions et les activités des organismes vivants du sol contribue à promouvoir l'appréciation du sol et le respect de son utilisation. Cela permet de créer un lien émotionnel avec le sol et de comprendre la nécessité de le protéger. C'est le cas par exemple des projets «Sounding Soi»² ou «La preuve par le slip»³.

1.5 Relevé des paramètres biologiques du sol en Suisse

Les paramètres microbiens totaux et d'activité décrits ainsi que les études faunistiques des communautés de vers de terre sont tous relevés ou réalisés depuis longtemps dans le cadre de l'Observation nationale des sols (NABO, Hug et al., 2018, Gross et al., 2024) et dans les réseaux de mesure cantonaux (KABO AG, BE, FR, GR) (Mösch et Hunziker 2015, FRIBO 2024, Bräm 2011, Maurer et al., 2020). Les valeurs mesurées sur le site d'étude sont classées et évaluées à l'aide de valeurs de référence et de valeurs comparaison typiques du site (Maurer et al., 2020, Hug et al., 2021). Dans le NABO, la diversité des bactéries et des champignons du sol est en outre relevée depuis quelques années par des méthodes de biologie moléculaire (Gschwend et al., 2018, 2021a et 2021b, Fernández-Bravo et al., 2021). Outre la quantité d'ADN, les communautés bactériennes et fongiques sont également analysées. Celles-ci ont également été déterminées de manière unique dans le cadre du Monitoring de la biodiversité en Suisse (MBD) (Mayerhofer et al., 2021). Les vers de terre et les enchytréides ont pareillement été recensés une seule fois sur des sites NABO sélectionnés, à l'aide de méthodes de biologie moléculaire (Cuartero et al., 2025). Sur les sites du LWF (recherches à long terme sur les écosystèmes forestiers), les nématodes sont déterminés par des méthodes de biologie moléculaire (Donhauser et al., 2023; Cuartero et al., 2024). Une vaste compilation d'autres études de biologie du sol en Suisse a été réalisée par la VBBio-BioSA en 2022 et est accessible sous forme de base de données bibliographiques (VBBio-BioSA, 2022).

Nous renonçons ici à une description détaillée de la situation à l'étranger et référons également à la littérature (Stone et al., 2015 et 2016; Fierer, N., 2017; Dequiedt et al., 2020; Bhaduri et al., 2022; Jones, et al., 2022; Orgiazzi et al., 2022; Labouyrie et al. 2023).

1

<https://www.weu.be.ch/fr/start/themen/umwelt/boden/bodeninformationen.html>



2

www.soundingsoil.ch/fr/



3

www.beweisstueck-unterhose.ch/fr/



2 Vue d'ensemble des paramètres

2.1 Sélection des paramètres

Les paramètres relevés en Suisse par le NABO et les KABO, et qui sont également utilisés au niveau international, sont énumérés ci-dessous. Ils ont été testés pour leur aptitude à être utilisés dans le cadre de l'observation à long terme et se caractérisent entre autres par une répétabilité fiable des mesures (Oberholzer et al., 2006 ; Hug et al., 2018). Toutes les analyses des paramètres biologiques du sol mentionnés ici sont effectuées selon les méthodes de références suisses de la Station de recherche fédérale Agroscope⁴ ou selon la littérature citée. Vous y trouverez également les descriptions détaillées des méthodes ainsi que d'autres références bibliographiques.

4

<https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/fr/home/themes/environnement-ressources/monitoring-analyse/methodes-references/caracterisation-sites.html>



2.2 Paramètres microbiologiques

2.2.1 Biomasse microbienne (méthodes FE-C, ATP, quantité d'ADN, SIR)

La biomasse microbienne est l'ensemble des microorganismes du sol, c'est-à-dire en particulier l'ensemble des bactéries et des champignons, mais aussi des protistes. Il s'agit d'un paramètre cumulatif qui, en tant que masse biologiquement active, constitue une mesure du compartiment biotique du sol, mais ne permet pas de tirer des conclusions sur les espèces individuelles. Il existe différentes méthodes pour évaluer la biomasse microbienne.

Méthode d'extraction par fumigation au chloroforme (méthode FE-C) :

Un sol frais et équilibré est gazé au chloroforme pendant 24 heures. Les microorganismes sont détruits, mais les substances organiques présentes dans le sol sont à peine modifiées. La quantité de matière organique qui peut ensuite être extraite permet de calculer la teneur en carbone de la biomasse microbienne (FE-C) ou en azote de la biomasse microbienne (FE-N) par rapport à un échantillon non traité au chloroforme (méthode de référence suisse B-BM-FE de la station de recherche fédérale Agroscope, 1998).

Application en Suisse : Depuis 2017, la biomasse microbienne est déterminée exclusivement avec la méthode FE-C dans le NABO et les KABO AG, BE, GR.

Méthode de l'adénosine triphosphate (méthode ATP) :

L'adénosine triphosphate (ATP) est extrait du sol frais à l'aide d'une digestion mécanique. Après filtration du sol, le filtrat est neutralisé et la bioluminescence est mesurée dans une aliquote. Au cours de la réaction enzymatique, l'ATP du filtrat de sol est entièrement consommée comme source d'énergie. Les impulsions lumineuses libérées sont directement proportionnelles à la quantité d'ATP. La conversion des impulsions lumineuses en ng d'ATP s'effectue à l'aide de courbes d'étalonnage (méthode de référence suisse B-BM-ATP de la station de recherche fédérale Agroscope, 1998).

Application en Suisse : KABO FR (FRIBO).

Quantité d'ADN (méthode de l'ADN) :

Pour déterminer la quantité d'ADN (acide désoxyribonucléique ; porteur de l'information génétique), l'ADN total est extrait d'un échantillon composite homogénéisé de 0,5 g de sol. La biomasse microbienne peut être mesurée à partir de cette ADN extrait. Afin de garantir la comparabilité à long terme, l'extraction de l'ADN n'est pas réalisée à l'aide d'un kit commercial, mais selon un protocole dont la com-

position chimique est connue. La méthode décrite a été soumise au groupe de travail d'Agroscope et, si elle est acceptée, sera également publiée comme méthode de référence suisse de la station de recherche fédérale Agroscope⁴.

Application en Suisse : La quantité d'ADN est relevée dans le cadre de monitorings dans le NABO et les KABO AG, BE et GR (Gschwend et al., 2021a et b). En outre, elle a été déterminée une seule fois dans le réseau de mesure du MBD (Mayerhofer et al., 2021).

Respiration induite par le substrat (méthode SIR) :

Des échantillons de sol sont mélangés à du glucose et incubés jusqu'à ce qu'une respiration initiale maximale soit atteinte. Celle-ci est proportionnelle à la biomasse microbienne. La production de CO₂ par heure est calculée à partir de l'augmentation de la concentration en CO₂ et du flux de gaz. La biomasse microbienne (C_{mic}) est ensuite déduite à l'aide du facteur de conversion d'Anderson et Domsch (1978) (méthode de référence suisse B-BM-HM de la station de recherche fédérale Agroscope, 1998).

Application en Suisse : NABO et KABO de 2004 à 2016 (Hug et al., 2021). Depuis 2017, la biomasse SIR n'est plus déterminée par le NABO et les KABO AG, BE et GR.

2.2.2 Respiration basale

La respiration basale décrit un processus biologique qui conduit à la libération de CO₂ par la décomposition de la matière organique en présence d'oxygène et qui est une mesure de l'activité des organismes du sol. Pour déterminer la respiration basale, le sol est incubé dans un système fermé. Le CO₂ libéré de la 24^{ème} à la 96^{ème} heure d'incubation est absorbé dans une solution de soude caustique. Le carbonate de sodium qui en résulte est précipité avec du chlorure de baryum et la soude caustique non utilisée est déterminée par titration avec de l'acide chlorhydrique (méthode de référence suisse B-BA-IS de la station de recherche fédérale Agroscope, 1998).

Application en Suisse : NABO et KABO AG, BE et GR.

2.2.3 Minéralisation C

La minéralisation du carbone (C_{min}) est une estimation de la quantité de matière organique minéralisée par les microorganismes. La valeur mesurée correspond à la somme du CO₂ libéré pendant 15 jours d'incubation. Cette valeur est convertie en équivalents carbone et exprimée en matière organique (µg MO g⁻¹ MS du sol 15 jours⁻¹) (Maire, 1984).

Application en Suisse : KABO FR (FRIBO).

2.2.4 Quotient métabolique qCO₂

Le quotient métabolique qCO₂ correspond au rapport entre la respiration basale et la biomasse microbienne (respiration basale divisée par la biomasse microbienne). Il s'agit d'une mesure indirecte de l'efficacité énergétique d'une communauté microbienne et de sa capacité à transformer la matière organique. Depuis 2017, dans le NABO et les KABO, le quotient métabolique est calculé avec la biomasse microbienne FE-C, car le SIR n'est plus mesuré. Ceci contrairement à l'aide au travail de 2009 (VBB/BSA, 2009), où le quotient qCO₂ était calculé avec la biomasse microbienne SIR. Afin d'exclure les changements méthodologiques au sein d'une série chronologique, seuls les quotients calculés avec les mêmes grandeurs d'entrée devraient être comparés entre eux.

Application en Suisse : La respiration basale, mesurée par la méthode B-BA-IS, et la biomasse microbienne, mesurée par la méthode FE-C, sont déterminées par le NABO et les KABO AG, BE et GR. Le quotient métabolique peut donc être calculé en conséquence.

2.2.5 Rapport biomasse microbienne-carbone sur carbone organique

C_{mic}/C_{org}

Le rapport C_{mic}/C_{org} (biomasse microbienne divisée par la teneur en C_{org} du sol) donne une indication de la quantité relative de carbone microbien par rapport au carbone organique total. Depuis 2017, la biomasse microbienne SIR n'est plus mesurée dans le NABO et les KABO et le rapport est établi à partir de la biomasse microbienne FE-C [$mg\ C_{mic}\ g^{-1}\ C_{org}$] ($FE-C/C_{org}$). Afin d'exclure les changements méthodologiques au sein d'une série chronologique, seuls les rapports C_{mic}/C_{org} calculés avec les mêmes données d'entrée doivent être comparés.

Application en Suisse : La biomasse microbienne, déterminée par la méthode FE-C, et la teneur en C_{org} sont relevées par le NABO et par les KABO AG, BE et GR. Le rapport C_{mic}/C_{org} peut donc être calculé en conséquence.

2.2.6 Diversité des bactéries et des champignons dans le sol

Bien qu'il n'existe pas encore de méthodes de références pour les analyses de la diversité du microbiome et que celles-ci ne puissent donc pas encore être appliquées, la méthode de détermination de la composition des communautés microbiennes est néanmoins décrite ici. Ceci principalement due à son potentiel immense concernant l'observation de l'environnement, la politique environnementale ou la vulgarisation agricole. La méthode est utilisée de manière routinière depuis 2012 dans le cadre du NABO, ce qui a permis de démontrer la stabilité de la méthode appliquée et de produire un premier cadre de référence (Gschwend et al., 2021a et b). Le chapitre 4 traite plus en détail des possibilités et des limites de cette technologie.

La diversité des microorganismes et d'autres organismes vivant dans le sol peut être déterminée sur la base de l'ADN grâce à une méthode appelée métabarcoding. Pour ceci, tout l'ADN est extrait d'un échantillon. Des segments spécifiques sont isolés de ce mélange d'ADN et ensuite ces segments sont séquencés. Comme la plupart des espèces, en particulier les microorganismes, ne sont pas encore décrites (Hawksworth et Lücking, 2017), les séquences sont regroupées en fonction de leur similarité. Ces groupes de séquences très similaires sont appelés OTU (unités taxonomiques opérationnelles ; engl. operational taxonomic units). Le nombre d'OTU d'un échantillon est appelé la richesse taxonomique et constitue un paramètre décrivant la diversité d'une communauté qui peut être utilisée de la même manière que la richesse en espèces. Les OTU peuvent être classées taxonomiquement en comparant leurs séquences à une base de données de séquences d'ADN, mais la qualité de cette classification dépend fortement de la base de données utilisée et de la connaissance de l'habitat étudié.

Application en Suisse : Dans NABObio, les analyses de biologie moléculaire (métabarcoding) sont utilisées pour déterminer la diversité des bactéries et des champignons, ce qui a été fait annuellement depuis 2012 jusqu'en 2024, puis à intervalles plus larges à partir de 2025 (Gschwend et al., 2021a et b ; Hug et al., 2018). Une détermination unique de la diversité des bactéries et des champignons a également été effectuée dans le MBD (Mayerhofer et al., 2021).

2.3 Paramètres faunistiques

2.3.1 Données sur la faune du sol

Il existe actuellement des valeurs de comparaison en Suisse pour le groupe animal des vers de terre. Pour l'Europe (p. ex. F, D, NL), il existe des travaux pour d'autres paramètres de la mésofaune et de la macrofaune (Rutgers et al., 2009, Römcke et al., 2018, Cluzeau et al., 2012 ; Stone et al., 2015, 2016). Les premières bases pour des organismes de la mésofaune sont également disponibles en Suisse (Gschwend et al., 2022).

2.3.2 Communautés de vers de terre

Une solution de formaline ou une suspension de poudre de moutarde est infiltrée sur une surface donnée pendant une durée définie. Les vers de terre (Lumbricidae) ainsi expulsés sont collectés et conservés (méthode de référence suisse *B-RW-E*). Une sélection manuelle est ensuite effectuée (méthode de référence suisse *B-RW-H*). L'extraction par solution de formaline ou suspension de poudre de moutarde et la méthode de sélection manuelle doivent être combinées afin de garantir une détermination proche de la réalité de la population totale de vers de terre (Dunger et Fiedler, 1997).

Le nombre d'espèces et leur répartition (diversité et cartes de répartition), ainsi que les biomasses et les abondances des quatre groupes écomorphologiques de vers de terre (Cuendet et al., 1997, méthode de référence suisse *BM-RW-B*) conviennent à la caractérisation de la population de vers de terre :

Vers de terre épigés, habitants de la litière : ces espèces vivent dans la litière, le pail-
lis ou le compost et décomposent de grandes quantités de matière organique.

Vers de terre endogés, habitants du sol minéral : ces espèces vivent dans la couche
supérieure du sol jusqu'à environ 40 cm de profondeur et creusent des galeries
horizontales, généralement peu stables.

Vers de terre anéciques (avec les deux sous-groupes *Lumbricus* et *Nicodrilus* désor-
mais : *Aporrectodea*) : ces espèces creusent dans le sol des galeries d'habitation ver-
ticales, durables et profondes de plus d'un mètre, qu'elles tapissent d'excréments.
Les *Lumbricus* anéciques peuvent être actifs même en été si les conditions sont
humides, leurs tubes restent ouverts. Les *Nicodrilus/Aporrectodea* anéciques se re-
tirent en profondeur en été, ferment leurs tubes d'habitation et sont alors inactifs.

*Application en Suisse : régulièrement au KABO BE, une seule fois sur 91 sites du
Plateau suisse (Cuendet et al., 1997).*

3 Outils d'évaluation

3.1 Définition des valeurs de comparaison et de référence

L'évaluation des valeurs mesurées est essentielle pour l'application de la loi, pour les décideurs en matière de politique environnementale, pour la recherche ou pour la vulgarisation agricole. Il s'agit de déterminer si le niveau de mesure se situe dans une intervalle attendue pour le site ou comment la valeur mesurée peut être classée par rapport à d'autres valeurs mesurées. Cet outil de travail propose deux types d'instruments d'évaluation qui se distinguent par le degré de précision des informations qu'ils permettent d'obtenir (voir 3.2 et 3.4) :

- *Les valeurs de comparaison* décrivent la moyenne et la dispersion des valeurs mesurées d'un paramètre sans tenir compte des caractéristiques du sol spécifiques au site. Elles permettent une évaluation générale de résultats de mesure concrets. Les valeurs basses et élevées ainsi que les valeurs aberrantes peuvent être identifiées. Les valeurs de comparaison sont surtout utilisées lorsque la base de données du paramètre n'est pas (encore) suffisante pour calculer des équations de régression permettant d'obtenir des valeurs de référence.
- *Les valeurs de référence* permettent une évaluation différenciée et spécifique au site des valeurs mesurées concrètes d'un paramètre, en utilisant les propriétés du sol comme base de calcul de la valeur de référence attendue pour le site en question.

Les valeurs de comparaison et les valeurs de référence sont toutes deux utilisées par le NABO et les KABO pour évaluer les données biologiques du sol (Mösch et Hunziker 2015; Maurer et al., 2020, Hug et al., 2021).

Comme décrit dans l'aide au travail de 2009, les bases de données permettant de définir les valeurs de comparaison et de référence, et donc d'évaluer les valeurs mesurées, doivent être complétées périodiquement (VBB/BSA, 2009). C'est ce qui a été fait au cours de l'actualisation de l'aide au travail 2024. Les valeurs de référence et de comparaison actuellement disponibles sont résumées ci-dessous.

3.2 Valeurs de comparaison microbiologiques

La mise à jour des comparaisons microbiologiques et faunistiques a été effectuée en 2024 (Hug, 2024). Des tableaux de valeurs de comparaison ont pu être établis avec des données de 238 sites pour la respiration basale, de 311 sites pour la biomasse microbienne FE-C, de 269 sites pour la biomasse microbienne FE-N, de 268 sites pour le rapport C_{mic}/C_{org} et de 311 sites pour le quotient métabolique qCO_2 , ceci avec des données couvrant une période de 2005 à 2023. Les données proviennent de sites du NABO et des KABO.

Les valeurs de comparaison sont réparties selon l'utilisation (terres assolées, prairies permanentes, forêts) et la profondeur d'échantillonnage (0–10 cm, 0–20 cm) (tableau 1 et tableau 2). En annexe, les valeurs de comparaison sont également réparties par réseau de mesure (NABO, KABO AG, KABO BE, KABO GR, MIP⁵, OBA⁶), par classe d'utilisation (culture maraîchère, culture fruitière/vigne) et par profondeur d'échantillonnage (tableau 10 – tableau 12). En outre, les données des tableaux de valeurs de comparaison sont présentées en annexe sous forme de boxplots (figure 2 – figure 9). Plus de détails sur la dérivation des valeurs de comparaison suivantes, sont donnés dans la publication de Hug (2024).

⁵ Projet « Potentiel infectieux des mycorhizes » (Jansa et al., 2014)

⁶ KABO BE, Oberacker (1 site, 6 parcelles)

Utilisation	profondeur de prélèvement	n	Médiane	Minimum	Maximum	Quartile inférieur	Quartile supérieur
Biomasse microbienne FE-C [mg kg⁻¹ MS]							
Terre assolée	0–10 cm	28	616	209	1609	404	824
	0–20 cm	96	620	203	3191	441	855
Prairie permanente	0–10 cm	76	1666	459	4409	848	2505
	0–20 cm	84	1604	398	4520	1056	2047
Forêt	0–20 cm	27	1130	469	4658	740	1712
Biomasse microbienne FE-N [mg kg⁻¹ MS]							
Terre assolée	0–10 cm	28	79	27	228	55	105
	0–20 cm	84	93	28	381	70	135
Prairie permanente	0–10 cm	69	211	62	679	125	329
	0–20 cm	61	207	56	500	137	266
Forêt	0–20 cm	27	144	68	333	109	187
Respiration basale [mg CO₂-C kg⁻¹ MS h⁻¹]							
Terre assolée	0–10 cm	47	0.7	0.2	2.2	0.4	1.0
	0–20 cm	96	0.7	0.3	2.5	0.5	0.9
Prairie permanente	0–10 cm	84	1.5	0.4	5.0	1.0	1.9
	0–20 cm	84	1.3	0.6	2.8	1.0	1.8
Forêt	0–20 cm	27	1.7	0.6	4.5	1.0	2.7
Rapport C_{mic}/C_{org} [mg C_{mic} g⁻¹ C_{org}] (FE-C/C_{org})							
Terre assolée	0–10 cm	28	32.2	10.6	56.1	26.4	38.8
	0–20 cm	85	33.6	4.9	52.3	26.4	38.6
Prairie permanente	0–10 cm	56	44.0	13.2	70.3	36.0	50.4
	0–20 cm	74	41.7	23.5	74.3	37.5	50.9
Forêt	0–20 cm	25	25.5	12.3	69.2	19.5	32.6
Quotient métabolique qCO₂ [mg CO₂-C g⁻¹ C_{mic}] (RB/FE-C)							
Terre assolée	0–10 cm	28	1.0	0.5	1.7	0.8	1.1
	0–20 cm	96	1.1	0.6	2.6	0.9	1.4
Prairie permanente	0–10 cm	76	0.9	0.5	2.2	0.7	1.1
	0–20 cm	84	0.9	0.5	2.2	0.7	1.1
Forêt	0–20 cm	27	1.5	0.7	3.5	1.2	1.8

Tableau 1

Valeurs de comparaison de biomasse microbienne FE-C [mg kg⁻¹ MS], biomasse microbienne FE-N [mg kg⁻¹ MS], respiration basale [mg CO₂-C kg⁻¹ MS h⁻¹], rapport C_{mic}/C_{org} [mg C_{mic} g⁻¹ C_{org}] (FE-C/C_{org}) et quotient métabolique qCO₂ [mg CO₂-C g⁻¹ C_{mic}] (RB/FE-C), réparties par utilisation.

Utilisation	profondeur de prélèvement	n	Médiane	Minimum	Maximum	Quartile inférieur	Quartile supérieur
ATP [ng g⁻¹ MS]							
Période 1990–2001 / 2012–2021							
Terre assolée	0–20 cm	470	832.10	102.00	5712.40	571.84	1292.51
Prairie permanente	0–20 cm	252	2227.15	408.10	9345.60	1419.15	3134.74
Alpage	0–20 cm	229	3127.10	677.05	14641.05	2184.02	4497.00
C_{min} [µg OS g⁻¹ MS 15 d⁻¹]							
Période 1990–2021							
Terre assolée	0–20 cm	672	598.40	79.00	2333.00	449.17	823.75
Prairie permanente	0–20 cm	362	1614.58	338.80	3968.40	1283.47	2102.12
Alpage	0–20 cm	323	2691.98	955.13	11208.74	2135.52	3436.82

Tableau 2

Valeurs de comparaison de la biomasse microbienne ATP et de la minéralisation du carbone C_{min} du Réseau d'observation des sols du canton de Fribourg (FRIBO).

Les propriétés du sol, comme la teneur en carbone organique, le pH ou la teneur en argile, influencent de manière significative la quantité et l'activité de la vie du sol. Afin de mieux situer les valeurs comparatives microbiennes du tableau 1 et du tableau 2, les propriétés du sol correspondantes sont présentées dans les tableaux 3 et tableau 4.

Tableau 3

Valeurs de comparaison du C_{org} (%), méthode FAL), du pH (pH $CaCl_2$) et de la teneur en argile (%), réparties par utilisation, sans FRIBO.

Utilisation	profondeur de prélèvement	n	Médiane	Minimum	Maximum	Quartile inférieur	Quartile supérieur
C_{org} [%]							
Terre assolée	0–10 cm	28	1.84	1.08	4.92	1.55	2.27
	0–20 cm	85	1.99	0.82	29.77	1.51	2.55
Prairie permanente	0–10 cm	56	3.21	1.16	9.50	2.31	4.59
	0–20 cm	74	3.73	1.39	10.14	2.53	4.71
Forêt	0–20 cm	25	4.24	2.04	14.26	2.99	6.30
pH [$CaCl_2$]							
Terre assolée	0–10 cm	28	5.8	4.9	7.3	5.4	6.2
	0–20 cm	72	6.2	4.9	7.5	5.6	6.8
Prairie permanente	0–10 cm	73	5.6	4.0	7.5	5.0	6.7
	0–20 cm	68	5.6	3.9	7.3	5.2	6.2
Forêt	0–20 cm	22	4.4	3.4	7.2	3.9	5.1
Argile [%]							
Terre assolée	0–10 cm	28	18	9	56	16	23
	0–20 cm	84	19	6	59	15	25
Prairie permanente	0–10 cm	73	21	11	42	17	27
	0–20 cm	68	21	11	51	18	27
Forêt	0–20 cm	24	23	12	48	18	28

Tableau 4

Propriétés du sol C_{org} (déterminées par la méthode FAL (FAL, FAW, RAC; 1998), pH (pH H_2O) et teneur en argile, mesurées par le principe de sédimentation (%) du FRIBO.

Utilisation	profondeur de prélèvement	n	Médiane	Minimum	Maximum	Quartile inférieur	Quartile supérieur
C_{org} [%]							
Période 1987–2001							
Terre assolée	0–20 cm	706	1.33	0.58	37.04	1.16	1.80
Prairie permanente	0–20 cm	386	3.01	1.51	7.54	2.51	3.59
Alpage	0–20 cm	329	4.17	1.86	45.97	3.54	5.45
pH [H_2O]							
Période 1987–2001							
Terre assolée	0–20 cm	706	6.4	4.9	8.0	6.1	7.1
Prairie permanente	0–20 cm	386	6.1	4.9	7.7	5.8	6.5
Alpage	0–20 cm	329	5.8	4.3	7.5	5.3	6.4
Argile [%]							
Période 1987–2001							
Terre assolée	0–20 cm	706	16	0	60	13	18
Prairie permanente	0–20 cm	386	23	12	75	18	28
Alpage	0–20 cm	329	35	0	65	24	41

3.3 Valeurs de comparaison de la macrofaune

3.3.1 Données disponibles

En Suisse pour des groupes d'animaux du sol, il n'existe des valeurs de comparaison que pour les vers de terre (Cuendet et al., 1997). Celles-ci se limitent aux valeurs de biomasse et au nombre d'individus pour une utilisation de prairie permanente avec des teneurs en humus de 2 à 15% et dans des régions avec <1200 mm de précipitations.

3.3.2 Communautés de vers de terre

La composition régionale typique des communautés de vers de terre peut être évaluée à l'aide des cartes de répartition de Cuendet et al. (1997). En outre, une description de la distribution géographique détaillée est disponible pour chaque espèce (Cuendet et al., 1997).

3.3.3 Valeurs de comparaison de la biomasse et de l'abondance

La biomasse et l'abondance totales de la communauté de vers de terre d'un site ainsi que les biomasses et les abondances des quatre groupes écomorphologiques distingués peuvent être interprétées à l'aide des valeurs de comparaison suivantes :

Biomasse de vers de terre [g/m²]	Médiane	Minimum	Maximum	Quartile inférieur	Quartile supérieur
Biomasse totale	301	131	515	256	400
Groupe épigée	4	0	20	1	9
Groupe endogée	61	9	170	38	91
Groupe anécique	228	73	495	174	309
- Lumbricus anécique uniquement	102	0*	220	63	147
- Nicodrilus/Aporrectodea anécique uniquement	121	0*	365	76	196
Proportion des groupes écomorphologiques dans la biomasse des vers de terre [%]					
Groupe épigée	1	0	13	1	3
Groupe endogée	21	2	50	14	30
Groupe anécique	75	48	98	67	85
- Lumbricus anécique uniquement	33	0*	86	21	44
- Nicodrilus/Aporrectodea anécique uniquement	39	0*	91	28	60

Tableau 5

Valeurs de comparaison des biomasses de vers de terre (g m⁻² et pourcentages) pour les sols de prairies permanentes du Plateau suisse (Cuendet et al., 1997).

** pour des raisons zoogéographiques, des groupes peuvent manquer.*

Abondance des vers de terre [Ind./m²]	Médiane	Minimum	Maximum	Quartile inférieur	Quartile supérieur
Biomasse totale	465	214	842	372	561
Groupe épigée	22	0	104	8	48
Groupe endogée	228	36	540	147	310
Groupe anécique	186	44	422	134	264
- Lumbricus anécique uniquement	66	0*	155	42	89
- Nicodrilus/Aporrectodea anécique uniquement	121	0*	350	77	199
Anteile der ökomorphologischen Gruppen an der Regenwurmabundanz [%]					
Groupe épigée	5	0	37	2	10
Groupe endogée	53	9	80	37	62
Groupe anécique	37	17	91	31	56
- Lumbricus anécique uniquement	13	0*	39	9	20
- Nicodrilus/Aporrectodea anécique uniquement	24	0*	73	17	40

Tableau 6

Valeurs de comparaison de l'abondance des vers de terre (individus/m² et pourcentages) pour les sols de prairies permanentes du Plateau suisse (d'après Cuendet et al., 1997, calculé à partir de 86 des 88 sites, C. Maurer, non publié 2024).

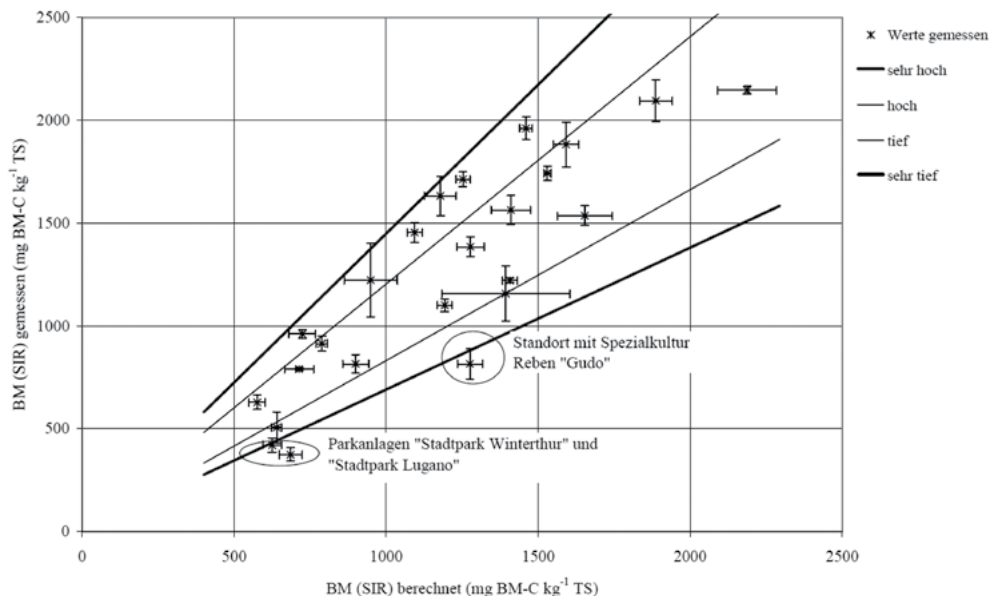
** pour des raisons zoogéographiques, des groupes peuvent manquer.*

3.4 Equations des valeurs de référence

Sur la base des caractéristiques du sol spécifiques au site qui influencent la valeur mesurée, il est possible de déduire des équations de régression et de calculer ainsi les valeurs microbiennes mesurées attendues et typiques du site, qui sont appelées ci-après valeurs de référence (équation 1 à équation 11). Elles permettent d'évaluer les valeurs mesurées. L'évaluation se fait sur la base des intervalles de confiance des équations de régression (figure 1) : Les valeurs mesurées qui se situent dans l'intervalle de confiance de 67% sont considérées comme «normales», les valeurs supérieures et inférieures sont considérées comme «élevées» ou «faibles», les valeurs supérieures et inférieures à l'intervalle de confiance de 95% sont classées comme «très élevées» ou «très faibles» (Oberholzer et al., 1999, Oberholzer et Scheid, 2007). Le tableau 7 présente les limites des classes d'évaluation déduites des intervalles de confiance pour les biomasses microbiennes FE-C et SIR et pour la respiration basale.

Figure 1

Biomasse microbienne SIR calculée et mesurée dans les sols des sites NABO (n=35) (tiré d'Oberholzer et Scheid, 2007). Représentation de la valeur moyenne par site et écart-type. Appréciation : les valeurs mesurées qui se situent dans l'intervalle de confiance de 67% sont considérées comme «normales», les valeurs supérieures et inférieures sont considérées comme «élevées» ou «faibles», les valeurs supérieures et inférieures à l'intervalle de confiance de 95% sont considérées comme «très élevées» ou «très faibles».



Pour les terres assolées, il existe des équations de référence pour les biomasses microbiennes FE-C, SIR, ATP, la respiration basale et la minéralisation du carbone. Pour les prairies permanentes, il existe des équations de valeur de référence pour la profondeur d'échantillonnage 0–20 cm pour la biomasse FE-C et la respiration basale (Hug et Moll-Mielewczik, 2024) et pour la profondeur d'échantillonnage 0–10 cm pour les biomasses SIR, ATP et la minéralisation du carbone (VBB/BSA 2009).

Équations de valeur de référence pour les terres assolées 0–20 cm (VBB/BSA, 2009; Oberholzer et al., 1999)

$$\text{Biomasse microbienne FE-C [mg } C_{\text{mic}} \text{ kg}^{-1} \text{ MS]} \\ \ln(\text{FE-C}) = 4.70 + 0.963 \ln(C_{\text{org}}) + 0.0637 \text{ pH} + 0.21 \ln(\text{Argile}) + 0.0008 \text{ Sable} \quad (1)$$

$$\text{Biomasse microbienne SIR [mg } C_{\text{mic}} \text{ kg}^{-1} \text{ MS]} \\ \ln(\text{SIR}) = 3.58 + 0.823 \ln(C_{\text{org}}) + 0.154 \text{ pH} + 0.311 \ln(\text{Argile}) + 0.005 \text{ Sable} \quad (2)$$

$$\text{Respiration basale, par heure [mg CO}_2\text{-C kg}^{-1} \text{ MS h}^{-1}] \\ \ln(\text{RB}) = 2.697 + 0.625 \ln(C_{\text{org}}) + 0.199 \text{ pH} - 0.146 \ln(\text{Argile}) - \\ 0.0009 \text{ Sable} - \ln(88) \quad (3)$$

$$\text{Respiration basale, par jour [mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ MS 24 h}^{-1}] \\ \ln(\text{RB}) = 2.697 + 0.625 \ln(C_{\text{org}}) + 0.199 \text{ pH} - 0.146 \ln(\text{Argile}) - 0.0009 \text{ Sable} \quad (4)$$

$$\text{Biomasse microbienne ATP [ng g}^{-1} \text{ MS]} \\ \ln(\text{ATP}) = 1.5571 + 1.0826 \ln(\text{Argile}) \quad (5)$$

$$\text{Minéralisation du carbone [}\mu\text{g MO g}^{-1} \text{ 15 d}^{-1}] \\ \ln(C_{\text{min}}) = 2.4953 + 0.7601 \ln(\text{Humus}) \quad (6)$$

Domaine d'application pour la biomasse microbienne FE-C et SIR, respiration basale : teneur en argile 10%–40%, pH (CaCl₂) 4.3–7.5 et teneur en C_{org} 1%–4%.

Domaine d'application pour la biomasse microbienne ATP et de la minéralisation du carbone C_{min} : teneur en argile de 8%–60% et teneur en humus de 1%–20%.

Équations de valeur de référence pour les prairies permanentes 0–20 cm (Hug et Moll-Mielewicz, 2024)

$$\text{Biomasse microbienne FE-C [mg } C_{\text{mic}} \text{ kg}^{-1} \text{ MS]} \\ \ln(\text{FE-C}) = 1.7448 + 1.0460 \ln(C_{\text{org}}) + 0.0188 \text{ pH} + 0.6574 \ln(\text{Argile}) + \\ 0.5879 \ln(\text{Sable}) \quad (7)$$

$$\text{Respiration basale, par jour [mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ MS 24 h}^{-1}] \\ \ln(\text{RB}) = 1.7480 + 0.9176 \ln(C_{\text{org}}) + 0.1172 \text{ pH} + 0.0329 \ln(\text{Argile}) + \\ 0.2989 \ln(\text{Sable}) \quad (8)$$

Domaine d'application : teneur en argile 8%–44%, pH (CaCl₂) 4.0–7.2, et teneur en C_{org} 1.3%–8.9%.

Equations de valeur de référence pour les prairies permanentes 0–10 cm (VBB/BSA, 2009 ; Oberholzer et al., 1999)

$$\text{Biomasse microbienne SIR [mg } C_{\text{mic}} \text{ kg}^{-1} \text{ MS]} \\ \ln(\text{SIR}) = 3.606 + 0.916 \ln(C_{\text{org}}) + 0.2848 \text{ pH} + 0.17 \ln(\text{Argile}) \quad (9)$$

$$\text{Biomasse microbienne ATP [ng g}^{-1} \text{ MS]} \\ \ln(\text{ATP}) = 2.1854 + 0.7697 \ln(\text{Argile}) \quad (10)$$

$$\text{Minéralisation du carbone [}\mu\text{g MO g}^{-1} \text{ 15 d}^{-1}] \\ \ln(C_{\text{min}}) = 2.6741 + 0.7476 \ln(\text{Humus}) \quad (11)$$

Domaine d'application pour la biomasse microbienne SIR : teneur en argile de 10% à 40%, pH (CaCl₂) de 4,3 à 7,5 et teneur en C_{org} de 1% à 4%.

Domaine d'application pour la biomasse microbienne ATP et de la minéralisation du carbone C_{min} : teneur en argile de 8% à 60% et teneur en humus de 1% à 20%.

Le C_{org} correspond à la teneur en carbone organique en % du poids de la terre fine, déterminée selon la méthode FAL (FAL, FAW, RAC; 1998). L'argile et le sable correspondent aux pourcentages de granulométrie respectifs (argile + limon + sable + humus = 100%) et ln au logarithme naturel. La granulométrie a été mesu-

7 Détermination de la granulométrie dans la terre fine

8 Détermination de la granulométrie dans la partie minérale de la terre fine

9 <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/sol/info-specialistes/mesures-de-protection-des-sols/annee-internationale-sol/groupe-de-travail-biologie-du-sol---application---bsa-.html>



rée à l'aide des méthodes de références suisses de la Station de recherche fédérale Agroscope KOF⁷ ou KOM⁸, selon l'origine des données. Si le Corg est mesuré par incinération à sec, il existe un facteur de conversion de Gubler et al. (2018) de 1,18 pour les sols suisses. L'humus est calculé avec un facteur de 1.725* Corg. Le pH est mesuré dans la solution de CaCl₂ (selon les méthodes de références suisses de la Station de recherche fédérale Agroscope).

Pour les calculs des valeurs de référence, des feuilles de calcul Excel sont disponibles sur le site web du groupe de travail VBBio-BioSA⁹.

3.4.1 Indicateur d'état Q

Les valeurs microbiennes mesurées peuvent également être comparées directement aux valeurs de référence spécifiques au site en divisant les valeurs mesurées par les valeurs de référence correspondantes (équation 12). Ce quotient, appelé indicateur d'état Q, est donc un indicateur de l'état actuel du site, qui se réfère à la grandeur mesurée correspondante. Un indice permet de préciser pour quelle mesure Q a été calculé (Q_{FE-C}, Q_{RB} ou Q_{SIR}) (Hug et al., 2021).

$$Q = \frac{\text{valeur mesurée}}{\text{valeur de référence spécifique au site}} \quad (12)$$

Pour $Q > 1$, la valeur mesurée est supérieure à la valeur de référence spécifique au site, pour $Q < 1$, elle est inférieure.

L'indicateur d'état Q calculé permet de déterminer la classe d'évaluation définie par Oberholzer et al. (1999). Les limites des intervalles de confiance pour Q ou des niveaux d'évaluation se calculent comme suit, se étant l'erreur standard estimée de la régression ce qui indique la précision de la régression (se_{est} en anglais : standard error of estimate) et e étant le nombre d'Euler (e≈2.72) :

limite «très basse» à «basse»	=	limite inférieure IC ₉₅	=	e ^{-2se}
limite «bas» à «normal»	=	limite inférieure IC ₆₇	=	e ^{-se}
limite «normale» à «haute»	=	limite supérieure IC ₆₇	=	e ^{se}
limite «élevée» à «très élevée»	=	limite supérieure IC ₉₅	=	e ^{2se}

Sur la base de ces calculs, les plages des classes qualitatives allant de «très bas» à «très élevé» pour les biomasses microbiennes FE-C et SIR et la respiration basale ont été déduites en utilisant l'erreur standard respective de la régression (tableau 7).

Par rapport aux classes qualitatives telles que «très élevé» ou «bas», Q est une grandeur numérique continue et permet des représentations graphiques et des analyses statistiques.

Tableau 7 : Limites des classes d'évaluation pour les biomasses microbiennes FE-C et SIR et pour la respiration basale

	Biomasse microbienne FE-C		Biomasse SIR		Respiration basale	
	Terre assolée 0–20cm	Prairie permanente 0–20 cm	Terre assolée 0–20cm	Prairie permanente 0–10 cm	Terre assolée 0–20cm	Prairie permanente 0–20 cm
se _{est}	0.2054	0.2101	0.1836	0.2114	0.201	0.2689
très basse	< 0.66	< 0.66	< 0.69	< 0.66	< 0.67	< 0.58
basse	0.66 jusqu'à 0.80	0.66 jusqu'à 0.80	0.69 jusqu'à 0.82	0.66 jusqu'à 0.80	0.67 jusqu'à 0.81	0.58 jusqu'à 0.75
normal	0.81 jusqu'à 1.23	0.81 jusqu'à 1.23	0.83 jusqu'à 1.20	0.81 jusqu'à 1.24	0.82 jusqu'à 1.22	0.76 jusqu'à 1.31
élevée	1.24 jusqu'à 1.51	1.24 jusqu'à 1.52	1.21 jusqu'à 1.44	1.25 jusqu'à 1.53	1.23 jusqu'à 1.49	1.32 jusqu'à 1.71
très élevée	> 1.51	> 1.52	> 1.44	> 1.53	> 1.49	> 1.71

4 Mesures à prendre

4.1 Standardisation des méthodes et du stockage des données

Une utilisation uniforme de méthodes standardisées permet de comparer et d'évaluer plus fiablement les données d'origines différentes. Ceci permet d'utiliser plus efficacement les données biologiques du sol, ce qui est d'autant plus important que ces données sont encore rares. Pour l'interprétation des résultats, il est important de documenter de manière uniforme le prélèvement des échantillons, leurs préparations, leurs stockages et les méthodes analytiques utilisées. Le travail de coordination entre les différents programmes d'observation des sols existants doit être intensifié et les efforts d'uniformisation et de standardisation des méthodes, en particulier dans le domaine de la biologie moléculaire, doivent être maintenus et poursuivis. Un stockage commun de toutes les données biologiques du sol dans le système national d'information pédologique NABODAT doit être envisagé.

4.2 Bases d'évaluation

Les bases d'évaluation existantes pour la microbiologie et les paramètres faunistiques sont limités à certaines régions, altitudes, granulométries, teneurs en humus et utilisations. Pour pouvoir interpréter les données biologiques du sol au-delà du Plateau suisse, il faudrait échantillonner d'autres sites à plus de 800 m d'altitude, dans des sols organiques, des forêts, des vignobles, des vergers et d'autres écosystèmes sous-représentés, et élaborer des valeurs de référence. Les estimations du nombre de points de données nécessaires pour obtenir une gamme de mesures aussi représentative que possible ont montré que pour obtenir des valeurs de référence valables à l'échelle nationale pour la biomasse microbienne, il faut des données provenant d'environ 70 sites dans les terres assolées et d'environ 30 sites dans les prairies permanentes. Pour obtenir la respiration basale, qui présente en principe une plus grande marge de variation, il faut des données d'environ 90 sites pour les terres assolées et d'environ 50 sites pour les prairies permanentes (Hug et Moll-Mielewicz, 2024). De telles estimations du nombre de points de données nécessaires devraient également être faites pour d'autres paramètres, comme par exemple pour la déduction de valeurs de référence des communautés de vers de terre ou d'éventuels autres groupes d'organismes. En outre, d'autres variables explicatives, telles que le climat, devraient être prises en compte dans la détermination des équations de valeurs de référence.

Plus de recherches sont nécessaires sur les bases d'évaluation des communautés de bactéries et de champignons. Dans le cadre de NABObio, celles-ci se sont révélées très spécifiques du site et stables au fil des ans (Gschwend et al., 2021a et b). A présent, il ne serait pourtant pas encore possible d'évaluer des changements d'une manière qualitative ou de les attribuer à des facteurs d'influences spécifiques.

Pour les communautés de vers de terre, les valeurs de comparaison datant des années 1990 doivent être vérifiées après plus de 30 ans, les éventuelles influences climatiques doivent être clarifiées et les bases pour les valeurs de référence doivent être élaborées. Il manque également des valeurs de comparaison pour les terres assolées, les forêts et d'autres utilisations.

Les bases d'évaluation disponibles permettent une première classification des valeurs mesurées et consistent surtout en une approche statistique et comparative. Cependant, de nombreuses connaissances de base manquent encore concernant la relation entre les variables de mesure et leur signification fonctionnelle.

4.3 Élaboration d'indicateurs

L'OFEV tient à jour une liste d'indicateurs environnementaux existants qui montrent l'état et l'évolution de ceux-ci¹⁰. Jusqu'à présent, cette liste ne contient pas d'indicateurs biologiques des sols. Certaines propositions, comme l'indicateur d'état Q ou la représentation visuelle des classes d'évaluation à l'aide des équations de valeur de référence, existent certes (Hug et al., 2018), mais la quantité de données permettant de tirer des conclusions à l'échelle nationale est encore trop faible.

Les méthodes de biologie moléculaire permettent d'obtenir des informations sur l'état et l'évolution de certains types d'organismes ou de groupes fonctionnels. Là aussi, ceux-ci ne peuvent pas encore être évalués pour des fonctions spécifiques du sol. Des études scientifiques sur le terrain ont pu mettre en relation certaines espèces indicatrices bactériennes et fongiques avec des conditions de compaction ou de saturation en eau du sol (Frey et al., 2011; Hartmann et al., 2014; Gschwend et al., 2020) ou montrer les relations entre les influences liées à l'utilisation et la composition des communautés d'organismes dans le cadre de l'essai DOK (Hartmann et al., 2015). Des approches expérimentales sont nécessaires pour évaluer précisément l'influence de certains facteurs de stress sur les espèces indicatrices. Les facteurs de stress suivants peuvent être pertinents pour la mise en œuvre : changements de pH, tassement du sol, travail du sol, altitude, pollutions géogènes, produits phytosanitaires, PFAS, pollution au mercure, organismes spécifiques, serres, réhabilitation du sol, remise en culture et changement climatique. Pour pouvoir tirer des conclusions sur les menaces qui pèsent sur certaines fonctions du sol, il faut également étudier expérimentalement des groupes d'organismes fonctionnels. Dans le domaine des cycles des nutriments, par exemple, il s'agirait d'analyses de la disponibilité et de la dynamique des nutriments, y compris la transformation de la matière organique en nutriments disponibles pour les plantes.

10

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/etat/indicateurs.html>



4.4 Etude d'autres organismes du sol

La détermination de groupes d'organismes du sol supplémentaires tels que les protistes, les nématodes, les collemboles ou les acariens n'est pas encore utilisée dans l'application de la protection des sols en Suisse. Les approches de biologie moléculaire offrent des possibilités nouvelles et prometteuses. Par rapport à la détermination morphologique des organismes, la quantité d'échantillons nécessaire à l'analyse est plus faible et le prélèvement moins invasif. De plus, l'identification morphologique précise de la microfaune, de la mésofaune et de la macrofaune nécessite un personnel hautement spécialisé. Une étude a montré que les approches de biologie moléculaire peuvent être plus précises que les approches morphologiques pour déterminer les communautés de vers de terre (Lilija et al., 2023). En Suisse, le projet BioDivSol a permis d'acquérir une première expérience encourageante dans la détection de différents organismes sur un même site (Fernández-Bravo et al., 2021, Gschwend et al. 2022). Les méthodes utilisées doivent maintenant être testées de manière plus approfondie et la base de données doit être élargie. En outre, les possibilités de combiner les méthodes morphologiques et biomoléculaires doivent être clarifiées davantage.

4.5 Etablissement de listes rouges et recensement des espèces invasives

En Suisse, il existe des listes rouges pour un peu plus d'un cinquième des espèces indigènes d'animaux, de plantes, de champignons et de lichens (Klaus et al., 2021). De telles informations sur la distribution et les menaces n'existent pas encore pour les espèces indigènes vivant dans le sol. Un premier aperçu a été élaboré par le groupe VBBio-BioSA sur mandat de l'OFEV (Frey et Maurer, 2022). Seuls quelques pays, comme l'Allemagne, ont établi une liste rouge d'animaux spécifiques du sol comme les vers de terre (Lehmitz et al., 2016). Les espèces menacées, mais aussi les espèces invasives comme les vers plats, peuvent être recherchées de manière ciblée à l'aide d'approches de biologie moléculaire. Pour ce faire, les bases de données de séquences doivent être développées (Gschwend et al., 2018).

4.6 Relevé exhaustif de l'état biologique des sols

Avec un plus grand nombre de sites présentant un large éventail de caractéristiques pédologiques et agronomiques, les variations systémiques des paramètres biologiques du sol pourraient être mieux enregistrées, la compréhension des causes et des effets pourrait être améliorée et la création des bases cartographiques pourrait être rendue possible. Une étroite collaboration entre la Confédération et les cantons (NABO, KABO, MBD, LWF, LFI et autres), la coordination des activités ou la cartographie nationale prévue du CCSols sont des possibilités prometteuses pour faire progresser le recensement des organismes du sol sur l'ensemble du territoire.

4.7 Législation et mise en œuvre

Des valeurs de référence spécifiques du site sont indispensables pour contrôler l'efficacité des mesures de politique environnementale et pour une mise en œuvre efficace. D'une part, de nombreuses valeurs de référence doivent encore être élaborées (voir ci-dessus), d'autre part, les valeurs de référence existantes ne sont pas juridiquement contraignantes. Cela devrait changer dans le cadre de la révision prévue de l'ordonnance sur les atteintes portées aux sols (Osol, 1998), dans la mesure où, outre les valeurs d'application chimiques et physiques, des valeurs biologiques du sol juridiquement contraignantes devraient être définies pour évaluer l'état des sols. Dans ce contexte également, il convient d'accorder une grande priorité au développement et à l'élaboration de valeurs de référence de paramètres biologiques du sol spécifiques du site.

5 Conclusion

Cette aide au travail permet une saisie et une évaluation standardisées et scientifiquement fondées des paramètres biologiques du sol. Comme indiqué dans l'aide au travail de 2009, la standardisation des méthodes doit être développée et les bases de données pour l'évaluation des valeurs mesurées doivent être complétées en permanence (VBB/BSA, 2009). Ainsi, cette édition d'aide au travail se veut un instantané des méthodes et des bases de données existantes. Elle peut et doit également être utilisée comme ouvrage de référence pour les projets futurs. Des projets qui traitent des domaines d'action décrits et qui sont si importants pour une compréhension plus complète du cosmos caché de l'écosystème du sol. Il faut encore beaucoup de recherche fondamentale – en collaboration avec les autorités chargées de l'application des lois – pour parvenir à une standardisation, à l'élaboration de valeurs de référence et d'indicateurs ainsi qu'à une analyse et à une collecte de données denses, uniformes et continues dans toute la Suisse. Les ressources financières et humaines correspondantes au niveau fédéral et cantonal, dans la recherche et dans la mise en œuvre doivent être développées.

Remerciements

Cette aide au travail est un projet du groupe de travail VBBio-BioSA. Nous remercions vivement Agroscope pour son soutien technique et financier à ce travail. Nous remercions également les collaborateurs des services cantonaux de protection des sols pour la mise à disposition des données : Maurus Fischer (Ct. GR), Dominik Müller (Ct. AG), Adrian von Niederhäusern et Sarah Busmann (Ct. FR). Merci également à Juliane Hirte (Qualité et utilisation du sol, Agroscope Reckenholz) pour l'évaluation compétente et la représentation graphique des valeurs comparatives et Wolfgang Sturny (Berne) pour l'édition de la version française.

Liste des figures

- Figure 1 :** Biomasse microbienne SIR calculée et mesurée dans les sols des sites NABO (n=35) (tiré de Oberholzer et Scheid, 2007). Représentation de la valeur moyenne par site et écart-type. Appréciation : les valeurs mesurées qui se situent dans l'intervalle de confiance de 67% sont considérées comme «normales», les valeurs supérieures et inférieures sont considérées comme «élevées» ou «faibles», les valeurs supérieures et inférieures à l'intervalle de confiance de 95% sont considérées comme «très élevées» ou «très faibles». 20
- Figure 2 :** Teneur en carbone organique (%) (méthode FAL), les chiffres sous le boxplot représentent le nombre de sites (n) ; avec médiane, quartile inférieur et quartile supérieur. 43
- Figure 3 :** pH (CaCl₂), les chiffres sous le boxplot sont le nombre de sites (n) ; avec médiane, quartiles inférieur et supérieur. 43
- Figure 4 :** Teneur en argile (%), les chiffres sous le boxplot sont le nombre de sites (n) ; avec médiane, quartiles inférieur et supérieur. 44
- Figure 5 :** Valeurs de comparaison de la respiration basale [mg CO₂-C kg⁻¹ sol MS h⁻¹]. Les chiffres sous le boxplot représentent le nombre de sites (n) ; avec la médiane, le quartile inférieur et le quartile supérieur. 44

Figure 6 : Valeurs de comparaison de la biomasse microbienne BM CFE [mg kg ⁻¹ sol MS]. Les chiffres sous la boîte à moustaches représentent le nombre de sites (n) ; avec la médiane, le quartile inférieur et le quartile supérieur.	45
Figure 7 : Valeurs de comparaison de la biomasse microbienne BM FE-N [mg kg ⁻¹ sol MS]. Les chiffres sous le boxplot représentent le nombre de sites (n) ; avec médiane, quartiles inférieur et supérieur.	45
Figure 8 : Valeurs de comparaison des quotients métaboliques qCO ₂ [mg CO ₂ -C g ⁻¹ C _{mic}]. Les chiffres sous le boxplot représentent le nombre de sites (n) ; avec la médiane, le quartile inférieur et le quartile supérieur.	46
Figure 9 : Valeurs de comparaison Ratio C _{mic} /C _{org} [mg C _{mic} g ⁻¹ C _{org}]. Les chiffres sous le boxplot sont le nombre de sites (n) ; avec médiane, quartiles inférieur et supérieur.	46

Liste des tableaux

Tableau 1 : Valeurs de comparaison de biomasse microbienne FE-C [mg kg ⁻¹ MS], biomasse microbienne FE-N [mg kg ⁻¹ MS], respiration basale [mg CO ₂ -C kg ⁻¹ MS h ⁻¹], rapport C _{mic} /C _{org} [mg C _{mic} g ⁻¹ C _{org}] (FE-C/C _{org}) et quotient métabolique qCO ₂ [mg CO ₂ -C g ⁻¹ C _{mic}] (BA/FE-C), réparties par utilisation.	17
Tableau 2 : Valeurs de comparaison de la biomasse microbienne ATP et de la minéralisation du carbone C _{min} de l'Observatoire cantonal des sols du canton de Fribourg (FRIBO).	17
Tableau 3 : Valeurs de comparaison C _{org} (% , méthode FAL), pH (pH CaCl ₂) et teneur en argile (%), réparties par utilisation, sans FRIBO.	18
Tableau 4 : Propriétés du sol C _{org} (déterminées avec la méthode FAL (FAL, FAW, RAC ; 1998)), pH (pH H ₂ O) et teneur en argile, mesurées avec le principe de sédimentation (%) du FRIBO.	18
Tableau 5 : Valeurs de comparaison des biomasses de vers de terre (g m ⁻² et pourcentages) pour les sols de prairies permanentes du Plateau suisse (Cuendet et al., 1997).	19
Tableau 6 : Valeurs de comparaison de l'abondance des vers de terre (individus/m ² et pourcentages) pour les sols de prairies permanentes du Plateau suisse (tiré de Cuendet et al., 1997, calculé à partir de 86 des 88 sites, C. Maurer, non publié 2024)	19
Tableau 7 : Limites des classes d'évaluation pour les biomasses microbiennes FE-C et SIR et pour la respiration basale	23
Tableau 8 : Valeurs de comparaison de la biomasse microbienne FE-C [mg kg ⁻¹ MS] (n=311)	36
Tableau 9 : Valeurs de comparaison de la biomasse microbienne FE-N [mg kg ⁻¹ MS] (n=269)	37
Tableau 10 : Valeurs de comparaison de la respiration basale [mg CO ₂ -C kg ⁻¹ MS h ⁻¹] (n=338)	38
Tableau 11 : Valeurs de comparaison du quotient métabolique qCO ₂ [mg CO ₂ -C g ⁻¹ C _{mic}] (BA/FE-C) (n=311)	39
Tableau 12 : Valeurs de comparaison du ratio C _{mic} /C _{org} [mg C _{mic} g ⁻¹ C _{org}] (FE-C/C _{org}) (n=268)	40
Tableau 13 : Teneur en carbone organique (%) (C _{org} , méthode FAL) (n=268), pH (pH CaCl ₂) (n=263), et teneur en argile (%) (n=277), répartis par réseau de mesure	41

Bibliographie

Aktionsplan des Bundesrates. 2017. Aktionsplan Strategie Biodiversität Schweiz. Bundesamt für Umwelt (BAFU) (Hrsg.). Bern.

Anderson J.P.E. & Domsch K.H.; 1978. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil Biol. Biochem.* 10, 215-221.

BAFU und BLW 2008: Umweltziele Landwirtschaft. Hergeleitet aus bestehenden rechtlichen Grundlagen. Umwelt-Wissen Nr. 0820. Bundesamt für Umwelt, Bern: 221p.

BAFU (2012): Strategie Biodiversität Schweiz. In Erfüllung der Massnahme 69 (Ziel 13, Art. 14, Abschnitt 5) der Legislaturplanung 2007–2011: Ausarbeitung einer Strategie zur Erhaltung und Förderung der Biodiversität. Die «Strategie Biodiversität Schweiz vom 25. April 2012 des Bundesrates» wurde am 24. Juli 2012 im Bundesblatt publiziert.

BAFU Bundesamt für Umwelt (2020): Bodenstrategie Schweiz für einen nachhaltigen Umgang mit dem Boden. Umwelt-Info, Bern, 2020, 69 p.

Bhaduri, D., Sihi, D., Bhowmik, A., Verma, B.C., Munda, S., Dari, B., 2022. A review on effective soil health bio-indicators for ecosystem restoration and sustainability. *Front Microbiol.* 2022 Aug 17;13:938481.

Bräm, E., 2011. Bodenbiologische Untersuchungen im Kanton Graubünden. VBB/BSA Bulletin Nr. 12, April 2011, 14-17.

Bunemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z.G., Creamer, R., de Deyn, G.B., de Goede, R.G.M., Flesskens, L., Geissen, V., Kuiper, T.W.M., Mäder, P., Pulleman, M.M., Sukkel, W., van Groenigen, J.W., Brussaard, L., 2018: Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry* 120 (2018) 105–125.

Cluzeau, D., Guernion, M., Chaussod, R., Martin-Laurent, F., Villenave, C., Cortet, J., Ruiz-Camacho, N., Pernin, C., Mateille, T., Philippot, L., Bellido, A., Rougé, L., Arrouays, D., Bispo, A., Pérès, G., 2012. Integration of biodiversity in soil quality monitoring: Baselines for microbial and soil fauna parameters for different land-use types. *European Journal of Soil Biology* 49, 63–72.

Cuartero, J., Frey, B., Eder, R., & Brunner, I., 2024. More than a decade of irrigation alters soil nematode communities in a drought-prone Scots pine forest. *Applied Soil Ecology*, 203, 105621.

Cuartero, J., Briones, M.J.I., Rast, B.M., Stierli, B., Maurer-Troxler, C., Hug, A.-S., Widmer, F., Schlaghamersky, J., Frey, B., 2025. Earthworm and enchytraeid indicator taxa of different land-use types identified using soil DNA metabarcoding. *Applied Soil Ecology*, 206, 105891.

Cuendet, G., Stähli, R. & Suter, E. 1997. Die Regenwurmfauna von Dauergrünland des Schweizer Mittellandes. Schriftenreihe Umwelt, Nr. 291, Buwal, Bern, 91p.

Dequiedt S., Karimi B., Chemidlin Prévost-Bouré N., Terrat S., Horrigue W., Djemiel C., Lelievre M., Nowak V., Wincker P., Jolivet C., Saby N.P.A., Arrouays D., Bispo A., Feix I., Eglin T., Lemanceau P., Maron P.A. et Ranjard L., 2020. Le RMQS au service de l'écologie microbienne des sols français, *Etude et Gestion des Sols*, 27, 51-71.

Donhauser, J., Briones, M. J., Mikola, J., Jones, D. L., Eder, R., Filser, J., Frey, B., 2023. Extracting DNA from soil or directly from isolated nematodes indicate dissimilar community structure for Europe-wide forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 185, 109154.

Dunger, W. & Fiedler, H.J. (Hrsg.) 1997. *Methoden der Bodenbiologie*, 2. neubearbeitete Auflage. Verlag Gustav Fischer Jena Stuttgart Lübeck Ulm.

FAL, FAW, RAC; 1998. *Schweizerische Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten*, Band 2, *Bodenuntersuchung zur Standortcharakterisierung*.

Fernández-Bravo, M.; Gschwend, F.; Mayerhofer, J.; Hug, A.; Widmer, F.; Enkerli, J., 2021. Land-Use Type Drives Soil Population Structures of the Entomopathogenic Fungal Genus *Metarhizium*. *Microorganisms* 2021, 9, 1380.

FRIBO, 2024. Resultate der Bodenbeobachtung im Kanton Freiburg - FRIBO-Bericht, 2024. Etat de Fribourg, Staat Freiburg, Groupe de coordination pour la protection des sols, Koordinationsgruppe für den Bodenschutz, 167 p.

Fierer, N., 2017. Embracing the unknown: Disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nature Reviews Microbiology*, 15(10), 579–590.

Frey, B., Stemmer, M., Widmer, F., Luster, J., & Sperisen, C., 2006. Microbial activity and community structure of a soil after heavy metal contamination in a model forest ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(7), 1745-1756.

Frey, B., Kremer, J., Rüdts, A., Sciacca, S., Matthies, D., & Lüscher, P., 2009. Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. *European Journal of Soil Biology*, 45(4), 312-320.

Frey, B., Niklaus, P. A., Kremer, J., Lüscher, P., & Zimmermann, S., 2011. Heavy-machinery traffic impacts methane emissions as well as methanogen abundance and community structure in oxic forest soils. *Applied and Environmental Microbiology*, 77(17), 6060-6068.

Frey, B., Walthert, L., Perez-Mon, C., Stierli, B., Köchli, R., Dharmarajah, A., & Brunner, I., 2021. Deep soil layers of drought-exposed forests harbor poorly known bacterial and fungal communities. *Frontiers in Microbiology*, 12, 674160.

Frey, B., & Maurer C., 2022. Informationen zum Boden anhand der Gebundenheit der Rote-Liste Arten BAFU. *VBBio-BioSA Bulletin* Nr. 20, 2022.

Frey, B., Rast, B. M., Qi, W., Stierli, B., & Brunner, I., 2022a. Long-term mercury contamination does not affect the microbial gene potential for C and N cycling in soils but enhances detoxification gene abundance. *Frontiers in Microbiology*, 13, 1034138.

Frey, B., Varliero, G., Qi, W., Stierli, B., Walthert, L., & Brunner, I., 2022b. Shotgun metagenomics of deep forest soil layers show evidence of altered microbial genetic potential for biogeochemical cycling. *Frontiers in Microbiology*, 13, 828977.

Frossard, A., Donhauser, J., Mestrot, A., Gygax, S., Bååth, E., & Frey, B., 2018. Long- and short-term effects of mercury pollution on the soil microbiome. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 191-199.

Gross, T., Hug, A.S., Moll-Mielewicz, Müller, M., Suter, D., Wächter, D., Wollmann, I., Zimmermann, R., Meuli, R.G., 2024. Ergebnisse der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO) 1985–2019. Zustand und zeitliche Entwicklung von Schad- und Fremdstoffen, organischem Kohlenstoff und der Mikrobiologie im Boden. Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt BAFU und Bundesamt für Landwirtschaft BLW Bern, 2024.

Gubler, A., Wächter, D., Schwab, P., 2018. Homogenisierung von Bodenkohlenstoff-Daten: Harmonisierung der Resultate aus Nassoxydation (FAL-Methode) und Trockenveraschung. *Agroscope Science*, 62, 1-9.

Gschwend, F., Hug, A.-S., Gubler, A., Meuli, R.G., Hartmann, M., Frey, B., Widmer, F., 2018. Mikrobielle Diversität in Böden von 30 NABO-Referenzmessstandorten. Schlussbericht des MiDiBo NABObio Projekts.

Gschwend, F., Aregger, K., Gramlich, A., Walter, T., Widmer, F., 2020. Periodic waterlogging consistently shapes agricultural soil microbiomes by promoting specific taxa, *Applied Soil Ecology*, Vol.155, 103623.

Gschwend, F., Hartmann, M., Hug, A., Enkerli, J., Gubler, A., Frey, B., Meuli, R.G., Widmer, F., 2021a. Long-term stability of soil bacterial and fungal community structures revealed in their abundant and rare fractions. *Molecular Ecology* 30, 4305–4320.

Gschwend, F., Hartmann, M., Mayerhofer, J., Hug, A.-S., Enkerli, J., Gubler, A., Meuli, R.G., Frey, B., Widmer, F., 2021b. Site and land-use associations of soil bacteria and fungi define core and indicative taxa. *FEMS microbiology ecology* 97, fiab165.

Gschwend, F., Fernández-Bravo, M., Degruene, F., Donhauser, J., Moll-Mielewicz, J., Frey, B. et al. (2022) Final report of the pilot study «MiDiBo-2» (Mikroskopische Diversität im Boden 2). 1-71.

Hartmann, M., Niklaus, P. A., Zimmermann, S., Schmutz, S., Kremer, J., Abarenkov, K., Frey, B., 2014. Resistance and resilience of the forest soil microbiome to logging-associated compaction. *ISME Journal*, 8(1), 226-244.

Hartmann, M., Frey, B., Mayer, J., Mäder, P. Widmer, F., 2015. Distinct soil microbial diversity under longterm organic and conventional farming. *ISME Journal* 9, 1177–1194.

Hawksworth, D., Lücking, R., 2017. Fungal Diversity Revisited: 2.2 to 3.8 Million Species, 79-95. In Heitman, J., Howlett, B., Crous, P., Stukenbrock, E., James, T., Gow, N. (ed), *The Fungal Kingdom*. ASM Press, Washington, DC.

- Hebert, P.D., Cywinska, A., Ball, S.L., deWaard, J.R., 2003. Biological identifications through DNA bar-codes. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 270, 313-321.
- Heinze, S., Raupp, J., Joergensen, R.G., 2010. Effects of fertilizer and spatial heterogeneity in soil pH on microbial biomass indices in a long-term field trial of organic agriculture. *Plant Soil* 328: 203-215.
- Hug, A.S., Gubler, A., Gschwend, F., Widmer, F., Oberholzer, H.-R., Frey, B., Meuli, R.G., 2018. NABObio - Bodenbiologie in der Nationalen Bodenbeobachtung, Ergebnisse 2012–2016, Handlungsempfehlungen und Indikatoren. *Agroscope Science* 63. Zürich-Reckenholz.
- Hug, A.-S., Moll-Mielewczik J., Gubler A., 2021. Monitoring Bodenbiologie – Auswertung bodenmikrobiologischer Daten von kantonalen und nationalen Bodenbeobachtungsstandorten. *Agroscope Science*, 110, 1-35.
- Hug, A.-S., 2024. Vergleichswerte von bodenmikrobiologischen Parametern. *Agroscope*, Zürich-Reckenholz. Ein Projekt der VBBio.
- Hug, A.-S. & Moll-Mielewczik J., 2024. Referenzwertgleichungen für die mikrobielle Biomasse und Basalatmung an Graslandstandorten. *Agroscope Science*, 188, 1-31.
- Jansa, J., Erb, A., Oberholzer, H.-R., Smilauer, P., Egli, S., 2014. Soil and geography are more important determinants of indigenous arbuscular mycorrhizal communities than management practices in Swiss agricultural soils. *Molecular Ecology*, 23, 2118-2135.
- Klaus, G., Cordillot, F., Künzle, I., 2021. Zustand der Artenvielfalt in der Schweiz. *Synthese rote Listen, Stand 2020*. BAFU, Bern, Info Species, Neuchâtel. Umwelt-Zustand.
- Labouyrie, M., Ballabio, C., Romero, F. et al. Patterns in soil microbial diversity across Europe. *Nat Commun* 14, 3311 (2023).
- Lehmitz, R., Römbke, J., Graefe, U., Beylich, A., Krück, S., 2016. Rote Liste und Gesamtartenliste der Regenwürmer Deutschlands. Hg. Senckenberg, Museum für Naturkunde, Görlitz.
- Li, X., Zhang, L., Liu, Y., and Sun, C., 2012. Impact of Different Fertilization Regimes on Soil Organic Carbon and Microbial Biomass in an Intensively Cultivated Soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 159; 72-78.
- Liu, C., Wu, J., Zhang, Y., & Liu, Y., 2014. Relationships between soil microbial biomass and soil properties in a temperate forest. *Applied Soil Ecology*, 74, 21-29.
- Lilja, M.A., Buivydaitė, Ž., Zervas, A., Krogh, P.H., Hansen, B.W., Winding, A., Sapkota, R., 2023. Comparing earthworm biodiversity estimated by DNA metabarcoding and morphology-based approaches. *Appl Soil Ecol*, 185, 104798.
- Mäder, P., Fließbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P., Niggli, U., 2002. Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science* 296: 1694-1697.

Maire N., 1984. Extraction de l'adénosine triphosphate dans les sols ; une nouvelle méthode de calcul des pertes en ATP. *Soil Biology and Biochemistry*. Vol. 19, 491-500.

Maurer, C., Müller, D., Lanfranchi, M., Weisskopf, P., Oberholzer, H.R., Walder, F., 2020. Mikrobiologische Parameter in der Kantonalen Bodenbeobachtung – eine Synthese. *Agrarforschung Schweiz* 11: 147-153.

Mayerhofer, J., Eckard, S., Hartmann, M., Grabenweger, G., Widmer, F., Leuchtmann, A., Enkerli, J., 2017. Assessing effects of the entomopathogenic fungus *Metarhizium brunneum* on soil microbial communities in *Agriotes* spp. biological pest control. *FEMS microbiology ecology*, 93(10), fix117.

Mayerhofer, J., Wächter, D., Calanca, P., Kohli, L., Roth, T., Meuli, R. G., Widmer, F., 2021. Environmental and Anthropogenic Factors Shape Major Bacterial Community Types Across the Complex Mountain Landscape of Switzerland. *Frontiers in Microbiology*, 12, (11 March), 2021, 1-17.

Mösch, D. und Hunziker, M., 2015. 10 Jahre Bodenmikrobiologie-Monitoring. Abteilung Umwelt, Umwelt Aargau, Sondernummer 45, November 2015.

Nannipieri, P., Ascher, J., & Ceccherini, M. T., 2003. Soil microbial biomass: A key factor in soil fertility. In *Soil Microbiology, Ecology, and Biochemistry*, 247-272. CRC Press.

Nunes, M. R., Karlen, D. L., Veum, K. S., Moorman, T. B., Cambardella, C. A., 2020. Biological soil health indicators respond to tillage intensity: a US meta-analysis. *Geoderma* 369, 114335. 10.1016/j.geoderma.2020.114335

Oberholzer, H.-R., Rek, J., Weisskopf, P., Walther, U., 1999. Evaluation of soil quality by means of microbiological parameters related to the characteristics of individual arable sites. *Agrobiological Research* 52 (2), 113–125.

Oberholzer, H.-R., Scheid, S., 2007. Bodenmikrobiologische Kennwerte. Erfassung des Zustands landwirtschaftlicher Böden im NABO-Referenzmessnetz anhand biologischer Parameter (NABObio). Umwelt-Wissen Nr. 0723. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.

Oberholzer, H.-R., Scheid, S., Schwab, P., Bonvicini, A., Müller, S., Brunner, H., 2006. Langzeitbeobachtung von physikalischen und biologischen Bodeneigenschaften. Pilotprojekt LAZBO. Teil 3, Bodenmikrobiologische Untersuchungen.

Oberholzer, S., Herrmann, C., Bodenhausen, N., Krause, H. M., Mestrot, A., Speranza, C. I., Jarosch, K. A., 2024. No effect on biological or chemical soil properties when amended with effective microorganisms for improved cover crop decomposition. *Applied Soil Ecology*, 197, 105358.

ökonsult, 1994. Untersuchung zum Regenerationspotential von Regenwurmpopulationen in unterschiedlich alten Rekultivierungsflächen. Erfolgskontrolle der Rekultivierung Mattstetten BE. Ökonsult 1994 zuhanden Bodenschutzfachstelle Kanton Bern.

Orgiazzi, A., Panagos, P., Fernández-Ugalde, O., Wojda, P., Labouyrie, M., Ballabio, C., Franco, A., Pistocchi, A., Montanarella, L., Jones, A., 2022. LUCAS Soil Biodiversity and LUCAS Soil Pesticides, new tools for research and policy development. *Eur J Soil Sci*, 73, e13299.

OSol, 1998. Ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol) du 1er juillet 1998 (Etat le 12 avril 2016) RS 814.12.

Reganold, J.P., Palmer, A.S., Lockhart, J.C., and Macgregor, A.N., 2001. Comparison of Soil Microbial Biomass and Activity Under Organic and Conventional Farming Systems. *Soil Science Society of America Journal*, 65, 3, 1026-1033.

Römbke, J., Dorow, W.H.O., Jänsch, S., 2018. Distribution and diversity of earthworms (Lumbricidae) in Hesse (Central Germany): current knowledge. *Soil Organ.* 90, 171–185.

Roy, V., Ventura, M., Fourcade, Y., Justine, J. L., Gigon, A., & Dupont, L., 2022. Gut content metabarcoding and citizen science reveal the earthworm prey of the exotic terrestrial flatworm, *Obama nungara*. *European Journal of Soil Biology*, 113, 103449.

Rutgers, M., Schouten, A.J., Bloem, J., Van Eekeren, N., De Goede, R.G.M., Jagersop Akkerhuis, G.A.J.M., Van der Wal, A., Mulder, C., Brussaard, L. and Breure, A.M., 2009. Biological measurements in a nationwide soil monitoring network. *European Journal of Soil Science*, 60: 820-832.

Sparling, G. P., 1992. Ratio of Microbial Biomass Carbon to Organic Carbon in Soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 24(1), 1-10.

Stefanowicz, A.M., Stanek, M., Nobis, M. et al., 2016. Species-specific effects of plant invasions on activity, biomass, and composition of soil microbial communities. *Biol Fertil Soils* 52, 841–852 (2016).

Stone, D., Ritz, K., Griffiths, B.G., Orgiazzi, A., Creamer, R.R., 2015. Selection of biological indicators appropriate for European soil monitoring *Applied. Soil Ecology*.

Stone, D., Blomkvist, P., Hendriksen, N.B., Bonkowski, M., Jørgensen, H.B., Carvalho, F., Dunbar, M.B., Gardi, C., Geisen, S., Griffiths, R., Hug, A.S., Jensen, J., Laudon, H., Mendes, S., Morais, P.V., Orgiazzi, A., Plassart, P., Römbke, J., Rutgers, M., Schmelz, R.M., Sousa, J.P., Steenbergen, E., Suhadolc, M., Winding, A., Zupan, M., Lemanceau, P., Creamer, R.E., 2016. A method of establishing a transect for biodiversity and ecosystem function monitoring across Europe. *Applied Soil Ecology, Soil biodiversity and ecosystem functions across Europe: a transect covering variations in biogeographical zones. Land Use Soil Properties* 97, 3–11.

VBB/BSA 2009. Arbeitshilfe zur Anwendung und Interpretation bodenbiologischer Parameter. Arbeitsgruppe Vollzug Bodenbiologie/Biologie du sol-Application VBB/BSA, Frick.

VBBio-BioSA 2022: Fliessbach, A. Sammlung bodenbiologischer Studien mit einem Standort-Bezug in der Schweiz. Abschlussbericht. Forschungsinstitut für biologischen Landbau., FiBL. Ein Projekt der VBBio-BioSA, 2022.

Walder, F., Schmid, M.W., Riedo, J., Valzano-Held, A.Y., Banerjee, S., Büchi, L., Bucheli, T.D., van der Heijden, M.G.A., 2022. Soil microbiome signatures are associated with pesticide residues in arable landscapes. *Soil Biology and Biochemistry* 174 (2022) 108830.

Annexe

Tableaux des valeurs de comparaison : Données réparties par réseau de mesure

Dans les tableaux 10 à 13, les valeurs de comparaison et les propriétés des sols sont divisées, en plus de l'utilisation, par réseau de mesure (KABO AG, KABO BE, KABO GR, MIP¹¹, NABO, OBA¹²), lorsqu'elles existent, par classe d'utilisation (culture maraîchère, culture fruitière/vigne) et par profondeur d'échantillonnage. Cette subdivision tient compte de facteurs pédologiques tels que la région (altitude, géologie, géomorphologie, etc.) ou le climat (précipitations, température) et de la focalisation parfois différente lors de la sélection des sites des différents programmes d'observation des sols. Cela peut permettre une comparaison plus précise des valeurs mesurées.

11 *Projet «Potentiel infectieux des mycorhizes»*

12 *KABO BE, Parcelles de suivi à long terme Oberacker*

Tableau 8 : Valeurs de comparaison de la biomasse microbienne FE-C [mg kg⁻¹ MS] (n=311)

Utilisation	Réseau de surveillance	Classe d'utilisation	profondeur de prélèvement	n	Médiane	Minimum	Maximum	Quartile inférieur	Quartile supérieur
Biomasse microbienne FE-C [mg kg⁻¹ MS]									
Terre assolée	KABO AG	Terre assolée	0–20 cm	15	711	351	3191	448	954
		Culture maraîchère	0–20 cm	2	545	378	712	462	629
		Arboriculture/viticulture	0–10 cm	1	834	834	834	834	834
	KABO BE	Terre assolée	0–10 cm	3	811	634	995	723	903
		Terre assolée	0–20 cm	18	809	525	1894	738	1049
	KABO GR	Terre assolée	0–20 cm	5	715	230	2298	664	1431
	MIP	Terre assolée	0–20 cm	10	497	230	1349	334	804
	NABO	Terre assolée	0–10 cm	15	632	286	1609	506	835
		Terre assolée	0–20 cm	30	588	255	1209	459	757
		Culture maraîchère	0–10 cm	1	209	209	209	209	209
		Culture maraîchère	0–20 cm	4	350	203	1461	305	635
		Arboriculture/viticulture	0–10 cm	2	831	683	980	757	906
		Arboriculture/viticulture	0–20 cm	6	527	276	922	394	717
	OBA	Terre assolée	0–10 cm	6	399	338	532	363	489
		Terre assolée	0–20 cm	6	401	364	502	389	435
Prairie permanente	KABO AG	Prairie permanente	0–10 cm	12	1105	459	3817	636	1772
	KABO BE	Prairie permanente	0–10 cm	18	832	525	1894	738	1049
		Prairie permanente	0–20 cm	18	829	523	1827	706	1046
	KABO GR	Prairie permanente	0–10 cm	34	2124	652	4409	1704	2875
		Prairie permanente	0–20 cm	1	2389	2389	2389	2389	2389
	MIP	Prairie permanente	0–20 cm	22	2095	700	4520	1694	2822
	NABO	Prairie permanente	0–10 cm	12	2384	765	3302	1637	3028
		Prairie permanente	0–20 cm	43	1649	398	3391	1296	1983
Forêt	NABO	Forêt	0–20 cm	27	1130	469	4658	740	1712

Tableau 9 : Valeurs de comparaison de la biomasse microbienne FE-N [mg kg⁻¹ MS] (n=269)

Utilisation	Réseau de surveillance	Classe d'utilisation	profondeur de prélèvement	n	Médiane	Minimum	Maximum	Quartile inférieur	Quartile supérieur
Biomasse microbienne FE-N [mg kg⁻¹ MS]									
Terre assolée	KABO AG	Terre assolée	0–20 cm	15	119	59	359	75	153
		Culture maraîchère	0–20 cm	2	81	59	103	70	92
		Arboriculture/viticulture	0–10 cm	1	131	131	131	131	131
	KABO BE	Terre assolée	0–10 cm	3	125	110	127	117	126
		Terre assolée	0–20 cm	18	130	81	242	106	143
	KABO GR	Terre assolée	0–20 cm	3	114	35	381	75	247
	NABO	Terre assolée	0–10 cm	15	82	31	228	62	103
		Terre assolée	0–20 cm	30	83	37	225	69	103
		Culture maraîchère	0–10 cm	1	27	27	27	27	27
		Culture maraîchère	0–20 cm	4	58	28	282	48	116
		Arboriculture/viticulture	0–10 cm	2	88	79	97	83	93
		Arboriculture/viticulture	0–20 cm	6	70	42	135	58	117
	OBA	Terre assolée	0–10 cm	6	55	47	69	50	63
		Terre assolée	0–20 cm	6	60	51	84	56	68
Prairie permanente	KABO AG	Prairie permanente	0–10 cm	12	167	62	542	88	262
	KABO BE	Prairie permanente	0–10 cm	18	133	81	242	106	143
		Prairie permanente	0–20 cm	18	126	76	227	95	139
	KABO GR	Prairie permanente	0–10 cm	27	318	93	679	230	399
	NABO	Prairie permanente	0–10 cm	12	289	93	384	186	318
		Prairie permanente	0–20 cm	43	243	56	500	191	277
Forêt	NABO	Forêt	0–20 cm	27	144	68	333	109	187

Tableau 10 : Valeurs de comparaison de la respiration basale [mg CO₂-C kg⁻¹ MS h⁻¹] (n=338)

Utilisation	Réseau de surveillance	Classe d'utilisation	profondeur de prélèvement	n	Médiane	Minimum	Maximum	Quartile inférieur	Quartile supérieur
Respiration basale [mg CO₂-C kg⁻¹ MS h⁻¹]									
Terre assolée	KABO AG	Terre assolée	0–20 cm	15	0.5	0.3	2.5	0.4	0.9
		Culture maraîchère	0–20 cm	2	0.7	0.7	0.8	0.7	0.8
		Arboriculture/viticulture	0–10 cm	1	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
	KABO BE	Terre assolée	0–10 cm	3	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
		Terre assolée	0–20 cm	18	0.9	0.6	1.6	0.8	0.9
	KABO GR	Terre assolée	0–20 cm	5	0.9	0.6	2.0	0.6	1.1
	MIP	Terre assolée	0–20 cm	10	0.7	0.3	1.4	0.5	1.1
	NABO	Terre assolée	0–10 cm	29	0.6	0.2	1.5	0.4	0.8
		Terre assolée	0–20 cm	30	0.7	0.3	1.5	0.5	0.9
		Culture maraîchère	0–10 cm	3	0.7	0.2	0.7	0.4	0.7
		Culture maraîchère	0–20 cm	4	0.6	0.3	1.9	0.5	1.0
		Arboriculture/viticulture	0–10 cm	5	0.9	0.9	2.2	0.9	1.3
		Arboriculture/viticulture	0–20 cm	6	0.9	0.7	2.2	0.8	1.1
	OBA	Terre assolée	0–10 cm	6	0.5	0.4	0.6	0.4	0.5
		Terre assolée	0–20 cm	6	0.4	0.4	0.5	0.4	0.5
Prairie permanente	KABO AG	Prairie permanente	0–10 cm	12	1.3	0.6	2.8	1.0	1.9
	KABO BE	Prairie permanente	0–10 cm	18	0.9	0.6	1.6	0.8	1.0
		Prairie permanente	0–20 cm	18	0.9	0.6	1.6	0.8	1.0
	KABO GR	Prairie permanente	0–10 cm	34	1.9	0.8	5.0	1.5	2.2
		Prairie permanente	0–20 cm	1	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9
	MIP	Prairie permanente	0–20 cm	22	1.6	0.7	2.8	1.3	2.0
	NABO	Prairie permanente	0–10 cm	20	1.6	0.4	2.3	1.1	1.7
		Prairie permanente	0–20 cm	43	1.3	0.6	2.6	1.1	1.8
Forêt	NABO	Forêt	0–20 cm	27	1.7	0.6	4.5	1.0	2.7

Tableau 11 : Valeurs de comparaison du quotient métabolique qCO_2 [$mg\ CO_2-C\ g^{-1}\ C_{mic}$] (RB/FE-C) (n=311)

Utilisation	Réseau de surveillance	Classe d'utilisation	profondeur de prélèvement	n	Médiane	Minimum	Maximum	Quartile inférieur	Quartile supérieur
Quotient métabolique qCO_2 [$mg\ CO_2-C\ g^{-1}\ C_{mic}$] (RB/FE-C)									
Terre assolée	KABO AG	Terre assolée	0–20 cm	15	0.9	0.6	1.5	0.8	1.1
		Culture maraîchère	0–20 cm	2	1.5	1.2	1.8	1.3	1.7
		Arboriculture/viticulture	0–10 cm	1	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
	KABO BE	Terre assolée	0–10 cm	3	1.1	1.1	1.6	1.1	1.3
		Terre assolée	0–20 cm	18	1.1	0.7	1.5	0.9	1.1
	KABO GR	Terre assolée	0–20 cm	5	0.9	0.7	2.6	0.9	1.3
	MIP	Terre assolée	0–20 cm	10	1.3	1.0	1.6	1.1	1.5
	NABO	Terre assolée	0–10 cm	15	0.8	0.5	1.2	0.7	1.0
		Terre assolée	0–20 cm	30	1.2	0.7	2.4	1.0	1.4
		Culture maraîchère	0–10 cm	1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
		Culture maraîchère	0–20 cm	4	1.5	1.3	2.0	1.4	1.7
		Arboriculture/viticulture	0–10 cm	2	1.1	0.9	1.4	1.0	1.2
		Arboriculture/viticulture	0–20 cm	6	2.4	1.3	2.5	1.6	2.5
	OBA	Terre assolée	0–10 cm	6	1.1	0.9	1.5	1.0	1.3
		Terre assolée	0–20 cm	6	1.0	0.9	1.3	1.0	1.1
Prairie permanente	KABO AG	Prairie permanente	0–10 cm	12	1.1	0.7	2.2	1.0	1.6
	KABO BE	Prairie permanente	0–10 cm	18	1.1	0.7	1.5	0.9	1.1
		Prairie permanente	0–20 cm	18	1.1	0.7	1.6	1.0	1.1
	KABO GR	Prairie permanente	0–10 cm	34	0.9	0.5	1.6	0.7	1.1
		Prairie permanente	0–20 cm	1	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	MIP	Prairie permanente	0–20 cm	22	0.7	0.5	1.2	0.7	0.8
	NABO	Prairie permanente	0–10 cm	12	0.6	0.5	0.7	0.5	0.6
		Prairie permanente	0–20 cm	43	0.9	0.5	2.2	0.7	1.0
Forêt	NABO	Forêt	0–20 cm	27	1.5	0.7	3.5	1.2	1.8

Tableau 12 : Valeurs de comparaison du rapport C_{mic}/C_{org} [$mg\ C_{mic}\ g^{-1}\ C_{org}$] (FE-C/ C_{org}) (n=268)

Utilisation	Réseau de surveillance	Classe d'utilisation	profondeur de prélèvement	n	Médiane	Minimum	Maximum	Quartile inférieur	Quartile supérieur
Rapport C_{mic}/C_{org} [$mg\ C_{mic}\ g^{-1}\ C_{org}$] (FE-C/$C_{org}$)									
Terre assolée	KABO AG	Terre assolée	0–20 cm	6	35.3	19.3	40.4	27.9	38.2
		Culture maraîchère	0–20 cm	2	18.9	14.8	23.0	16.9	21.0
		Arboriculture/viticulture	0–10 cm	1	22.3	22.3	22.3	22.3	22.3
	KABO BE	Terre assolée	0–10 cm	3	40.8	32.7	42.8	36.8	41.8
		Terre assolée	0–20 cm	18	39.6	25.1	48.1	36.7	40.6
	KABO GR	Terre assolée	0–20 cm	4	35.0	24.1	52.3	30.0	41.5
	MIP	Terre assolée	0–20 cm	10	26.1	22.0	42.3	22.8	31.2
	NABO	Terre assolée	0–10 cm	15	37.0	25.1	56.1	30.8	39.0
		Terre assolée	0–20 cm	29	34.1	24.1	46.8	30.1	37.9
		Culture maraîchère	0–10 cm	1	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6
		Culture maraîchère	0–20 cm	4	11.6	4.9	30.9	9.1	17.2
		Arboriculture/viticulture	0–10 cm	2	28.7	13.9	43.5	21.3	36.1
		Arboriculture/viticulture	0–20 cm	6	28.3	10.7	39.4	25.7	36.6
	OBA	Terre assolée	0–10 cm	6	27.6	23.9	31.9	25.1	30.4
		Terre assolée	0–20 cm	6	26.2	21.2	29.0	25.4	28.3
Prairie permanente	KABO AG	Prairie permanente	0–10 cm	10	35.5	13.2	59.4	28.5	47.3
	KABO BE	Prairie permanente	0–10 cm	18	39.8	25.1	48.1	36.7	41.7
		Prairie permanente	0–20 cm	18	38.1	23.5	46.9	36.7	40.6
	KABO GR	Prairie permanente	0–10 cm	16	45.4	25.9	60.5	41.7	51.3
		Prairie permanente	0–20 cm	1	43.8	43.8	43.8	43.8	43.8
	MIP	Prairie permanente	0–20 cm	22	54.0	33.0	74.3	46.0	58.8
	NABO	Prairie permanente	0–10 cm	12	50.9	33.7	70.3	48.3	59.1
		Prairie permanente	0–20 cm	33	40.1	24.7	58.1	32.3	45.6
Forêt	NABO	Forêt	0–20 cm	25	25.5	12.3	69.2	19.5	32.6

Tableau 13 : Teneur en carbone organique (%) (C_{org} , méthode FAL) (n=268), pH (pH $CaCl_2$) (n=263), et teneur en argile (%) (n=277), répartis par réseau de mesure

Utilisation	Réseau de surveillance	Classe d'utilisation	profondeur de prélèvement	n	Médiane	Minimum	Maximum	Quartile inférieur	Quartile supérieur
C_{org} [%]									
Terre assolée	KABO AG	Terre assolée	0–20 cm	6	2.36	1.28	3.09	2.22	2.49
		Culture maraîchère	0–20 cm	2	2.82	2.55	3.09	2.68	2.96
		Arboriculture/viticulture	0–10 cm	1	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78
	KABO BE	Terre assolée	0–10 cm	3	2.32	1.62	2.54	1.97	2.43
		Terre assolée	0–20 cm	18	2.11	1.40	7.63	1.84	2.60
	KABO GR	Terre assolée	0–20 cm	4	3.68	1.76	4.47	2.66	4.41
	MIP	Terre assolée	0–20 cm	10	2.12	0.82	4.22	1.17	3.12
	NABO	Terre assolée	0–10 cm	15	1.94	1.08	3.38	1.54	2.17
		Terre assolée	0–20 cm	29	1.72	0.94	3.61	1.42	2.09
		Culture maraîchère	0–10 cm	1	1.98	1.98	1.98	1.98	1.98
		Culture maraîchère	0–20 cm	4	2.31	1.17	29.77	1.75	9.45
		Arboriculture/viticulture	0–10 cm	2	3.59	2.25	4.92	2.92	4.26
		Arboriculture/viticulture	0–20 cm	6	1.99	1.11	3.44	1.76	2.26
	OBA	Terre assolée	0–10 cm	6	1.55	1.36	1.67	1.41	1.61
		Terre assolée	0–20 cm	6	1.62	1.36	1.82	1.47	1.71
Prairie permanente	KABO AG	Prairie permanente	0–10 cm	10	2.92	1.16	3.85	2.41	3.59
	KABO BE	Prairie permanente	0–10 cm	18	2.09	1.40	7.63	1.84	2.60
		Prairie permanente	0–20 cm	18	2.12	1.39	7.82	1.90	2.64
	KABO GR	Prairie permanente	0–10 cm	16	4.58	2.23	9.50	3.32	5.33
		Prairie permanente	0–20 cm	1	5.45	5.45	5.45	5.45	5.45
	MIP	Prairie permanente	0–20 cm	22	4.25	1.67	7.89	3.57	4.95
	NABO	Prairie permanente	0–10 cm	12	4.44	1.82	6.16	3.79	5.15
		Prairie permanente	0–20 cm	33	4.03	1.45	10.14	3.31	4.82
Forêt	NABO	Forêt	0–20 cm	25	4.24	2.04	14.26	2.99	6.30

Utilisation	Réseau de surveillance	Classe d'utilisation	profondeur de prélèvement	n	Médiane	Minimum	Maximum	Quartile inférieur	Quartile supérieur
pH [CaCl₂]									
Terre assolée	KABO AG	Terre assolée	0–20 cm	6	6.7	5.6	7.3	6.5	7.2
		Culture maraîchère	0–20 cm	2	6.9	6.5	7.3	6.7	7.1
		Arboriculture/viticulture	0–10 cm	1	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2
	KABO BE	Terre assolée	0–10 cm	3	6.0	5.1	6.5	5.5	6.2
		Terre assolée	0–20 cm	18	5.6	5.0	6.4	5.2	6.0
	KABO GR	Terre assolée	0–20 cm	5	7.1	6.8	7.4	7.1	7.1
	MIP	Terre assolée	0–20 cm	10	6.6	4.9	6.9	5.6	6.8
	NABO	Terre assolée	0–10 cm	15	5.8	4.9	7.3	5.1	6.6
		Terre assolée	0–20 cm	21	6.2	4.9	7.5	5.7	7.0
		Culture maraîchère	0–10 cm	1	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7
		Culture maraîchère	0–20 cm	2	6.3	5.7	6.9	6.0	6.6
		Arboriculture/viticulture	0–10 cm	2	5.6	5.2	6.1	5.4	5.8
		Arboriculture/viticulture	0–20 cm	2	6.4	5.9	7.0	6.2	6.7
	OBA	Terre assolée	0–10 cm	6	5.8	5.6	6.2	5.7	5.8
		Terre assolée	0–20 cm	6	6.1	5.9	6.3	6.0	6.2
Prairie permanente	KABO AG	Prairie permanente	0–10 cm	10	7.1	5.5	7.5	6.4	7.3
	KABO BE	Prairie permanente	0–10 cm	18	5.6	5.0	6.4	5.2	6.0
		Prairie permanente	0–20 cm	18	5.5	5.0	6.4	5.2	6.1
	KABO GR	Prairie permanente	0–10 cm	33	5.6	4.0	7.3	4.6	6.9
		Prairie permanente	0–20 cm	1	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3
	MIP	Prairie permanente	0–20 cm	22	6.2	4.3	6.8	5.5	6.6
	NABO	Prairie permanente	0–10 cm	12	5.4	4.4	6.4	4.8	5.8
		Prairie permanente	0–20 cm	27	5.4	3.9	6.3	4.9	5.7
Forêt	NABO	Forêt	0–20 cm	22	4.4	3.4	7.2	3.9	5.1
Argile [%]									
Terre assolée	KABO AG	Terre assolée	0–20 cm	6	32	13	40	19	33
		Culture maraîchère	0–20 cm	2	26	13	40	20	33
		Arboriculture/viticulture	0–10 cm	1	29	29	29	29	29
	KABO BE	Terre assolée	0–10 cm	3	17	15	19	16	18
		Terre assolée	0–20 cm	18	18	14	36	16	19
	KABO GR	Terre assolée	0–20 cm	5	22	8	29	19	23
	MIP	Terre assolée	0–20 cm	10	20	11	29	18	22
	NABO	Terre assolée	0–10 cm	15	20	10	56	17	26
		Terre assolée	0–20 cm	27	21	6	59	18	28
		Culture maraîchère	0–10 cm	1	13	13	13	13	13
		Culture maraîchère	0–20 cm	4	19	10	37	12	29
		Arboriculture/viticulture	0–10 cm	2	15	9	21	12	18
		Arboriculture/viticulture	0–20 cm	6	16	7	29	14	25
	OBA	Terre assolée	0–10 cm	6	17	14	19	16	18
		Terre assolée	0–20 cm	6	15	14	18	14	16
Prairie permanente	KABO AG	Prairie permanente	0–10 cm	10	31	12	42	22	34
	KABO BE	Prairie permanente	0–10 cm	18	18	14	36	16	19
		Prairie permanente	0–20 cm	18	18	14	37	16	19
	KABO GR	Prairie permanente	0–10 cm	33	22	11	36	16	26
		Prairie permanente	0–20 cm	1	27	27	27	27	27
	MIP	Prairie permanente	0–20 cm	22	25	17	33	20	29
	NABO	Prairie permanente	0–10 cm	12	25	12	37	21	28
		Prairie permanente	0–20 cm	27	24	11	51	19	31
Forêt	NABO	Forêt	0–20 cm	24	23	12	48	18	28

Boxplots des valeurs de comparaison, réparties par réseau de mesure

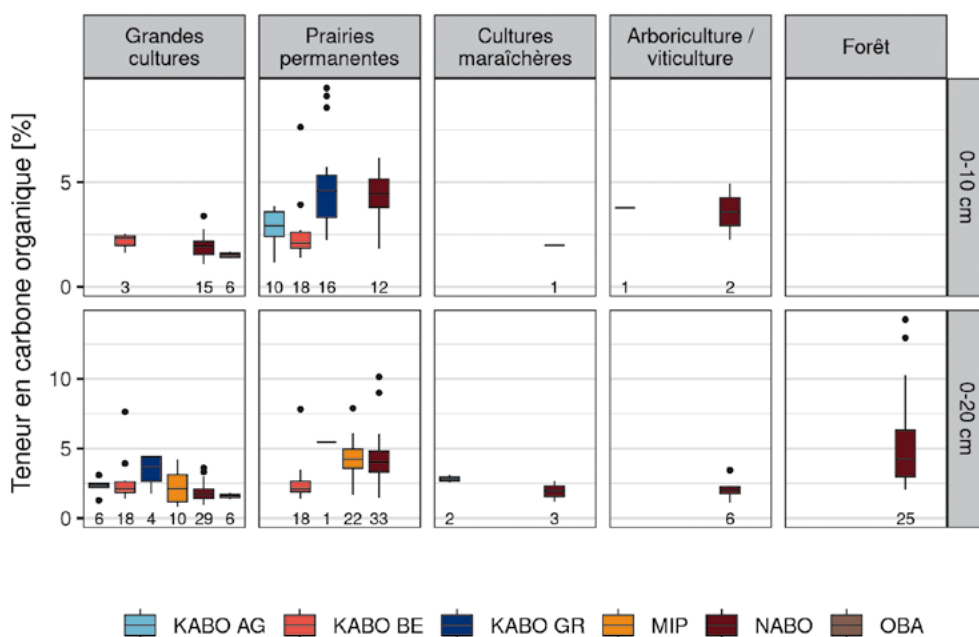


Figure 2

Teneur en carbone organique (%) (méthode FAL), les chiffres sous le boxplot représentent le nombre de sites (n) ; avec médiane, quartile inférieur et quartile supérieur.

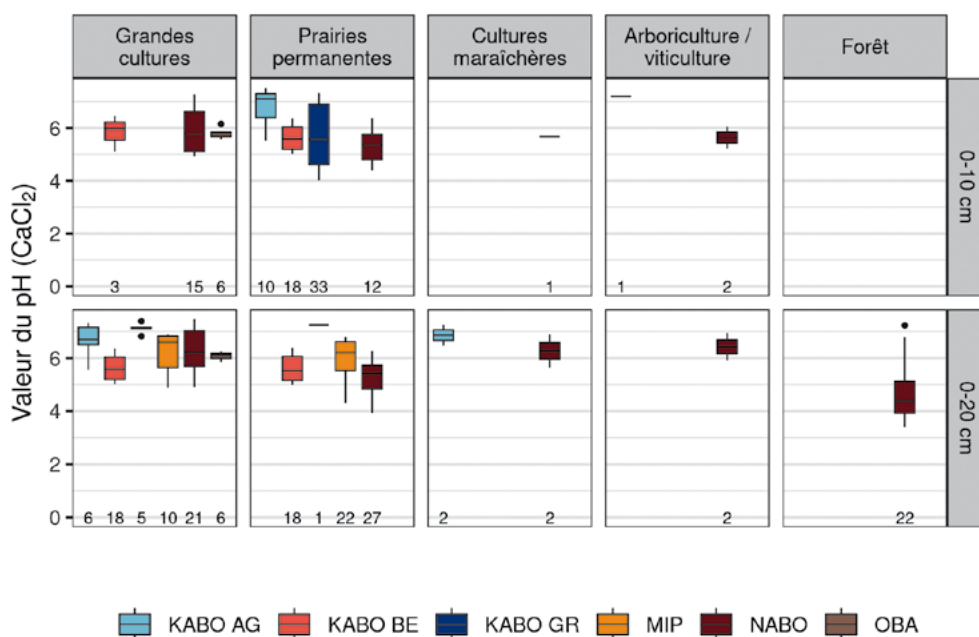
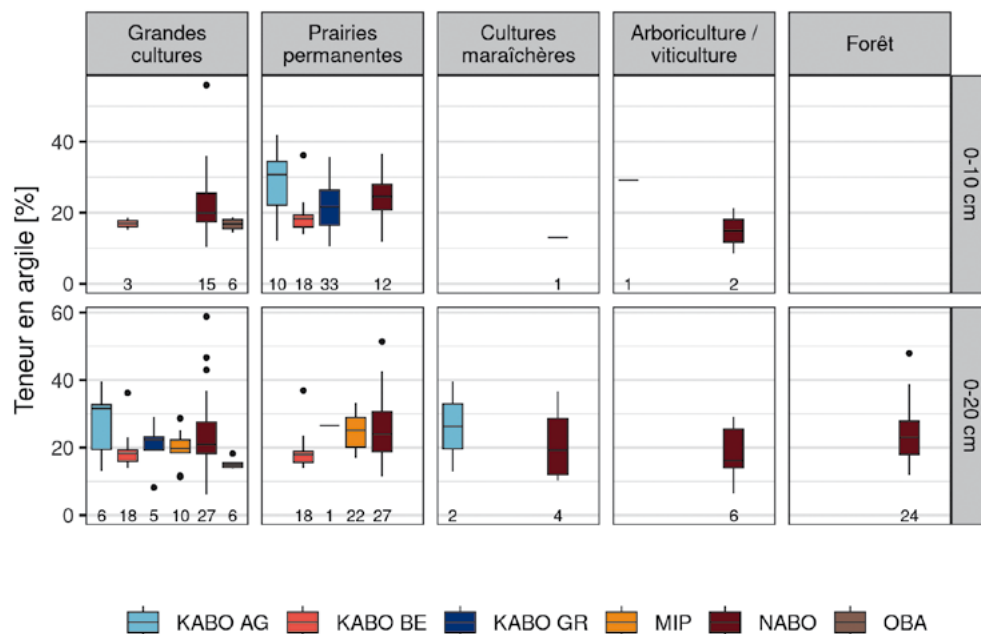


Figure 3

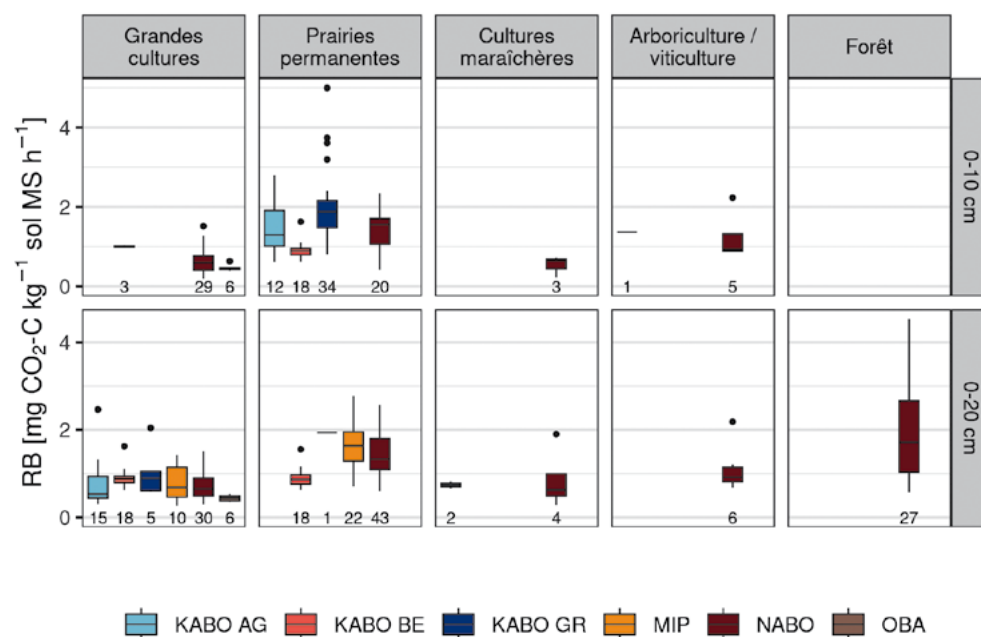
pH (CaCl₂), les chiffres sous le boxplot sont le nombre de sites (n) ; avec médiane, quartiles inférieur et supérieur.

Figure 4

Teneur en argile (%), les chiffres sous le boxplot sont le nombre de sites (n) ; avec médiane, quartiles inférieur et supérieur.

**Figure 5**

Valeurs de comparaison de la respiration basale [$\text{mg CO}_2\text{-C kg}^{-1} \text{ sol MS h}^{-1}$]. Les chiffres sous le boxplot représentent le nombre de sites (n) ; avec la médiane, le quartile inférieur et le quartile supérieur.



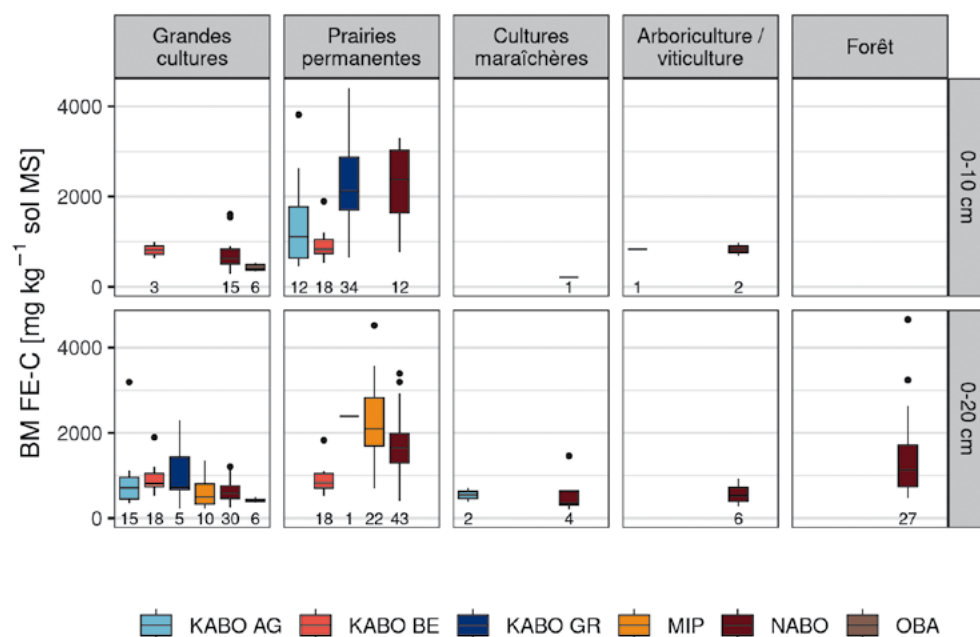


Figure 6

Valeurs de comparaison de la biomasse microbienne **BM FE-C** [$\text{mg kg}^{-1} \text{sol MS}$]. Les chiffres sous la boîte à moustaches représentent le nombre de sites (n) ; avec la médiane, le quartile inférieur et le quartile supérieur.

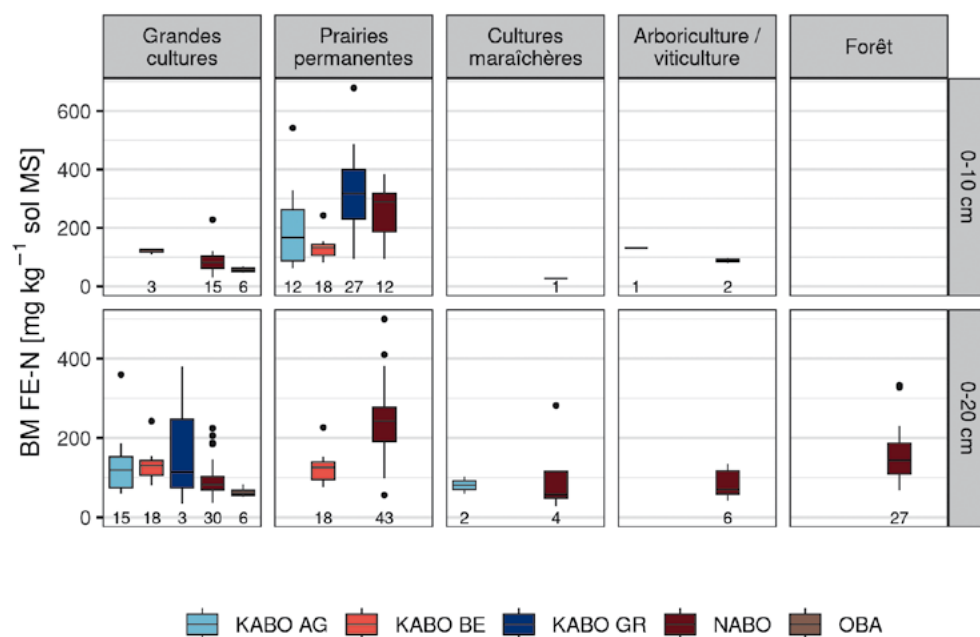
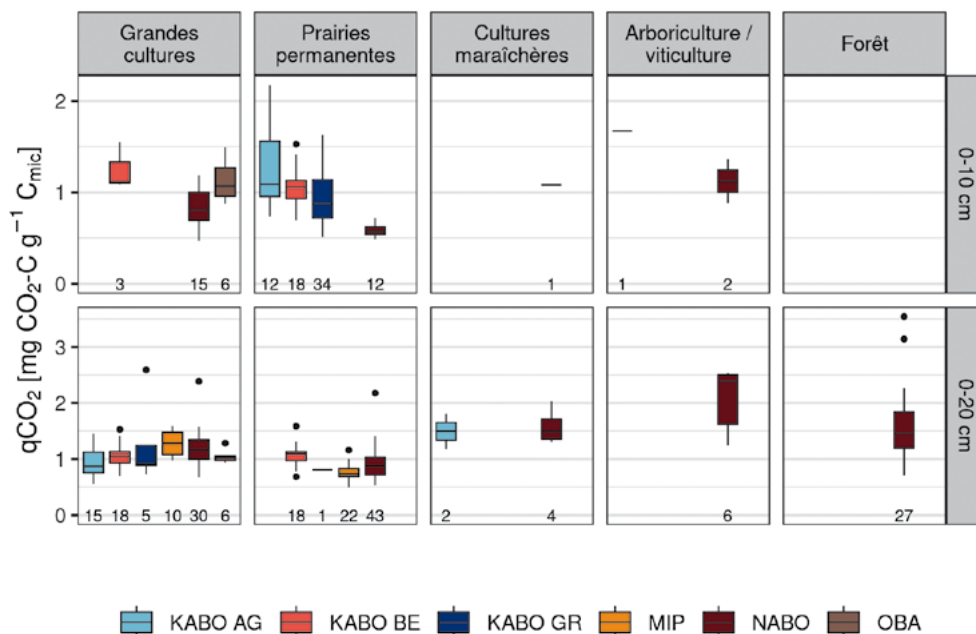


Figure 7

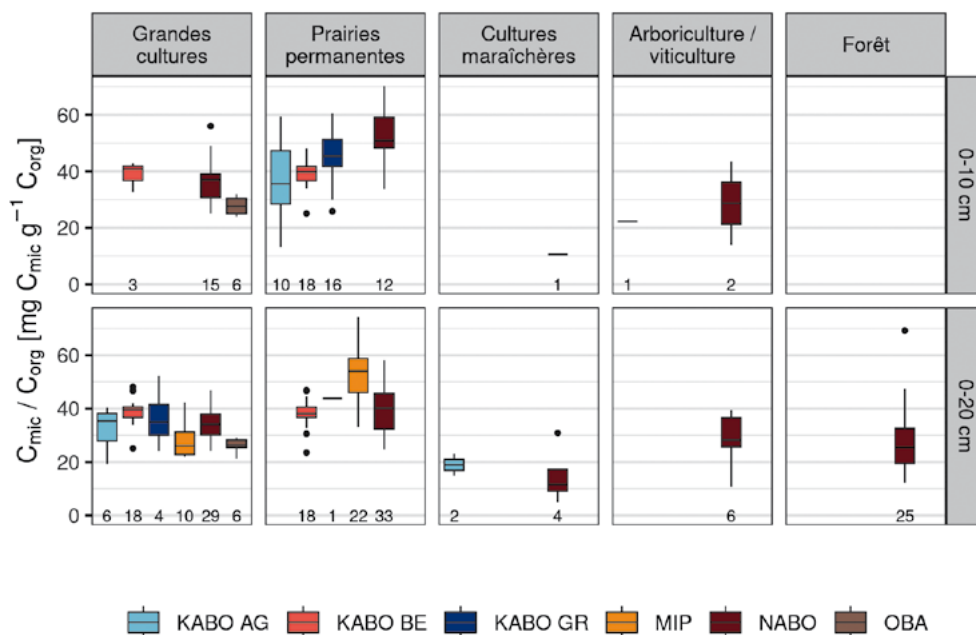
Valeurs de comparaison de la biomasse microbienne **BM FE-N** [$\text{mg kg}^{-1} \text{sol MS}$]. Les chiffres sous le boxplot représentent le nombre de sites (n) ; avec médiane, quartiles inférieur et supérieur.

Figure 8

Valeurs de comparaison des quotients métaboliques qCO_2 [$mg\ CO_2-C\ g^{-1}\ C_{mic}$].
Les chiffres sous le boxplot représentent le nombre de sites (n) ; avec la médiane, le quartile inférieur et le quartile supérieur.

**Figure 9**

Valeurs de comparaison Ratio C_{mic}/C_{org} [$mg\ C_{mic}\ g^{-1}\ C_{org}$].
Les chiffres sous le boxplot sont le nombre de sites (n) ; avec médiane, quartiles inférieur et supérieur.



À commander auprès de :

Site web du groupe de travail VBBio-BioSA :

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/sollinfo-specialistes/mesures-de-protection-des-sols/annee-internationale-sollgroupe-de-travail--biologie-du-sol---application---bsa-.html>



Cercle Sol \ documents :

<https://www.kvu.ch/fr/groupe-de-travail?id=192>

