

VBBio-Bulletin-BioSA Nr. 22, 2026

Suivi biologique du sol à travers le temps



Contenu

1. Éditorial.....	2
2. Structure de VBBio – BioSA mise à jour	3
3. Projets sélectionnés de la BioSA	5
3.1 Guide pratique pour le relevé et l'évaluation des paramètres biologiques du sol.....	5
3.2 Observation cantonale des sols (KABO) Berne: évaluation des propriétés biologiques du sol avec valeurs de référence et de comparaison	6
3.3 Microbiote du sol au fil du temps – étude de l'évolution temporelle des communautés microbiennes sur le site NABObio sur une période de dix ans.....	13
4. Forum de biologie du sol en pratique	17
4.1 Observation cantonale des sols (KABO) Berne: influence de la gestion et du climate sur les populations de vers de terre.....	17
4.2 BioDivSol: Résumé de trois sous-projets sur la biodiversité des sols en Suisse.....	27
4.3 Programme de ressources humus du canton de Soleure: Suivi des effets	31
4.4 Terres Vivantes.....	38
4.5 Quo vadis, biologie des sols? Perspectives pour le monitoring et la mise en œuvre en Suisse	42

1. Éditorial

Gaby von Rohr, Office de l'environnement, 4509 Soleure

Le groupe de travail VBBio-BioSA a fêté ses 30 ans d'existence en 2025. Cet anniversaire a été l'occasion de réexaminer et d'actualiser ses objectifs, sa structure et ses domaines d'action. Les résultats sont présentés dans le premier article. Les constantes de cette collaboration de longue date sont l'échange technique ainsi que l'objectif commun de fournir les bases nécessaires à l'intégration de la biologie des sols dans la mise en œuvre de la protection des sols – en particulier pour l'observation à long terme ainsi que l'évaluation de la qualité, des fonctions et de la biodiversité des sols.

Le bulletin contient des articles qui facilitent l'application des méthodes de biologie des sols dans la pratique. Il comprend notamment le *guide révisé et complété pour le relevé et l'évaluation des paramètres de biologie des sols*, désormais enrichi de tableaux de calcul qui en facilitent l'utilisation. Ce guide permet une classification et une interprétation systématiques des valeurs mesurées à l'aide de valeurs de référence et de comparaison. La pertinence pratique de ce guide est démontrée dans le rapport sur l'analyse des séries de données pluriannuelles relatives aux populations de vers de terre et aux paramètres microbiologiques globaux de la KABO Berne.

Deux autres contributions soulignent l'importance des observations continues à long terme pour détecter les changements de la biologie des sols sur de longues périodes. L'analyse d'une série chronologique de 30 ans de la KABO Berne montre des déclin de la biomasse des vers de terre sous l'influence de l'exploitation agricole et du climat. Et la série chronologique de plus de 10 ans de NABObio – l'une des rares observations continues intensives des communautés microbiennes dans les sols – fournit des informations importantes pour l'identification d'indicateurs pertinents et l'étude des changements dans le temps.

De nombreux travaux axés sur la pratique ont vu le jour dans le cadre de l'observation continue NABObio, menée depuis environ 15 ans. Dans le cadre de la réorientation de la NABO, la poursuite de ce projet a également été examinée; la contribution de l'OFEV esquisse l'orientation stratégique de NABObio ainsi que les défis en matière de biologie des sols pour les 15 prochaines années.

Les progrès réalisés dans les méthodes de génétique moléculaire élargissent les connaissances sur la biodiversité des sols et renforcent en même temps la pertinence des études de biologie des sols pour les questions pratiques. Le projet *BioDivSol* a permis d'étudier la diversité de six groupes d'organismes à travers différents types d'utilisation des sols et différentes régions biogéographiques de Suisse. Les résultats sont présentés de manière claire dans le rapport de synthèse et constituent une base importante pour des recherches approfondies.

La VBBio-BioSA favorise les échanges techniques en faisant régulièrement appel à des experts externes. Deux des travaux discutés, tous deux des projets sur les ressources cofinancées par l'OFAG, sont présentés dans ce bulletin: le rapport du *Programme sur les ressources «humus» du canton de Soleure* examine de manière critique les possibilités et les limites de la formation d'humus, tandis que le rapport de *Terres Vivantes* dresse le bilan de son projet.

Les contributions de ce bulletin montrent comment les progrès méthodologiques, les observations à long terme et les approches orientées vers la pratique peuvent être combinés pour renforcer davantage la biologie des sols dans la mise en œuvre.

2. Structure de VBBio–BioSA mise à jour

Maurus Fischer, Office de la nature et de l'environnement des Grisons, 7001 Chur

Le groupe de travail VBBio-BioSA est une plateforme destinée à coordonner les travaux axés sur la mise en œuvre dans les domaines de la biologie des sols et de la matière organique du sol et à soutenir les projets de recherche pratiques dans ces domaines. VBBio-BioSA est un groupe de travail du Cercle Sol CH, responsable pour les thèmes: la biologie des sols et la matière organique des sols.

Organisation, mode de fonctionnement, tâches et produits

Le groupe de travail VBBio-BioSA réunit les services cantonaux chargés de la protection des sols, l'OFEV, le NABObio et divers instituts de recherche (fig. 1).

Le groupe de travail se réunit une à deux fois par an en séance plénière. Ces réunions permettent un échange d'expériences pratiques et d'informations entre les cantons, l'OFEV et la recherche. Les affaires courantes y sont discutées et décidées. Les membres du groupe de travail ou des experts externes invités présentent des thèmes ou des recherches actuels liés à la biologie des sols ou la matière organique des sols.

La présidence est assurée à tour de rôle par les cantons, avec une rotation bisannuelle. Le président ou la présidente est membre du comité. Il ou elle dirige le groupe de travail et le comité et préside les réunions.

Le secrétariat apporte un soutien administratif au groupe de travail: échange de documents, préparation des réunions, rédaction des procès-verbaux, rédaction du bulletin, préparation et organisation d'événements

thématiques, etc. Il est financé par Cercle Sol.

La présidente ou le président et des représentantes de l'OFEV, de NABObio, des institutions de recherche et du secrétariat constituent le comité. Celui-ci élabore les grandes orientations, échange des informations, prépare les affaires courantes et organise des conférences/colloques. Le comité se réunit au moins avant chaque séance plénière.

Des projets concrets et limités dans le temps sont élaborés et réalisés sur différentes thèmes. Il peut s'agir des projets internes à VBBio-BioSA, des projets de recherche externes ou des projets conjoints. Si nécessaire, des bureaux privés sont également représentés.

Le domaine de l'information et de la communication inclut la publication de bases pour la mise en œuvre (concepts, aides au travail) et du bulletin VBBio-BioSA (projets, activités de recherche, bases d'exécution):

Groupe de travail Biologie du sol - application (BioSA)

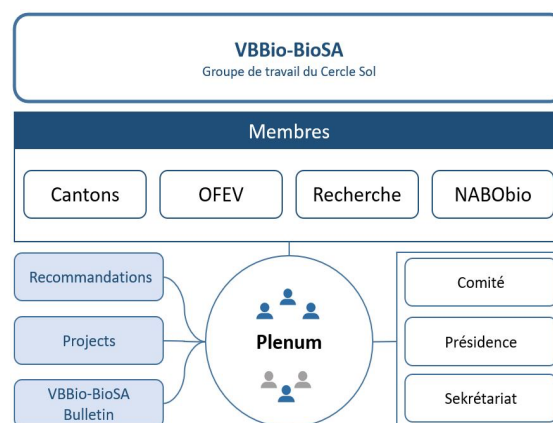


Figure 1: Organigramme

Objectifs et domaines d'action

Législation et orientations stratégiques

- Il s'engage à ce que les aspects et les thèmes liés à la biologie des sols et la matière organique du sol soient intégrés et mis en œuvre dans les dispositions légales.
- Il s'engage en faveur d'une bonne intégration de la biologie des sols et de la matière organique du sol dans la législation sur la protection des sols et s'engage, en tant que représentant du Cercle Sol, dans l'élaboration de valeurs de référence pour la matière organique du sol pour les sols minéraux.

Mise en œuvre

- Il élabore, évalue et recommande des bases méthodologiques dans le domaine de la biologie des sols, en particulier pour le monitoring à long terme, l'évaluation des fonctions du sol et la biodiversité des sols.
- En collaboration avec la recherche, il initie, élabore et évalue des méthodes pratiques, des outils de travail et des bases d'interprétation pour la mise en œuvre.
- Il préconise des méthodes uniformes afin de maximiser la comparabilité des données.
- Il formule des recommandations sur la manière dont les données relatives à la biologie du sol doivent être gérées et leur qualité vérifiée.
- Il rédige des prises de position sur des rapports ou des documents stratégiques liés aux fonctions du sol et à la biodiversité du sol.

Coordination et sensibilisation

- Il veille au maintien des contacts et à l'échange d'informations entre les autorités d'exécution et les institutions de recherche.
- Il veille à ce que les aspects liés à la biologie des sols soient également pris en

compte de manière adéquate dans les projets non spécifiques aux sols, en particulier dans le suivi de la biodiversité et dans les stratégies suisses en lien avec la biodiversité.

- Il se positionne comme un interlocuteur clé pour l'interprétation des données et coordonne ses activités avec la recherche appliquée.
- Il sensibilise la population et les utilisateurs des sols à la biologie des sols et la matière organique du sol.

3. Projets sélectionnés de la BioSA

3.1 Guide pratique pour le relevé et l'évaluation des paramètres biologiques du sol

Janine Moll-Mielewicz, Agroscope, Qualité des sols et utilisation des terres, 8046 Zurich

Le groupe de travail Mise en œuvre de la biologie des sols du Cercle Sol a publié au printemps dernier la version révisée du *Guide pratique pour le relevé et l'évaluation des paramètres biologiques du sol* (Cercle Sol, 2025). Cette publication est disponible en téléchargement en allemand et en français à l'adresse Groupes de travail | KVV (<https://www.kvu.ch/fr/groupe-de-travail?id=192>). Par rapport à l'édition précédente, le *Guide pratique pour l'application et l'interprétation des valeurs de mesure de la biologie des sols* (VBB BSA, 2009), la base de données a été considérablement élargie.

Par rapport à la version précédente, de nombreuses nouvelles données de mesure ont été intégrées: ont été intégrées des données issues de quatre programmes cantonaux d'observation des sols comprenant des analyses de la biologie des sols (KABO Argovie, Berne, Fribourg, Grisons), de l'Observation nationale des sols (NABO), d'une enquête spécifique du canton de Soleure, ainsi que des ensembles de données non expérimentales du guide précédent (VBB BSA, 2009). Pour les cantons de Saint-Gall et de Zurich, qui ne disposent pas de leur propre surveillance de la biologie des sols, le projet *Potentiel d'infection mycorhizienne* (Jansa et al., 2014) fournit des données qui ont été intégrées. La base de données s'est ainsi considérablement élargie, en particulier pour les prairies permanentes.

Le guide de 2009 fournissait déjà, outre des valeurs comparatives pour les données microbiennes et sur les vers de terre, des équations de valeurs de référence permettant de classer les valeurs de mesure mi-

crobiennes dans les catégories «très élevé», «élevé», «normal», «faible» et «très faible» en fonction de propriétés pédo-logiques centrales – pH, teneur en carbone organique (C_{org}) et granulométrie. Avec l'indicateur d'état Q, ce système a été complété par une composante quantitative. Il met en rapport la valeur mesurée avec la valeur de référence attendue et permet ainsi une évaluation numérique plus précise de l'état du sol (Hug et al., 2021).

Comme les nouveaux ensembles de données comptent nettement plus de sites de prairies permanentes qu'en 2009, des équations de valeurs de référence spécifiques ont pu être développées pour la première fois pour ce type d'utilisation des sols – tant pour la biomasse microbienne selon la méthode de fumigation au chloroforme que pour la respiration basale (Hug & Moll-Mielewicz, 2024). Pour faciliter l'utilisation pratique, le Cercle Sol met à disposition un tableur Excel sur son site web (rubrique «Documents»).

Outre la mise à disposition de nouvelles valeurs comparatives et d'équations de référence, ce guide souligne également les mesures à prendre à l'avenir. Celles-ci comprennent notamment:

- la normalisation des méthodes et des bases de données,
- le développement de bases d'évaluation pour d'autres utilisations des sols et de méthodes analytiques, telles que les analyses de métabarcoding basées sur l'ADN pour recenser les communautés bactériennes et fongiques,
- de nouvelles approches d'évaluation pour les vers de terre,

- l'élaboration d'indicateurs permettant d'évaluer et de se prononcer sur la menace pesant sur certaines fonctions du sol,
- prise en compte d'autres groupes d'organismes du sol (tels que les nématodes, les protistes, les collemboles et les acariens),
- l'établissement de listes rouges et noires pour les espèces menacées ou envahissantes.

La mise à jour de ce guide a permis d'actualiser un ouvrage de référence essentiel pour la «mise en œuvre de la biologie des sols». Parallèlement, ce nouveau guide jette délibérément les bases permettant d'intégrer de manière dynamique les nouveaux résultats de recherche et les données de mesure, et ainsi de perfectionner continuellement cet outil. Cela concerne en particulier des domaines tels que les analyses de diversité basées sur l'ADN ainsi que l'affinement et l'extension des indicateurs d'état existants, qui doivent à l'avenir être testés et intégrés progressivement.

Références

Cercle Sol (2025). Guide pour le relevé et l'évaluation des paramètres de biologie des sols.

Hug, A.-S., Moll-Mielewczik J., Gubler A. (2021). Surveillance de la biologie des sols – Évaluation des données microbiologiques des sols provenant de sites d'observation cantonaux et nationaux. *Agroscope Science* 110, 1-35.

Hug, A.-S. & Moll-Mielewczik J. (2024). Équations de référence pour la biomasse microbienne et la respiration basale sur des sites de prairies. *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.

VBB/BSA (2009). Guide pratique pour l'application et l'interprétation des paramètres de biologie des sols. Groupe de travail sur l'application de la biologie des sols VBB/BSA.

3.2 Observation cantonale des sols (KABO) Berne: Évaluation des propriétés biologiques du sol avec valeurs de référence et de comparaison

Claudia Maurer, Andreas Chervet, Lorenz Ramseier, Service spécialisé des sols du canton de Berne, 3052 Zollikofen

Introduction

Dans le canton de Berne, l'observation cantonale des sols (KABO BE) recense, outre les paramètres chimiques et physiques, des caractéristiques biologiques, à savoir les populations de vers de terre (depuis 1994) et des paramètres microbiologiques globaux (depuis 2004). Les premiers résultats ont déjà été présentés dans des bulletins antérieurs du groupe de travail *Appli-*

cation de la biologie des sols (bulletins VBBio 1999, 2002, 2006, 2017), les données microbiologiques ayant été évaluées conjointement avec les cantons d'Argovie et des Grisons (Maurer et al., 2020). Avec le *Guide pour le relevé et l'évaluation des paramètres de biologie des sols* (VBBio, 2025), les bases pour l'application des propriétés biologiques dans la mise en œuvre sont désormais disponibles.

Le canton de Berne dispose désormais de séries de données sur plusieurs années; dans certains cas, des prélèvements ont déjà été effectués pour la cinquième fois. Ces données sont évaluées ci-après pour la première fois à l'aide du guide.

Matériel et Méthodes

Le KABO BE se concentre sur les sols à usage agricole. Sur 19 sites du plateau bernois soumis à une exploitation agricole intensive, on a comparé un sol de prairie permanente (PP) et un sol provenant d'une terre arable (TA) voisine, aussi identique que possible sur le plan pédologique. L'échantillonnage des paramètres microbiologiques a été effectué au printemps, tandis que celui des vers de terre a généralement eu lieu en automne de la première année principale d'exploitation de la prairie artificielle. Les prélèvements et les analyses de la «respiration de base» BA, de la «biomasse microbienne de carbone et d'azote (méthode de fumigation-extraction)» FE-C et FE-N ainsi que de la biomasse et de l'abondance de la population de vers de terre correspondent largement aux méthodes de référence suisses d'Agroscope (<https://ira.agroscope.ch/fr-CH/publication/46224>), (<https://ira.agroscope.ch/fr-CH/publication/46222>), (<https://ira.agroscope.ch/fr-CH/publication/46233>). Les analyses des paramètres microbiologiques ont été effectuées à l'Agroscope de Reckenholz et les vers de terre ont été identifiés au Centre de recherche sur les sols.

Outre l'évaluation des sites individuels, ceux-ci ont été regroupés et analysés en fonction de leur mode d'exploitation. Le regroupement s'est effectué selon les facteurs suivants: (i) le système d'exploitation

avec les catégories TA et PP, la catégorie PP étant subdivisée en pâturages intensifs et prairies extensives, (ii) le système de culture (conformément aux directives des prestations écologiques requises: PER ou de l'agriculture biologique: BIO) ainsi que (iii) la technique de culture avec une part de prairies artificielles (PPA) dans la rotation des cultures $\geq 40\%$ (PPAélevée) ou $< 40\%$ (PPAfaibles).

Résultats et Discussion

Propriétés microbiologiques du sol

Valeurs de référence

Des valeurs de référence spécifiques au site peuvent être calculées pour les paramètres microbiologiques «respiration basale» (BA) et «biomasse microbienne» (FE-C) des types d'exploitation PP et TA, ainsi que pour la profondeur d'échantillonnage de 0 à 20 cm (VBBio 2025). Celles-ci se basent sur les principaux facteurs d'influence C_{org} , la teneur en argile et en sable ainsi que le pH, et sont calculées à l'aide d'équations de régression, puis comparées aux valeurs mesurées et évaluées. L'évaluation s'effectue à l'aide des intervalles de confiance des équations de régression: les valeurs mesurées se situant à l'intérieur de la limite de confiance à 67 % sont classées comme «normales», celles situées au-dessus et en dessous comme «élevées» ou «faibles»; les valeurs mesurées au-dessus et en dessous de la limite de confiance à 95 % sont évaluées comme «très élevées» ou «très faibles» (Oberholzer et Scheid, 2007). Pour tous les sites et prélèvements de la KABO BE, les valeurs de référence pour BA et FE-C ont été calculées et les valeurs mesurées évaluées en conséquence.

Site Utilisation Année de prélèvement	Respiration basale (mg CO ₂ -C kg ⁻¹ (MS) h ⁻¹)						Paramètres du sol				
	valeurs mesurées	valeurs de référence	Calculs des valeurs de référence				Évaluation des mesures	Corg %	pH CaCl ₂	Argile %	Sable %
			LIC 95%	LIC 67%	LSC 67%	LSC 95%					
Niederörsch PP cycles 3	0.642	0.65	0.38	0.497	0.861	1.113	normal	1.6	5.2	15	53.9
Niederörsch PP cycles 4	0.695	0.646	0.377	0.494	0.845	1.106	normal	1.6	5	15.6	51.9
Niederörsch PP cycles 5	0.888	0.676	0.395	0.517	0.885	1.157	élevée	1.6	5.4	15.4	51.2
Langnau TA cycles 3	0.615	0.421	0.282	0.344	0.515	0.629	élevée	1.6	5.4	16.5	45.1
Langnau TA cycles 4	0.533	0.427	0.286	0.349	0.522	0.638	élevée	1.7	5.2	15.7	47
Langnau TA cycles 5	0.692	1.058	0.708	0.865	1.294	1.582	très faibles	7.5	5.2	19.9	29.6

Tableau 1 : Valeurs mesurées, valeurs de référence calculées, évaluations des valeurs mesurées et paramètres du sol pour la respiration du sol des sites de Niederörsch (prairies permanentes = PP) et Langnau (terres arables = TA) lors des troisième, quatrième et cinquième prélèvements (cycles 3-5) de la KABO BE. IC = intervalle de confiance.

Le Tableau 1 illustre, à titre d'exemple, les différences observées dans l'évaluation des valeurs mesurées pour la BA du PP sur le site de Niederörsch et la TA sur le site de Langnau. Les analyses des premier et deuxième prélèvements (cycles 1 et 2) ont été effectuées avant 2004 dans un autre laboratoire et ne sont donc pas comparables à celles des cycles 3 à 5. À Niederörsch, la BA a été classée comme «élevée» lors du troisième échantillonnage (cycle 3). Or, avec des paramètres de sol comparables, l'évaluation était «normale» lors des deux relevés précédents. Cette différence s'explique probablement par le changement d'affectation de la PP: l'extensification croissante s'accompagne d'une augmentation de la diversité végétale (UNA 2023). La nature des résidus végétaux a changé, et avec elle celle des microorganismes qui les décomposent: on est passé de graminées tendres, pauvres en azote, principalement décomposées par des bactéries, à des herbes dures, riches en carbone, principalement décomposées par des champignons. La proportion de matière organique accumulée en surface par rapport à celle accumulée en sous-sol, avec une augmentation de la biomasse racinaire, peut également entraîner une activité accrue.

Sur le site de Langnau, la différence d'évaluation lors du troisième échantillonnage s'explique par l'analyse de deux paramètres du sol. La teneur en sable est nettement plus faible malgré une teneur en argile comparable, ce qui s'explique probablement par une erreur d'analyse. La teneur

très élevée en C_{org} pourrait certes indiquer un point de prélèvement très riche en matière organique, mais comme les valeurs mesurées pour la respiration basale ne diffèrent guère, il s'agit probablement aussi d'une erreur de laboratoire, ce qui met en évidence la problématique liée à l'analyse d'un seul échantillon (composé).

Indicateurs d'état

Outre l'évaluation des différents sites et de leur évolution dans le temps, il est également possible de comparer les médianes des facteurs, catégories et caractéristiques regroupés PER, BIO, PP, TA, inWe et exWi. Pour la BA et la FE-C, cela s'effectue à l'aide d'un indicateur d'état calculé, en divisant la valeur mesurée par la valeur de référence (Hug et al., 2021). Cela permet de déterminer où se situe l'indicateur d'état calculé dans la plage d'évaluation.

Valeurs de référence

Pour la biomasse microbienne FE-N et les deux grandeurs calculées «quotient métabolique qCO₂» (BA divisé par FE-C) et «rapport entre le carbone microbien (C_{mic}) et le carbone organique (C_{org})» C_{mic}:C_{org}, il n'existe pas (encore) de valeurs de référence, c'est pourquoi on se base sur les valeurs de comparaison correspondantes (VBBio 2025). Celles-ci permettent un premier classement de ces valeurs microbiologiques au sein d'un ensemble de données à l'échelle nationale, mais ne tiennent pas compte des propriétés spécifiques du sol de chaque site.

Groupement	Indicateurs d'état				Biomasse microbienne N FE (mg kg ⁻¹)		Quotient métabolique qCO ₂ (mg g ⁻¹ h ⁻¹)		Rapport C _{mic} : C _{org}	
	Respiration basale (mg CO ₂ -C kg ⁻¹ (MS) h ⁻¹)		Biomasse microbienne C FE (mg kg ⁻¹)							
	Médiane	Évaluation	Médiane	Évaluation	Médiane	Valeurs de référence	Médiane	Valeurs de référence	Médiane	Valeurs de référence
PP n = 47	0.99	normal	0.94	normal	126.7		0.91		38.7	
BIO-PP n = 19	1.04	normal	0.97	normal	97.5	Médiane: 207	1.03	Médiane: 0.85	39.6	Médiane: 41.65
PER-TA n = 28	0.96	normal	0.93	normal	133.6	Quartile supérieur: 265.7	0.86	Quartile supérieur: 1.06	38.6	Quartile supérieur: 50.94
Paln n = 16	0.94	normal	0.95	normal	145.5	Quartile inférieur: 137.5	0.84	Quartile inférieur: 0.72	39.1	Quartile inférieur: 37.49
PrEx n = 31	1	normal	0.94	normal	102.1		1.03		38.7	
TA n = 47	1.4	élevée	1.19	normal	86.9		1.13		35.3	
BIO-TA n = 18	1.46	élevée	1.19	normal	76.6	Médiane: 92.7	1.19	Médiane: 1.13	35.6	Médiane: 33.60
PER-TA n = 29	1.36	élevée	1.16	normal	91.2	Quartile supérieur: 265.7	1.02	Quartile supérieur: 1.36	33.2	Quartile supérieur: 38.63
PPAélevée n = 22	1.36	élevée	1.23	normal	90.1	Quartile inférieur: 137.5	1.03	Quartile inférieur: 0.94	35.5	Quartile inférieur: 26.44
PPAfaibles n = 25	1.44	élevée	1.16	normal	79		1.21		34.9	

Tableau 2: Médianes et évaluations des indicateurs d'état de la respiration basale BA et de la biomasse microbienne FE-C (carbone microbien, méthode de fumigation-extraction), médianes et valeurs de référence pour la biomasse microbienne FE-N (azote microbien, méthode de fumigation-extraction), le quotient métabolique qCO₂ et du rapport C_{mic}:C_{org} (part du carbone microbien dans le carbone organique) de la KABO BE. PP = prairies permanentes; TA = terres arables; BIO = exploitation selon les directives de l'agriculture biologique; PER = exploitation selon les directives des prestations écologiques requises; inWe = pâtures intensifs; exWi = prairies extensives; PPAélevée = terres arables à forte proportion (≥40%) de prairies artificielles dans la rotation des cultures; PPAfaibles = terres arables à faible proportion <40% de prairies artificielles dans la rotation des cultures.

Différences dues à l'exploitation

Le Tableau 2 présente les valeurs médianes (profondeur d'échantillonnage 0-20 cm) et les évaluations des indicateurs d'état pour les paramètres BA et FE-C, ainsi que les médianes et les valeurs de référence pour FE-N, qCO₂ et C_{mic}:C_{org} des différents systèmes de culture et d'exploitation ainsi que des techniques culturales.

Les indicateurs d'état pour le BA, calculés en tenant compte des paramètres du site, se situent autour de la valeur 1 pour le PP, c'est-à-dire que les médianes des valeurs mesurées correspondent à peu près aux valeurs calculées; l'évaluation relève donc de la catégorie «normal». Dans les TA, en revanche, la respiration basale est «élevée»; les médianes mesurées sont supérieures aux valeurs calculées, typiques du site. Cela pourrait s'expliquer par le travail du sol généralement régulier pratiqué dans les TA et le brassage intensif de matières organiques et inorganiques qui en résulte. Cela apporte de l'oxygène et de la chaleur dans le sol, stimulant ainsi l'activité microbologique pour décomposer les résidus de récolte, les plantes d'engrais vert et les engrais organiques.

Les indicateurs d'état pour la FE-C sont «normaux» pour les types d'utilisation PP et TA; toutefois, les médianes des valeurs mesurées se situent dans des fourchettes

différentes au sein de ces classes d'évaluation (VBBio 2025): les PP se situent juste en dessous de 1, dans la fourchette moyenne, tandis que les TA se situent nettement dans la fourchette supérieure. Le système de culture PPAélevée, en particulier, présente une médiane élevée, ce qui peut être lié à la sollicitation mécanique intense des prairies artificielles due à des coupes fréquentes et à un apport en nutriments proportionnellement élevé.

Les médianes de la biomasse microbienne FE-N sont nettement inférieures sur les sites PP par rapport à celles des sites de référence suisses (Tableau 2). Les sites du KABO BE présentent des sols plutôt pauvres en nutriments, notamment pour les BIO-PP et les exWi, ce qui confirme les valeurs de référence nationales concernant la teneur en C_{org} (VBBio 2025). Les médianes KABO pour le qCO₂ et le rapport C_{mic}:C_{org} dans les PP vont également dans le même sens. Les paramètres microbiologiques des TA ne présentent pas d'écarts et se situent autour des valeurs médianes suisses. Mais même au sein des TA, on observe des différences dans les propriétés microbiologiques entre les types plutôt pauvres en nutriments (TA bio) ou à exploitation plus extensive (PPAfaibles) et ceux plus riches en nutriments (TA PER) ou à exploitation plus intensive (PPAélevée).

Dans le cas de la BIO, d'une exploitation extensive des prairies et d'une part plutôt faible de prairies artificielles dans la rotation des cultures, les conditions microbiologiques pourraient être globalement un peu

moins favorables en ce qui concerne les interventions de travail du sol pour le désherbage et l'offre alimentaire que dans les cas de PER, inWe et PPAélevée.

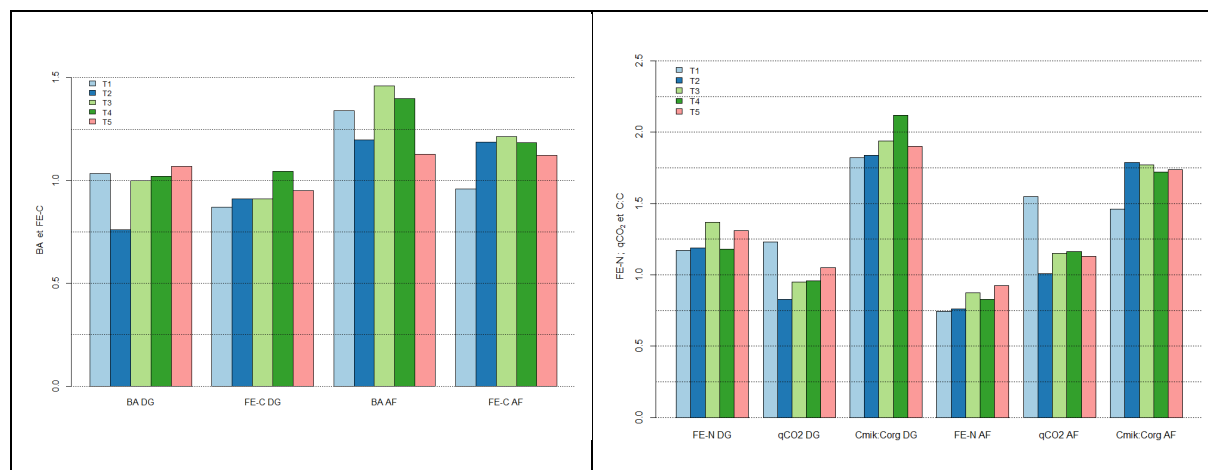


Figure 1 : Médianes des indicateurs d'état de la respiration du sol (BA) et de la biomasse microbienne FE-C (carbone microbien, méthode de fumigation-extraction) (graphique de gauche), médianes de la biomasse microbienne FE-N (azote microbien, méthode de fumigation-extraction), du quotient métabolique qCO_2 et du rapport $C_{mic}:C_{org}$ (part du carbone microbien dans le carbone organique) (graphique de droite) pour les types d'utilisation «prairie permanente» (PP = DG) et «terre arable» (TA = AF) des cinq cycles d'échantillonnage (cycles T1-T5) du KABO BE. Les valeurs des paramètres pour FE-N sont 20 fois plus élevées dans l'original, celles pour $C_{mic}:C_{org}$ 1'000 fois.

Différences au fil du temps

La Figure 1 présente les valeurs médianes (profondeur d'échantillonnage 0-20 cm) des indicateurs d'état calculés pour chaque site, à savoir la respiration du sol BA et la biomasse microbienne FE-C (graphique de gauche), ainsi que les médianes mesurées de la biomasse microbienne FE-N, du quotient métabolique qCO_2 et du rapport $C_{mic}:C_{org}$ (graphique de droite) pour les deux types d'utilisation PP et TA, séparés selon les cinq cycles d'échantillonnage (cycles T1-T5). Afin de garantir une représentation claire, les valeurs de FE-N ont été divisées par 1'000, et celles de $C_{mic}:C_{org}$ par 20.

Ni les indicateurs d'état calculés spécifiquement pour chaque site, ni les médianes présentées sans tenir compte des caractéristiques des sites n'indiquent de changements temporels notables dans les PP et les TA. Le moment de l'échantillonnage a

été choisi au début du printemps, immédiatement après la dormance hivernale, afin de saisir un état de base sans influences à court terme liées à l'exploitation ou aux conditions météorologiques.

Conclusion

Les valeurs de référence spécifiques à chaque site permettent d'évaluer les caractéristiques microbiologiques de chaque échantillon de sol, tant dans l'immédiat qu'au fil du temps. Les éventuelles influences liées à l'analyse ou à l'exploitation deviennent ainsi identifiables. À l'aide des indicateurs d'état, les sites peuvent être regroupés, ce qui permet de comparer et d'évaluer les différences entre les modes d'exploitation.

Lorsqu'il n'existe pas encore de valeurs de référence ni d'indicateurs d'état (biomasse microbienne FE-N, quotient métabolique qCO_2 et rapport $C_{mic}:C_{org}$), des valeurs comparatives ne tenant pas compte des carac-

téristiques du site donnent un premier aperçu. On constate notamment, pour la biomasse microbienne FE-N, que les sols des prairies permanentes KABO sont nettement plus pauvres en nutriments que ceux des sites étudiés dans l'ensemble de la Suisse.

De manière générale, l'agriculture biologique, l'extensification des prairies permanentes et une part plutôt faible de prairies artificielles dans la rotation des cultures créent des conditions légèrement moins favorables pour les microorganismes en termes d'interventions de travail du sol pour le désherbage et d'offre alimentaire qu'une

exploitation avec des nutriments suffisants, comme c'est le cas pour les PER, les prairies permanentes intensives et une part élevée de prairies artificielles dans la rotation des cultures.

Populations de vers de terre

Valeurs de référence

Pour les populations de vers de terre dans les prairies permanentes, il existe des valeurs de référence (VBBio, 2025), recueillies entre 1991 et 1995, issues d'une étude ponctuelle menée sur 88 sites du Plateau suisse (Cuendet et al., 1997).

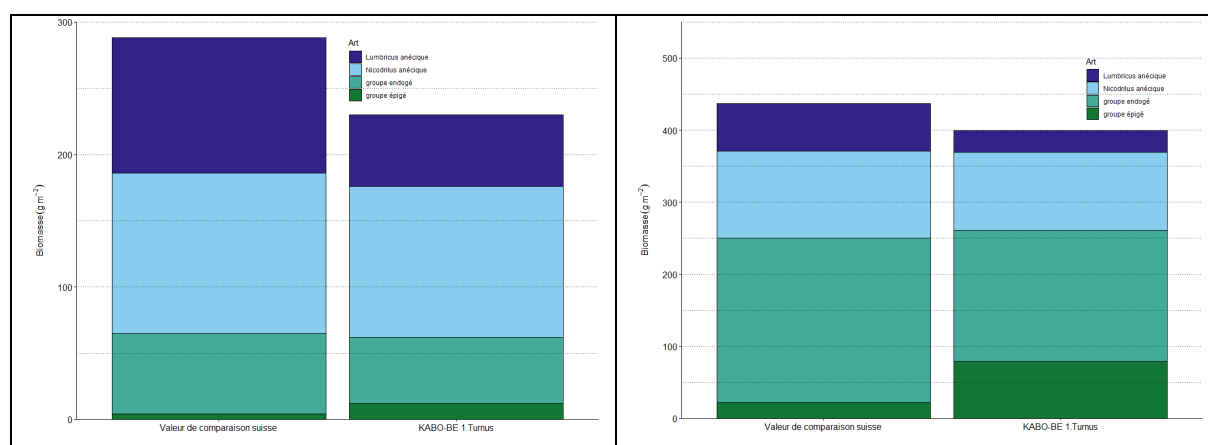


Figure 2: Comparaison des relevés de vers de terre effectués sur 88 sites de prairies permanentes du Plateau suisse et du premier relevé réalisé sur 16 sites de prairies permanentes de la KABO BE. Les colonnes empilées représentent les médianes de la biomasse (graphique de gauche) et de l'abondance (graphique de droite) des quatre groupes écomorphologiques: *Lumbricus* anéciques (bleu foncé), *Nicodrilus* anéciques (bleu clair), espèces endogées (turquoise) et espèces épigées (vert)

Les 16 sites KABO situés dans le plateau bernois ont fait l'objet d'un premier échantillonnage entre 1993 et 1999; ils sont donc comparables, en termes de date de relevé, aux 88 sites de prairies permanentes de l'étude CH-plateau (Fig. 2). Les prairies de l'étude CH-plateau présentent une biomasse plus importante (288 contre 197 g par m²) (graphique de gauche) et un nombre plus élevé de vers de terre (437 contre 367 individus par m²) (graphique de droite) que les prairies permanentes KABO. Les espèces épigées sont le seul groupe présent en plus grand nombre et avec une

biomasse plus importante dans les PP de la KABO BE que dans celles du Plateau suisse. La biomasse et l'abondance des espèces endogées et des *Nicodrilus* sp. anéciques de la KABO BE sont légèrement inférieures à celles du Plateau suisse, tandis que celles des *Lumbricus* sp. anéciques sont nettement plus faibles. Ce dernier point pourrait être lié à la concurrence alimentaire entre les espèces de type «espèces épigées» (vivant dans la litière) et les espèces de *Lumbricus* sp. creusant en profondeur (Cuendet et al., 1997).

Les différences observées dans les effectifs des populations de vers de terre entre les deux études s'expliquent par les caractéristiques variées des sites et les intensités d'exploitation. Les PP recensées dans l'étude du Plateau suisse sont pour la plupart situées à proximité des fermes, ont été utilisées comme pâturages pendant de nombreuses années et ont donc fait l'objet d'une fertilisation intensive. L'apport en nutriments est qualifié de «élevé» pour plus de la moitié des sites. Au moment des prélèvements, les PER n'étaient pas encore en vigueur et il n'existait pratiquement pas de surfaces de compensation écologique. Les parcelles KABO, en revanche, étaient déjà, lors du premier relevé, en partie des prairies exploitées de manière extensive avec un faible niveau de rendement. Outre la situation en matière de nutriments, les parcelles des deux études se distinguent également par leur teneur en argile et en humus : Près de la moitié des surfaces du Plateau suisse présentent une teneur en argile > 30 % et sont très riches en matière organique (C_{org} : 5-15 %, Cuendet et al., 1997), contrairement aux PP de la KABO BE qui, à une exception près, sont nettement plus pauvres en argile et en humus (argile: 15 %, C_{org} : 1,9 %). Les sols riches en nutriments et argileux à limoneux de l'étude du Plateau suisse offrent, en termes de quantité de nourriture et de conditions d'humidité constantes, de meilleures conditions pour le développement de grandes populations de vers de terre que les sols des PP de la KABO BE, plutôt pauvres en nutriments et sableux. Ces derniers retiennent notamment moins bien l'eau et s'assèchent plus rapidement, ce qui a un impact négatif sur les vers de terre compte tenu de la fréquence croissante des périodes de sécheresse.

Conclusion

Des intensités d'exploitation très différentes des prairies, associées à des ni-

veaux de fertilisation et de rendement très différents, conduisent à des populations de vers de terre de tailles différentes. Dans les pâturages du Plateau suisse, intensément fertilisés et riches en humus et en argile, des populations de vers de terre plus importantes ont pu se développer que dans les prairies de la KABO BE, généralement pauvres en nutriments et en argile. Seules les espèces épigées sont plus fréquentes dans le premier relevé de la KABO BE, tandis que les espèces anéciques du genre *Lumbricus* sp. sont nettement plus rares, ce qui s'explique non seulement par des conditions de site moins favorables aux vers de terre, mais aussi par une certaine concurrence alimentaire.

Les valeurs de référence du Plateau suisse ne peuvent être utilisées que de manière limitée pour l'évaluation des données de la KABO BE, tout au plus pour les sites exploités de manière intensive. Il manque à ce jour des valeurs de référence pour les prairies exploitées de manière

Références

Cuendet, G., Suter, E., Stähli, R. (1997). La faune des vers de terre des prairies permanentes du Plateau suisse. Rapport de synthèse. *Série Environnement* 291, Sol. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP).

Hug, A.-S., Moll, J., Gubler, A. (2021). Surveillance de la biologie des sols. Évaluation des données microbiologiques des sols provenant de stations d'observation cantonales et nationales. *Agroscope Science* 110.

Maurer, C., Müller, D., Lanfranchi, M., Weisskopf, P., Oberholzer, H.-R., Walder, F. (2020). Paramètres microbiologiques dans l'observation cantonale des sols – une synthèse. *Recherche agronomique suisse* 11, 147-153.

Oberholzer, H.-R., Scheid, S. (2007). Paramètres microbiologiques des sols. Évaluation de l'état des sols agricoles dans le réseau de mesure de référence NABO à l'aide de paramètres biologiques (NABO-bio). *Connaissances sur l'environnement* 0723. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne.

UNA Atelier für Naturschutz und Umweltfragen AG, Berne (2023). Observation cantonale des sols KABO – Relevés de végétation 2022 et chimie des sols. Service spé-

cialisé des sols, 3052 Zollikofen, rapport interne.

VBBio (2025). Guide pratique pour le relevé et l'évaluation des paramètres biologiques des sols:

<https://www.bafu.admin.ch/dam/fr/sd-web/xmWQiUJQqWRp/arbeitshilfe-monitoring-bodenbiologie.pdf>

Bulletins BioSA:

[Groupe de travail Biologie du sol - application \(BioSA\)](#)

3.3 Microbiote du sol au fil du temps – étude de l'évolution temporelle des communautés microbiennes sur les sites NABObio sur une période de dix ans

Janine Moll-Mielewczik¹, Florian Walder¹ et Florian Gschwend²

¹ Agroscope, Qualité des sols et utilisation des terres, 8046 Zurich

² Agroscope, Écologie moléculaire, 8046 Zurich

Les communautés bactériennes et fongiques du sol évoluent au cours de l'année, sous l'influence des saisons, de la composition de la communauté végétale et de l'état des plantes qui y poussent. Ce processus peut entraîner des modifications tant de la diversité des bactéries et des champignons que de la composition des communautés et de la fréquence des différents taxons (Lauber et al., 2013). Mais comment la composition et la structure des communautés microbiennes évoluent-elles sur plusieurs années? Il n'existe que quelques études isolées ayant examiné les communautés microbiennes sur plusieurs années dans des conditions non expérimentales. Deux études ont examiné les communautés bactériennes et fongiques dans les sols sur une période de 5 ans et comptent parmi les études les plus longues menées dans ce domaine : en étudiant des sols forestiers tchèques entre 2013 et 2017, il a été démontré que les communautés bactériennes et fongiques évoluent lé-

gèrement au fil du temps et s'écartent ainsi de plus en plus de la communauté d'origine (Martinovic et al., 2021). La deuxième étude a été menée dans le cadre de l'Observatoire national des sols de la Suisse (NABO) de 2012 à 2016 (Gschwend et al., 2021) et s'est ensuite poursuivie.

Les relevés biologiques menés chaque année en Suisse depuis plus de 10 ans dans le cadre du NABO (NABObio), qui permettent de recueillir les paramètres globaux «respiration basale» et «biomasse microbienne», ainsi que les données sur la diversité basées sur l'ADN (métabarcoding), peuvent désormais contribuer de manière significative à combler cette lacune dans les connaissances – et ce, pour différents types d'utilisation des sols. Dans la présente étude, nous montrons que les changements temporels des communautés microbiennes du sol varient en fonction de l'utilisation des sols. L'étude NABObio menée de 2012 à 2016 a fourni de premiers

indices: sur les 30 sites étudiés, seuls trois ont montré des signes de changements significatifs dans les communautés microbiennes du sol sur une période de cinq ans (Gschwend et al., 2021). Grâce à la poursuite de ces recherches, des données sur une période de 10 ans sont désormais disponibles pour 19 des 30 sites initiaux de NABObio (Moll-Mielewicz et al., en préparation). Ces sites comprennent neuf terres arables, sept prairies permanentes, deux sites changeant d'utilisation de prairies permanentes aux terres arables, ainsi qu'un site où l'herbe a été réensemencée à deux reprises au fil des ans après un travail du sol. À partir des analyses des communautés microbiennes de ces sites, on a cherché à déterminer (i) comment les communautés bactériennes et fongiques évoluent dans les sols des sites de terres arables et de prairies permanentes sur une période de 10 ans avec des mesures annuelles, (ii) quel est le rapport entre ces changements temporels et les propriétés du sol ainsi que les utilisations des terres, (iii) quels taxons bactériens et fongiques évoluent, et (iv) si les variations temporelles restent dans une fourchette attendue. Les principaux résultats de la publication scientifique de Moll-Mielewicz et al. (en préparation) sont résumés ici.

Les indicateurs microbiens montrent une évolution temporelle marquée sur la période étudiée (Fig.1): la biomasse microbienne diminue chaque année de 0.7 % sur les sites de terres arables et de prairies permanentes, et l'indice de Simpson inverse bactérien (indicateur de diversité alpha) recule de 1.6 % par an par rapport à la valeur de 2012. Les communautés bactériennes et fongiques des sites de terres arables et de prairies permanentes s'écartent de 0.6 % et 1 % par an par rapport aux communautés de 2012. En revanche, aucun changement n'a pu être constaté au niveau de la respiration basale et de la diversité alpha des champignons sur l'ensemble des sites

de terres arables et de prairies permanentes sur une période de 10 ans. Au niveau taxonomique, des taxons spécifiques dont l'abondance relative a varié au cours de la période d'étude ont pu être identifiés. Parmi les bactéries, 28 familles sur 183 (15%) et parmi les champignons, 5 familles sur 257 (2 %) ont été identifiées qui évoluent en termes d'abondance relative au fil du temps.

On observe donc, pour plusieurs des paramètres microbiens étudiés, des changements temporels continus sur une période de 10 ans. Ceux-ci peuvent être dus à une adaptation aux variations des paramètres pédoclimatiques, tels que la température, les précipitations, la teneur en nutriments ou l'humidité du sol, qui diffèrent légèrement d'une année à l'autre, au travail du sol, ainsi qu'à la variabilité naturelle des microorganismes et à la sélection écologique. Cependant, si l'on compare ces variations temporelles à l'influence des caractéristiques pédoclimatiques sur les communautés bactériennes et fongiques, on constate que le facteur temps n'explique que 5 % de la variation chez les bactéries et 4 % chez les champignons. Les principaux facteurs sont le site (bactéries: 39 %, champignons: 45 %), le type d'utilisation des sols (22 % chacun) ainsi que le pH (bactéries: 22 %, champignons: 17 %). Les communautés bactériennes et fongiques évoluent donc relativement peu sur une période de 10 ans, ce qui souligne la spécificité des communautés microbiennes en fonction du site.

Afin de déterminer quels paramètres pédo-logiques et caractéristiques météorologiques influencent les variations temporelles des paramètres biologique, l'influence de ces paramètres a été analysée à l'aide de modèles linéaires hiérarchiques (modèles à effets mixtes). Une partie de l'effet temporelle de la biomasse microbienne s'explique par les changements du carbone organique, ainsi que, dans une

moindre mesure, par la température annuelle moyenne et la teneur en eau du sol. L'évolution dans le temps de la diversité alpha bactérienne ne constitue qu'une tendance et n'est pas significative après ajustement de la valeur p pour tenir compte des tests multiples; elle semble toutefois dépendre fortement de la température annuelle moyenne et de la densité de la terre fine. L'évolution des communautés bactériennes et fongiques pendant les années dépendait de manière significative de la température annuelle moyenne.

Afin de déterminer si les variations temporelles observées s'inscrivent dans la fourchette des fluctuations naturelles ou si elles la dépassent, des plages normales ont été définies pour chaque paramètre microbien. Ces plages dites NOR (normal operating ranges) se basent sur l'intervalle de confiance à 95 % des valeurs mesurées et ont été calculées séparément pour chaque type d'utilisation des sols à partir des moyennes des mesures de 2012 à 2016, période durant laquelle les communautés étaient stables. Un site a été considéré comme présentant une évolution dans le temps lorsque les trois réplicats par paramètre de mesure se situaient en dehors des NOR pendant au moins trois années consécutives et ne revenait pas dans la NOR avant la fin de la série de mesures. Selon cette définition, quatre sites de terres arables et un site de prairies permanentes ont évolué au fil du temps et ont dépassé les limites de la NOR. Les raisons de cette situation ne sont toutefois pas connues à l'heure actuelle et devraient être clarifiées au cas par cas.

Les sites ayant connu un changement d'utilisation des sols constituent une base permettant de tester la NOR et d'identifier les indicateurs qui mettent en évidence ce changement dans la gestion. Le passage des prairies permanentes aux cultures arables a entraîné des dépassements de la

NOR pour la biomasse microbienne ainsi que pour les communautés bactériennes et fongiques. De plus, la NOR de la diversité alpha bactérienne a été dépassée pendant au moins trois ans après le changement, mais est revenue à la normale au fil des années. Le changement plus progressif, sur un site, de prairie permanente en prairie permanente avec des rangées de chanvre semées a entraîné un dépassement de la NOR de la biomasse microbienne. Sur le troisième site, l'herbe a été réensemencée deux fois au cours des dix années et, lors de la dernière année analysée, en 2021, du blé d'hiver a été cultivé. Sur ce site, la NOR relative à la modification de la communauté bactérienne par rapport à 2012 n'a été dépassée que trois fois, avec un certain retard par rapport à la première mesure de 2018 à 2021, à l'exception de 2019. On peut donc supposer que, malgré le non-respect des règles strictes de la NOR, il existe des indices forts indiquant que ce site est en déséquilibre. Dans l'ensemble, les sites ayant connu un changement d'utilisation des sols montrent que la biomasse microbienne et les communautés bactériennes et fongiques sont mieux adaptées pour détecter les changements dans les écosystèmes du sol que la respiration basale ou la diversité alpha. La définition de la NOR constitue une première étape vers une évaluation de la mesure dans laquelle les communautés bactériennes et fongiques peuvent évoluer avant que la pression ne devienne si forte qu'elles basculent dans un autre état.

Grâce à cet échantillonnage annuel intensif et à l'analyse approfondie des communautés microbiennes par DNA métabarcoding, combinés aux paramètres globaux sur une période de 10 ans, il a été possible de mener des tests rigoureux visant à déterminer dans quelle mesure ces indicateurs sont capables de refléter de manière fiable les changements au fil du temps. Les séries de données NABObio ont permis de montrer que les communautés microbiennes et la

biomasse microbienne sont plus adaptées pour détecter les changements que la respiration basale et les mesures de diversité alpha. De plus, il est clairement apparu que la spécificité des communautés microbiennes à un site donné est très marquée et que les changements sur dix ans sont relativement faibles. Cependant, comme les changements observés dans les communautés microbiennes sont en corrélation avec la hausse des températures, il faut s'attendre à ce que le changement clima-

tique entraîne des bouleversements plus importants dans les écosystèmes microbiens du sol au cours des prochaines décennies. Il n'est pas encore possible de prévoir dans quelle mesure cela se traduira par des modifications des fonctions des écosystèmes microbiens du sol; des études supplémentaires visant à caractériser le potentiel fonctionnel des microorganismes du sol sur les sites NABO permettront d'apporter des premiers éclaircissements à ce sujet.

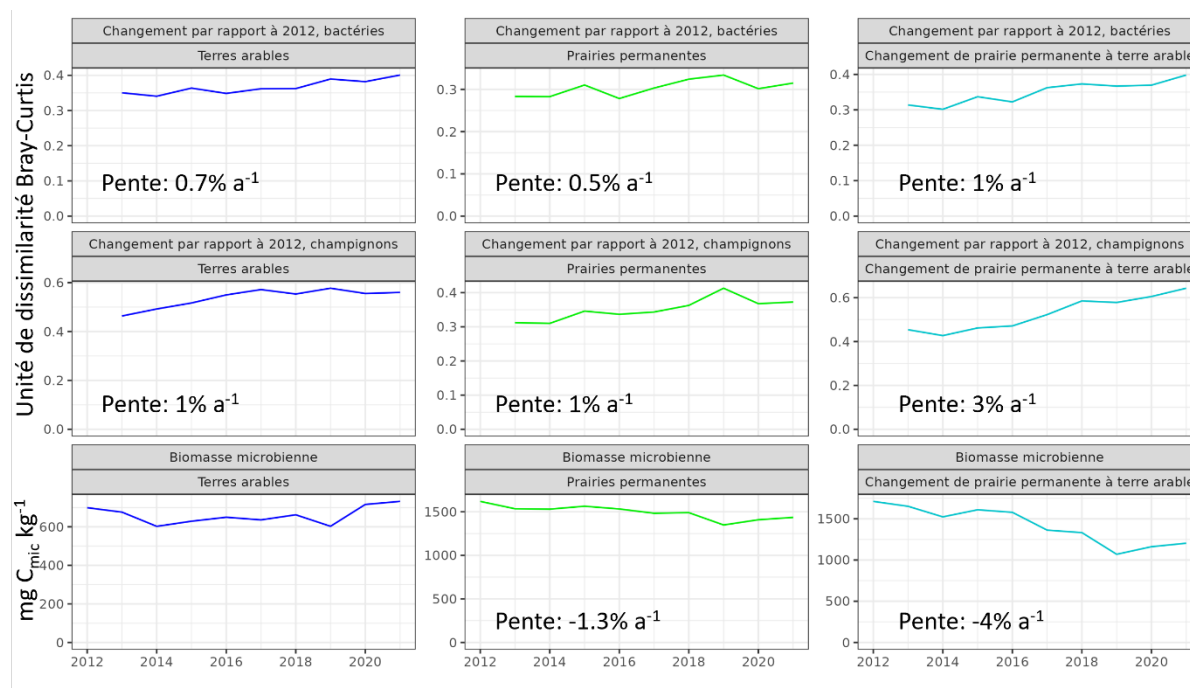


Figure 1: Évolution dans le temps des valeurs moyennes sur les sites de terres arables (bleu), les sites de prairies permanentes (vert) et les sites ayant subi un changement d'utilisation (turquoise) concernant les communautés bactériennes (en haut) et fongiques (au milieu), ainsi que la biomasse microbienne (en bas). La pente des modèles linéaires à effets mixtes est exprimée en pourcentage de variation par an (a⁻¹) par rapport à la mesure initiale de 2012, lorsque la variation était statistiquement significative (valeur $p < 0,001$)

Références

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

Lauber, C. L., Ramirez, K. S., Aanderud, Z., Lennon, J., & Fierer, N. (2013). Temporal variability in soil microbial communities across land-use types. *The ISME Journal* 7, 1641-1650.

Martinović, T., Odriozola, I., Mašínová, T., Doreen Bahnmann, B., Kohout, P., & Baldrian, P. (2021). Temporal turnover of the soil microbiome composition is guild-specific. *Ecology Letters* 24, 2726-2738.

Moll-Mielewicz, J., Durand-Maniclas, F., Widmer, F., Walder, F., & Gschwend, F. Long-term dynamics of soil bacterial and fungal communities over ten years (in preparation).

Forum de biologie du sol en pratique

4.1 Observation cantonale des sols (KABO) Berne: influence de la gestion et du climat sur les populations de vers de terre

Claudia Maurer, Andreas Chervet, Lorenz Ramseier, Service spécialisé des sols du cantone Berne, 3052 Zollikofen

Introduction

Dans le canton de Berne, dans le cadre de l'observation cantonale des sols (KABO BE), outre les paramètres chimiques et physiques, les populations de vers de terre sont également recensées en tant que caractéristique biologique (depuis 1994). Les premiers résultats ont déjà été présentés dans des bulletins antérieurs du groupe de travail *Application de la biologie des sols* (bulletins VBBio 1999, 2002, 2006, 2017). Nous abordons ci-après les influences de l'exploitation ainsi que des conditions changeantes de température et de précipitations sur les vers de terre. Pour ce faire, nous avons utilisé les séries de données pluriannuelles du KABO BE concernant les populations de vers de terre, certaines stations disposant déjà de données issues de cinq rééchantillonnages.

Matériel et Méthodes

Le projet KABO BE se concentre sur les sols à usage agricole. Sur 19 sites du plateau bernois, où l'agriculture est intensive, dont 18 ont été pris en compte dans les analyses, on a comparé un sol en prairie permanente (PP) et un sol d'une parcelle terre arable (TA) voisine, aussi identique que possible sur le plan pédologique. Les prélèvements ont généralement eu lieu durant la première année principale d'exploitation de la prairie artificielle, principalement en octobre, et ponctuellement au printemps suivant en cas de forte sécheresse. Le prélèvement d'échantillons et la détermination de la biomasse et de l'abondance

des populations de vers de terre ont été effectués par le Service du sol conformément aux méthodes de référence suisses d'Agroscope (<https://ira.agroscope.ch/fr-CH/publication/46233>). Outre l'évaluation des sites individuels, ceux-ci ont été regroupés et analysés en fonction de leur mode d'exploitation. Le regroupement s'est effectué selon le facteur «système d'exploitation» avec les catégories TA et PP, cette dernière étant différenciée en pâturage intensif (inWe) et prairie extensive (exWi).

Résultats et Discussion

En règle générale, les graphiques de biomasse et d'abondance présentent les mêmes tendances (non représentées ici), mais les valeurs d'abondance varient davantage que celles de la biomasse. Les valeurs d'abondance se prêtent surtout à l'évaluation de considérations relatives à la dynamique des populations (Cuendet et al., 1997), sur lesquelles nous ne reviendrons pas ici. Les résultats relatifs à la biomasse sont présentés ci-après afin de discuter des relations écologiques et fonctionnelles avec l'exploitation et les changements climatiques.

Influence de l'exploitation sur les biomasses de vers de terre

Chaque exploitation KABO met en place une rotation des cultures adaptée à son exploitation. En conséquence, les intervalles entre les prélèvements varient et la fréquence des prélèvements diffère d'un site à l'autre.

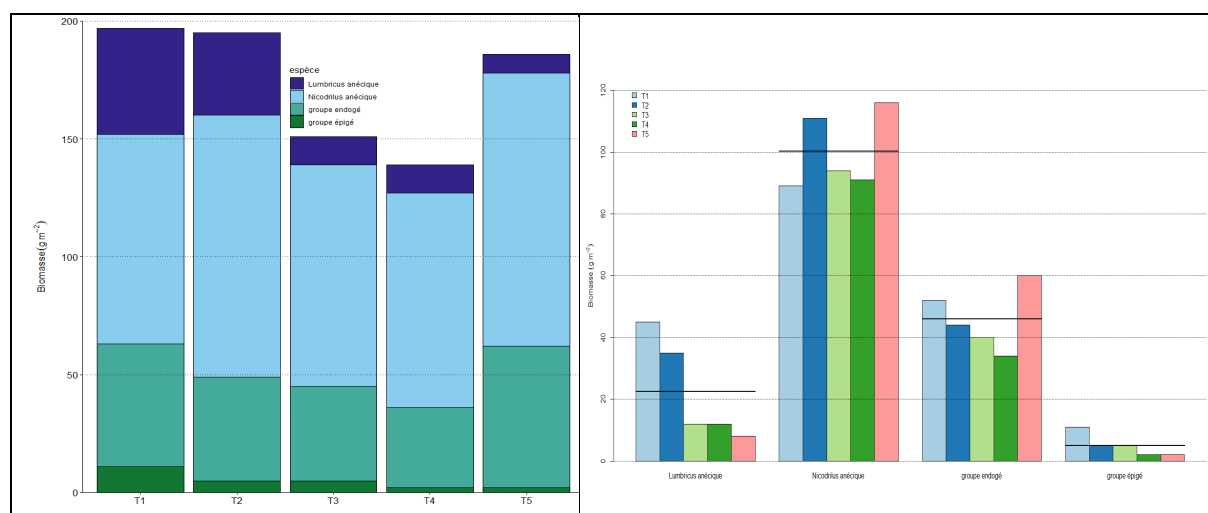


Figure 1: Relevés de vers de terre sur 18 sites de prairies permanentes avec cinq cycles de la KABO BE. Les médianes de la biomasse des quatre groupes écomorphologiques *Lumbricus* anéciques, *Nicodrilus* anéciques, espèces endogées et espèces épigées sont représentées sous forme de colonnes empilées (graphique de gauche) ou de colonnes individuelles (graphique de droite). Ligne noire = moyenne sur les cinq cycles.

Prairies permanentes

La Figure 1 présente la biomasse des vers de terre pour les cinq cycles d'échantillonnage (cycles 1 à 5) ainsi que les médianes des quatre groupes écomorphologiques distingués, avec le nombre correspondant de sites échantillonnés à ce jour.

En PP, la biomasse totale des différents groupes diminue fortement entre le deuxième et le troisième cycle, puis augmente à nouveau, tout au plus, entre le quatrième et le cinquième cycle (Fig.1, gauche). Cependant, seuls cinq sites ont été échantillonnés cinq fois à ce jour; cette affirmation ne pourra donc être vérifiée qu'après le cinquième échantillonnage des 18 sites. En tant qu'espèces épigées à cycle de vie court et à reproduction rapide (stratégies r), elles dépendent fortement de l'offre alimentaire actuelle et donc des conditions environnementales changeant à court terme, dont fait partie le moment de l'échantillonnage. Elles ne sont donc pas utilisées pour un suivi à long terme et, bien qu'elles soient représentées dans les graphiques ci-dessous, elles ne sont pas abordées dans le texte. Pour un suivi à long terme, les espèces qui réagissent de manière plus lente

aux changements des conditions d'exploitation et environnementales, telles que les espèces endogées et anéciques, sont plus adaptées (Fig. 1, droite). Alors que les premières, ainsi que les espèces anéciques du genre *Nicodrilus*, fluctuent autour de la moyenne au fil du temps, les espèces anéciques du genre *Lumbricus*, dont le seul représentant est *L. terrestris*, affichent un fort déclin depuis le premier relevé et se stabilisent à un niveau très bas.

Lorsqu'on classe le PP en fonction de l'intensité d'exploitation (Fig. 2), on constate que, tant pour les exWi (graphique en haut à gauche) que pour les inWe (graphique en bas à gauche), la biomasse totale diminue jusqu'au quatrième cycle, puis augmente à nouveau. La remontée observée au cinquième cycle est clairement visible pour les deux intensités d'exploitation, mais le nombre d'échantillons disponibles est encore limité. Les graphiques de droite montrent que les biomasses des espèces anéciques *Nicodrilus* sp. et des espèces endogées varient plus ou moins fortement autour de la valeur moyenne, tant dans les exWi que dans les inWe. Chez les espèces anéciques *Lumbricus* sp., on con-

state une diminution très nette de la biomasse pour les deux types d'exploitation.

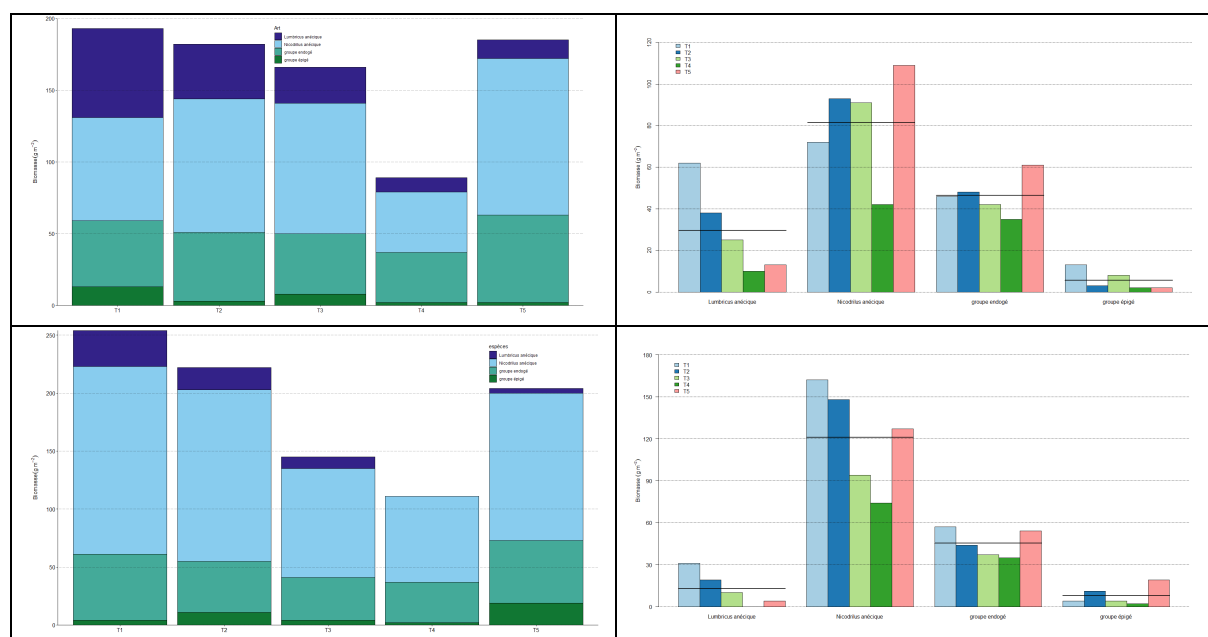


Figure 2: Relevés de vers de terre sur des sites de prairies permanentes exploités de manière extensive (graphiques du haut) et intensive (graphiques du bas), avec cinq parcelles de la KABO BE pour chaque type. Les colonnes empilées (graphiques de gauche) et les colonnes individuelles (graphiques de droite) représentent les médianes de la biomasse des quatre groupes écomorphologiques: *Lumbricus* anéciques, *Nicodrilus* anéciques, espèces endogées et espèces épigées. Ligne noire = moyenne sur les cinq cycles.

Terres arables

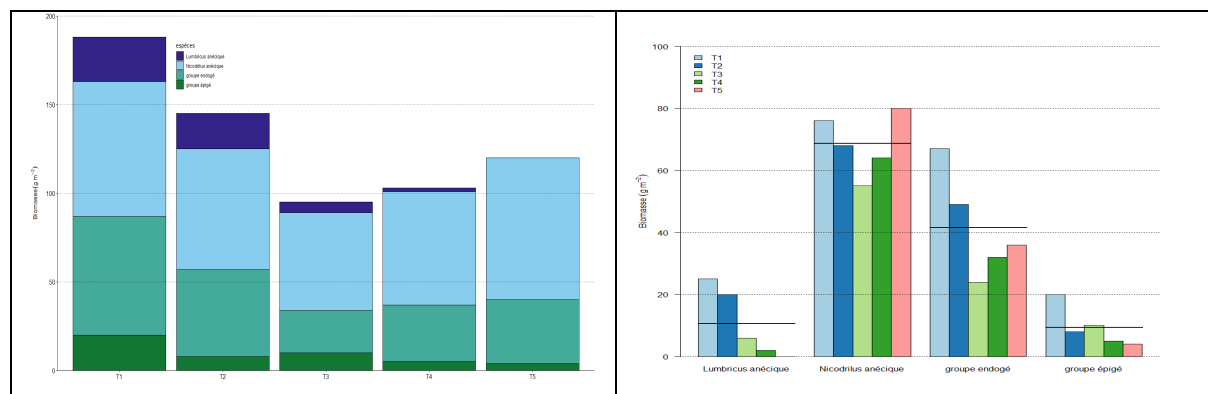


Figure 3: Relevés de vers de terre sur 18 terres arables avec cinq tournées de la KABO BE. Les médianes des biomasses des quatre groupes écomorphologiques *Lumbricus* anéciques, *Nicodrilus* anéciques, espèces endogées et espèces épigées sont représentées sous forme de colonnes empilées (graphique de gauche) ou de colonnes individuelles par cycle (graphique de droite). Ligne noire = moyenne sur les cycles correspondants.

Comme pour les PP (Figs. 1 et 2), on observe également pour les TA (Fig. 3, gauche) une diminution de la biomasse totale jusqu'au troisième cycle, après quoi elle augmente à nouveau légèrement.

Les biomasses des quatre groupes écomorphologiques (Fig.3, droite) varient également dans la TA; toutefois, contrairement à la PP, les biomasses des espèces endogées restent constamment inférieures à la moyenne à partir du troisième cycle et les

Lumbricus sp. anéciques disparaissent complètement.

Les biomasses totales de vers de terre de la TA sont, par cycle, inférieures de 2 à 23% à celles de la PP. Il s'agit néanmoins de valeurs élevées pour la TA. Cela s'explique par le fait que les relevés ont été effectués à l'automne de la première année d'exploitation principale de la prairie artificielle et que les populations de vers de terre peuvent se multiplier fortement au cours d'une période de plus d'un an sans travail du sol et riche en nourriture (Jossi et al., 2001). De plus, au cours du suivi, des cultures intermédiaires ont été de plus en plus souvent mises en place, ce qui a permis d'assurer une alimentation suffisante, des conditions pédoclimatiques stables (température, humidité) et donc de grandes populations de vers de terre. Parallèlement, les valeurs en PP ont baissé en raison de l'extensification, car les exWi représentent les deux tiers des sites PP.

Conclusion

La biomasse totale des vers de terre a diminué de manière continue au moins au cours des trois premiers cycles dans tous les systèmes d'exploitation étudiés – prairies permanentes exploitées de manière intensive et extensive ainsi que terres arables. Une éventuelle augmentation de la biomasse après le troisième cycle est certes observable, mais elle n'est pas confirmée en raison de la faiblesse des valeurs mesurées. Le niveau généralement plus faible de la biomasse dans les sols arables est principalement dû à l'utilisation de la charrue. Les groupes écomorphologiques réagissent différemment: les espèces anéciques du genre *Nicodrilus* présentent, dans les deux systèmes d'exploitation, des fluctuations de la biomasse au cours des

différents cycles. Cela pourrait s'expliquer par les différences de conditions alimentaires, de précipitations et de température. Il en va de même dans les sols de prairies permanentes pour les espèces endogées, qui ont toutefois tendance à présenter des valeurs de biomasse en baisse dans les sols arables. Cela est probablement lié aux surfaces de sol temporairement non couvertes dans les cultures telles que les céréales, les betteraves sucrières, le maïs ou les pommes de terre. Les sols nus se réchauffent davantage et s'assèchent plus tôt que les sols couverts, ce qui a un impact négatif sur les organismes du sol minéral vivant dans les 20 à 30 premiers centimètres ([Protéger les sols de la chaleur, un impératif crucial](#)). Les *Lumbricus* sp. anéciques, représentés exclusivement par l'espèce *Lumbricus terrestris*, affichent une diminution continue de la biomasse au cours du suivi, et ce dans les deux types d'utilisation des sols. Dans les prairies permanentes, en particulier en cas d'exploitation extensive, cela est probablement lié d'une part à cette exploitation pauvre en nutriments; d'autre part, un facteur externe doit également entrer en jeu, car la baisse des valeurs de biomasse s'observe également en cas d'exploitation intensive des pâturages et dans les terres arables. La multiplication des périodes de sécheresse et de chaleur peut en être une cause, car contrairement aux *Nicodrilus* sp. anéciques, les *Lumbricus* sp. anéciques ne ferment pas leurs galeries en été (Cuendet et al., 1997) et peuvent donc être plus fortement influencés par les changements climatiques. Le déclin des espèces endogées pourrait être lié aux périodes où les sols des terres arables sont nus, où les changements climatiques ont un impact négatif supplémentaire.

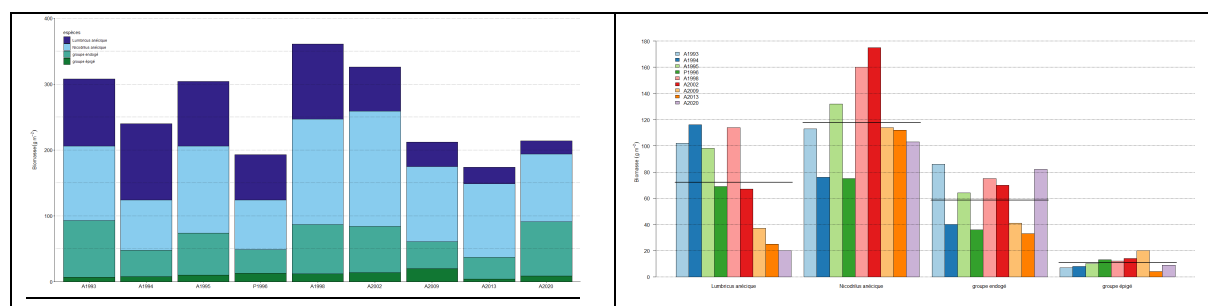


Figure 4: Relevés de vers de terre sur le site de prairie permanente intensivement échantillonné de Niederörsch, appartenant à la KABO BE. Les colonnes empilées (graphique de gauche) et les colonnes individuelles (graphique de droite) représentent les médianes de la biomasse des quatre groupes écomorphologiques: *Lumbricus* anéciques, *Nicodrilus* anécique, espèces endogées et espèces épigées. A = échantillonnage d'automne. P = échantillonnage de printemps. Ligne noire = moyenne des neuf échantillonnages.

Afin de mieux interpréter les écarts entre les valeurs de biomasse obtenues lors d'échantillonnages très espacés dans le temps, les vers de terre ont été recensés chaque année au début du projet KABO sur le site de Niederörsch (Fig. 4). Les valeurs des échantillonnages d'automne (H) effectués entre 1993 et 2002 varient ainsi entre 240 et 361 g par m² (graphique de gauche). Seul l'échantillonnage de printemps (F) de 1996 présente une valeur nettement inférieure, à savoir 193 g par m², ce qui peut s'expliquer par la différence de période d'échantillonnage. Lors des trois derniers échantillonnages d'automne de 2009, 2013 et 2020, les biomasses sont constamment faibles ; avec 174 à 212 g par m², elles se situent dans la fourchette de l'échantillonnage de printemps de 1996. Si l'on examine les groupes écomorphologiques dans le graphique de droite, on constate que pour les trois groupes, les biomasses des six premiers échantillonnages fluctuent autour de la moyenne (ligne noire). Seule l'espèce anoxique *Lumbricus* sp. présente une diminution constante de la biomasse au cours des trois derniers échantillonnages, avec des valeurs nettement inférieures à la moyenne. Ce phénomène peut être lié à l'utilisation plus extensive de la PP en tant que surface de compensation écologique (exWi). Avec l'introduction des PER en

1996, cela implique également une fertilisation extensive, ce qui entraîne une production végétale moindre et donc une offre alimentaire réduite pour les vers de terre. Outre l'extensification, la concurrence alimentaire avec les espèces épigées, une certaine concurrence spatiale avec les espèces anéciques du genre *Nicodrilus*, ainsi que les changements climatiques pourraient également avoir un impact négatif sur les espèces anéciques du genre *Lumbricus*.

Conclusion

Des prélèvements effectués à intervalles rapprochés, dans des conditions d'exploitation inchangées, fournissent des indications sur les fluctuations naturelles et de courte durée des populations de vers de terre. Celles-ci sont dues aux variations annuelles des températures et des précipitations et influencent la reproduction et la croissance des animaux. Les données recueillies à des intervalles plus espacés peuvent ainsi être mieux interprétées. Les changements dans les pratiques agricoles, tels que l'extensification, ainsi que l'évolution des conditions climatiques ont un impact négatif, en particulier sur le groupe des *Lumbricus* sp. anéciques, dont le seul représentant est *L. terrestris*.

Diversité des espèces

	Constance (%)	
	DG	AF
Lumbricus anécique:		
<i>Lumbricus terrestris</i>	95	84
Nicodrilus anécique:		
<i>Nicodrilus longus</i>	92	89
<i>Nicodrilus nocturnus</i>	85	77
Groupe endogé:		
<i>Nicodrilus caliginosus</i>	95	95
<i>Allolobophora chlorotica</i>	45	37
<i>Allolobophora icterica</i>	97	95
<i>Allolobophora rosea</i>	100	100
<i>Octolasion cyaneum</i>	67	71
<i>Octolasion tyrtaeum</i>	18	5
<i>Aporrectodea limicola</i>	0	1
Groupe épigé:		
<i>Lumbricus castaneus</i>	62	44
<i>Lumbricus rubellus</i>	74	89

Tableau 1: Fréquence d'occurrence (constance, en %) des taxons trouvés dans les 18 prairies permanentes (PP = DG) et terres arables (TA = AF) de la KABO BE, calculée pour l'ensemble des 73 échantillonnages.

Au total, douze espèces de vers de terre ont été recensées dans la KABO BE: *Lumbricus terrestris*, seul représentant du groupe des *Lumbricus* sp. anéciques, les deux espèces *Nicodrilus longus* (aujourd'hui: *Aporrectodea longa*) et *N. nocturna* (aujourd'hui: *A. nocturna*) du groupe des *Nicodrilus* sp. anéciques, les espèces endogéiques *N. caliginosus*, *Allolobophora chlorotica*, *A. icterica*, *A. rosea*, *Octolasion cyaneum*, *O. tyrtaeum* et *Aporrectodea limicola*, ainsi que les deux espèces épigées *L. castaneus* et *L. rubellus*.

En PP, on a recensé entre cinq et onze espèces par relevé, soit une moyenne de 8.3 espèces. Les espèces se distinguent par leur constance, c'est-à-dire leur pourcentage de présence sur l'ensemble des 73 prélèvements (Tableau 1). Des espèces telles que *L. terrestris*, *N. longus*, *N. nocturnus*, *N. caliginosus*, *A. icterica* et *A. rosea* sont présentes dans 85 à 100 % des relevés et apparaissent donc presque systéma-

tiquement. Des espèces telles que *L. castaneus*, *L. rubellus* et *O. cyaneum* sont régulièrement observées dans 62 à 74 % des échantillons, tandis qu'*A. chlorotica* ne l'est que dans 45 % d'entre eux et *O. tyrtaeum* dans seulement 18 %. Ces deux dernières espèces présentent donc une présence irrégulière ou rare, ou sont peu constantes. Sur la plupart des sites PP, le nombre d'espèces varie d'une à deux espèces au cours de la période d'étude (résultats non représentés graphiquement). Sur deux sites KABO, des variations plus importantes ou une diminution du nombre d'espèces ont pu être mises en relation avec des mesures d'exploitation (stockage de bois après la tempête «Lothar», pâturage intensif par des chevaux).

En TA, on a recensé entre quatre et dix espèces par relevé, soit une moyenne de 7.9, ce qui est légèrement inférieur au nombre d'espèces observées en PP. La constance des espèces varie également légèrement (Tableau 1): avec 84 à 100 %, *L. terrestris*, *N. longus*, *N. caliginosus*, *A. icterica* et *A. rosea* présentent une fréquence comparable à celle observée en PP. *L. rubellus* fait également partie de ces espèces plus ou moins toujours présentes; elle est ainsi plus régulière en TA qu'en PP. *N. nocturnus*, en revanche, est moins constant en TA qu'en PP, tout comme *O. cyaneum*, qu'on retrouve dans 71 à 77 % des échantillons. *L. castaneus* et *A. chlorotica* présentent une présence irrégulière et donc une constance moindre qu'en PP; *O. tyrtaeum* et *A. limicola* sont rares à très rares. Cette dernière espèce a été découverte pour la première fois en 2019 et uniquement sur un seul site. Le nombre de sites où les fluctuations du nombre d'espèces au cours des tournées correspondantes dépassent deux espèces est également nettement plus élevé en TA: sept sites présentent des différences de trois ou quatre espèces (résultats non représentés graphiquement). Cela concerne en partie des espèces très

stables telles que *L. terrestris*, *N. longus*, *N. caliginosus* et *A. icterica* lors du dernier cycle, ce qui peut être lié, outre l'exploitation (utilisation intensive des prairies artificielles, utilisation intensive du PP comme pâturage pour chevaux, passage du semis direct au labour), à des conditions de sécheresse accrues sur le site (exposition sud). On observe une forte augmentation du nombre d'espèces après l'abandon de la culture de la pomme de terre. Cette culture est associée à d'importants travaux du sol, ce qui a un impact négatif sur la communauté de vers de terre.

Conclusion

Tant le nombre d'espèces recensées que la constance de leur présence sont similaires dans les sols des prairies permanentes et des terres arables. Des variations d'une à deux espèces entre les relevés semblent normales, car les espèces rares ou très

rares ne sont pas toujours détectées lors d'un échantillonnage. Les fluctuations plus importantes du nombre d'espèces s'expliquent généralement par une mesure d'exploitation, éventuellement associée à des causes spécifiques au site et climatiques (exposition, sécheresse).

Influence des changements climatiques sur les communautés de la zone pluviale

Précipitations et température

Sur le Plateau suisse également, le changement climatique se manifeste par des températures moyennes de plus en plus élevées et par une modification de la quantité et de la répartition des précipitations ([Les scénarios climatiques suisses - MétéoSuisse](#)). Cette section examine si et dans quelle mesure ces changements peuvent avoir un impact sur les communautés de vers de terre.

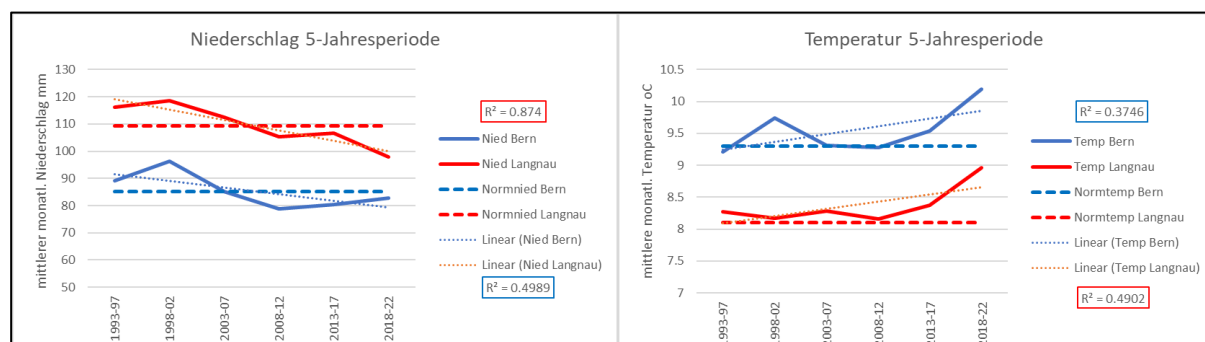


Figure 5: Précipitations mensuelles moyennes (graphique de gauche) et température mensuelle moyenne (graphique de droite) de 1993 à 2022, représentées sur six périodes de cinq ans, avec leurs relations linéaires ainsi que les valeurs climatiques normales correspondantes pour la période 1991-2020, issues des stations météorologiques automatiques de Berne et de Langnau de MétéoSuisse.

La Figure 5 présente les moyennes des précipitations mensuelles cumulées et des températures moyennes par périodes de 5 ans entre 1993 et 2022, mesurées par les stations météorologiques automatiques de Berne et de Langnau de MétéoSuisse. Le regroupement par périodes de cinq ans a été choisi d'une part pour lisser les fluctuations à court terme et d'autre part pour pouvoir les comparer aux données sur les vers

de terre. Celles-ci ont également dû être regroupées en ces périodes en raison du faible volume annuel de données (Fig. 6 et 8). Les deux sites de Berne et de Langnau ont pour but de mettre en évidence d'éventuelles différences régionales concernant l'évolution et les valeurs absolues des précipitations et de la température. Si les valeurs absolues des deux stations de mesure diffèrent, leurs fluctuations sont en re-

vanche très similaires: les précipitations (Fig. 5, gauche) ont diminué depuis 1993 et les températures (Fig. 5, droite) ont augmenté. À Berne et à Langnau, depuis le début du millénaire, nettement plus de la moitié des valeurs annuelles de précipitations se situent en dessous de la norme de 1991-

2020, parfois pendant plusieurs années consécutives. Cette tendance est encore plus marquée pour les températures. Depuis le début du KABO BE, le climat du plateau bernois est donc devenu plus sec et plus chaud.

Vers de terre

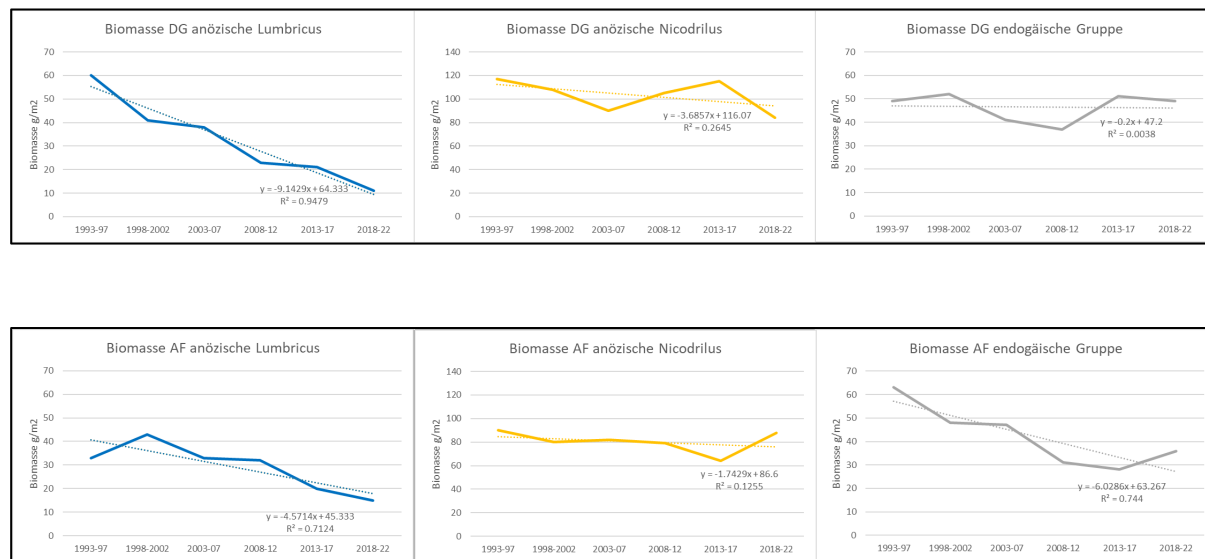


Figure 6: Évolution de la biomasse des vers de terre et relations linéaires entre la biomasse des vers de terre et le temps (valeurs moyennes pour six périodes de cinq ans) pour les trois groupes écomorphologiques: *Lumbricus* anéciques et espèces endogées, provenant de 18 sites de prairies permanentes (PP = DG, graphiques du haut) et de 18 terres arables (TA = AF, graphiques du bas) de la KABO BE de 1993 à 2022.

La Figure 6 présente les biomasses des trois groupes de vers de terre: *Lumbricus* sp. anéciques, *Nicodrilus* sp. anéciques et espèces endogéiques, sur des périodes de 5 ans entre 1993 et 2022 pour les PP (graphiques du haut) et les TA (graphiques du bas).

Pour le groupe des *Lumbricus* sp. anéciques, on observe dans les deux systèmes d'exploitation une forte corrélation linéaire entre la diminution de la biomasse et le temps ($R^2 = 0.95$ pour la PP, 0.71 pour la TA). Depuis la première période, on constate une diminution dans la PP, principalement due à l'extensification et à la réduction de l'offre alimentaire qui en découle. De ce fait, les populations de la seule espèce de

ce groupe, *L. terrestris*, ne cessent de diminuer. Dans le cas de la TA, les trois ou quatre premières périodes pourraient correspondre à des fluctuations naturelles, mais depuis la période 2008-2012, la diminution est nette. Les conditions climatiques de plus en plus sèches et chaudes peuvent en être une cause majeure.

Dans le groupe des *Nicodrilus* sp. anéciques, on observe certes une légère diminution générale de la biomasse au fil du temps en PP, mais les fluctuations entre les périodes sont faibles. En TA, aucune diminution notable n'est observable; la remontée observée au cours de la dernière période pourrait correspondre à une fluctuation naturelle. Les *Nicodrilus* sp. anéciques

ne semblent pas être fortement influencés ni par l'exploitation agricole ni par les changements climatiques. Ils survivent notamment aux périodes sèches et chaudes dans leurs galeries fermées, en état de dormance (Cuendet et al., 1997).

Chez les espèces endogées, il n'existe pas de relation linéaire entre la biomasse et le temps en PP. Ce groupe de vers de terre présente généralement les fluctuations temporelles les plus faibles (Fig. 4). En tant qu'habitants des sols minéraux sous un couvert végétal constant, ils semblent à peine affectés par les changements climatiques en PP. En TA, en revanche, celles-ci ont un impact négatif supplémentaire en raison de la sécheresse accrue sur les surfaces de sol temporairement non couvertes ($R^2 = 0.74$).

Outre la température, le facteur climatique le plus important pour les vers de terre est la précipitation, ce qui explique pourquoi ces animaux sont surtout actifs au printemps et en automne et se reproduisent à cette période. Dans la KABO BE, les populations de vers de terre étaient généralement recensées en octobre. Cependant,

les conditions météorologiques de plus en plus sèches et chaudes en automne ont conduit à accorder une attention accrue au moment du prélèvement et, lorsque le sol était trop sec, le recensement a dû être reporté au printemps suivant. Les prélèvements effectués au printemps et en automne devraient donner des résultats comparables (Cuendet et al., 1997), ce qui n'est toutefois pas toujours le cas, comme le montrent les études menées à Niederösch (Fig. 4). La quantité de précipitations en septembre, en particulier, influence le résultat de l'extraction lors du prélèvement d'octobre (Fig. 7).

La Figure 7 présente les moyennes des cumuls de précipitations et des températures moyennes enregistrées en septembre au cours des périodes de cinq ans comprises entre 1993 et 2022 par les stations météorologiques automatiques de Berne et de Langnau. Depuis la période 2003-2007, les précipitations de septembre se situent à la norme pluriannuelle ou en dessous; cette tendance est particulièrement marquée pour la période 2013-2017. De même, les températures de septembre ne sont pratiquement inférieures à la norme.

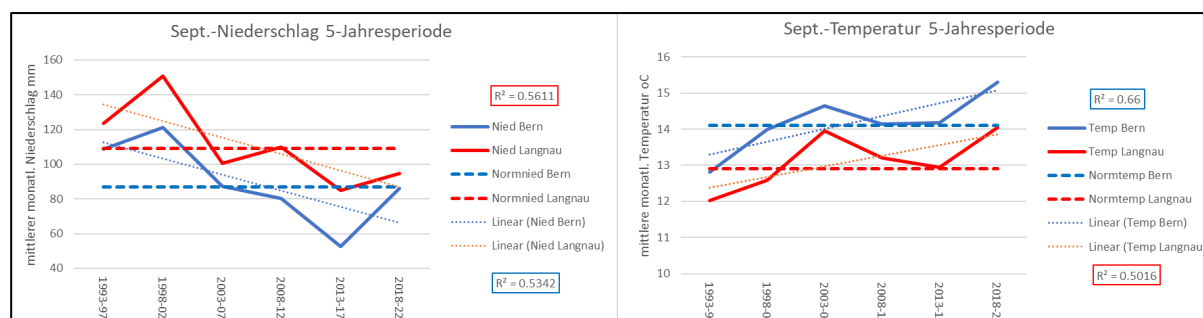


Figure 7: Cumul des précipitations (graphique de gauche) et température moyenne (graphique de droite) en septembre de 1993 à 2022, représentés sur six périodes de cinq ans, avec leurs relations linéaires ainsi que les valeurs climatiques normales correspondantes pour 1991-2020 des stations météorologiques automatiques de Berne et Langnau de MétéoSuisse.

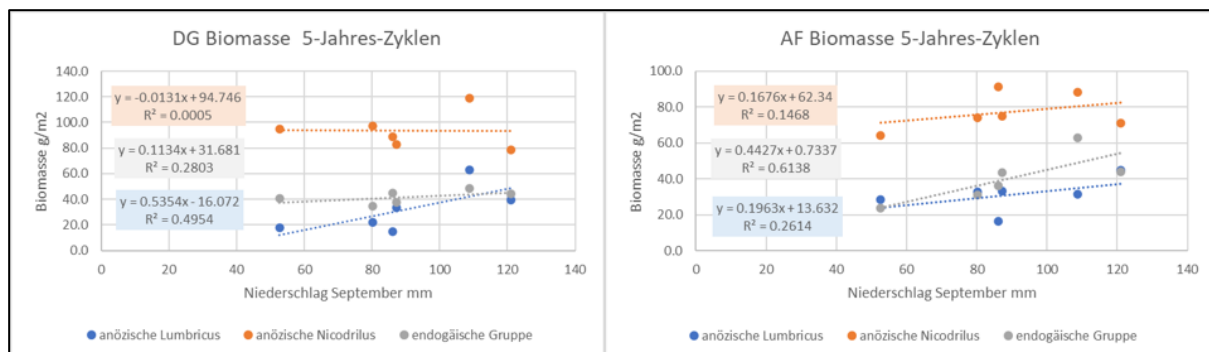


Figure 8: Relations linéaires entre la biomasse des vers de terre (valeurs moyennes pour six périodes de cinq ans) et les précipitations de septembre pour les trois groupes écomorphologiques *Lumbricus* anéciques, *Nicodrilus* anéciques et espèces endogées dans les 18 sites de prairies permanentes (PP, graphique de gauche) et les 18 sites de terres arables (TA, graphique de droite) du KABO BE.

Depuis la canicule de l'été 2003, les mois de septembre sont plus chauds et plus secs (Fig. 7). L'impact de ces conditions sur la biomasse des vers de terre est illustré à la Figure 8. À cette fin, les moyennes de la biomasse des périodes de 5 ans ont été calculées pour l'ensemble des sites KABO, en distinguant l'affectation des sols et les groupes écomorphologiques. Pour les précipitations annuelles de septembre, les données du site de Berne ont été prises en compte.

En PP, les *Lumbricus* sp. anéciques présentent une dépendance linéaire claire ($R^2 = 0,495$) entre les précipitations et la biomasse. Moins il pleut, moins la biomasse détectée est importante. On pourrait également imaginer un lien indirect, les espèces vivant en profondeur dans le sol ayant du mal à émerger dans des conditions sèches. Cela s'appliquerait toutefois également aux espèces anéciques *Nicodrilus* sp., ce qui n'est pourtant pas le cas. Les espèces endogées ne montrent pas non plus, en PP, de corrélation négative entre la sécheresse automnale et la biomasse; la couverture végétale permanente et l'absence de travail du sol garantissent des conditions constantes de température et d'humidité.

En TA, en revanche, le groupe endogéique subit une forte influence négative due à la

modification des conditions ($R^2 = 0.61$). La sécheresse croissante et la hausse des températures du sol pourraient avoir des effets négatifs sur ces espèces, qui ne se réfugient pas dans les couches profondes du sol, en particulier sur les surfaces de sol nues, telles qu'on les observe parfois dans diverses cultures. Une influence méthodologique peut être exclue ici, car ce groupe de vers de terre se trouve dans les 20 à 30 premiers centimètres du sol et peut être recensé de manière fiable par tri manuel. Les deux groupes anéciques réagissent certes également à la sécheresse automnale croissante en TA, mais ne présentent que de faibles corrélations.

Les comparaisons (non présentées) entre les groupes de vers de terre et les conditions météorologiques d'octobre (mois d'échantillonnage) ou celles de l'ensemble de la période de végétation (mars à octobre) n'ont révélé aucune corrélation.

Conclusion

Les conditions météorologiques de plus en plus sèches en septembre semblent avoir un impact négatif sur *L. terrestris*, le seul représentant des *Lumbricus* anéciques, dans les prairies permanentes. Des relevés issus de l'observation continue en Bavière ont également constaté des baisses d'abondance de cette espèce dans les prai-

ries naturelles et ont attribué cette situation aux conditions de plus en plus sèches en été et en automne (Bayerische LfL, 2022). Bien que cette espèce puisse se réfugier dans les couches profondes du sol en cas de conditions défavorables, elle n'entre pas dans un véritable stade de dormance avec un métabolisme ralenti et est donc plus sensible au stress hydrique et aux longues périodes de sécheresse que les autres espèces (Ehrmann, 2021).

Dans les terres arables, ce sont surtout les espèces endogées qui sont affectées négativement par la sécheresse accrue du sol pendant les périodes sans couverture végétale continue. Les espèces anéciques réagissent également, mais sont moins fortement touchées. L'influence des changements climatiques peut être atténuée dans les terres arables par une modification des pratiques agricoles, en privilégiant davantage les méthodes de culture de conservation avec une couverture permanente du sol, ce qui favorise globalement la biologie du sol.

Références

Cuendet, G., Suter, E., Stähli, R. (1997). La faune des vers de terre des prairies permanentes du Plateau suisse. Rapport de synthèse. *Série Environnement* 291, Sol. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP).

Ehrmann, O. (2021). Les vers de terre et le changement climatique – Influence des événements météorologiques extrêmes sur la population de vers de terre. *Landwirtschaft ohne Pflug* 12, 38-43.

Jossi W., Valenta A., Zihlmann U., Dubois D. (2001). Burgrain: influence de différents systèmes de culture sur la faune des vers de terre. *Agrarforschung* 2, 60-65.

LfL Institut bavaïsois pour l'agriculture (2022). 35 ans d'observation continue des sols des terres agricoles en Bavière. Vol. 5: Vers de terre.

4.2 BioDivSol: Résumé de trois sous-projets sur la biodiversité des sols en Suisse

Sophie Campiche, EnviBioSoil, 1124 Gollion

Cet article est un résumé étendu du rapport de synthèse sur la biodiversité des sols (projet BioDivSol). Le rapport de synthèse peut être consulté dans son intégralité à l'adresse suivante: <https://www.bafu.admin.ch/fr/etudes-sols>

Contexte et objectifs

Le sol est une ressource fondamentale mais limitée, indispensable au fonctionnement des écosystèmes et essentielle aux besoins humains. Les fonctions écologiques du sol, notamment les fonctions d'habitat et de régulation, reposent majoritairement sur les organismes qui y vivent et qui jouent un rôle clé dans les processus comme le recyclage des nutriments, la structure du sol ou la santé des plantes.

Cependant, malgré l'importance des organismes du sol, leur diversité reste encore en grande partie sous-estimée et mal caractérisée. En effet, une grande partie des espèces présentes n'est toujours pas identifiée et leurs contributions précises aux fonctions du sol sont encore peu quantifiées. Il semble donc nécessaire de renforcer les connaissances dans ce domaine et d'intégrer cette biodiversité dans les politiques de conservation. Dans ce contexte, le projet BioDivSol représente une étape

importante pour appréhender la biodiversité des sols en Suisse et pour fournir des bases scientifiques permettant de mieux protéger et gérer cet élément clé des écosystèmes. Il constitue de ce fait la première évaluation à grande échelle de la diversité des organismes des sols suisses, révélant la présence d'une biodiversité de grande ampleur et encore très peu connue sous nos pieds. Le projet a été financé dans le cadre du *Plan d'Action de la Stratégie Suisse pour la Biodiversité (AP SBS)*, notamment via la mesure 4.2.2, qui soutient l'élaboration d'une stratégie nationale sur les sols adoptée en 2020. Les objectifs principaux du projet *BioDivSol* sont d'améliorer les connaissances sur la biodiversité des sols suisses à l'aide de méthodes d'analyse basées sur l'ADN (métabarcoding) et de mieux comprendre les liens entre la biodiversité et les facteurs environnementaux (Campiche 2025).

Le projet *BioDivSol* a été mené sur quatre ans (2020–2024) et comprend trois sous-projets complémentaires. Le premier sous-projet, intitulé «*Biodiversité microscopique dans les sols*» (Gschwend et al., 2022; Bouraoui et al., 2022), explore la faisabilité du métabarcoding ADN pour caractériser la diversité des microorganismes du sol à grande échelle, en élargissant les données existantes sur les communautés bactériennes et fongiques, et en acquérant de nouvelles données sur d'autres groupes d'organismes tels que les protistes, nématodes et arthropodes du sol tout en validant ces approches moléculaires pour le suivi de la biodiversité. Le deuxième sous-projet, «*Propriétés microbiennes et matière organique*» (Deluz et al., 2024), s'intéresse aux relations à court et long terme entre l'activité microbiologique, la diversité microbienne, et les propriétés physico-chimiques des sols agricoles. Le troisième, «*Inventaire national des Collembolles et des Acariens*» (Mitchell et al., 2024), a pour objectif de documenter de manière exhaustive la

diversité de ces microarthropodes par des approches morphologiques et moléculaires combinées.

Biodiversité des communautés édaphiques en Suisse, une ressource inestimée

Le projet a évalué la diversité de six groupes d'organismes: les archées, les bactéries, les champignons, les protistes, les nématodes et les arthropodes du sol, avec un focus particulier sur les collemboles et les acariens. Le métabarcoding ADN a été utilisé comme méthodologie principale pour l'analyse de la diversité de ces communautés biologiques, en association dans certains cas avec des approches morphologiques traditionnelles. Au total, 663 sites d'études répartis dans les six régions biogéographiques suisses (Jura, Plateau, Versant nord des Alpes, Alpes centrales occidentales, Alpes centrales orientales et Versant sud des Alpes) ont été investigués, la plupart de ces sites étant déjà intégrés dans des réseaux de surveillance existants tels que le Monitoring de la Biodiversité en Suisse (MBD), le NABObio (monitoring de la biologie du sol du NABO), le Suivi des effets de la protection des biotopes en Suisse (WBS), les réserves forestières naturelles (RFN) ou le programme de recherche à long terme sur les écosystèmes forestiers (LWF). Les diversités fongiques ainsi que celles des collemboles et des acariens ont été investiguées sur près de la moitié des sites, tandis que celles des bactéries, archées, nématodes, protistes et arthropodes ont été évaluées sur une fraction plus restreinte de sites. Sept types d'usage du sol ont été considérés, les forêts (31 %), les prairies permanentes (22 %) et les terres arables (17 %) représentant à eux seuls 70% des sites étudiés. Les sites restants comprenaient les prairies alpines (10 %), les zones alluviales (9 %), les hauts- et bas-marais (9 %) ainsi que les zones urbanisées (1 %). Les facteurs envi-

ronnementaux comme les propriétés du sol ou les pratiques agricoles ont en outre été pris en compte afin de mieux comprendre leur influence sur la biodiversité.

Diversité des organismes

Les résultats de cette étude à l'échelle nationale mettent en évidence une diversité d'organismes considérable dans nos sols, mais inégale selon les groupes, avec parfois une proportion importante d'espèces détectées encore inconnues ou non décrites scientifiquement. Au total, c'est plus de 35'000 taxons biologiques qui ont été mis en évidence dans les sols suisses, les champignons étant le groupe le plus diversifié avec plus de 30'000 taxons estimés, tandis que les archées sont les moins représentées avec 40 taxons détectés. Ces chiffres montrent que la biodiversité souterraine dépasse largement les données issues des inventaires morphologiques traditionnels. Par exemple, alors qu'approximativement 15'000 espèces de macromycètes sont documentées en Suisse, le projet *BioDivSol* estime la diversité fongique totale à plus du double. Les limites des connaissances taxonomiques actuelles diffèrent fortement selon les groupes avec 24 % de taxons de nématodes non décrits à l'échelle du genre alors que pour d'autres groupes comme les bactéries, jusqu'à deux tiers (68 %) des taxons demeurent inconnus. L'inventaire des microarthropodes met également en évidence l'ampleur de cette biodiversité non caractérisée. Parmi les 170 espèces de collemboles identifiées morphologiquement sur 45 des 319 sites analysés, 105 espèces n'étaient pas encore répertoriées dans la base de données suisse GBIF (Global Biodiversity Information Facility), qui n'en recensait jusque alors que 68. Pour les acariens, 75 % des espèces d'oribates et 88 % des espèces de gamasides identifiées étaient absentes du portail GBIF.

Usage des sols

Cette étude montre aussi que les différents types d'usage du sol abritent des communautés d'organismes distinctes. Les terres agricoles se caractérisent par une richesse spécifique maximale en bactéries, champignons et protistes. Les prairies permanentes se distinguent également par une richesse élevée en bactéries et champignons, tandis que les milieux forestiers favorisent davantage une richesse spécifique maximale d'arthropodes (y compris collemboles et acariens) et de protistes. La grande majorité des taxons sont spécifiques à un seul type d'usage du sol et seulement une très faible proportion de taxons est commune à tous les usages. C'est le cas par exemple des archées qui ne comptent aucun taxon en commun entre les milieux agricoles, les prairies permanentes et les forêts. Pour les champignons et les arthropodes, la proportion de taxons partagés entre ces milieux est inférieure à 1 %, tandis qu'elle varie de 3 à 6 % chez les bactéries, protistes et nématodes.

Facteurs environnementaux

Outre l'usage des sols, le projet *BioDivSol* démontre que les facteurs environnementaux jouent un rôle déterminant dans la composition des communautés biologiques. Le pH et les indicateurs liés au carbone du sol tels que le carbone organique (C_{org}), le carbone total (C_{tot}), les rapports C/N et $C_{org}/Argile$, influencent fortement la richesse et la composition des communautés des nombreux groupes d'organismes étudiés. Concernant les pratiques agricoles, le projet fait apparaître une différence temporelle importante. À court terme (période de six mois), les pratiques culturales comme la rotation des cultures, l'intensité du travail du sol ou l'utilisation de pesticides n'ont qu'un impact limité sur les communautés microbiennes, à l'exception des apports de matière organique qui influencent légèrement la biomasse et l'activité microbienne. En revanche, les pra-

tiques à long terme (une décennie) exercent une influence plus marquée mais de manière indirecte. Elles agissent en effet principalement par le biais de modifications graduelles des propriétés du sol, tels que la teneur en carbone organique, le pH et la teneur en argile, qui conditionnent l'habitat des microorganismes. Ces observations illustrent l'importance de pratiques durables visant à préserver la structure et la matière organique du sol.

Intérêt du métabarcoding

Le projet *BioDivSol* met en évidence le potentiel des approches moléculaires (métabarcoding ADN) pour la surveillance de la biodiversité édaphique à l'échelle nationale. Le métabarcoding s'avère particulièrement adapté aux microorganismes (bactéries, champignons), pour lesquels les amorces spécifiques (de courtes séquences d'ADN qui se lient spécifiquement à des régions cibles de l'ADN et servent de point de départ à la synthèse de l'ADN), les outils bioinformatiques, et les bases de données de référence sont bien développés. Pour ces deux groupes, ainsi que pour les archées et les protistes, l'analyse peut être réalisée à partir de très faibles quantités de sol (0.5 g) et plusieurs groupes peuvent être évalués simultanément à partir d'un même extrait d'ADN. Cependant, pour certains groupes d'organismes étudiés, tels que les protistes, les nématodes et les arthropodes du sol, des adaptations restent nécessaires comme les volumes de sol utilisés, le développement d'amorces plus spécifiques ou l'enrichissement des bases de données de référence. Il apparaît donc nécessaire de poursuivre les efforts de recherche afin d'améliorer ces outils et de compléter les connaissances taxonomiques.

Les analyses de raréfaction (permettant d'estimer la diversité des espèces en fonction de l'effort d'échantillonnage) montrent que la densité d'échantillonnage est un pa-

ramètre critique. Pour les champignons, 255 sites suffisent à capturer 99 % de la diversité estimée, alors que 29 sites ne permettent d'en couvrir que 50 %. Pour les arthropodes du sol, même en doublant le nombre de sites (soit 58 sites au total), seule 29 % de la diversité attendue serait détectée. Finalement, les courbes d'accumulation montrent qu'avec environ 300 sites, une couverture satisfaisante serait atteinte à l'échelle nationale permettant de représenter la diversité de tous les groupes.

Conclusion et perspectives

Le projet *BioDivSol* démontre qu'un monitoring national de la biodiversité des sols est techniquement réalisable à moindre coût grâce aux outils moléculaires actuels et pour un nombre de sites de l'ordre de 300. Cette méthodologie permet d'accéder à une grande diversité d'organismes, incluant à la fois les microorganismes et les organismes de plus grandes tailles, et de dresser un inventaire remarquable de la biodiversité souterraine. Le projet contribue également à identifier les orientations pour la suite, par exemple la standardisation des protocoles de métabarcoding afin de garantir la comparabilité entre études, l'enrichissement des bases de données taxonomiques et de référence ADN, ou le développement d'indicateurs biologiques. L'étude prend en compte une grande diversité de facteurs environnementaux et d'usages du sol, et permet ainsi d'examiner en détail les interactions entre biodiversité, environnement et pratiques anthropiques. Certains milieux encore peu représentés dans l'échantillonnage devront cependant être d'avantage pris en compte ultérieurement. En enrichissant les connaissances par de nouvelles données, le projet *BioDivSol* aide ainsi à mieux comprendre la vie dans les sols et fournit une base pour un suivi régulier de la santé et de la biodiversité des sols.

Références

Bouraoui, D., Widmer, F., Mayerhofer, J. (2022). Rapport final de l'étude pilote «MiDiBo-2» (Diversité microscopique des sols 2), PARTIE B – Diversité fongique des sols sur 255 sites du système suisse de suivi de la biodiversité. *Molecular Ecology - Agroscope*, Zürich.

Campiche, S. (2025). [Soil Biodiversity in Switzerland – The BioDivSol Project. Synthesis Report](#). EnviBioSoil, Gollion (VD), pp. 43. Rapport préparé sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV).

Deluz, A., Deluz, C., Boivin, P. (2024). BioDivSol - Volet valeurs de référence_MO: Valeurs de référence pour la teneur en matière organique des sols: pools de matière

organique, qualité physique et qualité biologique des sols. Rapport d'étude, HEPIA Sols et Substrats, Genève, pp. 55.

Gschwend, F., Fernandez-Bravo, M., Degruene, F., Donhauser, J., Moll-Mielewicz, J., Frey, B., Heger, T., Hug, A. -S., Enkerli, J., Widmer, F. (2022). Final report of the pilot study «MiDiBo-2» (Mikroskopische Diversität im Boden 2), PART A - Soil biodiversity at Swiss long-term soil monitoring sites. *Molecular Ecology - Agroscope*, Zürich.

Mitchell, E., Lentendu, G., Bulliard, L., Lanz, S. (2024). Collembolles et acariens: inventaire national. Rapport final. Université de Neuchâtel.

4.3 Programme de ressources humus du canton de Soleure: Suivi de l'impact

*Franziska Büeler, Stéphane Burgos, Haute école spécialisée bernoise, 3052 Zollikofen
Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires, Agronomie*

Introduction

Contexte du project

La gestion de l'humus pour préserver la fertilité des sols est un sujet d'actualité brûlante dans le domaine agricole. Le maintien ou l'augmentation de la teneur en humus représente un défi, en particulier sur les sols principalement utilisés pour les grandes cultures.

Dans le cadre d'un programme de gestion des ressources agricoles (au sens des art. 77a et 77b LAgr) dans le canton de Soleure, il s'agissait de sensibiliser et de soutenir les exploitations agricoles sans bétail ou à faible densité de bétail en matière de gestion de l'humus. L'objectif du projet était de favoriser une teneur en humus adaptée au site sur les terres arables et de renforcer ainsi à long terme la fertilité des sols, la biodiversité et la stabilité climatique. Parallèle-

ment, il s'agissait de sensibiliser davantage les agriculteurs à ce sujet – par le biais de conseils et de l'utilisation du bilan humique – et d'améliorer la gestion de l'humus dans le respect des bonnes pratiques agricoles. Entre l'automne 2017 et 2023, environ 220 exploitations ont participé au projet. Environ 170 d'entre elles ont pu mettre en œuvre des mesures de gestion favorisant la formation d'humus et toutes ont calculé chaque année le bilan humique de leur exploitation. Des informations détaillées sont disponibles sur le site web du projet.

L'impact des mesures et leur interaction avec les pratiques d'exploitation respectives ont été étudiés dans le cadre d'un suivi de l'impact mené sur des exploitations de référence sélectionnées. L'acceptation dans la pratique a fait l'objet d'un accompagnement scientifique. Dans le rapport sui-

vant, l'accent est mis sur les résultats du suivi de l'impact.

Mesures du projet

Toutes les exploitations agricoles participantes, soit environ 220 exploitations soleuroises (avec de légères variations au fil des années du projet), ont calculé chaque année le bilan humique de leur exploitation à l'aide du calculateur de bilan humique d'Agroscope (www.humusbilanz.ch). La mise en œuvre, soutenue par des contributions, de mesures de gestion favorisant la formation d'humus était possible pour les exploitations sans bétail ou à vocation principalement agricole présentant une faible densité animale (< 1,1 UGB/ha de terres arables fertilisables). Au début du projet, elles pouvaient choisir parmi les mesures suivantes favorisant la formation d'humus : compostage du fumier, sous-semis, engrais vert précoce, fourrage intermédiaire, prairie artificielle avec luzerne, prairie artificielle pluriannuelle ainsi que, à partir de la 4^{ème} année du projet, engrais vert tardif, engrais vert avant la culture d'hiver et couverture du sol tout au long de l'année.

Objectifs et problématique du suivi de l'impact

Un suivi de l'impact a été mené afin de déterminer si, pendant la durée du projet, on pouvait constater une influence mesurable des mesures mises en œuvre sur la formation et le stockage d'humus ou du carbone organique (C_{org}). Cela comprenait également l'analyse et la quantification des erreurs de mesure.

En ce qui concerne le bilan humique, on a examiné s'il était en corrélation avec les valeurs de C_{org} mesurées et s'il avait évolué au cours des six années du projet dans les exploitations grâce à une stratégie d'exploitation adaptée (mesures favorisant la formation d'humus). Le rôle des influences externes (p. ex. engrais de ferme, conditions

météorologiques, rotation des cultures) a également été examiné, ce qui a permis de formuler des recommandations tant pour la pratique agricole que pour l'utilisation du bilan d'humus.

Le projet a par ailleurs utilisé des méthodes d'analyse pour déterminer la stabilité structurale du sol, sur lesquelles nous ne reviendrons pas plus en détail ici.

Méthodes

Échantillonnage et analyses en laboratoire

Sur 75 parcelles de surveillance réparties sur 16 exploitations différentes, des échantillons composites ont été prélevés chaque année entre octobre et décembre, de 2018 à 2023 inclus, pour mesurer le C_{org} . Au début du projet, la granulométrie a également été analysée et la densité apparente a été mesurée au début et à la fin du projet.

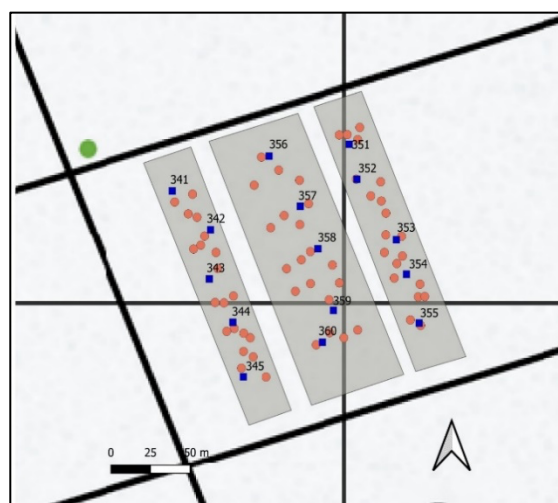


Figure 1: Exemple de plan d'échantillonnage pour trois parcelles de surveillance adjacentes. La zone grise correspond à la zone d'échantillonnage; une bande tampon de 5 m est prévue en bordure de la parcelle afin d'exclure les effets de bord. Par parcelle de surveillance: 20 points orange pour l'échantillon composite (analyse C_{org} et granulométrie) et 5 carrés bleus numérotés pour les échantillons cylindriques à 5-10 cm et 20-25 cm de profondeur (densité de stockage)

L'échantillonnage pour le C_{org} a suivi un schéma identique chaque année (Fig. 1). Il a été réalisé sur 60 parcelles de surveillance à l'aide d'un quad équipé d'un GPS. Les 15 parcelles situées dans la partie nord

du canton, moins accessibles, ont été échantillonnées à la main, à l'aide d'un GPS et d'une tarière selon le même design. Les analyses en laboratoire du C_{org} et de la granulométrie ont été réalisées selon les méthodes de référence respectives : C_{org} (Agroscope, 2020c) et KOF (Agroscope, 2020b). Au moins une double détermination de la valeur C_{org} a été effectuée pour chaque échantillon composite (y compris les valeurs à blanc et l'analyse des échantillons de référence). Si le coefficient de variation (CV) était supérieur à 0.03, une double détermination était effectuée une nouvelle fois jusqu'à ce que le CV de toutes les mesures d'un échantillon soit inférieur ou égal à 0.03.

Pour déterminer la densité apparentes, un échantillon cylindrique de 100 cm³ a été prélevé à 5 points par parcelle de surveillance, à des profondeurs de 5-10 cm et 20-25 cm (Fig. 1) et séché à 105°C. Le volume et le poids de la terre fine sèche ont été corrigés en fonction de la teneur en squelette et la densité apparente a été calculée pour chaque cylindre (méthode PYZYL-D; Agroscope, 2020a). La moyenne des 5 mesures pour chaque niveau de profondeur a donné la densité apparante de la parcelle de surveillance.

Évaluation des données et analyse des erreurs

Pour chaque parcelle de surveillance, on a analysé, d'une part, l'évolution de la teneur en C_{org} et, d'autre part, l'évolution du rapport C_{org} /teneur en argile, comme indicateurs de la stabilité du sol et du potentiel de stockage du C_{org} :

- Des régressions linéaires ont été calculées entre ces valeurs et le temps (années du projet) et la significativité de la tendance a été évaluée. Les parcelles présentant une pente significative indiquent une évolution positive ou négative de la teneur en C_{org} sur la parcelle.

- Une comparaison a également été effectuée entre le bilan humique sur la parcelle de surveillance et l'évolution de la teneur en C_{org} afin de déterminer s'il existe un lien direct entre le mode d'exploitation (apporte de matière organique, cultures intermédiaires, rotation des cultures, etc.) et la teneur en C_{org} .
- Une partie importante de l'analyse des valeurs de C_{org} consistait également à examiner les erreurs de mesures en laboratoire et d'échantillonnage. Cela a permis de déterminer l'ampleur qu'un changement mesuré doit avoir pour se situer en dehors de la marge d'erreur et indiquer un changement réel dans le sol au sein du système réel de rotation des cultures. Les valeurs CV de chaque parcelle ont été calculées pour obtenir un CV moyen annuel et un CV moyen sur l'ensemble des années du projet.

La densité apparente a servi, d'une part, à estimer les quantités de C_{org} dans le sol (multiplication du volume du sol par la teneur pondérale en C_{org}). D'autre part, elle a fourni des indications précieuses sur l'évolution de l'état physique d'une parcelle entre le début et la fin du projet.

Résultats

Évolution de la teneur en C_{org}

Les résultats du suivi de l'impact ne montrent, après les 8 années du projet (6 années de mesure), aucun changement significatif de la teneur en C_{org} sur les 75 parcelles de suivi, bien qu'une grande partie des bilans d'humus dans les parcelles ait été positive. Des fluctuations annuelles de

la teneur en C_{org} ont toutefois été observées sur les parcelles de suivi.

La Figure 2 illustre l'évolution sur 4 parcelles de surveillance pour une exploitation de référence. Ni sur cette exploitation ni sur les 15 autres, on n'observe de courbes ascendantes significatives, c'est-à-dire ni d'augmentation ni de diminution significative de la teneur en C_{org} sur la durée du projet (valeur $p < 0.05$).

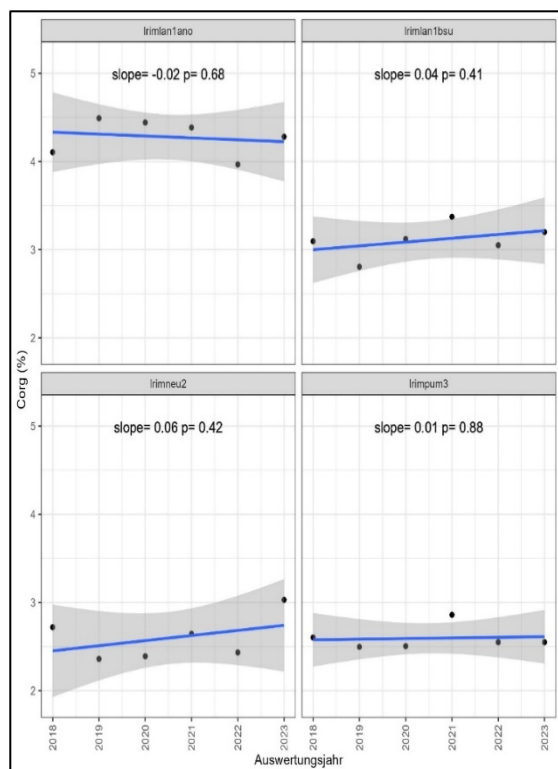


Figure 2: Évolution de la teneur en C_{org} , de la pente [slope = teneur en C_{org} /an] et de la valeur p sur la durée du projet, sur une exploitation type (anonymisée)

Ce résultat est illustré dans la Figure 3 pour l'ensemble des 75 parcelles suivies. La longueur d'une barre indique la valeur de la pente pour une parcelle de surveillance et la couleur la valeur p correspondante. On observe à la fois des évolutions légèrement positives et légèrement négatives (taille de la barre), mais toutes les valeurs p sont supérieures à 0.05; les variations ne sont donc statistiquement significatives nulle part.

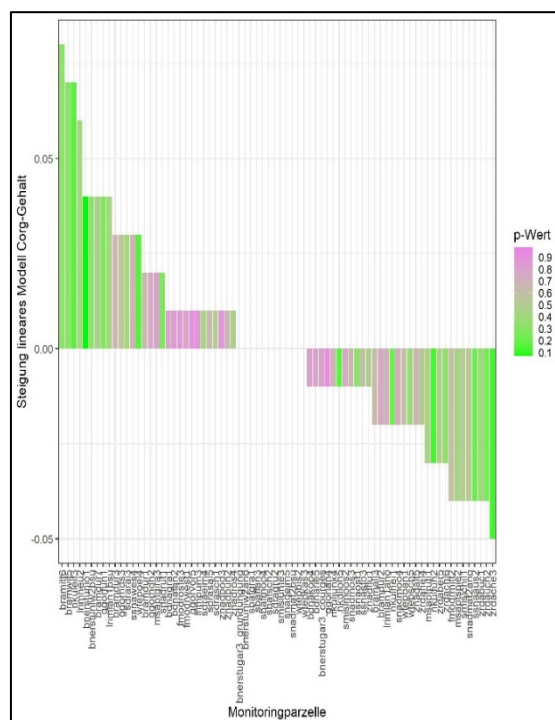


Figure 3: dispersion des pentes des régressions linéaires de la teneur en C_{org} sur les années du projet pour chaque parcelle de surveillance (barres). Une pente positive signifie globalement une augmentation au cours des années du projet, une pente négative une diminution de la teneur en C_{org} . Les pentes (couleurs du vert au rose) ne sont toutefois pas significatives (valeurs $p < 0.05$)

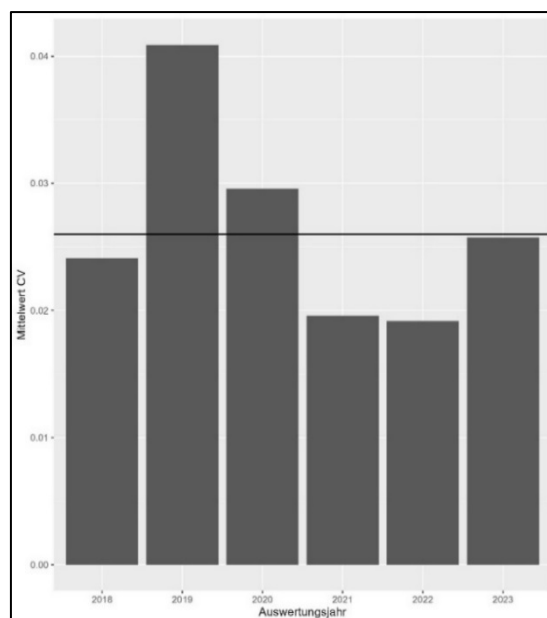


Figure 4: moyennes annuelles des coefficients de variation (CV) de la teneur en C_{org} sur l'ensemble des parcelles de surveillance, moyenne du CV sur toutes les années du projet = 0.0265 (ligne noire horizontale).

Le CV des mesures de C_{org} déterminé dans le cadre du projet s'élève en moyenne à 0,0265 sur l'ensemble des années (Fig. 4). Ce n'est qu'en 2019 que le CV est légèrement plus élevé, ce qui est considéré comme acceptable. Les valeurs de CV au niveau des parcelles suivies (non représentées ici) se situent dans la fourchette des valeurs de CV indiquées dans la méthode de référence. Les analyses C_{org} du programme de ressources Humus se situent donc dans la norme et présentent ainsi la qualité requise.

L'exemple de la parcelle de surveillance *Irimlan1bsu*, présenté dans la Figure 2, permet d'illustrer l'influence de l'erreur de mesure. Le sol de la parcelle contient 45 % d'argile et 3.2 % de C_{org} (unité : pourcentage en poids, mesure de 2023) et présente une densité apparente de 1.1 g/cm³ dans la couche arable. Le CV moyen de la mesure de cet échantillon sur toutes les années est de 0.027. La teneur en C_{org} en tenant compte de l'erreur de mesure, est donc de 3.2 % $\pm$ 0.09 %. Cette erreur correspond à 2.5 tonnes de C_{org} (soit environ 4.3 tonnes d'humus, coefficient standard de 1.72) sur une superficie d'un hectare. Les fluctuations observées sur cette parcelle et comprises dans la marge de 0.09 % de C_{org} relèvent du bruit de mesure et ne peuvent être interprétées comme des variations réelles. Pour pouvoir constater une variation réelle, la différence entre deux mesures doit donc être d'au moins 3 tonnes de C_{org} .

Rapport C_{org} /teneur en argile

Le rapport C_{org} /teneur en argile (Fig. 5) calculé pour les parcelles de surveillance est en corrélation avec l'évolution de la teneur en C_{org} pendant la durée du projet, car la teneur en argile est supposée constante et n'a donc été mesurée qu'une seule fois dans le cadre du projet. Les droites représentent les valeurs limites de probabilité d'une structure stable ou instable selon Johannes et al., (2017): La droite verte in-

dique le rapport idéal de 0.125. La couleur orange correspond à la valeur 0.1 et donc à la limite entre une stabilité probablement bonne et probablement moyenne. La droite rouge représente le rapport 0.08. À partir de cette valeur, selon Johannes et al., (2017), la probabilité d'une structure instable augmente ainsi que sa vulnérabilité.

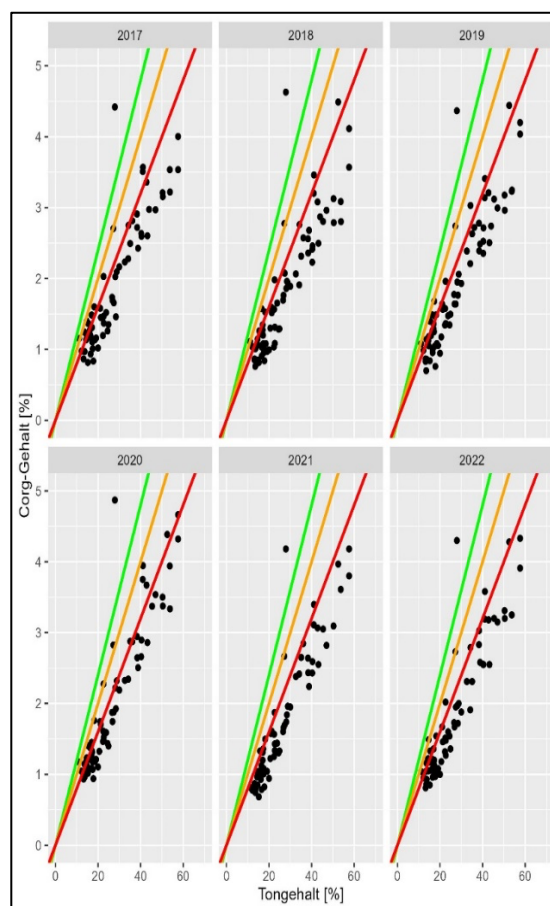


Figure 5: Teneur en C_{org} par rapport à la teneur en argile de toutes les parcelles de surveillance (points noirs) pour toutes les années du projet. La ligne verte indique, selon Johannes et al., (2017), un rapport optimal C_{org} /argile de 0.125, ce qui signifie que la probabilité d'une bonne stabilité est élevée. La droite orange indique un rapport C_{org} /argile de 0.1 et marque la limite entre la probabilité d'une stabilité moyenne et celle d'une bonne stabilité. La ligne rouge indique un rapport C_{org} /argile < 0.08 et donc une probabilité accrue de structure instable.

La Figure 5 montre que la plupart des parcelles de surveillance se situent en dessous de la droite rouge. Cela ne signifie pas que la structure est effectivement instable,

mais que la vulnérabilité est accrue et qu'il existe un potentiel de fixation en humus. De même, un rapport C_{org}/argile élevé ne signifie pas automatiquement que la structure est stable. Là encore, il peut s'agir d'une structure endommagée et, par exemple, compactée mécaniquement.

Ces résultats concernant le rapport C_{org}/argile des parcelles de surveillance ne sont pas surprenants, car le projet a explicitement sélectionné des parcelles présentant un potentiel probablement accru de formation d'humus et se prêtant donc à l'observation de l'effet des mesures favorisant la formation d'humus. Il convient également de noter que les valeurs limites du rapport C_{org}/argile font l'objet de discussions critiques dans la littérature, notamment en ce qui concerne les sols lourds dont la teneur en argile est supérieure à 30 %. Cela concerne de nombreux sols du suivi. Les sols des parcelles de suivi de l'exploitation de la Figure 2, présentent également des teneurs en argile très élevées, comprises entre 38 % et 52 %. Les résultats du rapport C_{org}/argile ne doivent donc pas être surinterprétés.

Pour les sols argileux en particulier, les valeurs limites devraient être réexaminées et faire l'objet d'études scientifiques plus approfondies, en tenant compte également de facteurs tels que les conditions de formation du sol.

Évolution de la densité apparente

La densité apparente a augmenté en moyenne sur l'ensemble des parcelles suivies au cours du projet (Fig. 6). Cette évolution s'explique par les conditions météorologiques et d'humidité du sol très différentes entre les deux prélèvements. Lors du prélèvement de l'automne 2023, les conditions étaient très humides, les précipitations étant nettement supérieures à la nor-

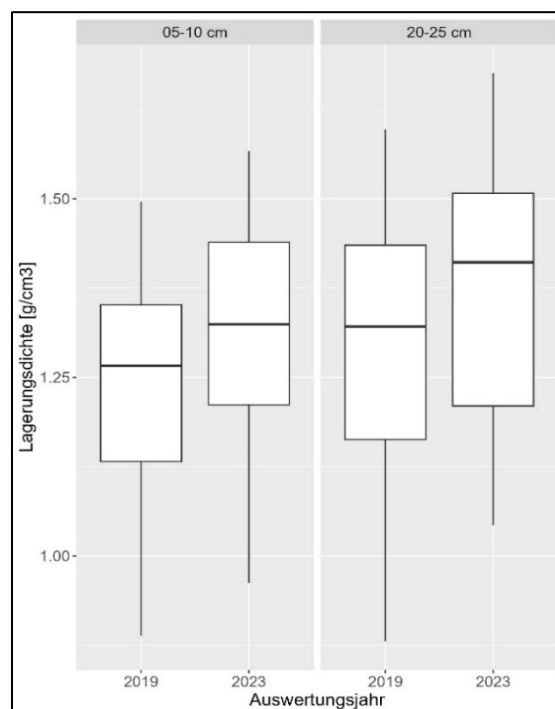


Figure 6: Comparaison de la densité moyenne de stockage entre le début et la fin du projet.

male. Les passages de véhicules et les travaux du sol ont probablement été effectués dans des conditions très défavorables. Lors du premier échantillonnage en 2019, en revanche, les précipitations étaient inférieures à la normale.

Conclusions et perspectives

Le projet a offert une occasion précieuse d'évaluer de manière réaliste, dans des conditions pratiques, le temps nécessaire pour quantifier les effets des mesures de formation d'humus dans le sol. Aucune tendance claire n'est encore visible après 6 ans, et l'interprétation des variations de C_{org} doit tenir compte de la marge d'erreur liée à l'échantillonnage et à l'analyse.

Les raisons de l'absence de tendances sont multiples, mais n'ont pas pu être quantifiées dans le cadre du projet.

Les processus d'humification (stabilisation du C_{org}) dans le sol prennent du temps, les mécanismes complexes ne sont pas encore clairement compris et les différentes fractions de la matière organique font tou-

jours l'objet de recherches (Castellano et al., 2015; Feng et al., 2014; Lützow et al., 2006).

La teneur en humus du sol est un paramètre fortement corrélé à d'autres paramètres. Il est donc généralement difficile, mais surtout dans le cadre d'une telle étude pratique, de décomposer les influences des différents paramètres sur la teneur en C_{org} . C'est ce que confirment également les études de la NABO (Gubler et al., 2019).

La rotation des cultures a probablement une influence sur les fluctuations (Gubler et al., 2019). Celle-ci n'a toutefois pas pu être étudiée de manière précise dans le cadre de ce projet, car les rotations des cultures ont été adaptées au cours du projet pour diverses raisons opérationnelles. De plus, certaines mesures d'amélioration de la teneur en humus liées au projet n'ont pu être mises en œuvre qu'une ou deux fois seulement, en fonction de la rotation des cultures.

Les conditions de prélèvement, notamment l'humidité du sol, peuvent également influencer les teneurs en C_{org} mesurées et la densité de stockage, et entraîner des variations annuelles. C'est ce que montre l'étude de Gubler et al., (2016). Les difficultés liées à la mise en place d'un suivi fiable dans des conditions réelles ont été mises en évidence dans le cadre du projet, et les enseignements tirés pourront être pris en compte dans la planification de projets futurs.

Les calculateurs de bilan d'humus, tels que celui d'Agroscope utilisé dans le cadre du projet, reposent sur de nombreuses hypothèses et ne sont pas principalement conçus ni adaptés pour prédire un effet direct et mesurable à court terme sur la teneur en C_{org} . Il sert en revanche d'outil de sensibilisation important et permet de mettre en évidence des tendances ainsi que de montrer aux agriculteurs les effets des mesures de gestion sur l'évolution à long terme de la te-

neur en C_{org} du sol. Si les mesures du projet continuent d'être mises en œuvre dans les exploitations participantes et si, dans la mesure du possible, on veille à un apport suffisant de matière organique externe (fumier et compost), on peut très probablement s'attendre à des effets positifs et mesurables dans le sol sur une période prolongée d'au moins 10 ans.

Tous les collaborateurs du projet, l'organisme responsable et les bailleurs de fonds sont cités dans le rapport final détaillé sur le suivi scientifique et le suivi de l'impact du programme de ressources humus. Ce rapport est disponible sur le site web du canton de Soleure.

Références

- Agroscope (2020a). PYZYL-D: Détermination de la densité apparente dans un cylindre de sol non perturbé. Agroscope, Reckenholz, Referenzmethode version 1.1 (2020). Agroscope. <https://ira.agroscope.ch/fr-CH/publication/46214>
- Agroscope (2020b). KOF: Détermination de la granulométrie de la terre fine. Agroscope, Reckenholz, méthodes de référence, version 3.1 (2020). <https://link.ira.agroscope.ch/fr-CH/publication/45990>
- Agroscope (2020c). Corg : Détermination du carbone organique. Agroscope, Reckenholz, méthodes de référence, version 1.2 (2020). <https://ira.agroscope.ch/fr-CH/publication/46276>
- Castellano, M. J., Mueller, K. E., Olk, D. C., Sawyer, J. E., & Six, J. (2015). Intégration de la qualité de la litière végétale, de la stabilisation de la matière organique du sol et du concept de saturation en carbone. *Global Change Biology* 21, 3200 - 3209.
- Feng, W., Plante, A. F., Aufdenkampe, A. K., & Six, J. (2014). Stabilité de la matière organique du sol dans les complexes or-

gano-minéraux en fonction d'une charge croissante en carbone. *Soil Biology and Biochemistry* 69, 398 - 405.

Gubler, A., Schwab, P., Wächter, D., Meuli, R. G., & Keller, A. (2016). Influence de l'état hydrique du sol sur les échantillons de sol prélevés. *Agroscope Science* 34, 1 - 16.

Gubler, A., Wächter, D., Schwab, P., Müller, M., & Keller, A. (2019). Vingt-cinq ans d'observations du carbone organique du sol dans les terres cultivées suisses montrent une stabilité générale, mais avec certaines tendances divergentes. *Environmental Monitoring and Assessment* 191, 277.

Johannes, A., Matter, A., Schulin, R., Weiskopf, P., Baveye, P. C., & Boivin, P. (2017). Valeurs optimales de carbone organique pour la qualité de la structure des sols arables. La teneur en argile a-t-elle une importance ? *Geoderma* 302, 14 - 21.

Lützow, M. v., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., & Flessa, H. (2006). Stabilisation de la matière organique dans les sols tempérés : mécanismes et leur pertinence dans différentes conditions pédologiques – une revue. *European Journal of Soil Science* 57, 426 - 445.

4.4 Terres Vivantes

Luc Scherrer, Fondation Rurale Interjurassienne, 2852 Courtételle



Quelques notions de base

Le projet *Terres Vivantes*, initié le 1^{er} janvier 2019, a mobilisé durant 6 années 85 exploitations agricoles du Jura et du Jura bernois autour d'un objectif commun: préserver la qualité des sols grâce à l'agriculture de conservation. Inscrit dans le cadre des programmes d'utilisation durable des ressources naturelles de l'OFAG (Art. 77 a & b de la LAgr), ce projet a permis d'expérimenter et d'appliquer des pratiques agricoles innovantes.

Le projet a été possible grâce à la participation active des agriculteurs, des conseillers FRI et des scientifiques, ainsi que par la participation financière de l'Office fédéral de l'agriculture (50 à 80%) et le soutien des

cantons de Berne et du Jura. Le projet *Terres Vivantes* a été un succès, avec des avancées dans l'amélioration de la qualité des sols et des pratiques agricoles durables, malgré quelques défis organisationnels et techniques.

Terres Vivantes avait pour but deux objectifs principaux, à savoir:

- Augmenter la résilience des sols.
- Améliorer la compétence «sol» des agriculteurs de la région.

En résumé, le souhait de *Terres Vivantes* est de créer l'opportunité pour l'agriculteur de descendre de son tracteur, de mettre les deux pieds dans son champ et de prendre le temps d'aller observer son sol. Il est compétent pour poser un diagnostic sur l'état de ses sols et de prendre des mesures qui font sens selon les atouts et contraintes de son exploitation (agriculture adaptée au site). Le projet a atteint ses objectifs, malgré quelques défis. Les agriculteurs ont signifi-

cativement gagné en confiance dans leurs compétences à évaluer la qualité du sol.

Six ans pour s'approprier

Le projet *Terres Vivantes* a été construit pour garder l'ensemble des acteurs sur le plancher des vaches, tant les scientifiques, les agriculteurs que les conseillers dans une notion de partenariat. Ainsi chaque partie a amené sa part de conseil aux autres. Concilier science et agriculture est un défi, d'autant plus lorsque le projet souhaite impliquer directement les agriculteurs dans le monitoring scientifique et utiliser les outils du monde agricole, comme le carnet des champs.

Dans un premier temps, il faut que les uns et les autres se comprennent au niveau du vocabulaire. Le conseiller joue un rôle essentiel de traducteur. Alors que les uns parlent en graphiques et statistiques, les autres utilisent trois termes différents pour parler de la même machine. Il faut également expliquer aux praticiens que la science a besoin de prélèvements de qualité, et également de répétitions afin de garantir la qualité, notamment statistique.

De l'autre côté, les préoccupations agricoles sont saisonnières, urgentes et demandent une réponse sur le moment, et non pas après une validation scientifique qui prend des mois, voire des années à venir. Les agriculteurs ne peuvent pas attendre la publication scientifique pour obtenir leurs réponses.

Terres Vivantes a montré également que les protocoles scientifiques doivent s'adapter à la dimension du projet, car avec 85 exploitations et près de 180 parcelles de monitoring, l'organisation du monitoring est complexe (exemple: ouvrir et observer 180 profils de sol en un mois est logistiquement très compliqué, ou encore faire patienter les agriculteurs de très longues minutes, le temps que la solution d'extrait d'oignons

pénètre dans le sol afin de faire ressortir les vers de terre, est impossible), et la quantité de données récoltée est énorme (par exemple 6'000 prélèvements type Barber, fig.1). Il est également essentiel d'analyser finement la qualité d'un opérateur agricole en matière d'échantillonnage et de valider scientifiquement l'exploitabilité des données récoltées par un agriculteur. Il semble que cela fonctionne, notamment grâce à la taille du projet, qui permet d'exclure les données aberrantes, mais ceci demande encore confirmation.



Figure 1: Piège Barber

Scientifiquement plus concret

La science dans *Terres Vivantes* s'articule en trois catégories : la science humaine pour comprendre les enjeux sociétaux d'un tel projet, la science physico-chimique des sols et la biodiversité des sols, à travers les deux indicateurs que sont les vers de terre et les carabes.

Evaluation des apprentissages – HAFL – Mirjam Pfister, Patricia Fry et Bruno Häller

Le suivi scientifique d'«évaluation des apprentissages» sous forme de trois enquêtes en ligne (en 2019, 2022 et 2024). Il est montré que la motivation à participer à un tel projet se fonde sur des aspirations à protéger les sols et d'accéder à l'innovation, plus que sur des aspects pécuniers. La mise en œuvre des certaines mesures,

comme les couvertures végétales en inter-culture, se heurtent à des impératifs de rotation. Il en va de même pour la qualité des engrais de ferme, qui est définie par des choix de construction des bâtiments et ne peuvent pas être modifiés d'un claquement de doigt. Les partenaires agricoles estiment qu'ils ont acquis des connaissances sur la durée du projet. Un sentiment élevé d'auto-efficacité a des effets positifs sur les efforts personnels, la persévérance et l'endurance, ainsi que sur un comportement actif face à la situation, comme la protection des ressources.

La place du sol au sein de Terres Vivantes – UniNe – Jérémie Forney

Dans un projet de cette ampleur, il est important de comprendre le rapport au sol de chaque partenaire et de comprendre les logiques de gouvernance qui permettent d'atteindre les objectifs. Deux axes de travail ont été suivis:

- Un axe transversal et continu du projet, associant observation participante et entretiens informels.
- Un axe d'entretiens formels et d'ateliers mixtes ou spécifiques avec les partenaires.

Dans les observations à mi-projet, la question des interactions entre acteurs du projet (scientifiques, conseillers, agriculteurs) est apparue comme potentiellement problématique. Des agriculteurs ont regretté de ne pas être mieux informés des résultats des tests réalisés sur leurs parcelles. Des scientifiques déploraient de ne pas être plus sollicités dans les interactions avec les agriculteurs. Des conseillers étaient parfois un peu mal à l'aise par rapport à certaines de leurs tâches. Ils ont pu ressentir un certain décalage entre discours scientifique et approches pratiques des agriculteurs.

Un champ de tensions importantes a été identifié entre les différentes logiques qui

traversent le projet: logique scientifique, logique administrative, logique agronomique/pratique. Certaines exigences imposées par le monitoring ou par le système de contrôle (en vue de la rémunération des prestations des agriculteurs) ont pris parfois l'ascendant sur les objectifs fondamentaux du soin au sol au cœur du projet, ce qui a aussi suscité l'incompréhension et l'agacement de certains agriculteurs.

Ce suivi des facteurs humains a permis d'identifier plusieurs apprentissages importants :

- Pour promouvoir une agriculture plus respectueuse des sols, il importerait de ne pas limiter l'approche aux gains de compétences des agriculteurs, mais de se pencher aussi sur les verrous liés à des aspects plus systémiques (standards, normes, marchés).
- La dimension participative et les interactions scientifiques-agriculteurs sont positives, mais ont aussi leurs défis propres (décalage dans les temporalités; gourmand en temps; traduction; langage scientifique-pratique, etc.), qui méritent une attention spéciale dès le début d'un projet.
- La promotion de pratiques favorables pour le sol demande un cadre flexible pour que les agriculteurs puissent prendre des décisions sensées agronomiquement, en fonction des contextes spécifiques (site, météo, etc.).

Suivi des vers de terre – UniNe – Claire le Bayon

Le suivi des vers de terre visait à évaluer la diversité, l'abondance, la biomasse et l'activité de ces organismes en lien avec les pratiques agricoles du sol, travail du sol et les conditions pédoclimatiques. Ces suivis permettent d'envisager les vers de terre comme bioindicateurs de la santé et la qualité des sols cultivés. Au total, 27'169 vers

de terre ont été collectés sur le terrain au cours de l'étude dont 10'306 ont été identifiés à l'espèce. Les données sont encore en cours de traitement. La seule évidence que saute aux yeux est que les catégories d'exploitation BIO ou conventionnelle n'explique en rien la présence ou l'absence de vers de terre qui globalement est élevée dans la plupart des parcelles (160 ind./m²).

Suivi des communautés de carabes. EnviBioSoil – Sophie Campiche

Les carabes sont d'excellents indicateurs de la santé de l'agroécosystème et sont considérés comme des marqueurs de la qualité biologique des sols. Le suivi des spécimens a été réalisé par piégeage Barber sur les parcelles du monitoring, puis par le tri et la détermination à l'espèce des carabidés (Fig.1).

La participation active des agriculteurs a permis la capture de plus de 36'000 carabes lors des trois phases de collecte menées entre 2019 et 2024. Au total, 76 espèces de carabes ont été recensées sur les Parcelles *Terres Vivantes* pour le Jura et Jura bernois (l'espèce la plus fréquente était: *Pterostichus* sp., Fig. 2). Elles représentent 54% des espèces de carabes présentes dans les milieux agricoles suisses.



Figure 2: *Pterostichus* sp.

Le piégeage des carabes sur les parcelles *Terres Vivantes* a également mis en évi-

dence la présence d'espèces rares (espèces vulnérables, menacées d'extinction à moyen terme) comme *Zabrus tenebrioides*, *Carabus auratus* et *Cylindera germanica*. *Cylindera germanica* n'avait jusqu'alors jamais été signalée dans le canton du Jura et les données ainsi obtenues pourraient contribuer à enrichir l'inventaire national suisse.

Evaluation de certains paramètres des sols – Hepia/Agroscope – Pascal Boivin, Ophélie Sauzet et Alice Johannes

Sur 1293 parcelles, les principaux paramètres relevés pour les sols en début et fin de projet sont la qualité analytique: texture, teneur en matière organique MO, pH et la qualité physique (score de qualité structurale, indice de dégradation de la structure).

L'équipe de Pascal Boivin a encore besoin de temps pour transmettre l'ensemble des résultats. De manière globale, les sols du périmètre du projet sont dans un état acceptable mais comme dans tous les systèmes agricoles occidentaux, le taux de matière organique est inférieur aux teneurs recommandées (ratio MO/argile de 14 % à la place de 17 % minimum) et n'évolue pas positivement (ni négativement) durant les 6 ans du projet. L'évaluation de la porosité montre généralement que la porosité grossière est parfois impactée par le machinisme mais que les porosités médianes et fines sont fonctionnelles.

De nombreux échanges entre l'ensemble des partenaires sur le test à la bêche et l'évaluation visuelle de la structure (VESS). La nécessité de la rigueur scientifique a imposé 5 répétitions par parcelle a été mal comprise par les exploitants. Il n'en demeure pas moins que le test à la bêche est un excellent moyen de connecter les agriculteurs avec ce qui se passe dans le sol.

Pour aller de l'avant

L'un des trois objectifs principaux de la demande de soutien de *Terres Vivantes* est de: «Développer une méthodologie pour mettre en œuvre une agriculture adaptée au site, garantissant des terres de qualité». La notion de «site» est multiscalaire. À grande échelle, le site correspond au contexte pédoclimatique de l'exploitation agricole. Cette notion de «site» inclut également l'exploitation elle-même, avec les choix stratégiques et de production qui ne peuvent être modifiés du jour au lendemain. Enfin le «site» correspond à l'assolement puis la parcelle. Cette échelle nécessite également des réponses adaptées aux conditions du moment. *Terres Vivantes* démontre que pour pratiquer de l'agronomie adaptée au site, l'exploitant agricole a besoin de plasticité dans ses choix. L'agriculture adaptée au site nécessite donc des réponses multiples. Le cadre légal et politique est bien souvent déconnecté est bien souvent éloigné dans cette souplesse.

Terres Vivantes avait pour référence le carnet des champs agricole. Force de constater que cette donnée est inexploitable et va-

lorisable (par exemple pour le calcul de contributions) sans le regard humain obligé de traduire la pensée agricole. A ce titre, le monde scientifique est bien souvent désarmé pour comprendre la logique agronomique. Le rôle de traducteur de la vulgarisation agricole devient alors essentiel.

La protection des ressources repose sur deux mots-clés: confiance et connaissances. L'acquisition des connaissances doit passer par l'expérimentation sur site. Peu importe ce que l'autre fait, rien ne vaut l'expérience personnelle afin de faire confiance à l'innovation. Les différentes phases d'acquisition prennent du temps et se traduisent par une certaine inertie des pratiques. Pour autant, il ne faut pas sous-estimer les changements dans les têtes de partenaires qui eux sont assez rapides.

En conclusion, un projet tel que *Terres Vivantes* est une sacrée aventure humaine qui permet de mettre en lumière la dynamique agricole de toute une région. Il tisse des liens, insuffle des idées et créer de l'émulation.

4.5 Quo vadis, biologie des sols? Perspectives pour le monitoring et la mise en œuvre en Suisse

Thomas Drobnik, Division Sols et biotechnologie, Office fédéral de l'environnement (OFEV), 3063 Ittigen

«On ne sait pas vraiment quoi faire de la biologie des sols» – cette opinion persiste encore aujourd'hui dans certains milieux. Dans le même temps, il est incontestable que la vie dans le sol joue un rôle central pour le bon fonctionnement et la fertilité des sols. C'est pourquoi la biologie des sols est déjà solidement intégrée dans l'Observation nationale des sols (NABO) depuis plus de 10 ans. L'accent est mis sur le développement de méthodes harmonisées, de valeurs de référence et d'indicateurs fonction-

nels afin d'établir à l'avenir la biologie des sols comme partie intégrante d'une évaluation des sols applicable dans la pratique. Ce domaine de recherche reste toutefois complexe et, malgré des progrès scientifiques considérables, des lacunes subsistent au niveau des méthodes, des valeurs de référence et, en particulier, de l'interprétation pratique.

Avec la révision de l'ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OASols), la biologie des sols en Suisse dépasse désormais

le cadre de la recherche : son ancrage dans l'OASols lui confère également une importance réglementaire. La question centrale qui se pose alors est de savoir comment valoriser les connaissances existantes et futures en biologie des sols de manière à ce qu'elles jouent un rôle essentiel à l'avenir dans la surveillance et l'application de la réglementation. La biologie des sols se trouve ainsi à un tournant décisif entre la recherche et l'application.

La microbiologie des sols dans le suivi de la NABO

En Suisse, les études menées depuis de nombreuses années dans le cadre de l'Observation nationale des sols (NABO) constituent une base essentielle pour le développement de la biologie des sols dans le suivi. Pour les paramètres microbiologiques globaux, on dispose de séries chronologiques fiables qui permettent de caractériser la biomasse, l'activité et l'efficacité du microbiote du sol. Ces données permettent de détecter les changements au fil du temps et d'établir des premières plages de référence pour différentes utilisations des sols (Hug et Moll-Mielewicz, 2024).

En complément, les méthodes de génétique moléculaire, en particulier le métabarcoding de l'ADN, ont permis d'obtenir de nouvelles informations sur la structure et la dynamique des communautés microbiennes. Les résultats montrent que ces communautés sont spécifiques à la fois au site et à l'utilisation des sols et présentent des schémas relativement stables sur de longues périodes (Gschwend et al., 2021a; 2021b; Han et al., 2026). Cela constitue une base importante pour la définition de cadres de référence et l'interprétation des écarts.

Ces approches sont de plus en plus complétées par des analyses fonctionnelles qui évaluent le potentiel génétique des processus microbiens. L'accent est ainsi déplacé

de la simple description de la biodiversité vers la question des fonctions potentiellement disponibles dans le sol et de leur lien avec les processus pédologiques (Frey et al., 2022; Frey et al., 2023). Dans le même temps, il apparaît toutefois que les paramètres individuels n'ont qu'une valeur informative limitée lorsqu'ils sont considérés isolément.

Il est donc de plus en plus crucial d'adopter une vision intégrative du sol en tant que système dans lequel les propriétés biologiques, chimiques et physiques interagissent entre elles. Seule la combinaison de ces informations permet une évaluation complète et fiable de l'état du sol et de son évolution au fil du temps.

La faune du sol entre recherche et surveillance

Alors que les composantes bactériennes et fongiques de la biote du sol sont aujourd'hui relativement faciles à déterminer, il subsiste des lacunes méthodologiques et conceptuelles importantes pour les méso- et macro-organismes. Des progrès importants ont néanmoins été réalisés dans ces domaines ces dernières années, notamment en ce qui concerne les méthodes de recensement standardisées et l'intégration de techniques de génétique moléculaire.

Les vers de terre sont depuis longtemps considérés comme des organismes indicateurs essentiels de la qualité et des fonctions du sol. Leur importance pour la structure, l'aération et les cycles de matières est bien documentée. Cependant, leur recensement sur le terrain est jusqu'à présent fastidieux et dépend fortement de l'expertise taxonomique, ce qui complique une application systématique dans le cadre de la surveillance. Des défis similaires se posent également pour d'autres groupes tels que les enchytréides, les collemboles, les nématodes, les acariens et les protistes.

Les méthodes de génétique moléculaire ouvrent ici de nouvelles perspectives. De premières études montrent que des techniques basées sur l'ADN permettent également de recenser systématiquement ces groupes d'organismes et de mettre en évidence les différences liées à l'utilisation des sols sur les sites NABO (par exemple, les vers de terre: Cuartero et al., 2025a) ou présentent des structures communautaires caractéristiques et des espèces indicatrices de sécheresse (par exemple, les nématodes: Donhauser et al., 2023 et les microarthropodes: Cuartero et al., 2025b).

Un obstacle majeur à une application à grande échelle reste toutefois l'insuffisance de la base de données pour la classification taxonomique des informations génétiques. L'absence ou le caractère incomplet des bases de données de référence compliquent l'interprétation et limitent actuellement l'utilisation systématique dans le cadre de la surveillance.

Parallèlement, des travaux sont menés en Suisse pour combler ces lacunes et intégrer progressivement le recensement des macro-organismes dans les structures de surveillance existantes. L'objectif est notamment de perfectionner les méthodes standardisées pour les vers de terre et de constituer une base de données fiable pour les valeurs de référence.

Il apparaît ainsi clairement que, dans le domaine de la faune du sol également, des bases méthodologiques se développent de plus en plus, ce qui permettra à terme une intégration dans l'observation nationale des sols. Cela suppose toutefois une standardisation accrue ainsi que le développement ciblé de bases de données de référence appropriées.

Perspectives: de la collecte de données à une évaluation applicable

La biologie des sols est aujourd'hui souvent perçue comme un domaine spécialisé de l'évaluation des sols, complexe et intéressant sur le plan scientifique, mais peu utile dans la pratique. De plus, il manque des critères clairement applicables pour mettre en œuvre la mission réglementaire découlant de son intégration dans la législation.

Pour que cela change et que la biologie des sols puisse s'établir comme partie intégrante d'une évaluation globale des sols et être utilisée efficacement en tant que paramètre pertinent pour la prise de décision et applicable dans la pratique, il faut développer un ensemble d'outils capable de faire le lien entre la description scientifique et l'application pratique, et de refléter de manière adéquate l'importance de la fonction d'habitat du sol en tant que fondement central de la fourniture de services écosystémiques.

Cela nécessite, outre le perfectionnement, l'harmonisation et la mise en relation systématique des approches existantes – paramètres microbiologiques globaux, analyses d'ADN basées sur les communautés et méthodes fonctionnelles –, l'interprétation fonctionnelle des données de biologie des sols, la prise en compte de la méso- et de la macro-biologie des sols, ainsi que la mise en relation des propriétés biologiques avec les propriétés physiques et chimiques des sols. Les données NABO, collectées depuis de nombreuses années, fournissent des informations contextuelles essentielles pour distinguer la variabilité naturelle des changements réels résultant de l'utilisation des sols, du changement climatique et des apports de substances.

L'objectif de la section Sols de l'OFEV est de disposer à long terme d'un ensemble d'outils s'appuyant sur un cadre réglementaire et permettant, grâce à des valeurs de référence robustes et spécifiques au site ainsi qu'à des indicateurs clairs et applicables, une évaluation fiable et globale de

la qualité des sols et la détection précoce des changements.

La voie à suivre est donc claire: au cours des 10 à 15 prochaines années, il faudra valoriser les connaissances existantes en biologie des sols et assurer leur transfert de la science vers la pratique. D'une part, pour fournir les bases nécessaires à la mise en œuvre des tâches réglementaires déjà existantes. D'autre part, pour créer les fondements permettant de préciser les objectifs en matière de biologie des sols dans la législation, avec des valeurs de référence claires et des indicateurs univoques.

Références

- Cuartero, J., Briones, M. J., Rast, B. M., Stierli, B., Maurer-Troxler, C., Hug, A. S., ... & Frey, B. (2025a). Taxons indicateurs de vers de terre et d'enchytraïdes de différents types d'utilisation des sols identifiés à l'aide du métabarcoding de l'ADN du sol. *Applied Soil Ecology* 206, 105891.
- Cuartero, J., Brunner, I., Schaub, M., Gwiazdowicz, D. J., Skubała, P., Qin, J., ... & Frey, B. (2025b). Comparaison des communautés de microarthropodes du sol issues directement du métabarcoding de l'ADN du sol avec celles issues d'une évaluation morphologique dans une forêt de pins sujette à la sécheresse et irriguée. *Applied Soil Ecology* 209, 106042.
- Donhauser, J., Briones, M. J., Mikola, J., Jones, D. L., Eder, R., Filser, J., ... & Frey, B. (2023). L'extraction d'ADN du sol ou directement à partir de nématodes isolés révèle une structure communautaire différente pour les sols forestiers à l'échelle européenne. *Soil Biology & Biochemistry* 185, 109154.
- Frey, B., Varliero, G., Qi, W., Stierli, B., Walthert, L., & Brunner, I. (2022). La métagénomique de type « shotgun » des couches profondes des sols forestiers montre des signes d'une altération du potentiel génétique microbien pour les cycles biogéochimiques. *Frontiers in Microbiology* 13, 828977.
- Frey, B., Moser, B., Tytgat, B., Zimmermann, S., Alberti, J., Biederman, L. A., ... & Risch, A. C. (2023). L'apport à long terme d'azote modifie la structure des communautés de micro-organismes du sol jouant un rôle fonctionnel important dans le cycle de l'azote dans les prairies du monde entier. *Soil Biology and Biochemistry* 176, 108887.
- Gschwend, F., Hartmann, M., Hug, A. S., Enkerli, J., Gubler, A., Frey, B., ... & Widmer, F. (2021a). Stabilité à long terme des structures des communautés bactériennes et fongiques du sol révélée par leurs fractions abondantes et rares. *Molecular Ecology* 30, 4305-4320.
- Gschwend, F., Hartmann, M., Mayerhofer, J., Hug, A. S., Enkerli, J., Gubler, A., ... & Widmer, F. (2021b). Les associations entre les bactéries et les champignons du sol et le site ainsi que l'utilisation des sols définissent les taxons centraux et indicateurs. *FEMS Microbiology Ecology* 97, fiab165.
- Han, X., Cuartero, J., Koppe, V., Nohl, S., Sneyders, A., Vancampenhout, K., Frey, B., Frossard, A. (2026). Le séchage à l'air libre du sol préserve l'abondance et la diversité de l'ADN environnemental microbien et faunique, indépendamment du type d'utilisation des sols ou de l'intensité de gestion. *Soil Biology & Biochemistry*, 110082.
- Hug, A.-S., et Moll-Mielwicz, J. (2024). Équations de référence pour la biomasse microbienne et la respiration de base dans les prairies. *Agroscope Science* 188.

Impressum Bulletin VBBio n° 22/2026

Éditrice : VBBio-BioSA

(Groupe de travail « Exécution biologie des sols »)

Les services cantonaux de protection des sols et l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) ont fondé en 1995 le groupe de travail sous le nom de VBB. Celui-ci se consacre aux questions relatives à la biologie des sols en lien avec l'exécution de la protection des sols et la préservation de la fertilité des sols conformément à l'ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol).

Présidence

2022-2025

Gaby von Rohr

Office de l'environnement

4509 Soleure

Tél. +41 32 627 28 05

gaby.vonrohr@bd.so.ch

À partir de 2026

Maurus Fischer

Office de la nature et de l'environnement

Grisons (ANU)

7001 Coire

Tél. +41 81 257 29 86

maurus.fischer@anu.gr.ch

Secrétariat

Beat Frey

Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL

Zürcherstrasse 111

CH-8903 Birmensdorf

Tél. 044 739 25 41

www.wsl.ch

E-Mail: beat.frey@wsl.ch

Photos de couverture: Beat Frey / Marco Walser, WSL

Le bulletin est également disponible en ligne :

<https://www.bafu.admin.ch/fr/groupe-de-travail-biologie-du-sol-application-biosa>