

L'Observatoire national des sols 2021

Auteur·e·s

Andreas Gubler, Thomas Gross, Anna-Sofia Hug, Janine Moll-Mielewczik, Michael Müller, Kirsten Rehbein, Peter Schwab, Daniel Wächter, Ramon Zimmermann, Reto Giulio Meuli



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'économie,
de la formation et de la recherche DEFR
Agroscope

Impressum

Éditeur	Agroscope Reckenholzstrasse 191 8046 Zürich www.agroscope.ch
Renseignements	www.nabo.ch
Concept & réalisation	Andreas Gubler
Rédaction & lectorat	Paul Knüsel, Zürich
Traduction française	André Carruzzo, Carruzzo Traduction, Genève
Mise en page	Andreas Gubler
Photos	NABO
Illustration de couverture	Agroscope
Download	www.nabo.ch Cette publication est également disponible en allemand.
Copyright	© Agroscope 2022
ISSN	2296-729X
DOI	https://doi.org/10.34776/as128f

Exclusion de responsabilité

Les informations contenues dans cette publication sont destinées uniquement à l'information des lectrices et lecteurs. Agroscope s'efforce de fournir des informations correctes, actuelles et complètes, mais décline toute responsabilité à cet égard. Nous déclinons toute responsabilité pour d'éventuels dommages en lien avec la mise en œuvre des informations contenues dans les publications. Les lois et dispositions légales en vigueur en Suisse s'appliquent aux lectrices et lecteurs; la jurisprudence actuelle est applicable.

Table des matières

Résumé	5
Zusammenfassung	6
Summary	7
1 Plus de trente ans d'activité de l'Observatoire national des sols NABO	8
2 Un cas de figure interdisciplinaire : comment combiner différentes analyses de sol ?	12
3 Sur la piste des organismes du sol : le monitoring de la biologie du sol	16
3.1 Les paramètres biologiques globaux réagissent aux changements	16
3.2 Des méthodes de génétique moléculaire révèlent la présence de biocénoses typiques du site	16
4 Exploitation optimale des données pédobiologiques grâce à l'évaluation commune de programmes de mesures cantonaux et du NABO.	20
4.1 Comparaison des valeurs mesurées avec prise en compte des propriétés du site	20
4.2 Des classes d'évaluation à l'indicateur d'état Q	22
5 Physique du sol : la structure du sol livre beaucoup d'informations sur ses propriétés	24
5.1 Les paramètres physiques complémentaires documentent l'échantillonnage	24
5.2 Mesures à l'aide du pénétromètre : plus le sol est dense, plus la résistance est grande	24
5.3 Mieux comprendre les sols grâce aux paramètres physiques complémentaires	27
6 Flux de substances : les bilans complètent le prélèvement d'échantillons sur le terrain	28
6.1 Des excédents parfois marqués de cuivre et de zinc	29
6.2 Principales sources d'apport : les engrais de ferme et les produits phytosanitaires	30
7 Engrais de ferme : des analyses améliorent les bilans des flux de substances	32
7.1 Deux campagnes de mesures du NABO confirment l'importante variabilité	33
8 Métaux lourds : de nouveaux relevés confirment des tendances positives et négatives	35
8.1 Plomb et mercure : les teneurs dans le sol continuent de reculer	35
8.2 Cuivre et zinc : augmentation des teneurs dans le sol	37
8.3 Cuivre et zinc : d'où provient l'augmentation des apports ?	39
8.4 Une conclusion après trois décennies : les métaux lourds restent importants pour l'observation des sols 40	
9 La matière organique du sol : également importante pour la protection du climat	41
9.1 Grandes cultures : forte variabilité mais évolution générale stable	42
9.2 Herbages : peu de fluctuations de la teneur en carbone organique (C _{org}) du sol	43
10 Produits phytosanitaires : un sujet brûlant considéré objectivement	45
10.1 Premier aperçu : un screening des produits phytosanitaires dans le réseau de mesure du NABO	45
10.2 Plan d'action Produits phytosanitaires : élargissement des substances actives analysées et des sites étudiés	47
11 Monitoring de la biodiversité : la collaboration avec l'Observatoire national des sols est recherchée	49
11.1 Un ensemble de données à l'échelle suisse comportant plus de mille échantillons de sols	49

11.2	Base pour des recherches supplémentaires	51
12	Collaboration en Europe : une étude d'état actuel réalisée en commun avec les pays de l'UE.....	52
12.1	Une première comparaison avec les pays voisins révèle des différences notables	53
12.2	Recommandations pour un échantillonnage harmonisé	55
13	Système d'informations pédologiques NABODAT : le NABO rend disponibles de précieuses données de monitoring portant sur plus de trois décennies	56
14	Remerciements	58
15	Références	59
16	Annexe.....	63
16.1	Nouveaux sites dans le réseau de mesure NABO	63
16.2	Que signifient des « données centrées » ?	63
16.3	Tableaux de la comparaison entre pays de l'ensemble de données LUCAS-Soil.....	64

Résumé

L'Observatoire national des sols NABO étudie depuis plus de trois décennies la qualité des sols en Suisse et son évolution dans le temps. Ce rapport donne un aperçu du programme de travail du NABO et propose une présentation concise de connaissances actuelles à travers des aspects thématiques choisis. À la fin de chaque chapitre, une liste de liens et de sources d'informations permet aux lecteurs d'approfondir certains sujets.

Le rapport couvre l'ensemble du domaine d'activité du NABO dans un ordre thématique : le monitoring de la biologie du sol NABObio, lancé en 2012, donne un aperçu du monde des organismes du sol (chapitre 3). Le chapitre 4 décrit comment les données sur la biologie du sol peuvent être interprétées conjointement avec celles de réseaux de mesure cantonaux. Le rapport montre également comment les propriétés physiques des sols ont été intégrées dans l'observation au cours des dernières années (chapitre 5). Les chapitres 6 à 9 sont consacrés aux propriétés chimiques du sol. On y trouve une présentation élargie de résultats concernant la matière organique et la pollution par les métaux lourds, interprétés sur la base des six anciens cycles de relevés et en partie du septième relevé (2015-2019). Le chapitre 10 présente les résultats de mesures des produits phytosanitaires ainsi que les travaux déjà engagés pour le plan d'action Produits phytosanitaires de la Confédération.

Comme l'explique le chapitre 6, le NABO complète ses données de mesure par des informations sur l'exploitation des sites étudiés, et évalue à partir de celles-ci les apports et exports de substances nutritives et de polluants. Le NABO s'appuie notamment sur ses propres analyses des engrais de ferme utilisés par les exploitations concernées (chapitre 7).

Les nombreuses activités menées dans le cadre du réseau de mesure du NABO sont complétées par des études spécifiques, souvent réalisées en collaboration avec des partenaires externes. Ainsi, le rapport présente l'échantillonnage des sols à l'échelle suisse effectué en collaboration avec le Monitoring de la biodiversité en Suisse (chapitre 11). Il décrit également les résultats de la participation du NABO à la campagne de mesures LUCAS-Soil menée dans l'ensemble de l'Europe (chapitre 12).

Depuis 2020, les données mesurées de haute qualité du NABO sont aussi enregistrées et régulièrement actualisées dans le système national d'information pédologique NABODAT. Le dernier chapitre (13) précise que le NABODAT publie également ces données dans le Fichier de données pédologiques et peut les mettre à la disposition de tous les intéressés.

Zusammenfassung

Seit mehr als drei Jahrzehnten untersucht die Nationale Bodenbeobachtung NABO die Qualität von Böden in der Schweiz und ihre Entwicklung über die Zeit. Dieser Bericht gibt Einblicke in das Arbeitsprogramm der NABO und stellt aktuelle Erkenntnisse anhand ausgewählter thematischer Aspekte kurz und prägnant vor. Am Schluss der einzelnen Kapitel findet sich eine Zusammenstellung von Links und weiterführenden Informationsquellen, die der Leserschaft eine thematische Vertiefung erlauben.

Der Bericht deckt sämtliche Aufgabenbereiche der NABO thematisch geordnet ab: Das bodenbiologische Monitoring NABObio, das seit 2012 betrieben wird, gibt Einblicke in die Welt der Bodenlebewesen (Kapitel 3). Das Kapitel 4 beschreibt, wie die Daten zur Bodenbiologie gemeinsam mit den Daten kantonaler Messnetze ausgewertet werden können. Weiter wird aufgezeigt, wie in den letzten Jahren auch physikalische Bodeneigenschaften in die Bodenbeobachtung aufgenommen wurden (Kapitel 5). Die Kapitel 6 bis 9 beschäftigen sich mit chemischen Bodeneigenschaften. Darin werden umfassende Resultate für die organische Bodensubstanz und die Belastung mit Schwermetallen präsentiert, die aus den bisherigen sechs Erhebungsrounden (2010 – 2014) vollständig und aus der siebten Runde (2015 – 2019) teilweise vorliegen. Befunde aus den Messungen von Pflanzenschutzmitteln und die bereits in Angriff genommenen Arbeiten für den Aktionsplan Pflanzenschutzmittel des Bundes werden im Kapitel 10 thematisiert.

Wie Kapitel 6 verdeutlicht, ergänzt die NABO ihre Messdaten mit Informationen zur Bewirtschaftung der Erhebungsstandorte und schätzt daraus flächenbezogene Ein- und Austräge für Nähr- und Schadstoffe ab. Als Datengrundlage dienen dazu unter anderem eigene Analysen des vor Ort eingesetzten Hofdüngers (Kapitel 7).

Die zahlreichen und vielfältigen Aktivitäten im NABO-Messnetz werden durch spezifische Untersuchungen, häufig in Zusammenarbeit mit externen Partnern, ergänzt. Dazu stellt der Bericht die schweizweite Beprobung von Böden in Zusammenarbeit mit dem Biodiversitätsmonitoring Schweiz vor (Kapitel 11). Ebenfalls erklärt ist, welche Ergebnisse die Teilnahme des NABO an der europaweiten LUCAS-Soil-Messkampagne 2015 hervorgebracht hat (Kapitel 12).

Die qualitativ hochwertigen Messdaten der NABO werden seit 2020 auch im nationalen Bodeninformationssystem NABODAT gespeichert und regelmässig aktualisiert. Im Weiteren führt das abschliessende Kapitel 13 aus, dass NABODAT diese Daten im Nationalen Bodendatensatz veröffentlicht und allen Interessierten frei zur Verfügung stellen kann.

Summary

For more than three decades, the Swiss Soil Monitoring Network NABO has been assessing the soil quality in Switzerland and its evolution. This report provides insights into NABO's activities and presents recent findings for a broad range of subjects. At the end of each chapter you will find links to further sources that provide in-depth information on the presented topics.

This report covers the whole thematic range of NABO's activities: The soil biological monitoring NABObio, running since 2012, provides insights into the universe of soil biota (chapter 3). Chapter 4 describes, how data on soil biology of NABO and cantonal monitoring networks may be interpreted jointly. Furthermore, it is demonstrated how physical soil properties have been incorporated into NABO's soil monitoring during the last years (chapter 5). Chapters 6 to 9 deal with chemical soil properties. Comprehensive results on soil organic matter and the exposure to heavy metals are presented up to the sixth repetition of the survey (2010 – 2014), partly also for the seventh round (2015 – 2019). Results on analyses of plant protection products and the activities recently started in the framework of the national action plan on plant protection products are presented in chapter 10.

As pointed out in chapter 6, the data measured by NABO are complemented by soil management information recorded to derive inputs and outputs for nutrients and pollutants for the considered plots. Inter alia, analyses of the used farmyard manures serve as basis for these calculations (chapter 7).

The manifold activities within the monitoring network are supplemented by specific investigations, often in collaboration with external partners. In this report, the soil sampling campaign throughout Switzerland in collaboration with the Biodiversity Monitoring Switzerland is presented (chapter 11). In addition, the conclusions gained by NABO's participation in the European soil survey LUCAS-Soil in 2015 are described (chapter 12).

Since 2020, the valuable data acquired by NABO are stored and regularly updated in NABODAT, the national soil information system. As outlined in the final chapter 13, these data are provided through the national dataset on soils and are freely available for interested parties.

1 Plus de trente ans d'activité de l'Observatoire national des sols NABO

Le sol est à la base de la production agricole et sylvicole, et il remplit d'importantes fonctions pour l'environnement et la société. Étant donné que de nombreux changements sont irréversibles, le sol naturel et intact est une ressource limitée et non renouvelable. L'Observatoire national des sols NABO suit depuis plus de 35 ans l'évolution de l'état du sol en Suisse. Le monitoring est régulièrement adapté aux nouvelles problématiques afin de pouvoir détecter rapidement les atteintes qualitatives.

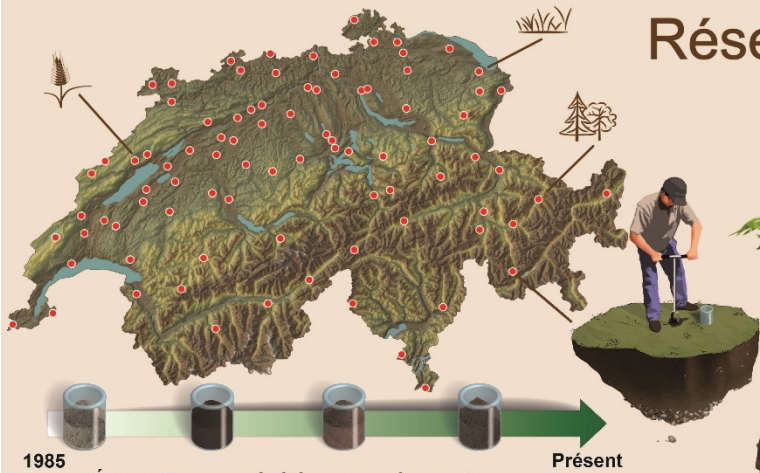
Le sol est un milieu multifonctionnel essentiel à la vie ainsi qu'une ressource rare. Les sols intacts sont une ressource irremplaçable pour notre vie, que ce soit en tant que facteur de production et biotope, ou par le rôle qu'ils jouent dans la régulation du régime hydrique, dans l'équilibre des substances nutritives ou encore dans la filtration des polluants. Cependant, cette ressource naturelle est sous pression. Objets de nombreuses convoitises, les sols sont menacés et ont besoin d'être protégés dans leur étendue et dans leur qualité. Si l'on veut que les générations futures puissent profiter de ses fonctions et utiliser ses services écosystémiques, le sol doit être ménagé. Pour garantir une utilisation durable, des connaissances détaillées et actualisées sur les sols sont nécessaires, ainsi que des méthodes pour établir des pronostics sur les évolutions futures : comment évaluer l'état des sols au-delà des sites individuels, et à quelles évolutions faut-il s'attendre ?

Le sol est un support d'informations et un site d'observation. Les décideurs manquent souvent d'informations pertinentes sur les sols pour la gestion des ressources environnementales dans l'agriculture et la sylviculture. Les informations pédologiques sont également importantes pour l'évaluation des dangers naturels, la protection contre les crues et les conséquences du changement climatique. Pour obtenir une image précise de l'état des sols, de très nombreux aspects doivent être pris en compte. C'est pourquoi il est nécessaire de collecter divers paramètres et informations spécialisées et de les synthétiser en une vue d'ensemble. Le rapport « Besoins des cantons et de la Confédération en matière de monitoring de la ressource sol » (Gubler et al. 2020) offre un aperçu des instruments de relevé et d'évaluation nécessaires. Les programmes de monitoring, comme l'Observatoire national des sols NABO et les programmes d'observation cantonale des sols (KABO), fournissent une solide base scientifique : ils relèvent l'état du sol et son évolution dans le temps à l'aide de données mesurées. Les programmes de monitoring regardent à la fois vers l'avenir et vers le passé. Ils servent d'une part à évaluer les changements possibles dans une optique de prévention et de détection précoce, et d'autre part à vérifier à long terme l'efficacité des mesures prises.

Le NABO s'est bien établi au fil du temps. Au milieu des années 1980, la Confédération a instauré une observation permanente des sols en Suisse. Si le monitoring s'est initialement concentré sur la menace causée par les polluants chimiques et sur l'analyse de caractéristiques pédologiques telles que le pH et le carbone du sol, le programme de mesure a été complété en 2003 par des paramètres de physique du sol et, en 2012, par des paramètres de microbiologie et de génétique moléculaire. En outre, les analyses des substances nutritives ont pris une importance grandissante pour répondre au besoin accru de connaissances dans les domaines de l'agriculture et de la protection du climat. L'observation à long terme du sol se révèle ainsi indispensable. C'est grâce à ces diverses analyses, qui peuvent être combinées entre elles à chaque campagne d'échantillonnage des sites NABO, que l'état des sols peut être relevé et évalué d'une manière globale (cf. Figure 1).

Figure 1 (page suivante) : Représentation graphique des multiples tâches de l'Observatoire national des sols NABO, qui se sont élargies avec le temps.

Réseau suisse d'observation des sols



1985 **Échantillonnage répété sur les mêmes sites** **Présent**

Les sols remplissent de nombreuses fonctions essentielles pour les écosystèmes et les hommes. Ils fournissent des habitats aux plantes et aux organismes. Non seulement l'agriculture et la sylviculture, mais aussi la disponibilité d'eau potable propre dépendent de la santé des sols. Pour garantir le bon fonctionnement des sols à long terme, leur qualité doit faire l'objet d'observations précises. Le réseau suisse d'observation des sols (NABO) enregistre et documente l'évolution de la qualité des sols sur la base de données provenant de sites de monitoring. Les menaces pesant sur le sol sont évaluées à partir des propriétés des sols et des données relatives à l'exploitation.

Propriétés physiques des sols

- Densité apparente
- Résistance à la pénétration
- Structure du sol

Données d'exploitation

- Assolements
- Engrais
- Produits phytosanitaires
- Travail du sol, ...

Des sols en bonne santé apportent:

Production

Habitat

Régulation

Rapport & support

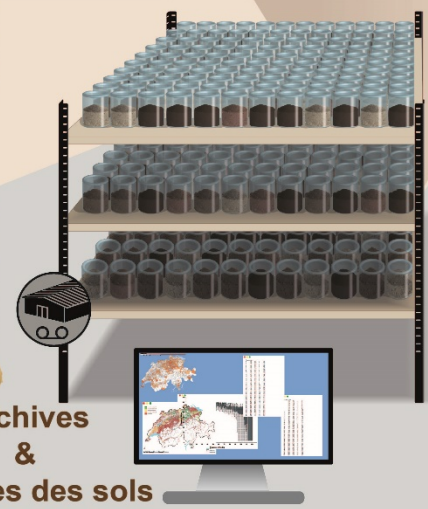
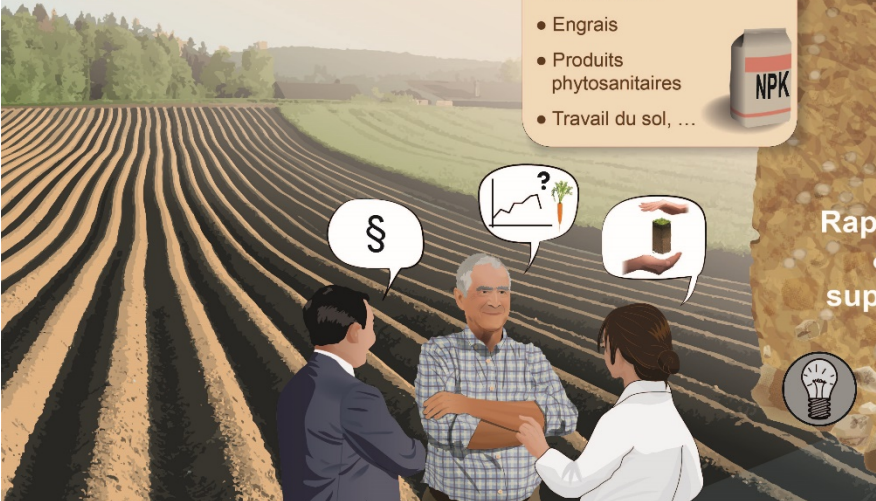
Propriétés chimiques des sols

- pH, C:N, Corg
- Nutriments
- Polluants

Propriétés biologiques des sols

- Microbes: biomasse & respiration du sol
- Richesse & composition des espèces

- Suivi de sites
- Échantillonnage
- Préparation des échantillons
- Chimie
- Biologie
- Physique
- Données d'exploitation



Archives & données des sols

Le réseau d'observation est régulièrement adapté en fonction des nouvelles problématiques. En 2020, l'Observatoire national des sols NABO a lancé la huitième série d'échantillonnage. Les relevés sont réalisés tous les cinq ans sur chaque site. Lors du cycle d'analyses de 2015-2019, des adaptations ont été apportées au programme de relevé, en particulier au collectif des sites et à la stratégie d'échantillonnage (Schwab & Gubler 2015). L'adaptation de la stratégie d'échantillonnage vise à optimiser les ressources nécessaires au monitoring. Ainsi, les recherches portant sur l'ensemble du profil du sol se concentrent sur les sites principaux. Pour évaluer par exemple la migration en profondeur de substances, des échantillons d'horizons y sont prélevés jusqu'à une profondeur de 75 cm. Alors que dans les sites secondaires, seule la couche supérieure du sol (0-20 cm) est échantillonnée. La répartition entre sites principaux et secondaires a d'abord été dictée par la faisabilité technique : si les sols se prêtent à un échantillonnage de l'ensemble des horizons, ils sont définis comme sites principaux. Dans les sites secondaires, la faible épaisseur du sol ou d'autres raisons (p. ex. présence de pierres) empêchent le prélèvement d'échantillons dans les couches profondes. La répartition des sites principaux et secondaires est présentée dans la figure 2. En plus de l'adaptation de la stratégie d'échantillonnage, des lacunes ont été comblées sur le plan de la géologie, de la distribution spatiale sur le territoire suisse et de la répartition des altitudes des sites échantillonnés. C'est ainsi que le réseau de mesure NABO a été complété par sept nouveaux sites d'herbages dans les Préalpes et dans les Alpes (cf. Figure 2 et annexe 16.1). Quatre de ces sites sont constitués d'un site principal et un à deux sites complémentaires, proches géographiquement, mais situés à des altitudes différentes. Ces sites sont désignés dans la figure 2 comme « Sites principaux avec étages altitudinaux ».

Le NABO consacre régulièrement des recherches à des problématiques d'actualité qui complètent le monitoring à long terme des sols. Pour ce faire, des échantillons sont prélevés en fonction des besoins particuliers sur des sites à l'intérieur et à l'extérieur du réseau de mesures NABO. Par exemple, le NABO prélève des échantillons de sol dans le réseau de mesure de l'indicateur Z9 du Monitoring de la biodiversité en Suisse (MBD) (cf. chapitre 11). D'autre part, en 2015, la Suisse a participé au projet européen LUCAS-Soil en menant une propre campagne d'échantillonnage (cf. chapitre 12). En outre, le NABO développe un monitoring des résidus de PPh présents dans le sol pour le plan d'action national Produits phytosanitaires (PA PPh) (cf. point 10.1).

Sites d'observation à long terme du NABO

Anciens sites

- ▲ Site principal
- Site secondaire

Nouveaux sites (depuis la 7e série de relevés)

- ▲ Site principal
- ▲ Site principal avec étages altitudinaux

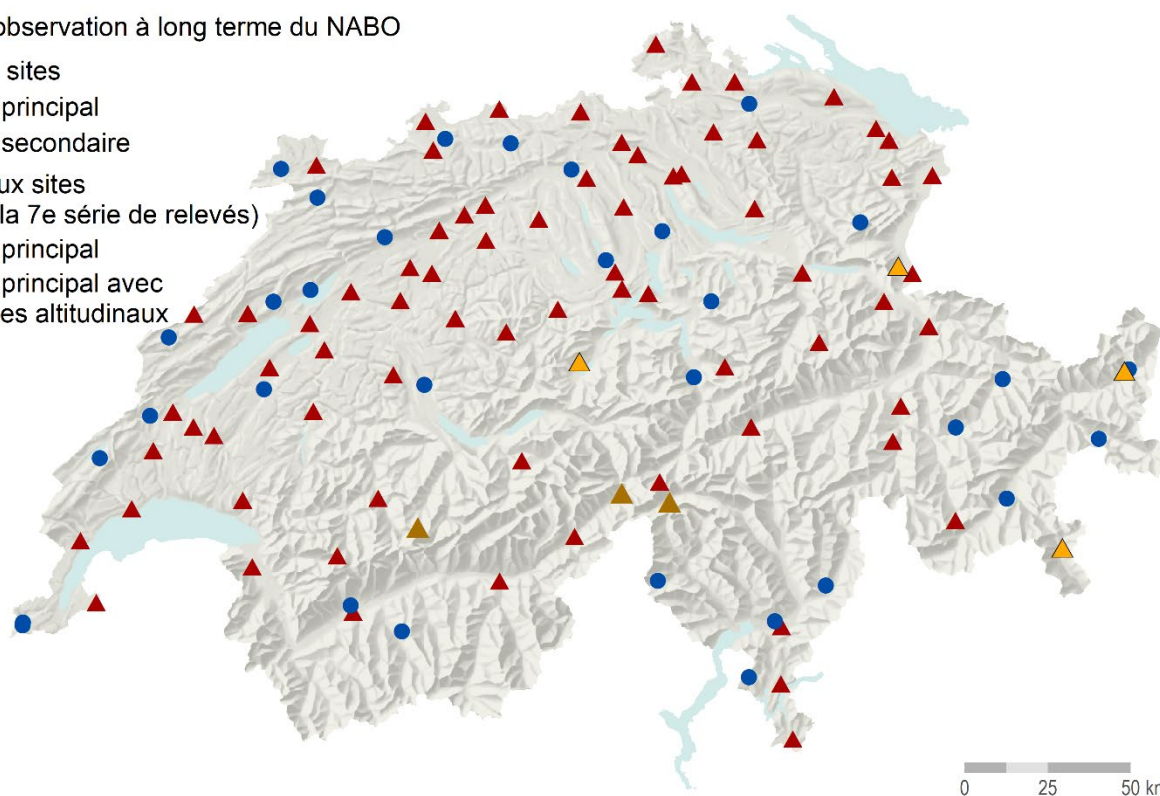


Figure 2: Le réseau de mesures NABO réparti sur tout le territoire suisse, état en 2021 ; la stratégie d'échantillonnage subdivise en sites principaux et sites secondaires.

Projet d'extension et de complément de l'Observatoire national des sols. Comme l'a montré une récente analyse des besoins de la Confédération et des cantons (Gubler et al. 2020), l'observation des sols doit être élargie sur le plan thématique. La direction du NABO, où sont représentés les Offices fédéraux de l'environnement (OFEV) et de l'agriculture (OFAG), a donc élaboré une stratégie pour le développement de l'observation des sols. À l'avenir, le NABO devrait ainsi couvrir les sept domaines d'activité suivants :

1. la structure du sol, de point de vue des atteintes physiques, comme la compaction
2. l'érosion
3. la matière organique
4. les polluants et substances étrangères
5. l'azote et l'acidification
6. la biologie du sol et la biodiversité
7. la quantité et la qualité du sol, y compris les fonctions du sol

Les trois offices fédéraux OFEV, OFAG et Office fédéral du développement territorial (ARE) créeront un service de coordination qui sera chargé de coordonner les divers travaux réalisés dans ces domaines d'activité. Ce service assumera également la responsabilité de l'évaluation des données et de la publication de l'ensemble des informations résultant de l'observation élargie des sols.

Informations complémentaires

[Besoins des cantons et de la Confédération en matière de monitoring de la ressource sol](#)

Rapport, Gubler et al. 2020.

[Stratégie d'échantillonnage \(NABO-Standortkonzept: Betrieb des Messnetzes ab 2015\)](#)

Rapport (en allemand), Schwab & Gubler 2015.

Les sites d'observation à long terme en bref (en allemand)

[Sites de grandes cultures](#)

[Sites d'herbages](#)

[Sites de forêt](#)

[Sites de cultures spéciales](#)

[Autres sites](#)

Wächter et al. 2021

www.nabo.ch > [Monitoring](#)

2 Un cas de figure interdisciplinaire : comment combiner différentes analyses de sol ?

En règle générale, les sols ne peuvent être évalués que par rapport à des thèmes spécifiques et en fonction du site. Pour pouvoir déterminer de manière différenciée l'état du sol, il est donc nécessaire d'analyser une série de caractéristiques biologiques, physiques et chimiques. Le NABO se charge d'effectuer des relevés uniformes de différents sites et types de sols et de les inscrire dans un contexte global. Le présent exemple montre, à partir d'un sol de grandes cultures, les connaissances qui peuvent être acquises pour soutenir la mise en œuvre de la législation sur la protection des sols ainsi que la pratique agricole.

L'avantage de l'Observatoire national des sols NABO est qu'il permet aussi d'étudier différentes questions de manière approfondie dans un seul site de mesures, qui peut être échantillonné selon un programme standardisé. Le site du NABO retenu pour l'exemple présenté ici a fait l'objet des analyses suivantes :

- > propriétés chimiques du sol : échantillonnage tous les cinq ans depuis 1986 (cf. chapitres 8, 9 et 10) ;
- > biologie du sol : échantillonnage annuel depuis 2012 (cf. chapitres 3 et 4) ;
- > physique du sol : détermination de paramètres complémentaires comme la résistance à la pénétration et autres paramètres physiques (cf. chapitre 5) ;
- > bilan des flux de substances : relevé régulier des données d'exploitation, notamment pour le calcul des bilans de surface et des flux de substances (cf. chapitre 6).

Le site choisi est un terrain agricole dans le nord-est de la Suisse exploité ces dernières années sous forme de rotation culturale, la prairie artificielle alternant avec des grandes cultures. De 2014 à 2016, le sol a été exploité en grandes cultures. La prairie artificielle a été labourée en automne 2013 pour permettre le semis de betteraves sucrières au printemps. L'année suivante, le terrain a été cultivé avec du maïs, puis avec des céréales pour la période de récolte suivante. Depuis lors, la surface est exploitée en prairie artificielle pluriannuelle (comme elle l'avait déjà été auparavant). Les autres caractéristiques du site sont notamment les suivantes : sol de type brun calcaire, avec peu de pierres et beaucoup d'argile. En conséquence, la couche supérieure du sol a été classée comme peu pierreuse et très argileuse. La parcelle est légèrement inclinée.

Voici à titre d'exemple les informations que le NABO peut tirer de l'ensemble des données collectées. Les résultats des flux de substances sont présentés dans la Figure 3 ; la Figure 4 reproduit les propriétés biologiques, chimiques et physiques mesurées. Les commentaires sont chaque fois suivis de conclusions sur la façon dont les paramètres évalués peuvent s'influencer réciproquement.

Les bilans de surface indiquent quelles substances parviennent dans les sols. Les flux des substances nutritives et des métaux lourds sont influencés par la rotation culturale. La principale source d'apport est la fumure : l'utilisation d'engrais de ferme sur la prairie artificielle entraîne surtout des apports de cuivre et de zinc. Les engrais minéraux phosphatés épandus dans les grandes cultures occasionnent quant à eux des apports sensiblement plus élevés de cadmium.

La structure physique du sol étudié a été massivement modifiée en particulier par la préparation du terrain avant, pendant et après la culture des betteraves sucrières. Un important ameublissement de la couche supérieure sur sol entraîne une diminution de la densité apparente. Cette diminution ne permet pas de tirer en soi des conclusions pertinentes sur l'état du sol, mais elle influence d'autres paramètres de mesure, comme la concentration de polluants. C'est souvent précisément pour cette raison que des paramètres physiques complémentaires sont relevés : ils mettent en évidence des observations aberrantes dans une série de données. Comme ils décrivent l'état physique du sol au moment du prélèvement d'un échantillon, ils fournissent des informations complémentaires très précieuses pour l'interprétation des diverses données mesurées.

Une comparaison de la biologie du sol entre prairie artificielle et grandes cultures révèle des différences marquées. Le retournement de la parcelle après plusieurs années d'exploitation herbagère se répercute sur les paramètres microbiologiques globaux. Cette intervention a entraîné une réduction à la fois de la masse et de l'activité des microorganismes. Parallèlement, la teneur en carbone organique du sol a diminué. Les paramètres microbiologiques globaux et la matière organique ont aussi eu tendance à reculer légèrement entre 2013 et 2016, durant l'exploitation en grandes cultures. Ce n'est qu'après le resemis de la prairie artificielle que la respiration basale - en tant que mesure de l'activité des microorganismes - s'est redressée et a très rapidement retrouvé son niveau initial. Par comparaison, l'augmentation de la biomasse et de la matière organique a été retardée. Les quantités respectives ont mis plus de temps à se reconstituer, et ce n'est qu'après quatre ans qu'elles ont retrouvé leur niveau initial.

Des produits phytosanitaires sont utilisés dans les grandes cultures. Dans le sol choisi pour la présente étude de cas, les substances actives sont restées décelables pendant des années. La terbuthylazine, par exemple, n'était pas décelable dans le sol avant son utilisation ; la valeur la plus élevée a été mesurée directement après l'application ; puis les concentrations dans les échantillons ont diminué les années suivantes. Il convient de relever que les analyses ont aussi révélé la présence de substances qui ne sont plus employées, comme l'atrazine. Bien que cet herbicide ne soit plus autorisé depuis 2011 et que sa dernière utilisation sur le site échantillonné remonte à 1999, la couche supérieure du sol en contenait encore environ 6 µg/kg. Des valeurs plus basses ont été mesurées certaines années, mais il s'agissait d'aberrations méthodologiques résultant de changements apportés à la préparation physique du sol.

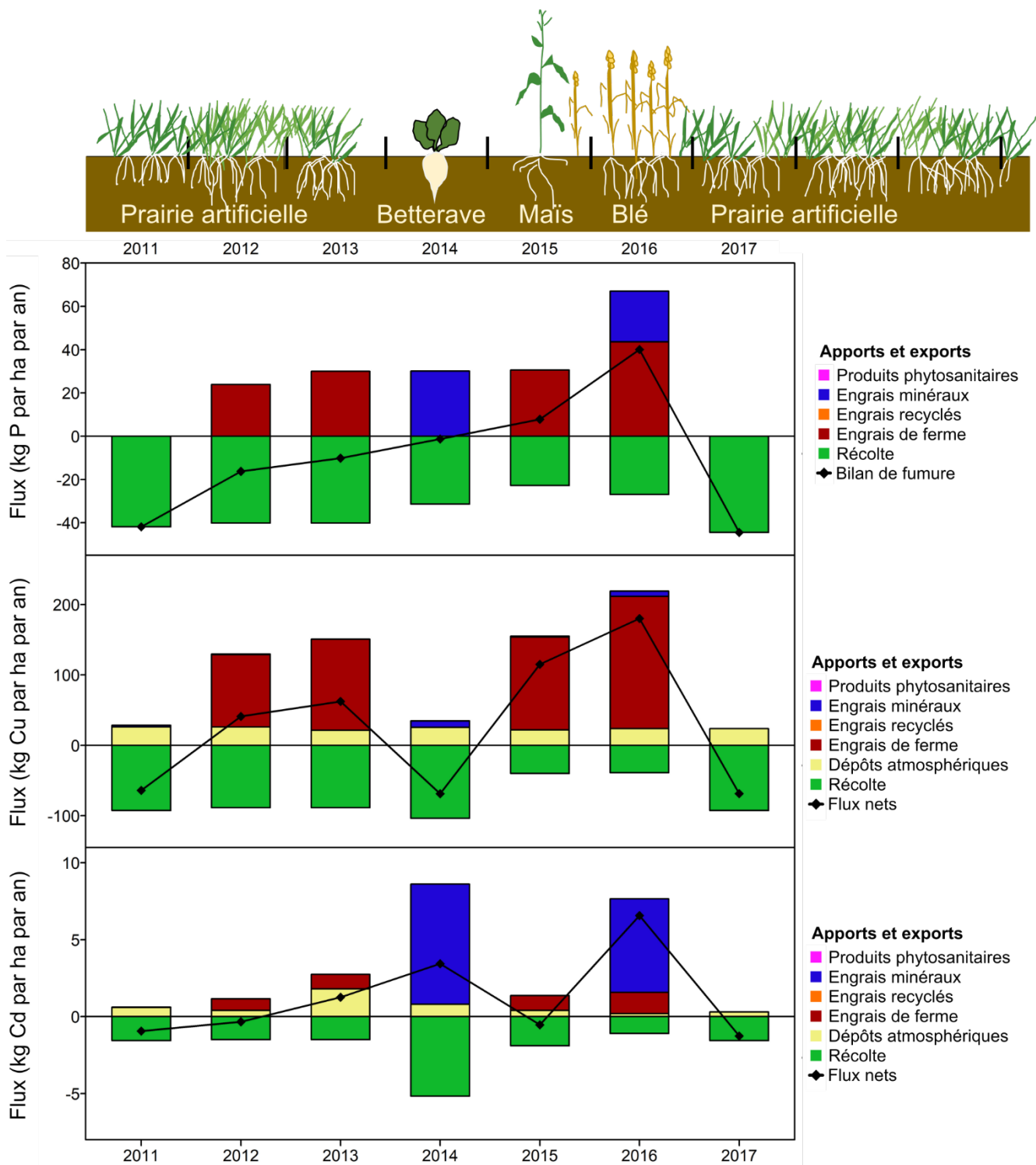
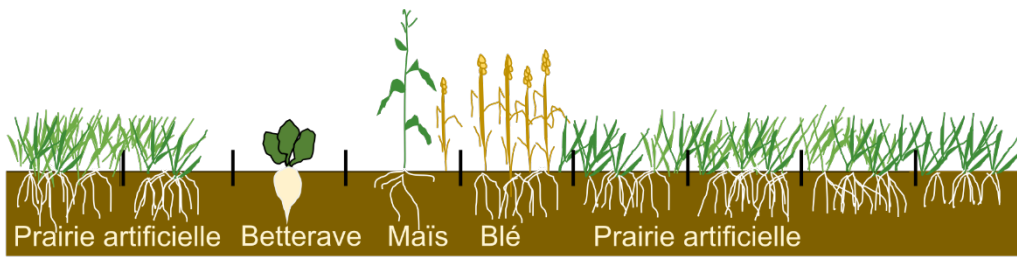
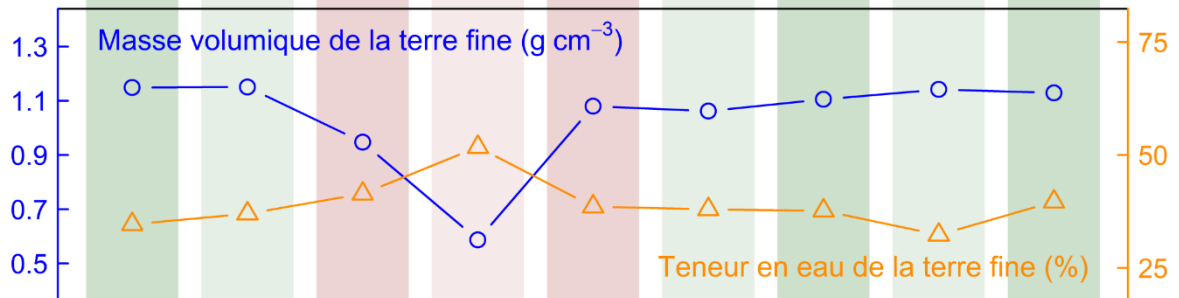


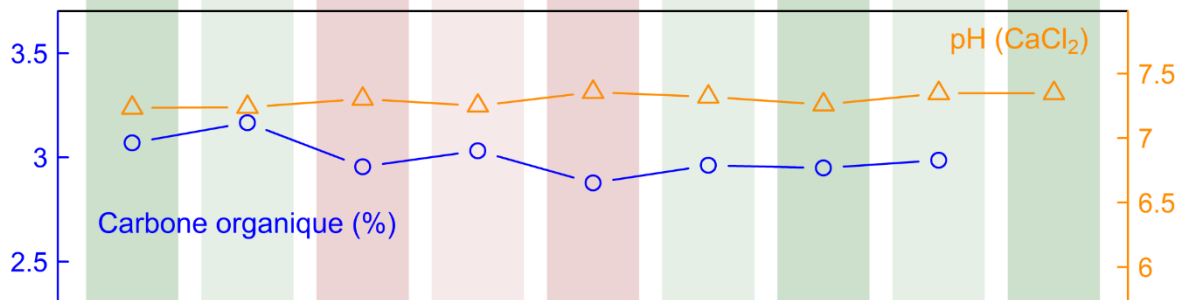
Figure 3: Les bilans de surface du phosphore (P), du cuivre (Cu) et du cadmium (Cd) sur le site étudié, une terre assolée dans le nord-est de la Suisse. Des données sur le relevé des bilans de surface sont présentées au chapitre 6.



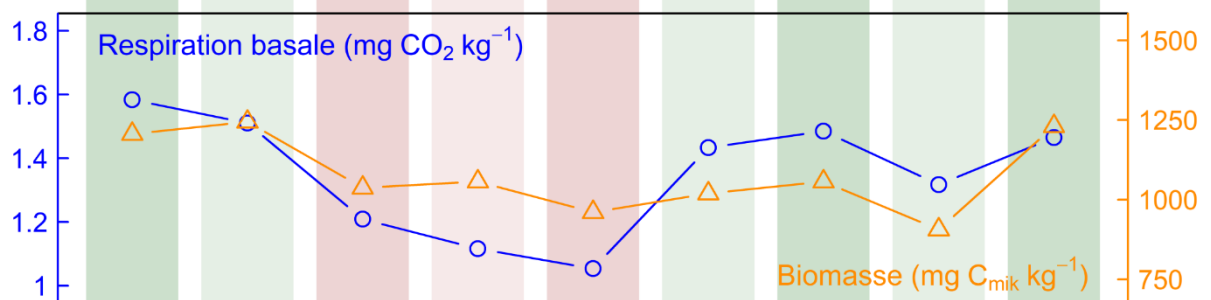
Paramètres physiques complémentaires



Caractéristiques pédologiques



Paramètres biologiques globaux



Produits phytosanitaires

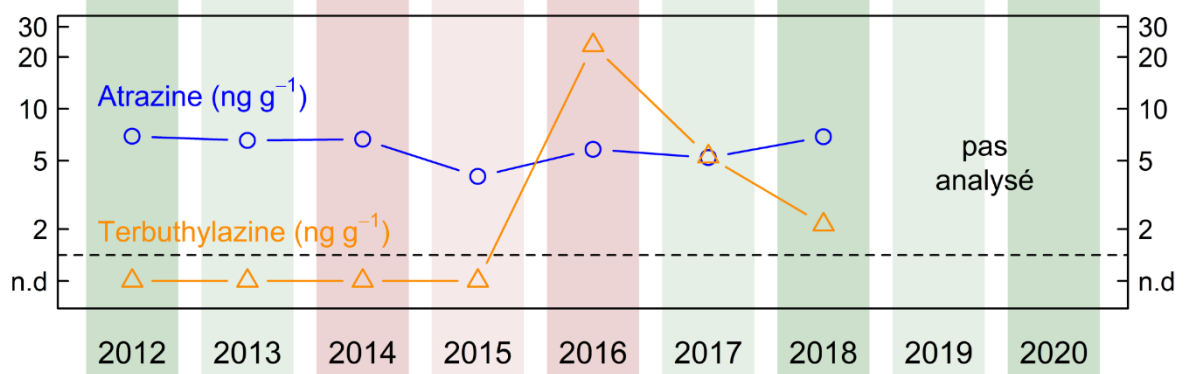


Figure 4: Les valeurs mesurées sur le site de l'étude de cas reflètent la rotation culturale (n.d. = substance non détectée / inférieure au seuil de détection). Colonnes vertes = prairie artificielle, colonnes roses = grandes cultures

3 Sur la piste des organismes du sol : le monitoring de la biologie du sol

Le sol offre un habitat à une multitude de microorganismes, comme des bactéries et des champignons. Le NABO mène un monitoring spécifique dans ce domaine sur des sols de grandes cultures et d'herbages, car la microbiologie permet de bien décrire l'état du sol. Les résultats obtenus jusqu'ici montrent que les changements d'exploitation peuvent fortement perturber la présence et l'activité des organismes du sol. À l'avenir, il est prévu de recourir plus souvent à des analyses de génétique moléculaire pour approfondir nos connaissances sur la composition des organismes du sol.

Le sol est un lieu où la vie foisonne : un seul mètre cube de terre renferme plus de 5 billions de microorganismes. Ces derniers sont non seulement nombreux, mais aussi d'une grande diversité. Le monitoring biologique du sol NABOBio, qui se concentre sur le relevé des microorganismes, vise d'une part à déterminer la quantité présente dans le sol, d'autre part à étudier la richesse en espèces et la composition des communautés microbiennes. Pour l'instant, l'accent est mis sur les bactéries et les champignons. Leur biomasse totale est mesurée selon la méthode de fumigation extraction. Au laboratoire, les échantillons de sol NABOBio font également l'objet d'une analyse de la respiration basale, en tant que mesure de l'activité microbienne (Hug et al. 2018). Celle-ci consiste à mesurer la quantité de CO₂ émise par la respiration des microorganismes du sol. Un autre indicateur utilisé pour déterminer la biomasse du sol est l'ADN, la substance porteuse du patrimoine génétique présente dans tout être vivant. L'ADN est extrait d'un échantillon de sol, puis analysé selon des méthodes de génétique moléculaire. À l'avenir, ce type d'extraits d'ADN devrait aussi servir à évaluer les modifications de l'état du sol. Pour les analyses pédobiologiques, le NABO collabore avec d'autres chercheurs d'Agroscope, notamment avec les groupes de recherche « Interactions entre plantes et sol » et « Écologie moléculaire ».

Le monitoring NABOBio se concentre sur neuf sites de grandes cultures et dix sites d'herbages, échantillonnés annuellement depuis 2012. Jusqu'en 2016, il intégrait également des relevés dans dix sites forestiers. Les autres sites du réseau NABO feront l'objet d'une étude pédobiologique unique d'ici 2023. Ces relevés ont pour but de donner un aperçu de l'évolution de la biologie du sol, et de permettre des comparaisons entre les sites et les variantes d'exploitation. Pour illustrer l'évolution dans le temps, l'écart-type est présenté pour chaque site. L'évaluation statistique s'appuie sur des « données centrées » (cf. annexe 16.2).

3.1 Les paramètres biologiques globaux réagissent aux changements

La Figure 5 illustre les séries de données des 19 sites NABOBio relevées sur la période de 2012 à 2020. On constate d'une manière générale que les sites de grandes cultures présentent des valeurs de biomasse et de respiration basale inférieures aux sites d'herbages. Les plages de valeurs des données microbiologiques sont en grande partie comparables aux résultats d'autres études (Fliessbach et al., 2007 ; BSA, 2009 ; Oberholzer et Scheid, 2007 ; Anderson et Domsch, 2010).

En outre, l'évolution dans le temps met en évidence un lien avec l'utilisation du sol : dans les grandes cultures, la biomasse microbienne reste dans l'ensemble stable, alors que dans les herbages, elle augmente légèrement. Deux sites se sont distingués par une nette diminution de leur biomasse vers la fin de la période de mesure (à savoir à partir de 2017, respectivement de 2019). La raison réside dans un changement d'exploitation : l'exploitation herbagère pratiquée pendant de nombreuses années dans les deux sites a été remplacée par des grandes cultures ou des cultures spéciales. Comme le montre la figure 5 (« Évolution après un changement d'exploitation »), le retournement du sol a entraîné une diminution sensible de la teneur en matière organique, de la biomasse microbienne et de la respiration basale

Considérée du point de vue des différents types d'utilisation des sites NABOBio, la respiration basale est restée dans la moyenne, tant dans les sites de grandes cultures que dans les sites d'herbages, sans présenter de tendance orientée, mais avec des fluctuations d'une année à l'autre.

3.2 Des méthodes de génétique moléculaire révèlent la présence de biocénoses typiques du site

De 2012 à 2016, des investigations supplémentaires portant sur la diversité des bactéries et des champignons ont été réalisées au moyen d'un metabarcoding ADN. Le metabarcoding permet de déterminer simultanément de très

nombreux taxons par séquençage de certains segments de gènes de l'ADN, et de calculer ainsi la diversité des espèces dans un échantillon. Dans la présente étude, la totalité de l'ADN a été extraite des échantillons de sol. À partir de ces échantillons, des segments de gènes spécifiques (barcodes) ont été isolés et multipliés par amplification en chaîne par polymérase (polymerase chain reaction, PCR). Ensuite, ces segments ont été analysés par séquençage à haut débit (high throughput sequencing) et regroupés par unités taxonomiques similaires. Ces groupes représentent un rapprochement avec des espèces, et les séquences ont été classées taxonomiquement à l'aide de banques de données de bactéries et de champignons connus.

Ces analyses permettent de caractériser les communautés de bactéries et de champignons de certains sites sous l'angle de la biologie moléculaire. Les conclusions sont que les sites se distinguent clairement les uns des autres et que par conséquent, les biocénoses peuvent être considérées comme typiques de leur station et stables au fil du temps. En outre, l'échantillonnage répété pendant la cinquième période de mesure a montré que la diversité restait très constante dans chaque site (Gschwend et al. 2021). C'est également ce qui ressort de la présentation simplifiée en deux dimensions de la diversité dite bêta (cf. Figure 6) : plus les points sont proches, plus les associations microbiennes sont semblables. Chaque point représente la valeur de mesure d'un échantillon.

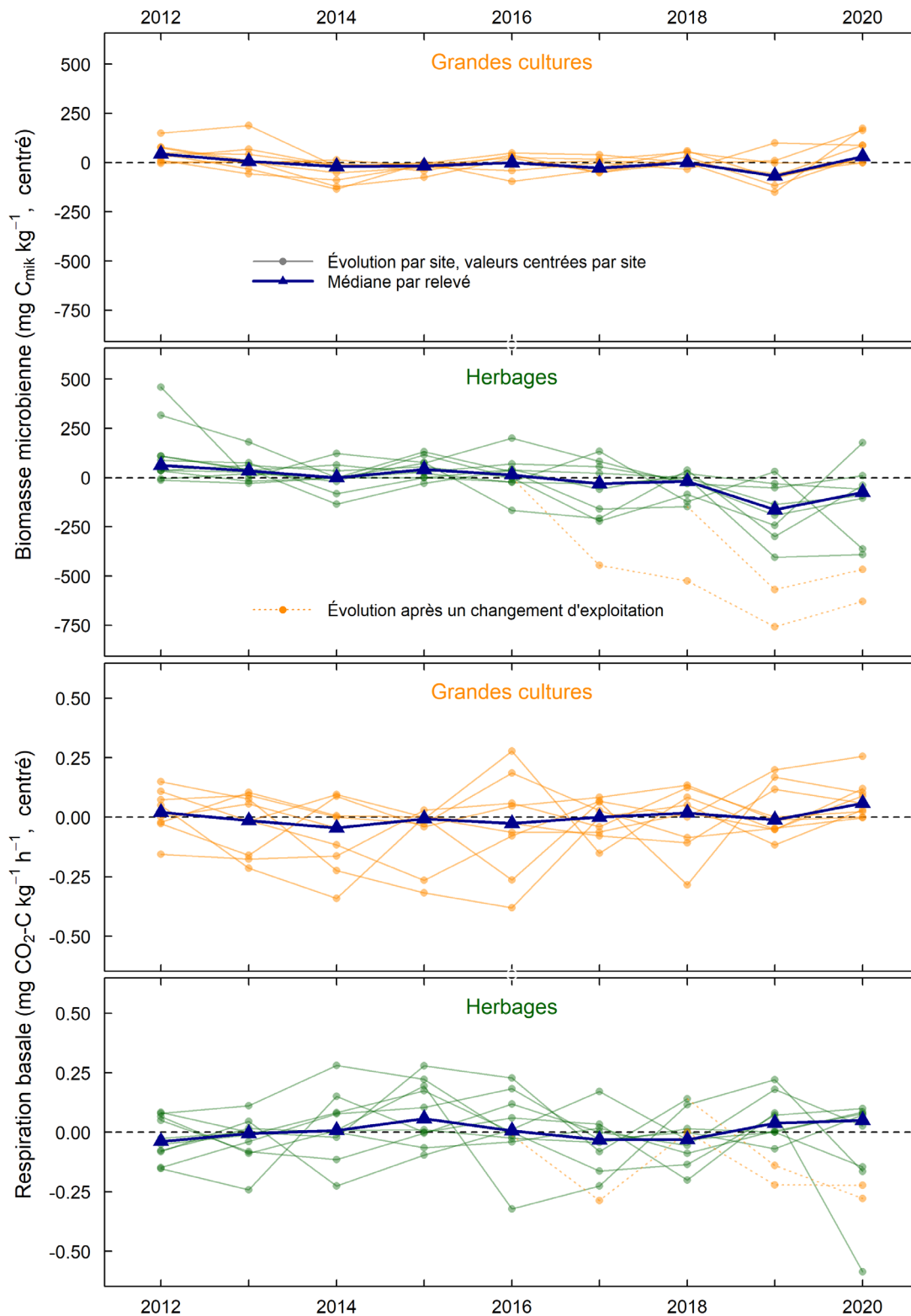


Figure 5: Tendances évolutives de la biomasse microbienne (méthode de fumigation extraction, moitié supérieure) et de la respiration basale (moitié inférieure) dans les sites NABObio. Sont reproduites les évolutions de neuf sites de grandes cultures (1^{re} et 3^e ligne) et de dix sites d'herbages (2^e et 4^e ligne) ainsi que la médiane par variante d'exploitation. Deux sites d'herbages n'ont plus été pris en compte dans la médiane après un changement d'exploitation. L'évolution des valeurs mesurées a été centrée pour chaque site par soustraction de la médiane du site (cf. annexe 16.2).

L'utilisation des terres a une forte influence sur les biocénoses du sol. Les communautés de bactéries et de champignons présentent toutes deux une plus grande variabilité temporelle dans les grandes cultures que dans les herbages. En outre, les champignons présentent une plus grande variabilité temporelle que les bactéries dans les grandes cultures (Gschwend et al. 2021).

Les résultats des cinq dernières séries d'échantillonnage de NABObio sont encore en traitement ; la dixième et dernière série a été achevée en 2021. Il devrait ainsi être possible de montrer l'évolution de la diversité sur la période de 2016 à 2021. Il sera également intéressant d'effectuer une comparaison avec de précédents cycles d'échantillonnage : comment la biologie du sol a-t-elle évolué au cours des dix dernières années ? Sur quels sites observe-t-on les changements les plus marqués ? Et quelles influences ou quels facteurs de stress sont responsables de ces changements ?

L'évaluation des cinq premières années a montré que la méthode de génétique moléculaire développée pour le NABObio pouvait être intégrée avec succès dans des programmes de monitoring. Il faut toutefois tenir compte d'une règle valable pour tous les relevés de la diversité et des paramètres microbiologiques globaux : pour obtenir des valeurs de base (*baseline*) fiables pour chaque site, il est nécessaire de procéder à des échantillonnages répétés au fil du temps. Ceux-ci permettent de faire la différence entre les fluctuations à court terme pouvant résulter p. ex. des différents types de grandes cultures, et les changements à long terme (tendances). C'est seulement ainsi que l'on peut reconnaître la pertinence des changements et déplacements des biocénoses, et les distinguer des fluctuations à court terme.

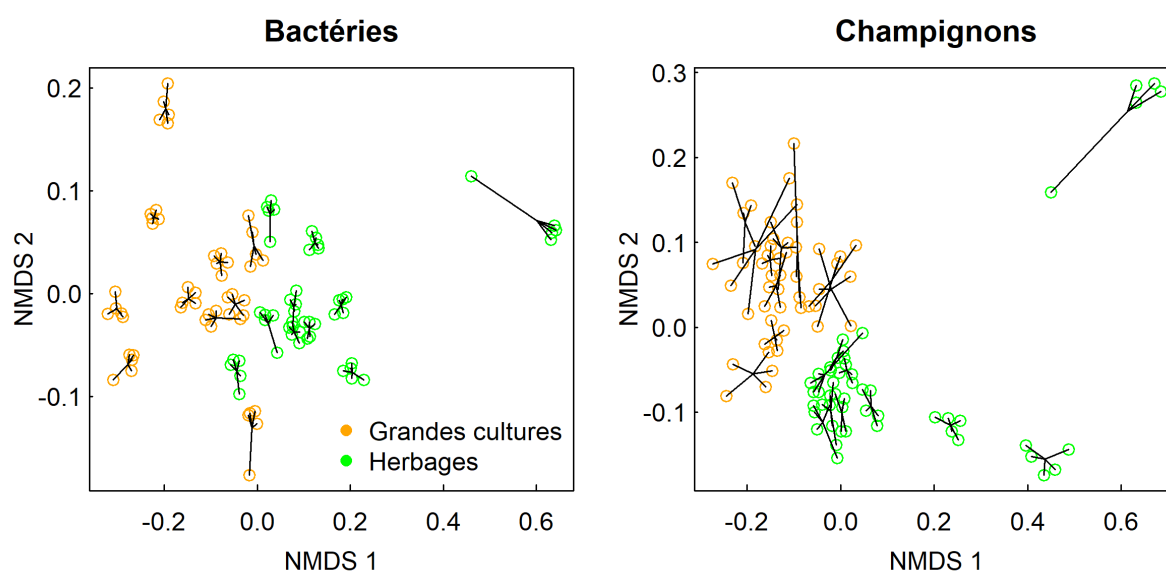


Figure 6: Un classement des comparaisons des communautés de bactéries (à gauche) et de champignons (à droite). Plus deux points sont rapprochés, plus les communautés sont semblables dans les sites de mesures. Chaque point représente une structure de communauté «moyenne» par année dans un site NABObio, le type d'exploitation est indiqué par la couleur (orange : grandes cultures, vert : herbage) Chaque site est lié à son centroïde par des lignes.

Informations complémentaires

[Résultats NABObio 2012–2016 et recommandations pour la gestion d'un monitoring de la biologie du sol \(NABObio – Bodenbiologie in der Nationalen Bodenbeobachtung, Ergebnisse 2012–2016, Handlungsempfehlungen und Indikatoren\)](#)

Rapport (en allemand, résumé en français), Hug et al. 2018.

[Long-term stability of soil bacterial and fungal community structures revealed in their abundant and rare fractions.](#)

Article scientifique, Molecular Ecology, Gschwend et al. 2021.

www.nabo.ch > [Monitoring](#) > [La vie dans le sol](#)

4 Exploitation optimale des données pédobiologiques grâce à l'évaluation commune de programmes de mesures cantonaux et du NABO.

En plus de l'Observatoire national des sols NABO, certains cantons récoltent leurs propres données sur la biologie du sol. Pour que ces connaissances puissent être exploitées conjointement, les méthodes de mesure et les normes d'évaluation doivent être harmonisées. Des évaluations comparées laissent entrevoir une solution sur la façon d'agréger les données des sites de différents réseaux de mesures. Le NABO prévoit de développer encore ces bases, en collaboration avec les cantons. L'objectif à long terme est d'obtenir un indicateur de qualité commun et global pour la biologie du sol.

Les biocénoses de champignons, de bactéries et autres microorganismes sont les garantes de la qualité et des fonctions du sol. Elles contribuent également à la préservation de la biodiversité, à la sécurité alimentaire et à la protection contre le changement climatique. C'est pourquoi les informations sur l'état de la biologie du sol sont importantes dans de nombreux domaines de la société. La Confédération et les cantons en ont besoin pour évaluer l'évolution des sols en Suisse. Comme l'a montré une analyse des besoins (Gubler et al. 2020), les acteurs concernés s'accordent à dire qu'en plus des données mesurées, il faut également pouvoir disposer d'instruments d'évaluation appropriés qui permettent par exemple de fixer des valeurs de référence spécifiques pour les sites. D'autre part, un travail de fond est nécessaire pour pouvoir agréger des indicateurs de qualité compréhensibles et clairs à partir des données relevées.

À l'instar du NABO et de son monitoring ciblé de la biologie du sol (cf. chapitre 3), quelques cantons recueillent aussi des informations spécifiques sur la biologie du sol. Ainsi, les cantons d'Argovie, de Berne et des Grisons gèrent leur propre réseau de mesure et relèvent dans certains sites les mêmes paramètres microbiologiques que le NABO. Les analyses des échantillons de sol sont effectuées par le laboratoire d'Agroscope, sur mandat des cantons, selon les méthodes de référence standardisées des anciennes stations fédérales de recherche agronomique (FAL, FAW, RAC, 1998). Malgré certaines différences, le prélèvement des échantillons est très similaire dans les trois cantons. C'est pourquoi les données pédobiologiques des programmes de mesure cantonaux ont pu être évaluées conjointement avec celles du NABO. Les résultats de cette collaboration sont publiés dans le rapport d'Hug et al. (2021).

4.1 Comparaison des valeurs mesurées avec prise en compte des propriétés du site

Les paramètres biologiques globaux - la biomasse microbienne et la respiration basale - fournissent toujours des valeurs spécifiques au site. Celles-ci sont notamment influencées par les propriétés du sol, les facteurs climatiques ainsi que l'exploitation agricole. C'est la raison pour laquelle les valeurs de différents sites ne peuvent pas être comparées entre elles. Pour pouvoir effectuer une évaluation commune des données du NABO et des cantons, il a donc fallu définir une procédure sur la façon d'agréger quatre programmes de mesures. Une interprétation des données à l'aide de valeurs de référence spécifiques au site présentait des avantages. C'est ainsi que des valeurs de référence ont été élaborées sur une base empirique pour évaluer la qualité biologique des terres assolées (biomasse et respiration basale). Elles permettent désormais de répartir les données de mesure d'un site échantillonné en cinq classes de qualité, allant de « très faible » à « très élevée » (Oberholzer et al. 1999, Oberholzer et Scheid 2007, VBB/BSA 2009).

Pour reproduire également l'état de l'ensemble des sites, les valeurs classées sont présentées sous forme de graphique. Il est ainsi possible de visualiser directement la répartition des différentes classes. La condition requise pour un indicateur de qualité commun est que les collectifs aient été échantillonnés de manière identique. Pour pouvoir agréger les données des différents programmes de mesures nationaux et cantonaux, il a donc fallu uniformiser la résolution temporelle sur une année. Les données des sites suivis selon un autre cycle d'échantillonnage sont prises en compte dans l'évaluation jusqu'à ce que les résultats d'une prochaine série d'échantillonnage soient disponibles.

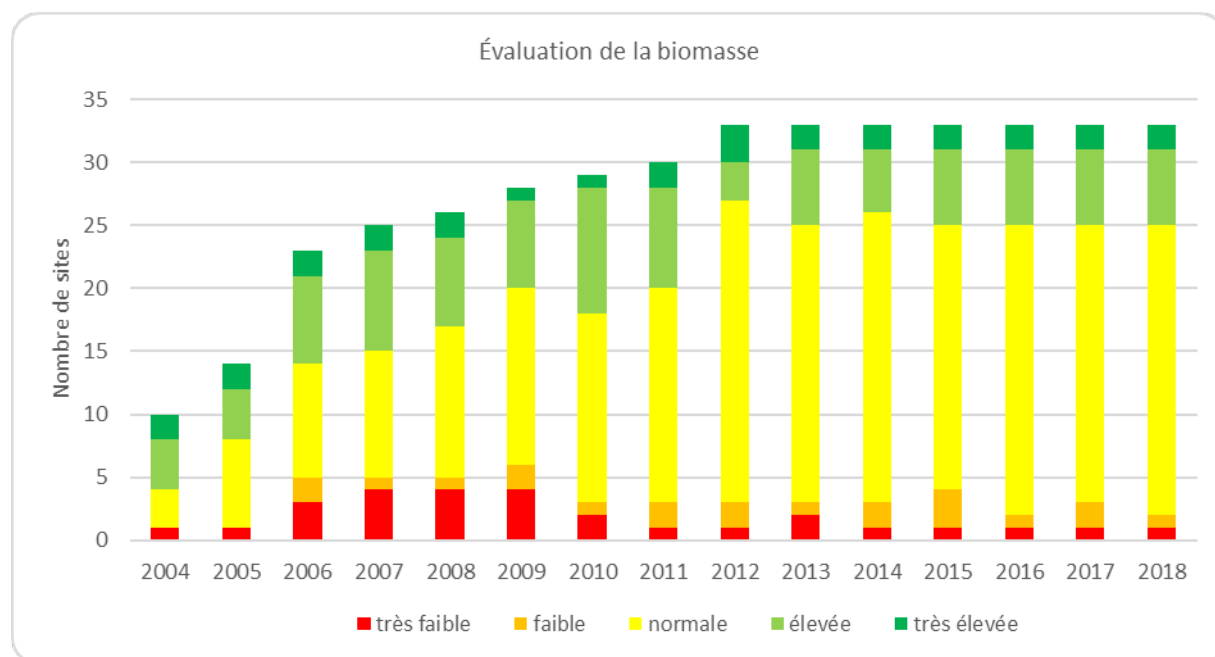


Figure 7: Données sur la biomasse microbienne (méthode de fumigation extraction) selon un inventaire des classes évaluées par site ; représentation de l'évolution dans le temps pour 33 sites du NABObio et des programmes de mesures des cantons d'Argovie, de Berne et des Grisons.

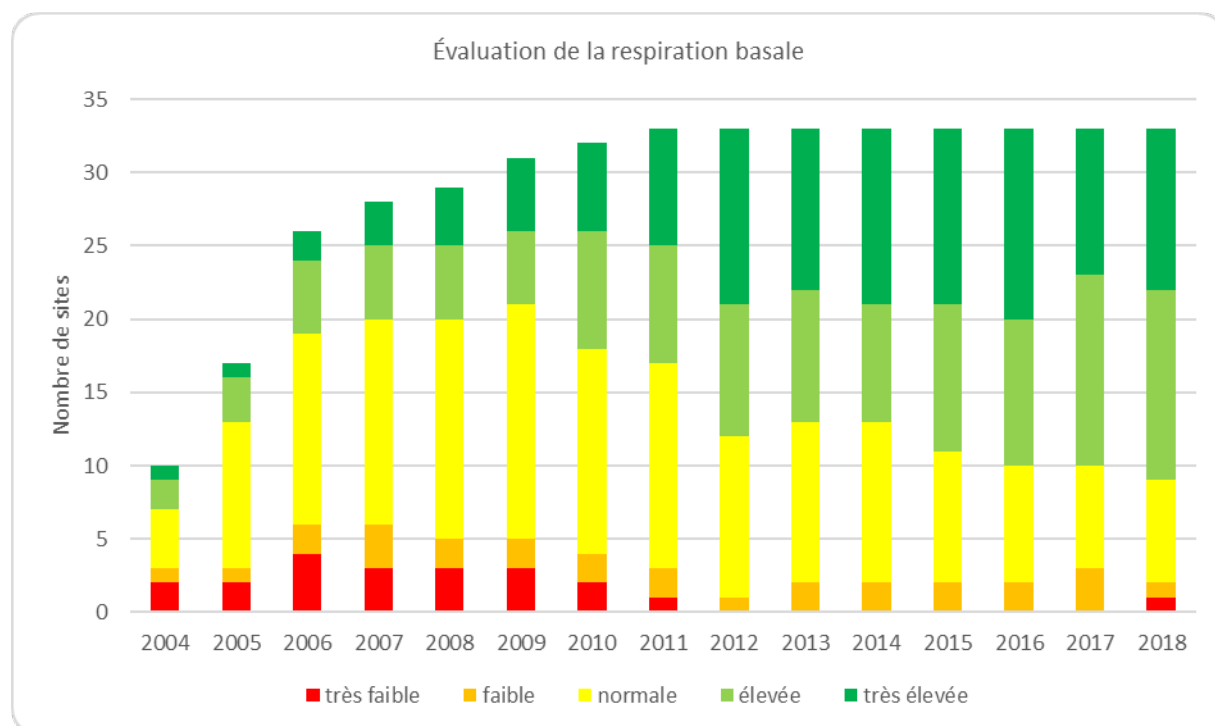


Figure 8: Données sur la respiration basale (méthode de fumigation extraction) selon un inventaire des classes évaluées par site ; représentation de l'évolution dans le temps pour 33 sites du NABObio et des programmes de mesures des cantons d'Argovie, de Berne et des Grisons.

À partir du moment où les observations ne portent pas toujours sur le même collectif de sites, l'évolution dans le temps des paramètres microbiologiques globaux doit être interprétée avec prudence. L'exemple de la biomasse, présentée sous forme de diagramme à barres dans la Figure 7, montre que le nombre de sites a constamment augmenté jusqu'en 2012. C'est n'est qu'à partir de cette année que le collectif reste stable et qu'il est possible de tirer des conclusions sur l'évolution temporelle. La quantité de biomasse peut être évaluée comme normale dans une majorité des sites sur la base des classes de qualité. La répartition dans les différentes classes semble très stable. De légères fluctuations au fil des années, telles qu'elles apparaissent depuis 2012 dans la figure 7, sont encore assimilées à un déroulement stable, car elles peuvent s'expliquer en partie par les conditions météorologiques.

Pour les résultats des analyses de la respiration basale, une distinction doit être faite là aussi entre fluctuations à court terme d'une année à l'autre, et tendances à long terme. Une interprétation de l'évolution chronologique permet de tirer les conclusions suivantes (cf. Figure 8) : à quelques exceptions près, les valeurs se situent dans la zone normale, élevée ou très élevée par rapport aux données de mesure des sites qui ont servi à définir les classes de qualité (Oberholzer et al. 1999, Oberholzer et Scheid 2007, VBB/BSA 2009). Ces derniers temps, les classes d'évaluation « élevée » et « très élevée » semblent même progresser proportionnellement. À l'aide du quotient métabolique (respiration basale divisée par la biomasse microbienne), il est possible de contrôler si les microorganismes ont été exposés à un stress. D'une manière générale, les modifications à long terme requièrent toujours un examen approfondi, en particulier en cas de diminution de la biomasse microbienne et de la respiration basale ou d'augmentation du quotient métabolique. Il s'agit de déterminer si elles ont été causées par des conditions naturelles ou par des changements d'exploitation.

4.2 Des classes d'évaluation à l'indicateur d'état Q

Une évaluation peut poursuivre différents objectifs. Pour une communication concise, un classement des qualités sur une échelle allant de « très faible » à « très élevée » est extrêmement clair. Pour des évaluations scientifiques plus approfondies, des valeurs d'évaluation numériques et continues sont nécessaires. C'est la raison pour laquelle l'indicateur d'état Q a été défini. Il est calculé à partir du rapport entre la valeur mesurée effective, et la valeur de référence spécifique d'un site selon le Groupe de travail « Biologie du sol - application » (VBB/BSA, 2009). L'indicateur d'état biologique Q se rapporte à chaque site et à chaque échantillonnage individuel, et reproduit donc les changements avec plus de sensibilité que la classification susmentionnée. En même temps, l'état peut être agrégé spécifiquement pour la biomasse (indicateur Q_{FE-C}) et pour la respiration basale (Q_{BA}) (Hug et al. 2021). La moyenne ou la médiane de l'indicateur d'état fournit des informations sur un collectif de données. La Figure 9 reproduit à titre d'exemple la série de données Q_{FE-C} des neuf sites de grandes cultures de NABObio.

L'agrégation de données de mesures pédobiologiques en un ou plusieurs indicateurs de qualité n'en est qu'à ses débuts. Les approches méthodologiques décrites ci-dessus ont encore besoin d'être développées : premièrement, la base de données doit être améliorée par l'échantillonnage de davantage de sites et par l'intégration de données tirées d'autres programmes de mesure. Deuxièmement, des bases d'évaluation supplémentaires sont impérativement nécessaires : le modèle des valeurs de référence pour la biomasse et la respiration basale applicable aux sites de grandes cultures ne peut pas être utilisé pour les sols d'herbages, parce que ces derniers présentent d'autres fourchettes de référence pour les différents critères d'évaluation et qu'il n'existe pas encore d'équations de prédiction pour les méthodes appliquées ici. Dans une troisième étape, il est prévu de compléter les paramètres microbiologiques globaux présentés ci-dessus par des indicateurs de la diversité ou d'autres aspects. En outre, il restera à synthétiser les enseignements des différents indicateurs pédobiologiques en un indicateur global de l'état de la biologie du sol.

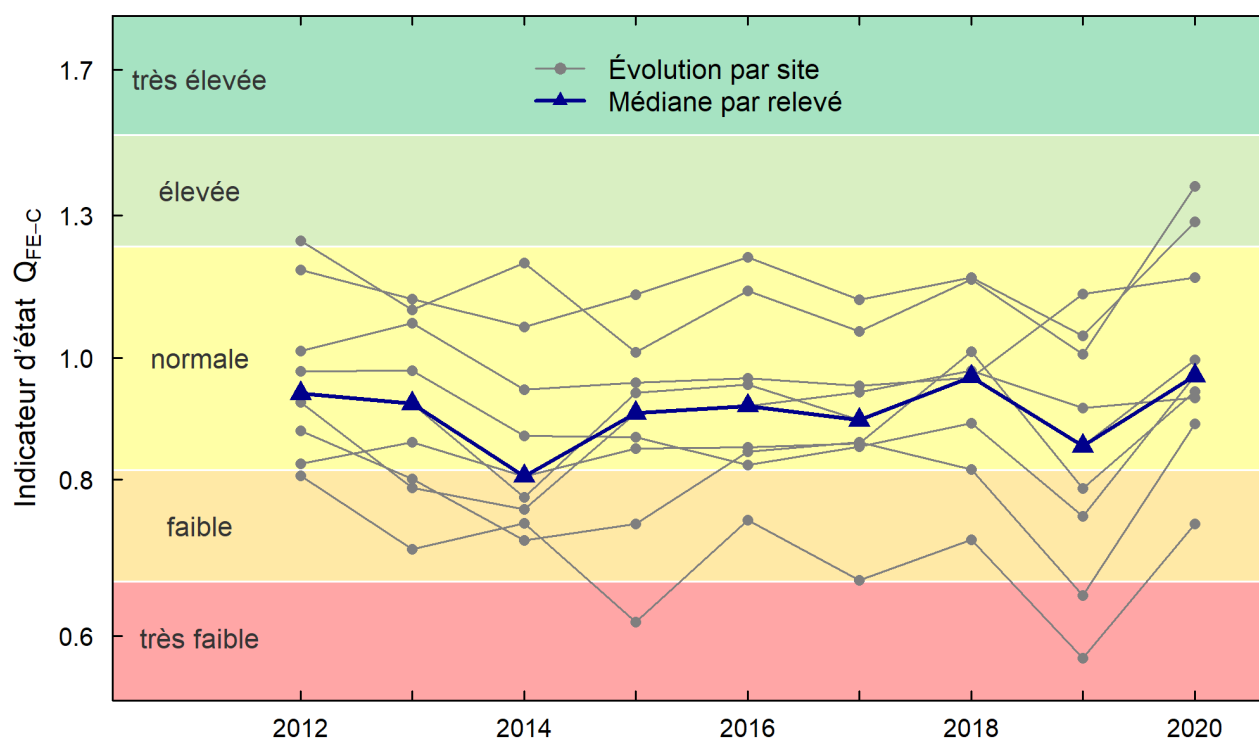


Figure 9: L'indicateur d'état Q_{FE-C} de neuf sites de grandes cultures, évalué pour la période de 2012 à 2020.

Informations complémentaires

[Évaluation commune de programmes de mesures cantonaux et du NABO \(Monitoring Bodenbiologie. Auswertung bodenmikrobiologischer Daten von kantonalen und nationalen Bodenbeobachtungsstandorten\)](#)

Rapport (en allemand, résumé en français), Hug et al. 2021.

www.nabo.ch > [Monitoring](#) > [La vie dans le sol](#)

5 Physique du sol : la structure du sol livre beaucoup d'informations sur ses propriétés

La physique du sol est déterminée, entre autres, par le poids, la densité et la teneur en eau de ses différentes couches. La collecte de ces données permet notamment de mettre en évidence la compaction des sols. En outre, les informations sur la physique des sols servent à documenter les sites de mesures. Elles permettent d'évaluer plus précisément la chimie et la biologie du sol, et améliorent notre compréhension des multiples processus naturels qui interagissent dans le sol

Le sol est un écosystème fascinant, qui intègre étroitement les états d'agrégation solide, liquide et gazeux. Les processus biologiques, chimiques et physiques se déroulant dans la matrice (phase solide), l'eau (phase liquide) et l'air (phase gazeuse) du sol interagissent dans un espace extrêmement restreint. Pour obtenir une compréhension globale des propriétés et de l'état du sol, ces milieux doivent être étudiés par les trois disciplines spécialisées (biologie, physique et chimie du sol). La structure, autrement dit la porosité et la perméabilité de la matrice, joue un rôle important dans la physique du sol. Elle permet par exemple de déterminer combien d'eau peut être emmagasinée. Les données sur la physique des sols nous aident incontestablement à comprendre de nombreuses corrélations. Car les propriétés physiques influencent aussi bien la biologie – par leur effet sur la composition et l'activité des organismes – que la chimie du sol, notamment en ce qui concerne la disponibilité des substances nutritives, la capacité de décomposition et de filtration des polluants, ou encore le potentiel redox.

C'est en 2001 que l'Observatoire national des sols NABO a commencé à effectuer des relevés des propriétés physiques des sols. À cette époque, le projet pilote visait à tester des méthodes de relevé ainsi que des paramètres (projet LAZBO ; Schwab et al., 2006). Le monitoring du NABO a pu être complété dès 2003. Les paramètres physiques complémentaires de la masse volumique, de la densité apparente et de la teneur en eau sont relevés de manière standardisée dans la couche supérieure du sol jusqu'à une profondeur de 20 cm (Schwab & Gubler, 2016). Et depuis 2013, le NABO assure un véritable monitoring de la physique des sols. La compaction est déterminée au moyen d'un pénétromètre (sonde PANDA) qui peut mesurer la résistance à la pénétration. Dans certains sites particulièrement intéressants du NABO, le programme d'études physiques a encore été élargi : on y détermine en plus le comportement de désorption, la perméabilité à l'air et la diffusion gazeuse.

5.1 Les paramètres physiques complémentaires documentent l'échantillonnage

Comme on l'a vu, les informations sur la physique du sol sont un élément important pour l'évaluation de la qualité biologique et chimique du sol. Ainsi, la masse volumique, la densité apparente et la teneur en eau fournissent des précieuses méta-informations : elles documentent l'état du sol au moment de l'échantillonnage, et constituent une base de comparaison pour l'évaluation du site lors d'échantillonnages répétés. En outre, les informations sur la masse volumique sont nécessaires pour convertir les concentrations de substances mesurées en réserves de substances à l'échelle de volumes ou de surfaces. Par ailleurs, le programme NABO a développé une méthode alternative au prélèvement d'échantillons, qui permet d'évaluer grossièrement la masse volumique dans un site d'échantillonnage à partir de données d'autres propriétés du sol au moyen de fonctions de pédotransfert (Schwab & Gubler 2019).

En règle générale, le relevé des paramètres physiques complémentaires se concentre sur la couche supérieure du sol. Pour cela, des échantillons en cylindre de sol non perturbé sont prélevés jusqu'à une profondeur de 20 cm (Schwab & Gubler 2016). Depuis l'adaptation en 2015 de la stratégie d'échantillonnage (cf. chapitre 1), les sites principaux sont échantillonnés jusqu'à une profondeur de 75 cm. Les informations sur la physique des sols obtenues grâce à ces carottes de sondage, comme la structure et les caractéristiques de compaction, couvrent ainsi une plus grande partie du profil. Comme ces carottes sont évaluées en tant qu'échantillons volumiques, elles permettent également d'estimer les réserves de substances.

5.2 Mesures à l'aide du pénétromètre : plus le sol est dense, plus la résistance est grande

La structure du sol est influencée par des facteurs naturels et par les activités humaines. La genèse naturelle du sol conditionne par exemple la granulométrie et la superposition des horizons. Elle détermine ainsi la densité des matériaux terreux et le niveau de structuration des différents horizons pédologiques. L'influence anthropique comprend

avant tout l'exploitation du sol, notamment la circulation de véhicules et la préparation du terrain, par exemple lors du labour, qui exercent une importante pression physique sur le sol, tout comme une charge en bétail inadaptée sur les pâturages. Des forces excessives altèrent la structure intacte du sol.

L'objectif d'un monitoring de la physique du sol est de déterminer l'impact des influences naturelles et humaines. Depuis 2013, le monitoring NABOphys suit l'évolution de la compaction des sols dans 38 sites sélectionnés du NABO (Schwab 2010 ; Schwab et al. 2018). L'échantillonnage a lieu au moins tous les cinq ans. Quelques sites font l'objet d'échantillonnages plus fréquemment visant à améliorer les méthodes de relevé. Entre-temps, chaque site a déjà pu être échantillonné au moins une fois, et jusqu'à sept fois pour les sites les plus échantillonnés. Ces données constituent une base de référence pour mettre en évidence les changements futurs.

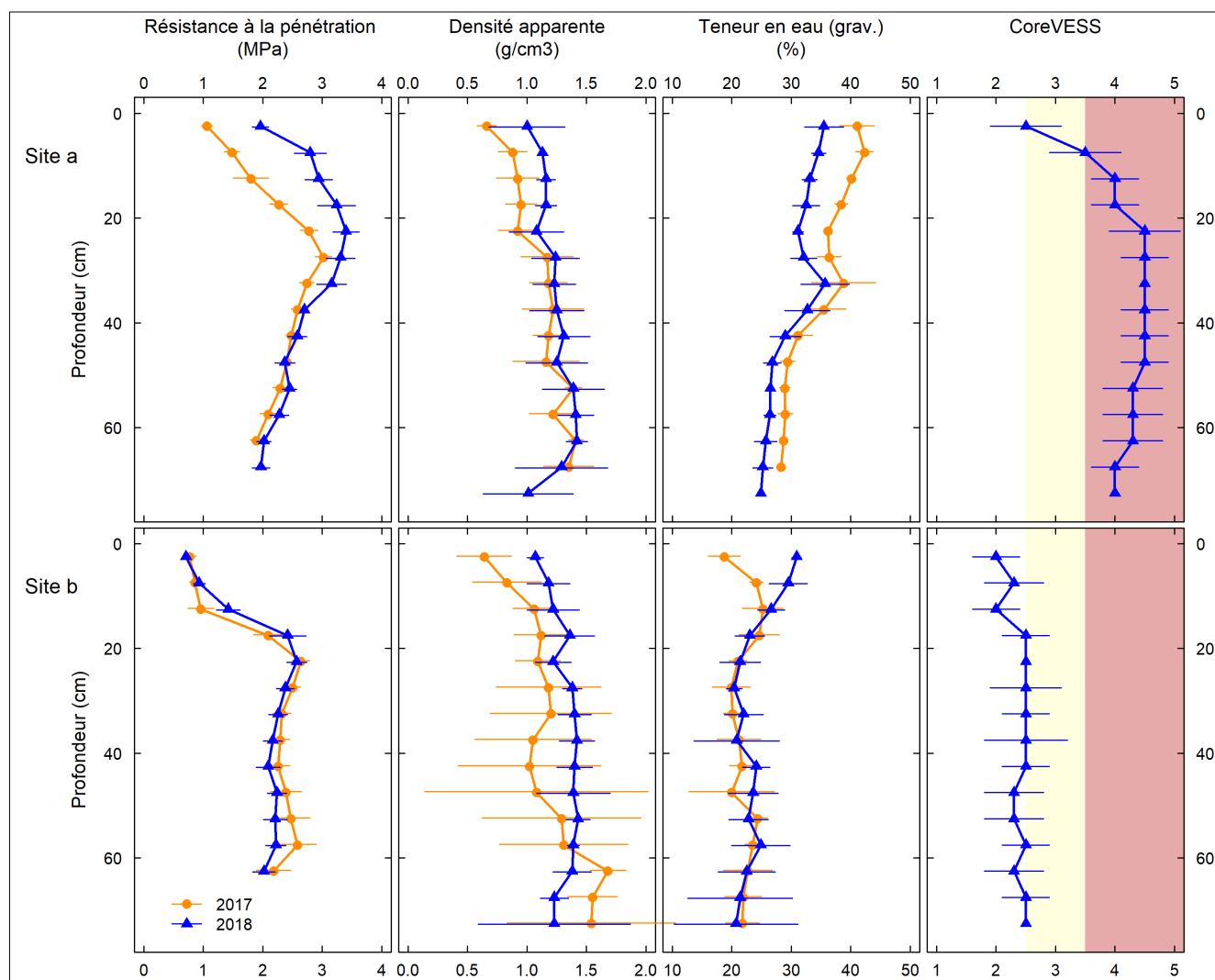


Figure 10: Résistance à la pénétration (mesurée avec une sonde PANDA) en fonction de la profondeur du sol pour deux différents sites de grandes cultures sur deux années successives (2017 et 2018). La densité apparente, la teneur en eau et le CoreVESS (seulement 2018) ont été déterminés à partir de carottes de sondage

L'air, l'eau et les racines peuvent difficilement pénétrer dans les sols compactés. Le principe du pénétromètre repose sur cette résistance physique. Une sonde mesure la force utilisée pour enfoncer une tige dans le sol. La résistance à la pénétration est toutefois loin d'être constante dans un sol donné ; les différences peuvent être très marquées d'un horizon à l'autre (cf. Figure 10). C'est en général dans la couche supérieure du sol que la résistance à la pénétration est la plus faible. En outre, comme le montre clairement le site présenté dans la série de graphiques du haut, cette résistance varie avec le temps : elle s'est révélée nettement plus élevée une année. Outre la densité, la teneur en eau doit aussi être prise en considération, car une résistance élevée est également le signe de sols secs. C'est

pourquoi les informations sur la teneur en eau sont indispensables pour interpréter les compactions du sol. Par ailleurs, une évaluation de la structure du sol est effectuée afin de localiser les zones compactées. Dans les terres assolées, il faut également tenir compte du fait que la résistance à la pénétration est une mesure peu pertinente dans l'horizon labouré (en règle générale les 20 à 25 cm supérieurs), car le travail du terrain influence fortement la densité du sol.

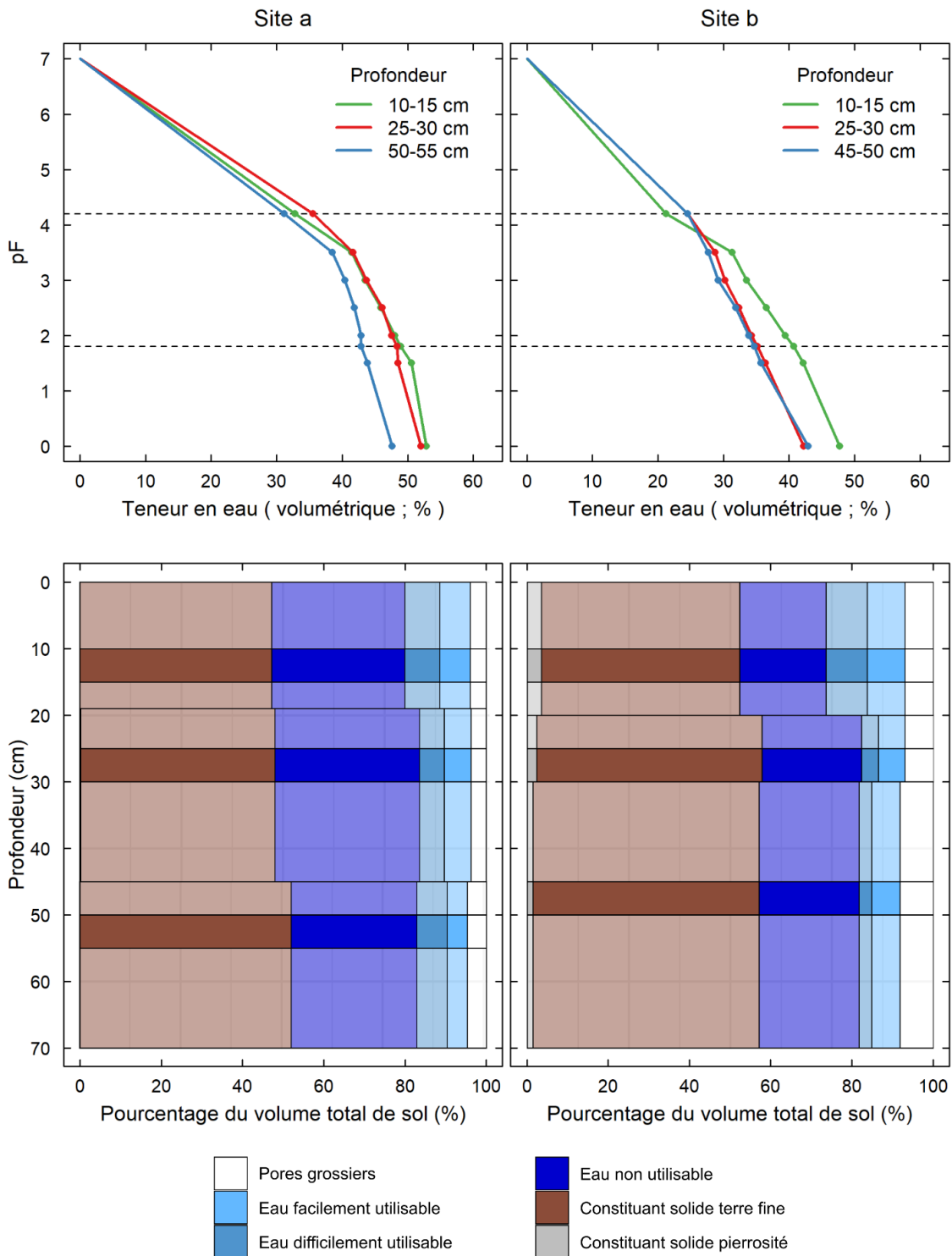


Figure 11: Courbes de désorption (en haut) et la distribution des pores déduite à partir de ces courbes pour deux sols sélectionnés (sites de mesures selon la Figure 10).

Dans les deux sites, les données mesurées sur la résistance à la pénétration révèlent la présence d'une zone plus dense à environ 20 à 30 cm de profondeur, donc directement sous l'horizon labouré. Dans le premier site, la résistance diminue nettement dans les couches plus profondes, contrairement au deuxième, où elle reste relativement élevée dans la couche sous-jacente du sol. Cependant, l'évaluation visuelle de la structure du sol selon la méthode CoreVESS (Johannes et al. 2017) donne aussi un bon résultat pour le deuxième site. La comparaison des deux sites permet donc de conclure que la qualité de la structure peut fortement varier dans le sol même lorsque la résistance à la pénétration est identique. Les valeurs de mesure de la figure 10 peuvent donc être interprétées comme suit : la résistance à la pénétration relativement élevée dans la couche sous-jacente du sol semble plutôt être d'origine naturelle. En revanche, les zones compactées au niveau de la semelle de labour sont clairement imputables à l'exploitation.

5.3 Mieux comprendre les sols grâce aux paramètres physiques complémentaires

La connaissance des propriétés physiques est essentielle à la compréhension des processus de migration et des flux de substances dans le sol. Pour pouvoir étudier les substances nutritives, les polluants et la matière organique, il est donc également nécessaire de déterminer la physique du sol des sites échantillonnés. De plus, les modèles de prévision mathématiques qui simulent les processus dans le sol ont généralement besoin d'être alimentés avec diverses informations sur la physique des sols. C'est pourquoi le NABO a entrepris il y a trois ans un relevé unique de plusieurs propriétés physiques dans une série de sites sélectionnés. Ces relevés ont été effectués en collaboration avec le groupe de recherche d'Agroscope « Qualité et utilisation du sol » et portent sur le comportement de désorption (courbe pF), la perméabilité à l'air et la diffusion gazeuse. Les échantillons de sol sont prélevés à deux ou trois profondeurs différentes et analysés dans le laboratoire de physique des sols d'Agroscope.

Les résultats des mesures fournissent des informations sur la porosité ainsi que sur d'autres fonctions du sol, comme la disponibilité en eau. Cette dernière peut être déterminée d'après la distribution des grandeurs des pores déduite à partir de la courbe de désorption (courbe pF) (cf. Figure 11). Plus la valeur de pF est élevée, plus l'eau est fortement liée dans le sol - et plus la force de succion est élevée. Celle-ci exprime la force nécessaire pour retirer l'eau des pores. Une plage de force de succion supérieure à pF 4,2 est caractéristique des pores de petite taille ; l'eau y est fortement liée. Les pores de grande taille (zone inférieure à pF 1,8) ne peuvent pas retenir l'eau et sont généralement remplis d'air. Les racines ne prélèvent donc que la partie d'eau liée aux pores du sol située dans la plage de force de succion de pF 1,8 à 4,2. À l'étape d'évaluation suivante, les connaissances sur la distribution des pores peuvent être extrapolées à l'ensemble du profil. Il est ainsi possible de déterminer quelle quantité d'eau disponible pour les plantes peut être stockée dans le sol du site échantillonné.

Informations complémentaires

[Méthodes de relevé pour les paramètres physiques complémentaires](#)

[\(Methoden zur Bestimmung physikalischer Begleitparameter an Bodenproben\)](#)

Rapport (en allemand, résumé en français), Schwab & Gubler 2016.

[Fonctions de pédotransfert pour la densité apparente et la masse volumique 0-20 cm](#)

[\(Herleitung von Schätzwerten für Lagerungsdichte und Raumgewicht Feinerde: Pédotransferfunktionen für landwirtschaftlich genutzte Böden der Tiefe 0-20 cm\)](#)

Rapport (en allemand), Schwab & Gubler 2019.

[Mesures de la résistance à la pénétration : une comparaison de différentes méthodes](#)

[\(Messung des Eindringwiderstands und des Bodenwasserzustandes. Methodenvergleich verschiedener Geräte und Verfahren\)](#)

Rapport (en allemand), Schwab et al. 2018.

www.nabo.ch > [Monitoring](#) > [Études de caractéristiques physiques](#)

6 Flux de substances : les bilans complètent le prélèvement d'échantillons sur le terrain

Les sols des sites du NABO sont régulièrement échantillonnés. En outre, des informations relatives à l'exploitation sont collectées dans plus de quarante sites agricoles. À cet effet, les paysans concernés sont interrogés chaque année au sujet de l'exploitation de ces parcelles. Les données recueillies servent notamment à déduire des volumes de flux de substances nutritives et de polluants. Ces analyses de flux permettent de déterminer les causes des changements de concentration mesurés dans le sol et de faire des prévisions sur les évolutions futures à l'aide de scénarios d'exploitation. Il est ainsi possible d'évaluer l'efficacité de différentes mesures visant à prévenir l'accumulation de polluants dans le sol. Il s'agit d'une base importante pour une protection des sols orientée vers la prévention. Les bilans des flux de substances permettent de mieux évaluer l'évolution future des sols.

Outre les données pédologiques mesurées, l'Observatoire national des sols NABO recueille des informations supplémentaires au sujet de sites sélectionnés. Ce monitoring indirect comprend une enquête sur l'exploitation de 46 sites agricoles du NABO (état actuel). Son objectif est d'estimer les flux de substances nutritives et de polluants et d'évaluer ainsi de manière approfondie l'évolution de l'état des sols (Gross et al. 2021a). Pour ce faire, les exploitants des parcelles sélectionnées sont régulièrement interrogés au sujet des cultures (semences et récoltes), de l'utilisation de matières auxiliaires de l'agriculture (engrais et produits phytosanitaires) ainsi que du travail du sol (Gross et al. 2021b). Ces données permettent ensuite d'estimer quelles quantités de substances nutritives et de polluants parviennent dans le sol à travers les engrais recyclés et les produits phytosanitaires, et quelles quantités sont retirées par les récoltes (Figure 12).

Les sous-chapitre suivants résument les résultats du dernier rapport sur les flux de substances (Gross et al. 2021a). Les résultats du monitoring indirect sont disponibles pour la période de 1985 à 2017 ; ils se concentrent sur les substances nutritives azote (N), phosphore (P) et potassium (K), et sur les métaux lourds cuivre (Cu), zinc (Zn), cadmium (Cd) et uranium (U). Les flux de substances sont présentés sous forme de bilans de surface avec les apports et exports annuels de substances nutritives et de métaux lourds. Les flux nets des différentes parcelles sont particulièrement intéressants : s'ils sont positifs, la quantité apportée est plus importante que celle exportée. Les flux nets négatifs indiquent le rapport inverse.

Pour les bilans de surface du cuivre, du zinc et du cadmium, les dépôts atmosphériques sont également pris en compte. Ils sont estimés sur la base des données du réseau national d'observation des polluants atmosphériques (NABEL) (OFEV et Empa 2016).



Figure 12: Les données d'exploitation saisies comprennent les apports de matières auxiliaires de l'agriculture ainsi que les quantités récoltées, par exemple lors de la fauche d'une prairie.

6.1 Des excédents parfois marqués de cuivre et de zinc

Des données relatives à l'exploitation agricole sont disponibles pour 46 sites. Les bilans de surface estimés pour ces sites montrent les résultats suivants : les flux nets du cuivre et du zinc fluctuent au fil des années, mais ne diminuent pas (cf. Figure 13). Sur 10 à 30 % des parcelles, ils sont élevés ou très élevés (cf. Figure 13 : indiqués respectivement en orange et en rouge). Le cuivre et le zinc parviennent dans le sol principalement avec les engrais de ferme. La corrélation entre nombre d'animaux de rente rapporté à la surface agricole, et quantité d'engrais de ferme épandue, peut être qualifiée de significative (Gross et al. 2021a).

Depuis la fin des années 1980 et jusqu'au milieu des années 1990, les flux nets de cadmium ont aussi affiché un niveau élevé à très élevé sur une proportion pouvant atteindre 30 % des parcelles. Mais depuis lors, ils ont nettement diminué dans de nombreuses parcelles, car l'utilisation d'engrais minéraux phosphorés en grandes cultures a baissé dans les années 1990. La reconversion d'exploitations agricoles à la production intégrée (IP) et l'introduction des prestations écologiques requises (PER) sont probablement à l'origine de ce recul. La diminution des apports de cadmium s'explique peut-être aussi par un recul des dépôts atmosphériques de ce métal lourd dans le sol.

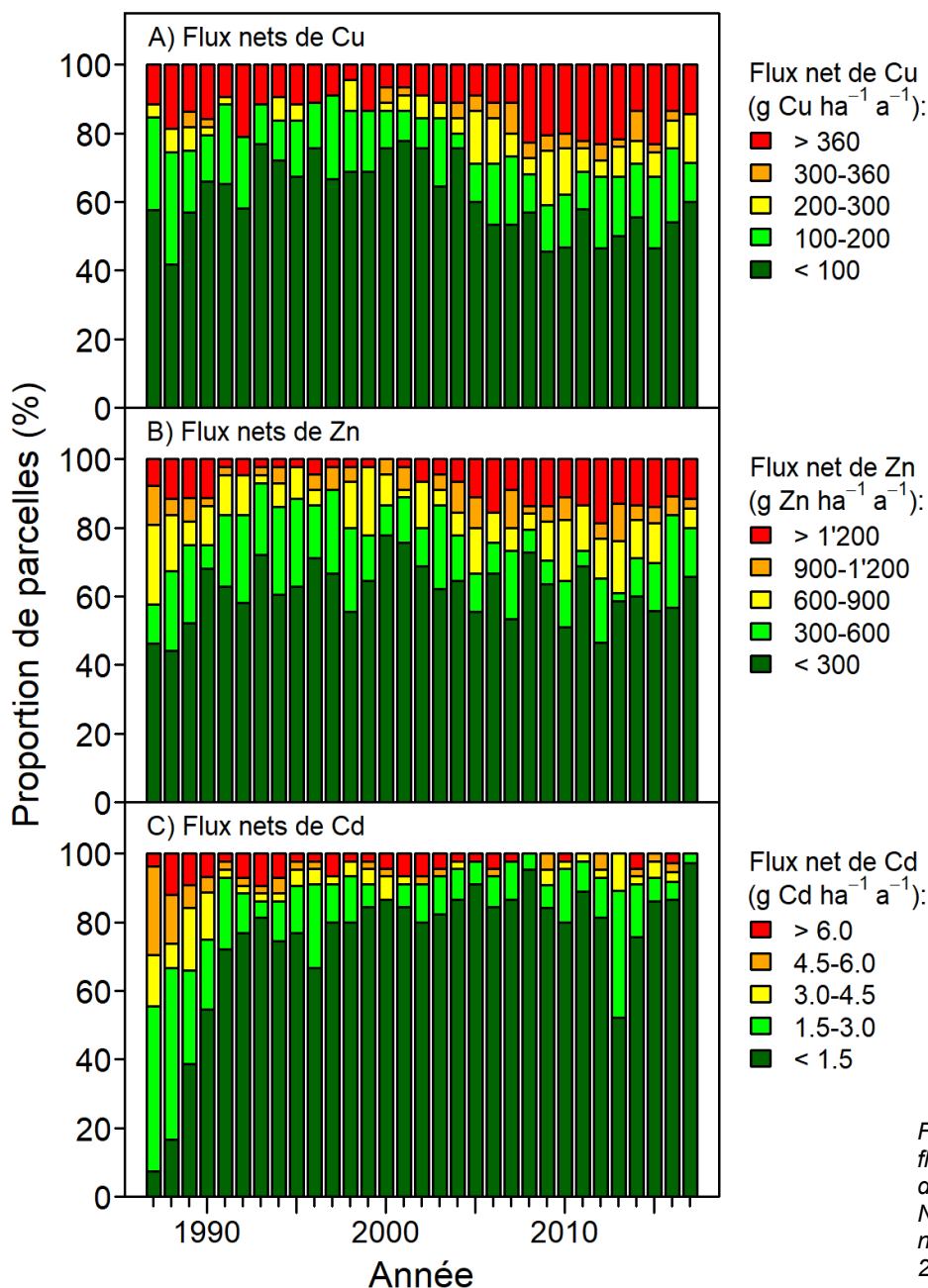


Figure 13: Évolution dans le temps des flux nets de cuivre (Cu), de zinc (Zn) et de cadmium (Cd) sur les parcelles du NABO ($n = 39-46$); moyennes des flux nets annuels pour la période de 1987 à 2017.

La Suisse ne dispose pas encore de base d'évaluation des apports de métaux lourds dans un sol. L'Allemagne par contre fixe des charges limites dans son ordonnance sur la protection des sols et sur les sites pollués (Bodenschutz- und Altlastenverordnung BBodSchV 1999, annexe 2, n° 5 : « zulässige zusätzliche jährliche Frachten an Schadstoffen über alle Wirkungspfade »), qui peuvent être utilisées en Suisse comme référence pour les flux nets très élevés. La comparaison des bilans de surface du NABO avec les valeurs allemandes permet de classer les flux nets des sols suisses en charges faibles et plus importantes (cf. Figure 13). Elle ne suffit toutefois pas pour déduire la façon dont la fertilité du sol sera influencée à long terme. Ce genre d'évaluation nécessite des calculs supplémentaires ; il faut notamment convertir les flux nets du bilan par parcelle en taux d'accumulation théorique des métaux lourds. Ces taux peuvent ensuite être comparés avec les valeurs indicatives pour la couche supérieure du sol de l'ordonnance nationale sur les atteintes portées aux sols (OSol, 1998, Gross et al. 2021a).

Les taux d'accumulation sont toujours calculés pour une décennie, ceci afin d'égaliser les fluctuations annuelles, et pour pouvoir évaluer grossièrement l'accumulation à long terme des substances. Ils fournissent des indications sur les substances et sur les sols dont l'évolution à long terme est problématique. Ils mettent également en évidence les principaux facteurs d'influence à prendre en considération (cf. description détaillée au sous-chapitre 6.2).

6.2 Principales sources d'apport : les engrais de ferme et les produits phytosanitaires

Un constat important des données des mesures du monitoring direct : les concentrations de cuivre et de zinc ont augmenté au cours des dernières décennies sur de nombreuses parcelles de cultures herbagères intensives et de grandes cultures (cf. point 8.3, Figure 20). Les taux d'accumulation calculés sur la base du monitoring indirect confirment la corrélation entre exploitation du sol et concentrations de métaux lourds dans la couche supérieure du sol. Dans six parcelles d'herbages et de grandes cultures, les taux d'augmentation se situaient entre 1 et 5 % de la valeur indicative de l'OSol. Dans les deux types d'exploitation, les quantités plus élevées de cuivre et de zinc introduites sont principalement imputables aux engrais de ferme (cf. Figure 14). Ces métaux lourds sont des éléments traces élémentaires que l'on trouve dans les aliments pour animaux d'élevage (Agroscope 2016, 2021). Comme ils sont en grande partie éliminés par les animaux (Schultheiss et al. 2004), ils finissent par aboutir dans le sol via les engrais de ferme. Les fluctuations des flux nets de cuivre et de zinc observables dans la Figure 13 peuvent ainsi être expliquées en grande partie par la variabilité des apports d'engrais de ferme sur les parcelles d'herbages (Gross et al. 2021a).

D'une manière générale, le résultat montre que les exploitations comptant un nombre relativement élevé d'animaux par surface utile épandent plus d'engrais de ferme par surface et par année. En principe, cette utilisation est compatible avec une agriculture durable : les engrais de ferme de l'exploitation sont très importants pour l'approvisionnement en substances nutritives des plantes cultivées, et ils bouclent le cycle des substances. Cependant, une fumure trop intensive peut entraîner une augmentation excessive des apports de cuivre et de zinc (Gross et al. 2021a). Il en résulte au fil des années des excédents notables de ces deux métaux lourds sur les parcelles de cultures herbagères intensives.

En viticulture, il faut s'attendre à une accumulation plus marquée de cuivre. Les taux d'accumulation sur trois parcelles de vigne atteignent effectivement 5 à 15 % de la valeur indicative de l'OSol. Les taux élevés, toujours interprétés sur une période d'une décennie, sont ici principalement liés à l'utilisation de produits phytosanitaires (Figure 14). Le monitoring direct de ces trois parcelles viticoles aboutit au même constat : les concentrations mesurées de cuivre sont nettement supérieures à la valeur indicative de l'OSol. L'échantillonnage de ces sols montre toutefois que les concentrations élevées ne résultent pas seulement de l'exploitation récente, mais sont aussi dues à l'utilisation pendant des années de produits phytosanitaires contenant du cuivre.

Les engrais minéraux phosphorés peuvent contenir du cadmium et de l'uranium. Cependant, nos connaissances sur la teneur en ces métaux lourds des engrais disponibles dans le commerce sont très lacunaires. Deux campagnes de contrôle des engrais (OFAG 2015, Canton de Berne 2021) ont montré que de nombreux engrais phosphorés ne respectaient pas les valeurs limites en vigueur pour le cadmium. Une amélioration a certes été observée au cours des dernières années. Mais selon les résultats les plus récents des campagnes de mesure, 16 % des engrais minéraux utilisés contenaient trop de cadmium. Cela dit, le cadmium dans le sol peut aussi provenir d'autres sources, notamment de retombées atmosphériques (cf. Figure 14) et de l'épandage de boues d'épuration non traitées, en tout cas jusqu'à l'interdiction d'épandage entrée en vigueur il y a 15 ans.

Depuis la fin des années 1980, l'utilisation d'engrais minéraux phosphorés dans les grandes cultures a diminué, très probablement à la suite de la reconversion de nombreuses exploitations agricoles à la production intégrée (PI) et de l'introduction des prestations écologiques requises (PER), dont les prescriptions impliquent un bilan de fumure équilibré au niveau de l'exploitation. Les dépôts atmosphériques aussi ont diminué depuis le milieu des années 1990, ce qui explique que le nombre de parcelles présentant des flux nets de cadmium élevés ou très élevés a également reculé dans le réseau de mesure NABO (cf. Figure 13).

Le monitoring NABO de ces deux dernières décennies montre ainsi que les apports et exports de cadmium sont pratiquement équilibrés dans de nombreux sites (cf. Figure 13 : apports de cadmium < 1.5 g/ha /a), et basculent même légèrement dans le négatif sur quelques parcelles. Suivant la parcelle et la charge de fond géogène, il convient néanmoins d'évaluer de manière critique les apports supplémentaires de cadmium.

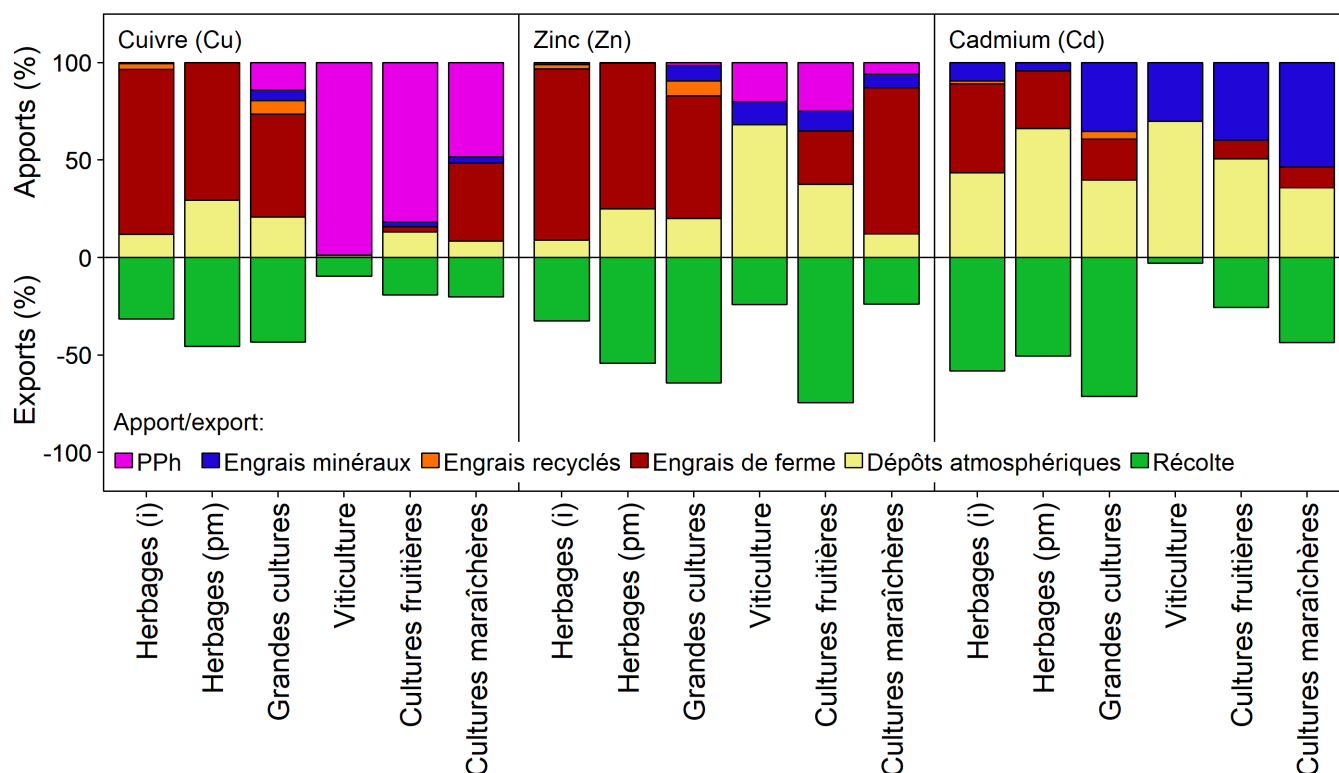


Figure 14: Apports et exports de cuivre (à gauche), de zinc (au centre) et de cadmium (à droite) par type d'utilisation du sol pour la période de 1985-2017 (moyenne par utilisation du sol et en pour cent des apports totaux ; herbages exploités de manière intensive (i) et peu à moyennement intensive (pmi), PPh = produits phytosanitaires).

Informations complémentaires

[Bilans des flux de substances pour les parcelles de l'Observatoire national des sols. Substances nutritives et métaux lourds 1985-2017. \(Stoffbilanzen für Parzellen der Nationalen Bodenbeobachtung.\)](#)

Rapport (en allemand, résumé en français), Gross et al. 2021a.

[Prélèvement des données d'exploitation pour les parcelles de l'Observatoire national des sols \(Erfassung der Bewirtschaftungsdaten im Messnetz der Nationalen Bodenbeobachtung\)](#)

Rapport (en allemand, résumé en français), Gross et al. 2021b.

www.nabo.ch > [Monitoring](#) >

[De la collecte de données d'exploitation à la détermination de flux de substances](#)

7 Engrais de ferme : des analyses améliorent les bilans des flux de substances

Une grande partie des substances nutritives, mais aussi certains polluants parviennent dans le sol avec le lisier et le fumier. Comme la composition des engrais de ferme est très hétérogène, les quantités de substances effectivement introduites dans les différents sites sont difficiles à évaluer. C'est pourquoi l'Observatoire national des sols NABO a déjà mené deux campagnes de mesures visant à analyser plus précisément les engrais de ferme. Cet échantillonnage effectué pour les sites du NABO a permis d'améliorer les données de base destinées aux bilans de substances.

Les bilans de surface décrits au chapitre 6 (« Flux de substances : les bilans complètent le prélèvement d'échantillons sur le terrain ») comportent certaines incertitudes. Les données sur les engrais de ferme (cf. Figure 15), les engrais minéraux, les engrais recyclés, les produits phytosanitaires et les récoltes utilisées pour calculer les quantités apportées et exportées sont souvent inexactes. La composition des engrais est très variable naturellement, tout comme la quantité épandue. La façon dont ces incertitudes influent sur un bilan de substances a été analysée au moyen d'une méthode stochastique (Keller et al. 2005, Gross et al. 2021a). L'analyse de l'incertitude s'est appuyée sur les moyennes, mais aussi sur l'ensemble des plages de valeurs et sur les distributions statistiques des concentrations respectives de substances. La qualité des données d'exploitation est également prise en compte. Ainsi, certaines exploitations agricoles sont interrogées en principe chaque année sur leurs utilisations d'engrais et de produits phytosanitaires sur les sites du NABO (fréquence et quantités). De son côté, le NABO se donne pour tâche d'évaluer et de vérifier la qualité de ces données déjà pendant leur saisie. Cela montre combien il est important de disposer d'hypothèses proches de la réalité, par exemple sur la composition des engrais de ferme, pour établir les bilans de surface (Gross et al. 2021a). La Figure 16 l'illustre à titre d'exemple pour les parcelles d'herbages.



Figure 15: Une description la plus précise possible des engrais de ferme épandus (quantité, concentrations en substances nutritives et en métaux lourds) est important pour réduire au maximum les incertitudes dans les bilans de substances.

Compte tenu du fait que les exploitations agricoles ne peuvent fournir que des indications quantitatives sur les engrais et les produits phytosanitaires utilisés et sur le produit des récoltes, il est important d'en étudier plus précisément la composition. Les concentrations de substances nutritives, d'éléments traces et de polluants dans les engrais de ferme sont déterminées sur la base de recherches bibliographiques et d'analyses réalisées par le NABO. Il en ressort que de nombreux facteurs influencent le calcul des flux de substances. D'une manière générale, on peut

néanmoins faire le constat suivant : la quantité de substances nutritives et d'éléments traces parvenant dans le sol dépend en grande partie de l'intensité d'exploitation, de l'élevage, du fourrage utilisé, des additifs destinés à l'alimentation animale ainsi que de l'infrastructure de l'exploitation agricole (Menzi et Kessler 1998, Menzi et al. 1999, Schultheiss et al. 2004, Keller et al. 2005). Dans une ferme, même les eaux usées domestiques peuvent se révéler pertinentes, car elles servent souvent à diluer l'engrais de ferme (Gross et al. 2021a,b). Cela montre tout l'intérêt d'un échantillonnage périodique des engrais de ferme spécifiquement utilisés par les exploitations. C'est seulement ainsi que le NABO peut limiter au maximum les incertitudes d'un bilan de substances et fournir des informations fidèles à la parcelle sur les apports de substances nutritives et de polluants dans le sol.

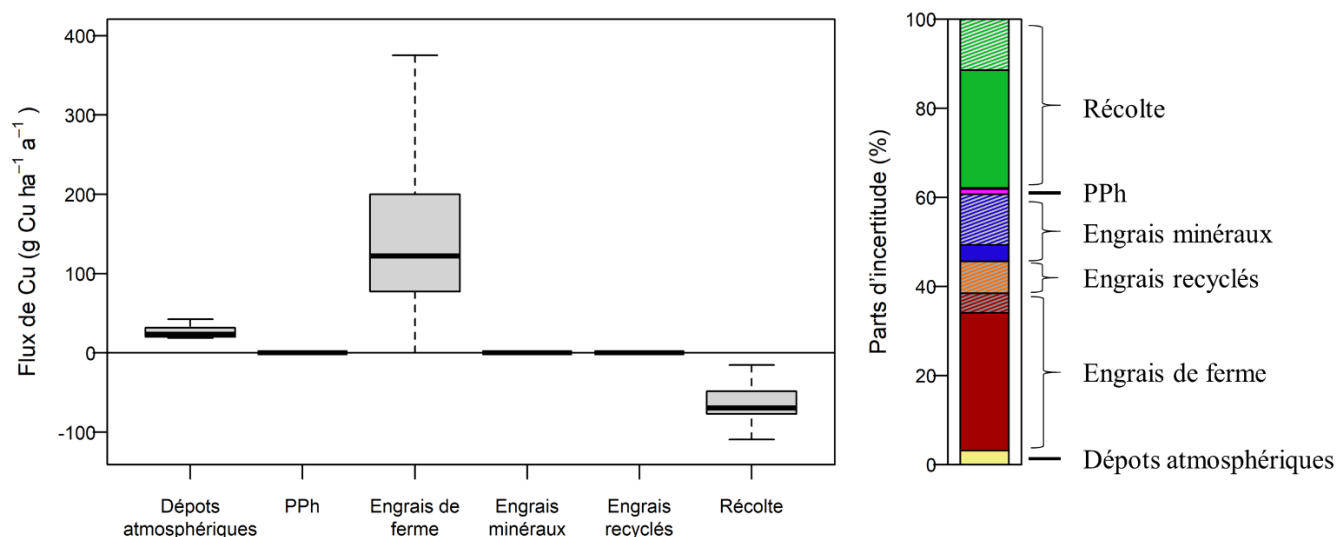


Figure 16: Boîtes à moustaches (boxplots) des apports et exports de cuivre (à gauche) sur 12 parcelles d'herbages de 1985 à 2017 (sans valeurs extrêmes). L'analyse de l'incertitude (à droite) montre les incertitudes relatives aux quantités (zones hachurées) et celles relatives aux données sur les concentrations (zones non hachurées).

7.1 Deux campagnes de mesures du NABO confirment l'importante variabilité

Depuis 2006, le NABO étudie les engrais de ferme d'exploitations agricoles sélectionnées où se trouve un site de mesure. L'engrais de ferme est principalement constitué de lisier et de fumier de bovins et de porcs ; il est en partie mélangé et épandu comme lisier mélangé. Les analyses sont menées à intervalles irréguliers selon la méthode de Menzi et Kessler (1998) et consistent ainsi à mesurer les concentrations de la matière sèche, des substances nutritives et des métaux lourds (Gross et al. 2021b). Le Tableau 1 présente la teneur en matière sèche ainsi que les concentrations de phosphore, de cuivre et de zinc dans le lisier bovin et porcin et dans le lisier mélangé. Les valeurs proviennent de 14 exploitations du NABO échantillonnées en 2006, et de 30 autres échantillonnées en 2018. Le fumier n'a fait l'objet que d'analyses ponctuelles, dont les résultats ne sont pas présentés dans ce texte.

Comme on pouvait s'y attendre, les valeurs mesurées pour la matière sèche et les métaux lourds contenus dans les engrais de ferme montrent une grande dispersion. Ainsi, un kg de matière sèche (kg_{ms}) de lisier bovin contenait en moyenne respectivement 29 et 41 mg de cuivre (Cu) selon la campagne de mesure (2006, resp. 2018), la fourchette allant de 22 à 101 mg de Cu/kg_{ms} (cf. Tableau 1).

Les valeurs mesurées des teneurs en substances nutritives et en métaux lourds sont comparables à celles de précédentes études portant sur les exploitations agricoles suisses. Il y a plus de 20 ans, Menzi et Kessler (1998) ont analysé le lisier de vaches laitières. La médiane de ces 48 échantillons était de 37 mg/kg_{ms} pour le cuivre, et de 162 mg/kg_{ms} pour le zinc. Le lisier de porcs d'élevage a été évalué à partir de 191 échantillons ; la médiane était de 115 mg/kg_{ms} pour le cuivre, et de 747 mg/kg_{ms} pour le zinc. Cette étude comprend également des échantillons provenant de quelques exploitations agricoles du réseau de mesure NABO. La teneur des engrais de ferme en cuivre et en zinc est influencée par l'élevage et l'utilisation d'additifs destinés à l'alimentation animale, ce qui explique qu'elle est en partie moins élevée que dans les pays pratiquant une agriculture plus intensive (Schultheiss et al. 2004, Keller et al. 2005).

Tableau 1: Concentrations de matière sèche (ms), de phosphore (P), de cuivre (Cu) et de zinc (Zn) dans le lisier d'exploitations agricoles du réseau de mesure du NABO pour 2006 (14 exploitations) et 2018 (30 exploitations) ; un échantillon (n) correspond à la moyenne de trois à quatre sous-échantillons par fosse à lisier (ET = écart type).

Type	Valeur	2006				2018			
		MS (g _{ms} kg ⁻¹)	P (g kg _{ms} ⁻¹)	Cu (mg kg _{ms} ⁻¹)	Zn (mg kg _{ms} ⁻¹)	MS (g _{ms} kg ⁻¹)	P (g kg _{ms} ⁻¹)	Cu (mg kg _{ms} ⁻¹)	Zn (mg kg _{ms} ⁻¹)
Lisier bovin	n	7	7	7	7	22	22	22	22
	Minimum	3.8	4.8	21.7	89	0.8	3.8	20.8	84
	Maximum	7.7	9.9	40.3	513	9.5	12.7	100.9	426
	Médiane	5.0	7.6	27.7	108	4.3	7.8	37.1	178
	Moyenne	5.2	7.3	28.5	176	4.3	7.9	41.1	188
	ET	1.3	1.8	6.9	152	2.4	2.4	17.5	83
Lisier porcin	n	6	6	6	6	11	11	11	11
	Minimum	1.0	13.0	72.8	512	0.8	9.9	71.6	309
	Maximum	8.0	22.7	193.8	3'463	12.3	24.3	225.3	979
	Médiane	3.3	18.5	114.2	868	3.2	14.2	122.0	557
	Moyenne	3.6	18.7	119.9	1'286	4.1	15.4	119.6	615
	ET	2.5	3.7	40.0	1'093	3.6	4.2	43.2	205
Lisier mélangé	n	7	7	7	7	5	5	5	5
	Minimum	2.0	4.6	15.6	120	2.2	7.7	27.1	149
	Maximum	5.2	13.2	147.0	686	5.1	22.8	80.7	516
	Médiane	2.5	9.8	56.0	321	3.4	10.3	56.8	354
	Moyenne	3.1	9.1	63.4	326	3.8	12.1	54.9	329
	ET	1.4	3.2	43.0	217	1.2	6.1	23.2	174

Informations complémentaires

[Bilans des flux de substances pour les parcelles de l'Observatoire national des sols. Substances nutritives et métaux lourds 1985-2017. \(Stoffbilanzen für Parzellen der Nationalen Bodenbeobachtung.\)](#)

Rapport (en allemand, résumé en français), Gross et al. 2021.

[Prélèvement des données d'exploitation pour les parcelles de l'Observatoire national des sols \(Erfassung der Bewirtschaftungsdaten im Messnetz der Nationalen Bodenbeobachtung\)](#)

Rapport (en allemand, résumé en français), Gross et al. 2021.

www.nabo.ch > [Monitoring](#) >

[De la collecte de données d'exploitation à la détermination de flux de substances](#)

8 Métaux lourds : de nouveaux relevés confirment des tendances positives et négatives

La pollution aux métaux lourds est étudiée depuis le début de l'observation des sols, il y a plus de trente ans. Les métaux lourds peuvent être d'importantes substances nutritives, mais à trop forte dose, ils sont nuisibles pour les plantes et les animaux. Entre-temps, six campagnes de mesures du NABO ont été achevées, et les résultats d'une septième série sont partiellement disponibles. Les connaissances les plus récentes apportent de bonnes et de mauvaises nouvelles : les teneurs en plomb et en mercure continuent de baisser, alors que celles du cuivre et du zinc augmentent.

Contrairement à ce qu'on pourrait croire, les métaux lourds ne sont pas forcément dangereux. Certains sont des substances nutritives importantes et indispensables en petites quantités à la faune et à la flore. Cependant, à des concentrations excessives, ces éléments peuvent porter atteinte à l'écosystème et nuire aux plantes, aux animaux et finalement aux êtres humains. Quelques métaux lourds parviennent dans le sol principalement depuis des sources géogènes. Ainsi, l'altération de la roche-mère assure les apports naturels de chrome (Cr), de nickel (Ni) et de cobalt (Co). Selon le monitoring du NABO, leurs concentrations dans les sites étudiés restent stables. Par contre, les métaux provenant principalement de sources anthropiques révèlent des changements notables. Le plomb (Pb) et le mercure (Hg) parviennent dans le sol avec les retombées atmosphériques. Les mesures de protection de l'air contribuent toutefois à réduire sensiblement ces dépôts. D'autres métaux lourds, comme le cuivre (Cu) et le zinc (Zn), sont introduits dans les sols avec les engrais, les produits phytosanitaires et d'autres matières auxiliaires de l'agriculture. Ces apports sont en partie en nette augmentation.

L'Observatoire national des sols NABO a réalisé cinq cycles de relevés sur la période de 1985 à 2009. Les analyses ont porté sur les métaux lourds pour lesquels l'ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol) fixe une valeur indicative. Les évaluations ont montré que l'utilisation du sol et le mode d'exploitation étaient des facteurs importants pour l'évolution de la teneur en métaux lourds (Gubler et al. 2015). Entre-temps, l'échantillonnage dans le réseau de mesure du NABO s'est poursuivi avec deux cycles supplémentaires. Les sous-chapitres ci-dessous présentent les résultats de la sixième campagne, menée de 2010 à 2014 ; ils sont complétés en partie par la présentation de premières analyses du septième cycle, qui proviennent d'un échantillonnage réalisé entre 2015 et 2019 des sites du monitoring.

Les mesures des métaux lourds ont été optimisées par rapport aux précédents relevés. Désormais, seuls les sites exploités par l'agriculture ou se trouvant dans un parc urbain sont analysés. Les sites forestiers ne le sont plus, car les faibles dépôts de métaux lourds ne laissent pas présager d'évolution négative à l'heure actuelle. Au besoin, des échantillons de sol archivés sont disponibles pour ces sites.

Pour que l'évolution depuis le milieu des années 1980 puisse être décrite avec des séries de données adéquates et cohérentes, le prélèvement, la préparation et l'analyse des échantillons de sol respectent des normes très strictes. Maintenir le niveau de la méthodologie du relevé est indispensable pour pouvoir comparer des analyses de métaux lourds provenant de différentes périodes de mesures et référencer les résultats en conséquence (Meuli et al. 2014, Gubler et al. 2015).

8.1 Plomb et mercure : les teneurs dans le sol continuent de reculer

Les retombées atmosphériques sont la principale source d'apports de plomb et de mercure dans le sol (Keller et al. 2005). Après cinq cycles de relevés, le monitoring du NABO a mis en évidence à chacun de ces cycles une baisse des teneurs dans le sol. Les deux échantillonnages suivants ont confirmé cette tendance. Les concentrations dans la couche supérieure du sol sont majoritairement en recul (cf. Figure 17 et Tableau 2). Elles sont peu influencées par les différentes utilisations du sol. Quelques sites de cultures spéciales présentent partiellement un écart vers le haut. Cependant, des investigations plus approfondies montrent que l'on ne peut pas en déduire de tendances à long terme indiquant une accumulation dans le sol. La variabilité des données du NABO résulte essentiellement d'influences spécifiques aux sites.

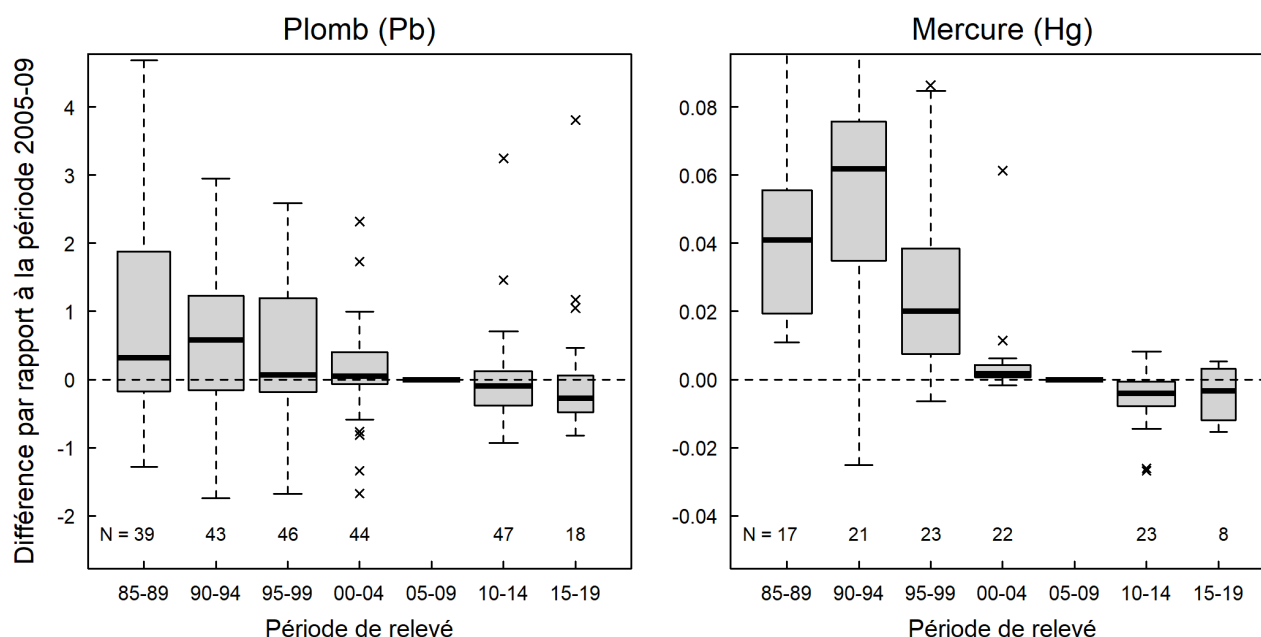


Figure 17: La boîtes à moustaches illustrant les changements de concentrations (mg/kg) du plomb (Pb) et du mercure (Hg) dans la couche supérieure du sol (0-20 cm) sur les sites agricoles du NABO (grandes cultures, herbages, cultures spéciales) et sur les parcelles de deux parcs urbains. La base de données est le changement (absolu) des dernières valeurs mesurées pour les sites par rapport au cinquième cycle de relevé (2005 - 2009).

Tableau 2: Les teneurs en plomb (Pb) et en mercure (Hg) dans les sites du NABO selon l'utilisation du sol ; sont indiquées les teneurs dans la couche supérieure du sol (0 - 20 cm) tirées du sixième relevé (2010 - 2014) et leur changement par rapport au cinquième relevé (2005 - 2009) ; n : nombre de sites ; Méd. : médiane ; Moy. : moyenne (pour le Hg, seules les données de quelques sites sont disponibles, car les teneurs sont partiellement inférieures au seuil de quantification.)

		n	Teneur (mg/kg) du sixième relevé			Changement (mg/kg) par rapport au cinquième relevé		
			Méd.	Moy.	(min., max.)	Méd.	Moy.	(min., max.)
Pb	Grandes cultures	25	19.9	21.6	(11.0, 31.9)	-0.09	-0.06	(-0.69, +0.71)
	Cultures spéciales	9	25.4	24.7	(17.6, 34.6)	-0.01	-0.06	(-4.87, +3.25)
	Herbages	11	22.6	25.2	(14.5, 47.1)	-0.35	-0.22	(-0.93, +0.38)
	Parc urbain	2	94.7	94.7	(71.3, 118.1)	-3.10	-3.10	(-6.46, +0.26)
Hg	Grandes cultures	10	0.059	0.069	(0.022, 0.113)	-0.004	-0.005	(-0.026, +0.008)
	Cultures spéciales	2	0.166	0.166	(0.117, 0.215)	-0.001	-0.001	(-0.011, +0.008)
	Herbages	9	0.069	0.067	(0.046, 0.087)	-0.004	-0.005	(-0.015, +0.001)
	Parc urbain	2	0.290	0.290	(0.220, 0.361)	-0.014	-0.014	(-0.027, 0.000)

L'interprétation de la tendance à la baisse observée pour le plomb et le mercure s'appuie sur des informations du réseau national d'observation des polluants atmosphériques (NABEL). Celles-ci montrent que les dépôts de plomb transportés par les particules fines sont aujourd'hui 50 fois plus bas qu'il y a 30 ans en arrière (OFEV, 2019). Les données sur la qualité de l'air et les retombées atmosphériques confirment l'hypothèse selon laquelle la diminution de la pollution de l'air contribue aussi à réduire les dépôts de polluants dans le sol. La poursuite du recul des taux de dépôt est également attestée par le monitoring national des mousses. Ainsi, la teneur moyenne en mercure des mousses a diminué de 11 % entre 2010 et 2015 (OFEV, 2018). Ces résultats sont notamment le fruit des mesures de protection de l'air prises. L'interdiction de l'essence sans plomb, décidée il y a plus de deux décennies, montre également ses effets en ce qui concerne l'amélioration de la qualité de l'air comme du sol.

8.2 Cuivre et zinc : augmentation des teneurs dans le sol

Une tendance inverse s'observe pour le cuivre et le zinc. Comme le montrent les données du sixième cycle et de l'évaluation partielle du septième cycle de relevés du NABO, les teneurs dans la couche supérieure du sol continuent d'augmenter dans de nombreux sites de grandes cultures (cf. Figure 18 et Tableau 3). Le changement est bien visible : la médiane de l'augmentation s'élève à 0,09 mg/kg pour le cuivre, et atteint même 0,67 mg/kg pour le zinc. Les sols des sites d'herbages exploités de manière intensive présentent une image similaire (cf. Figure 19 et Tableau 3). Toutefois, la teneur en zinc augmente ici de façon plus marquée que celle du cuivre. Dans les sites d'herbages exploités de manière moins intensive, les teneurs en cuivre et en zinc sont en revanche à peu près stables. S'agissant des cultures spéciales maraîchères et viticoles, des hausses parfois marquées de la teneur s'observent au fil du temps (cf. Tableau 3). Mais le nombre de sites échantillonnés est tellement faible et la variabilité des valeurs des sites tellement élevée qu'il n'est pas possible d'en tirer des conclusions générales.

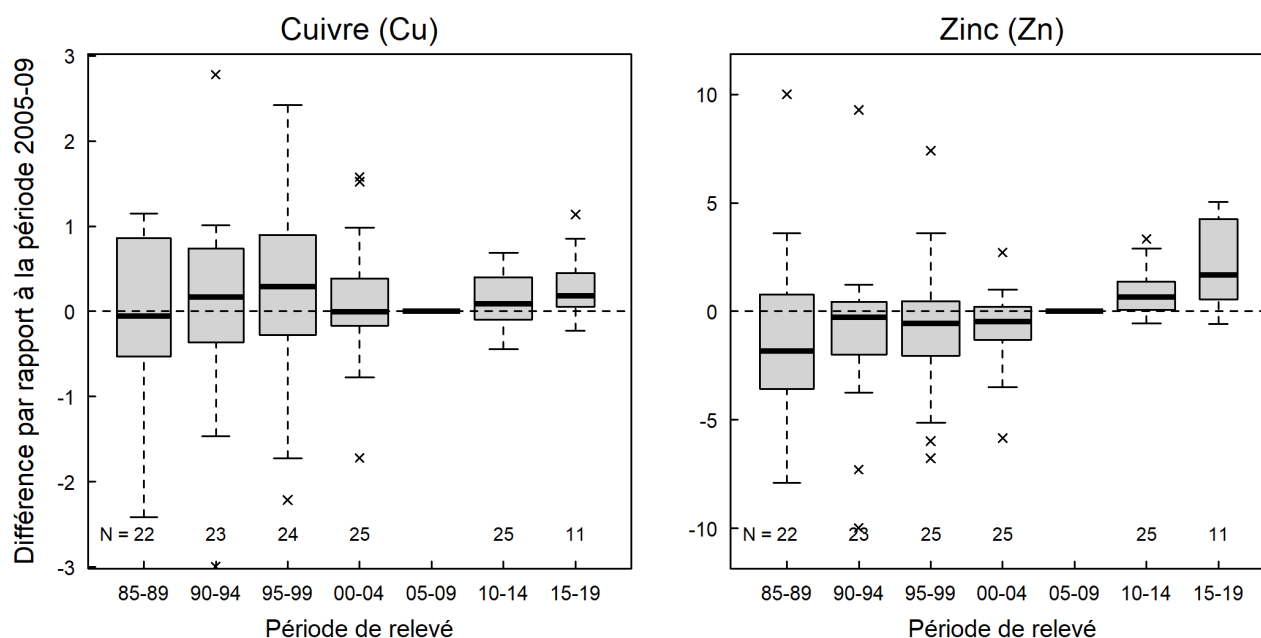


Figure 18: La boîtes à moustaches illustrant les changements de concentrations (mg/kg) pour le cuivre (Cu) et le zinc (Zn) dans la couche supérieure du sol (0-20 cm) sur les sites de grandes cultures du réseau de mesure NABO. La base de données est le changement (absolu) par site par rapport au cinquième relevé (2005 - 2009).

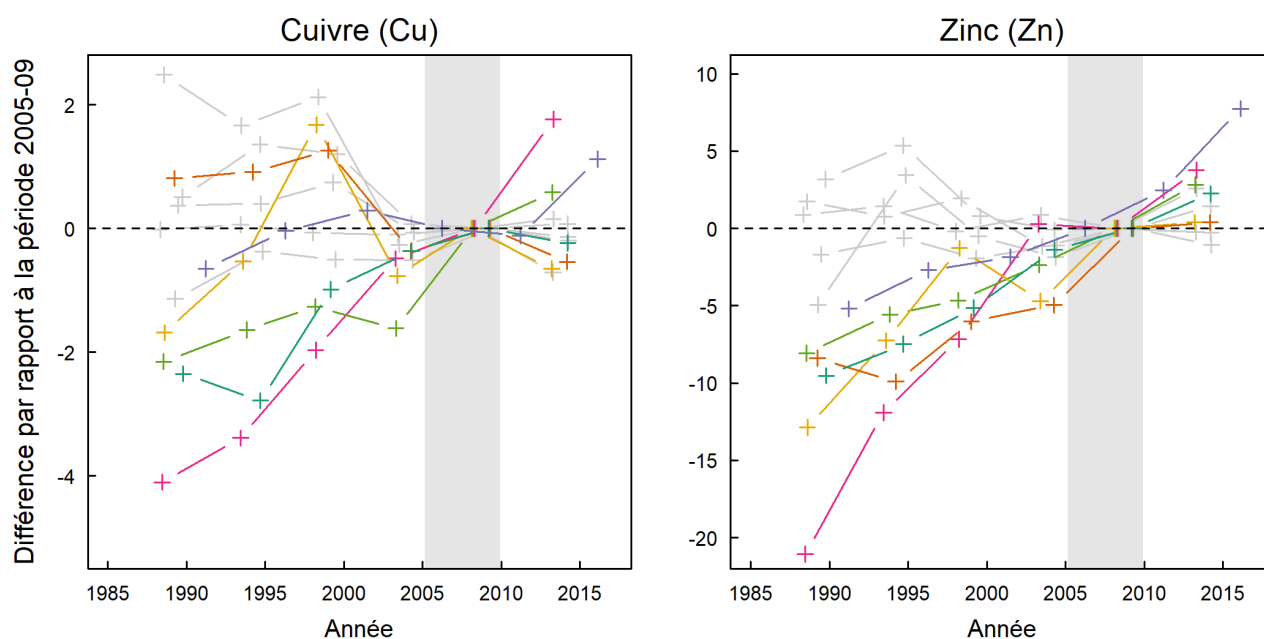


Figure 19: Évolution des concentrations (mg/kg) pour le cuivre (Cu) et le zinc (Zn) dans la couche supérieure du sol (0-20 cm) sur les sites d'herbages du réseau de mesures NABO. La figure représente le changement (absolu) par site par rapport au cinquième relevé (2005 - 2009). Les données pour les herbages exploités de manière intensive sont en couleur, celles pour les herbages exploités de manière peu intensive sont en gris.

Tableau 3: Les teneurs en plomb (Pb) et en mercure (Hg) dans les sites du NABO selon l'utilisation du sol ; sont indiquées les teneurs dans la couche supérieure du sol (0 - 20 cm) tirées du sixième relevé (2010 - 2014) et leur changement par rapport au cinquième relevé (2005 - 2009) ; n : nombre de sites ; Méd. : médiane ; Moy. : moyenne (pour le Hg, seules les données de quelques sites sont disponibles, car les teneurs sont partiellement inférieures au seuil de quantification.)

		n	Teneur (mg/kg) du sixième relevé			Changement (mg/kg) par rapport au cinquième relevé		
			Méd.	Moy.	(min., max.)	Méd.	Moy.	(min., max.)
Cu	Grandes cultures	25	22.0	23.9	(10.1, 45)	+0.09	+0.15	(-0.44, +0.69)
	Légumes	3	39.9	38.6	(32.2, 43.7)	+0.91	+1.30	(-0.11, +3.12)
	Fruits	3	26.9	40.1	(22.8, 70.6)	+2.28	+3.46	(-0.35, +8.45)
	Vigne	3	266.5	269.5	(230.2, 311.9)	+0.75	-0.70	(-10.24, +7.40)
	Herbages intensifs	6	26.6	26.3	(11.2, 40.2)	-0.18	+0.13	(-0.65, +1.76)
	Herbages peu intensifs	5	11.0	13.7	(8.3, 23.1)	-0.14	-0.16	(-0.71, +0.15)
Zn	Grandes cultures	25	50.7	58.3	(37.7, 103.7)	+0.67	+0.83	(-0.55, +3.34)
	Légumes	3	57.7	61.9	(51.2, 76.8)	+2.31	+1.87	(-0.23, +3.53)
	Fruits	3	66.9	73.1	(57, 95.6)	-0.49	+1.34	(-3.52, +8.03)
	Vigne	3	83.4	90.6	(80.5, 107.9)	+1.92	+3.25	(-0.48, +8.32)
	Herbages intensifs	6	91.7	89.2	(58.1, 111.4)	+2.36	+2.01	(+0.39, +3.77)
	Herbages peu intensifs	5	59.1	64.8	(56.1, 76.2)	-0.25	+0.48	(-1.06, +2.56)

8.3 Cuivre et zinc : d'où provient l'augmentation des apports ?

Pour commencer, un bref récapitulatif des résultats des bilans de surface calculés par le NABO dans le cadre du monitoring indirect des sites agricoles (cf. chapitre 6) : dans les herbages, le cuivre et le zinc proviennent principalement des engrais de ferme. Dans les cultures spéciales comme les cultures maraîchères, fruitières et viticoles, les sources d'apports sont variables : en général, le cuivre parvient dans le sol lors de l'utilisation de produits phytosanitaires. Le zinc peut provenir, suivant la culture spéciale et le mode d'exploitation, des produits phytosanitaires, de l'engrais de ferme ou des dépôts atmosphériques. Dans les sites de grandes cultures, ce sont les engrais de ferme et/ou les produits phytosanitaires qui constituent les principales sources d'apports. Les hausses observées des teneurs en cuivre et en zinc dans le sol résultent principalement de l'exploitation agricole. Les dépôts atmosphériques jouent un rôle secondaire du point de vue quantitatif et sont en recul ces dernières années (OFEV, 2019).

Les bilans de surface permettent également d'évaluer la façon dont évolueront en théorie les concentrations de métaux lourds dans les sols des sites du NABO. Les concentrations modélisées peuvent être comparées avec les données pédologiques mesurées. Pour les métaux lourds, les concentrations modélisées et mesurées sur les parcelles d'herbages sont étonnamment concordantes (cf. Figure 20), bien que la migration dans les couches profondes soit négligée dans les bilans de surface. La modélisation offre donc la possibilité de jeter un regard vers l'avenir : elle peut fournir des indications à l'échelle des parcelles sur l'évolution prévisible des teneurs en métaux lourds. Et en plus, cet instrument permet aussi de montrer l'évolution future pour différents scénarios, comme un changement d'exploitation ou un nouveau cadre légal ou socio-économique.

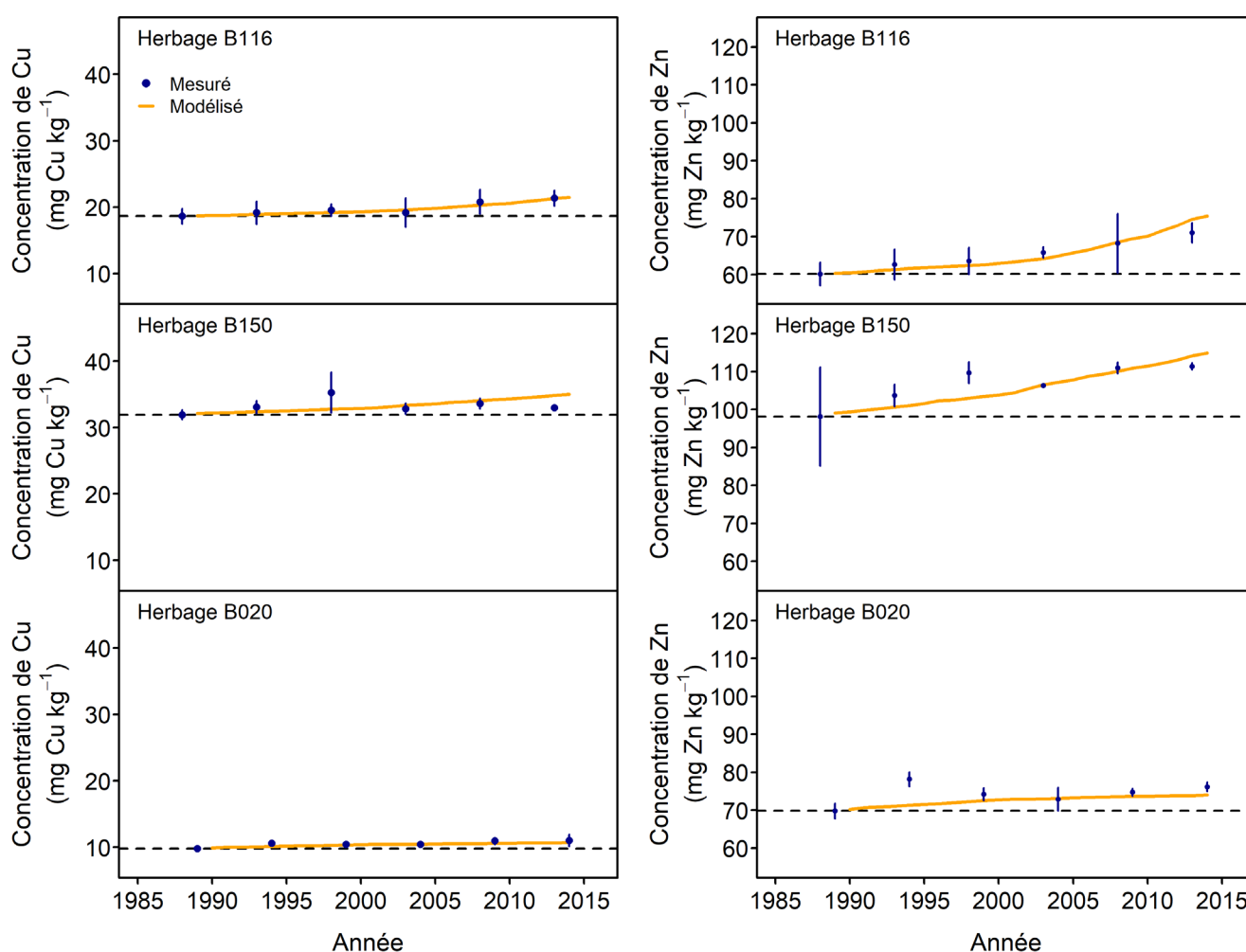


Figure 20: L'évolution des teneurs mesurées en cuivre (Cu) et en zinc (Zn) dans la couche supérieure du sol (0-20 cm) sur trois sites sélectionnés du NABO depuis le milieu des années 1980, et la comparaison avec l'évolution modélisée des bilans de surface (courbe orange).

8.4 Une conclusion après trois décennies : les métaux lourds restent importants pour l'observation des sols

Le monitoring du NABO relève depuis 36 ans les teneurs en métaux lourds dans les sols. Les résultats de l'observation présentés ci-dessus montrent que les apports de métaux lourds dans les sols restent un problème d'actualité. C'est particulièrement vrai pour les métaux lourds qui sont apportés par l'exploitation agricole et surchargent le cycle presque fermé des substances nutritives. Certes, dans la plupart des cas, les teneurs absolues mesurées respectent les valeurs indicatives légales de l'OSol. Mais l'augmentation attestée de la teneur en substances spécifiques n'en reste pas moins significative, car elle doit aussi être évaluée en fonction du site. L'agriculture n'est pratiquée de manière durable que si elle peut éviter une accumulation continue de substances dans les sols. Sinon, elle met en danger la fertilité du sol.

Ces dernières années, la Suisse et les autorités de l'UE ont pris de mesures et renforcé les limites de concentrations du zinc et du cuivre dans les aliments pour animaux. Malgré cela, le monitoring du NABO montre que le cuivre et le zinc ne cessent d'augmenter dans le sol. Ces métaux lourds sont apportés dans le sol par les engrais de ferme, mais aussi par les produits phytosanitaires. Il importe par conséquent de continuer de suivre les évolutions législatives et socio-économiques dans le domaine agricole quant à leur influence sur l'utilisation de produits contenant du cuivre et du zinc. Comme mesure de précaution supplémentaire, il conviendrait d'examiner si la Suisse pourrait fixer de propres valeurs de référence pour les charges limites, de manière analogue aux prescriptions en Allemagne.

Le monitoring des teneurs en plomb et en mercure dans le sol (à la baisse) montre par comparaison qu'il est possible de mieux protéger les sols à l'aide de mesures efficaces. Les succès obtenus dans le domaine de la protection de l'air contribuent dans une large mesure à la diminution actuelle des teneurs en plomb et en mercure dans la couche supérieure du sol. En ce sens, l'exploitation agricole devrait aussi chercher des possibilités de réduire directement les dépôts de métaux lourds dans ses sols.

Informations complémentaires

[Observatoire national des sols \(NABO\) 1985 à 2009 : État et évolution des polluants inorganiques et des paramètres associés aux sols.](#)

Rapport, Gubler et al. 2015.

[Bilans des flux de substances pour les parcelles de l'Observatoire national des sols. Substances nutritives et métaux lourds 1985-2017. \(Stoffbilanzen für Parzellen der Nationalen Bodenbeobachtung.\)](#)

Rapport (en allemand, résumé en français), Gross et al. 2021.

www.nabo.ch > [Monitoring](#) > [Études portant sur des matières](#)

9 La matière organique du sol : également importante pour la protection du climat

Si les sols tourbeux sont presque exclusivement constitués de matériel végétal mort, de nombreux sols suisses ne contiennent que quelques pour cent de matière organique. Celle-ci n'en joue pas moins un rôle déterminant pour la qualité du sol et est étudiée depuis le début par l'Observatoire national des sols NABO. D'autres disciplines environnementales découvrent à présent combien ces informations pédologiques sont importantes. Comme la matière organique du sol peut être un puits ou au contraire une source de CO_2 , le NABO collabore avec la recherche sur le climat. Les séries d'observation du sol sont intégrées dans le système national d'observation du climat ainsi que dans l'inventaire des gaz à effet de serre.

En pédologie, l'humus désigne la matière organique décomposée présente dans le sol. Cette partie du sol, issue d'organismes (plantes, organismes du sol, etc.), est constituée pour une part importante de carbone. La matière organique exerce une influence déterminante sur des processus très variés, comme le cycle des substances nutritives, le régime hydrique et la fonction de filtration du sol. La quantité et la qualité de la matière organique jouent un rôle très important dans la conservation de la fertilité du sol. La matière organique est en interaction avec des facteurs environnementaux comme le climat et d'autres propriétés du sol ; elle est aussi influencée par l'exploitation - la plantation, le travail du sol ou la fumure.

Le sol occupe une place importante dans le cycle global du carbone. Le carbone peut parvenir dans le sol à travers les résidus végétaux, les exsudats racinaires ou les déjections animales et être stocké dans la matière organique. Inversement, du carbone est libéré dans l'atmosphère sous forme de dioxyde de carbone (CO_2), ou de méthane (CH_4) en l'absence d'oxygène, lors de la décomposition de la matière organique. C'est pourquoi l'augmentation ou la diminution du carbone organique (C_{org}) présent dans le sol jouent un rôle important dans l'évolution future du réchauffement climatique.

Au fil du temps, la matière organique a pris une place prioritaire au sein du monitoring du NABO. Dès le début, la teneur en C_{org} a été systématiquement relevée en tant que paramètre complémentaire. Elle était importante pour évaluer la teneur en polluants des sites de mesure. Entre-temps, la teneur en carbone présente beaucoup d'intérêt en elle-même ; les séries temporelles du NABO permettent de suivre son évolution dans le sol jusqu'à 20 cm de profondeur depuis les années 1980. Depuis 2010, le prélèvement des échantillons inclut également les couches plus profondes (cf. chapitre 1), de sorte que le NABO peut montrer désormais l'évolution des réserves de carbone jusqu'à 75 cm de profondeur. Les résultats sont présentés et expliqués dans les sous-chapitres suivants.

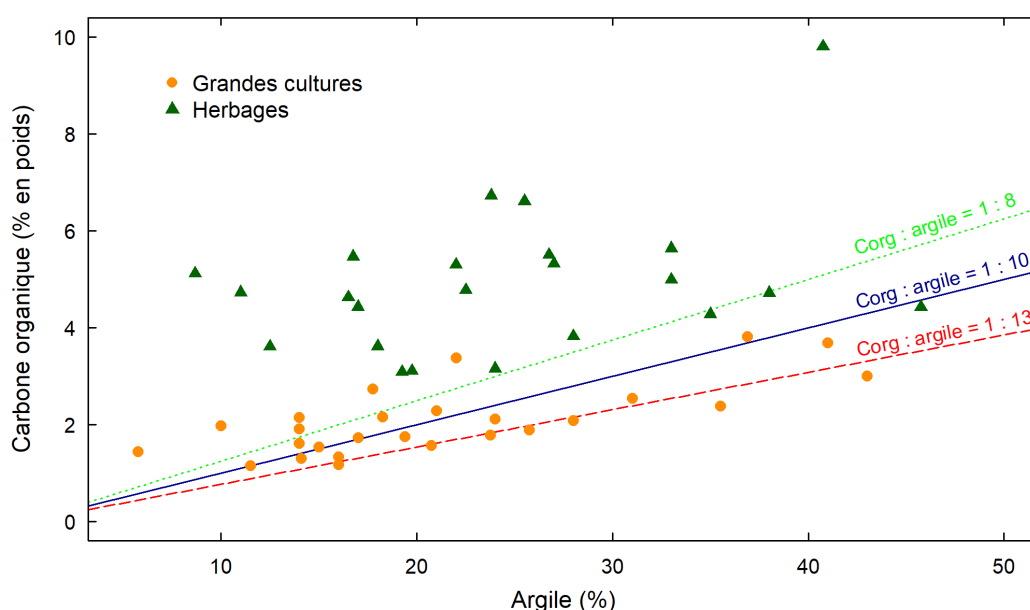


Figure 21: La teneur en carbone organique (C_{org}) de sols minéraux du réseau de mesure du NABO en fonction de la teneur en argile pour des sites de grandes cultures et d'herbages (médiane par site). Les lignes marquent les limites entre les classes selon Johannes et al. (2017).

9.1 Grandes cultures : forte variabilité mais évolution générale stable

La teneur en carbone des sites de grandes cultures du NABO se révèle très variable, tant dans la comparaison entre les sites que dans son évolution dans le temps. Les 30 sols minéraux suivis présentent des teneurs en C_{org} d'un peu moins de 1,2 jusqu'à 4 % en poids (médiane : 2 % en poids). La part de C_{org} stockée dans le sol augmente notamment avec la teneur en argile. C'est pourquoi les pédologues utilisent une méthode d'appréciation consistant à évaluer les teneurs en C_{org} en fonction de la teneur en argile à travers le calcul du rapport C_{org} :argile. Johannes et al. (2017) considèrent qu'un rapport égal ou supérieur à 1:10 est l'indicateur d'une bonne structure du sol du point de

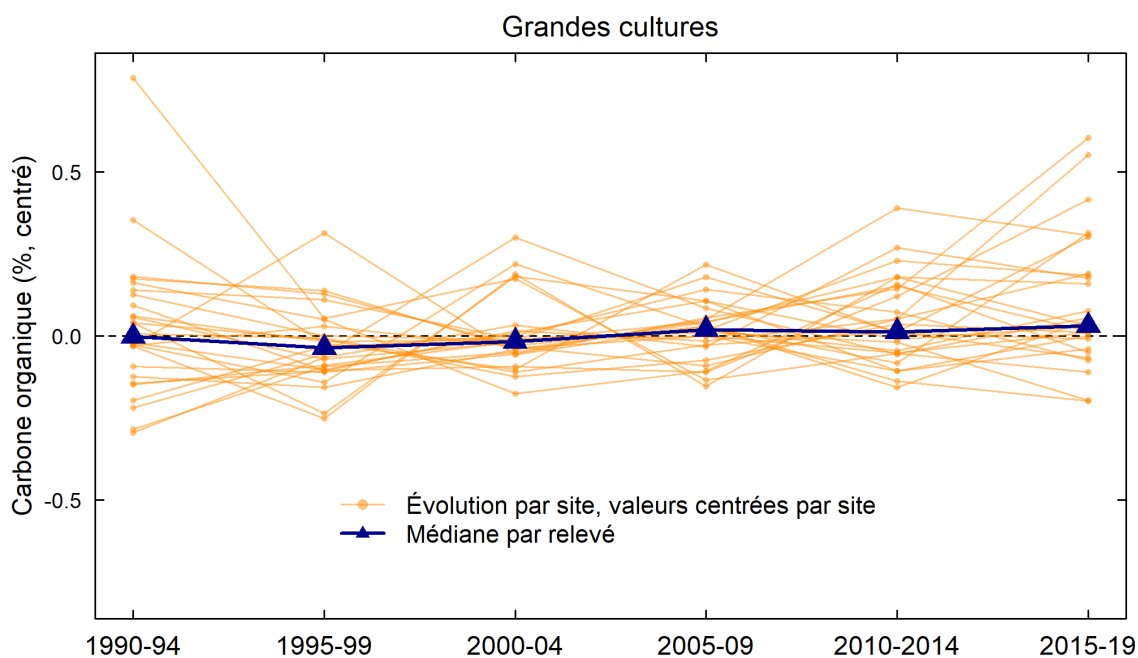


Figure 22: Évolution temporelle de la teneur en carbone organique (C_{org}) pour les sols minéraux de grandes cultures (0 - 20 cm de profondeur) dans le réseau de mesure du NABO sur la période de 1990 à 2019 (deuxième à septième relevés). Le graphique présente l'évolution centrée par site (cf. annexe 16.2) ainsi que la médiane de tous les sites.

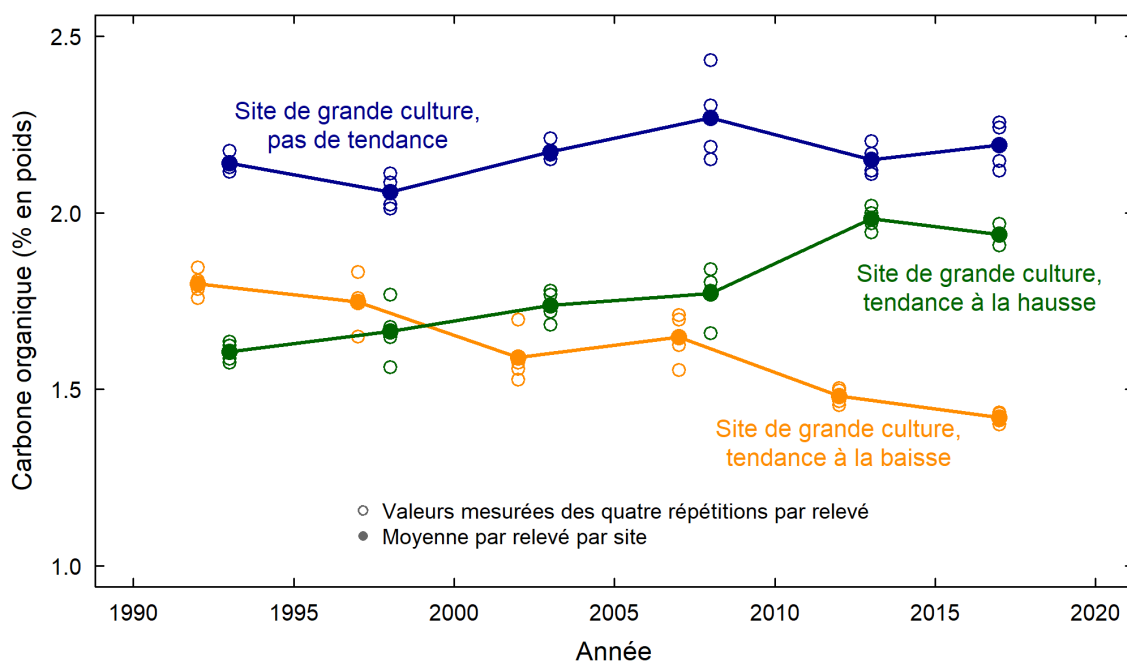


Figure 23: L'évolution temporelle de la teneur en carbone organique (C_{org}) dans la couche supérieure du sol (0-20 cm) pour trois sites sélectionnés du NABO exploités en grandes cultures.

vue qualitatif. Pour les sites de grandes cultures du NABO, ce rapport varie entre 1:4 et 1:20 (médiane : 1:11). Les sols sableux avec une faible teneur en argile (moins de 20 %) présentent souvent un rapport C_{org} :argile élevé. Par comparaison, les sols riches en argile contiennent trop peu de C_{org} pour obtenir un « bon » rapport selon cette évaluation (cf. Figure 21).

Dans certains sites, l'évolution dans le temps du carbone organique fluctue assez fortement entre les différents cycles de relevés et par rapport à la tendance à long terme de l'ensemble du collectif (cf. Figure 22). Les fluctuations à court terme résultent d'une part de variations saisonnières, et reflètent d'autre part l'exploitation pratiquée dans le cycle des rotations avec les différentes cultures et variantes de travail du sol. L'évolution à long terme depuis le début des années 1990 jusqu'en 2014 a été étudiée de manière approfondie pour les terres assolées. Cette étude (Gubler et al. 2019) n'a pas permis de dégager une tendance générale ; certains sites se sont démarqués par des augmentations ou au contraire des diminutions de la teneur en C_{org} . D'autres ne montrent aucune tendance claire. La Figure 23 l'illustre à l'aide de trois exemples. Les raisons ne peuvent pas être identifiées dans chaque cas. Un changement du mode d'exploitation pourrait être une cause possible, surtout lorsqu'il entraîne des variations de la quantité d'engrais de ferme épandue.

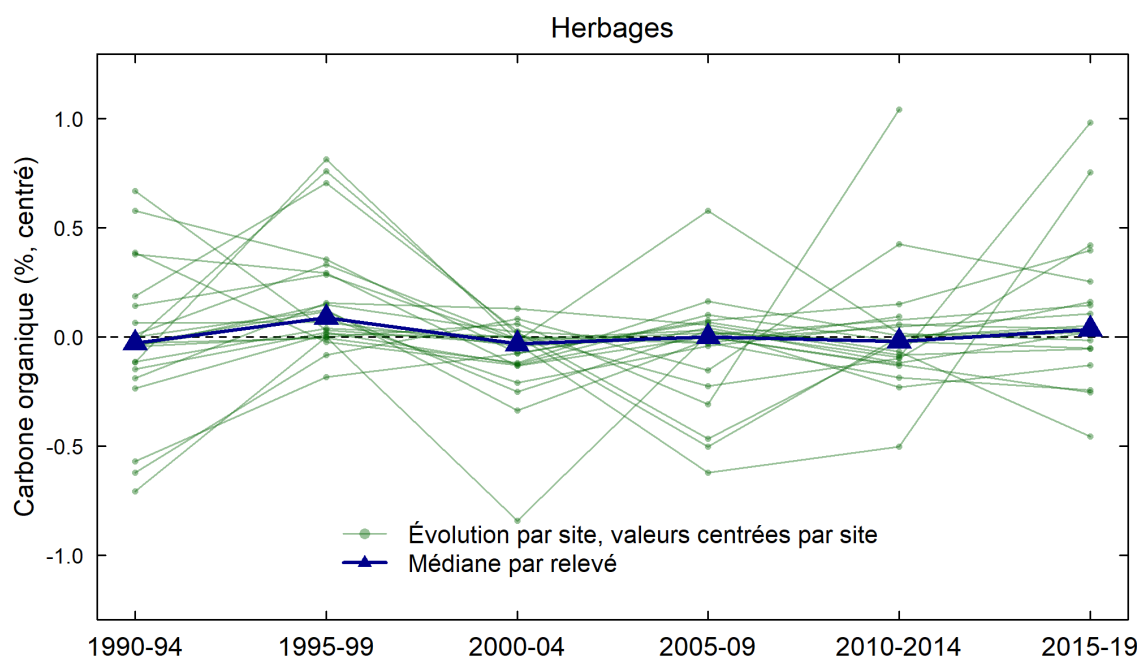


Figure 24: Évolution temporelle de la teneur en carbone organique (C_{org}) pour les sols minéraux d'herbages (0 - 20 cm de profondeur) dans le réseau de mesure du NABO sur la période de 1990 à 2019 (deuxième à septième relevés). Le graphique présente l'évolution centrée par site (cf. annexe 16.2) ainsi que la médiane de tous les sites.

9.2 Herbages : peu de fluctuations de la teneur en carbone organique (C_{org}) du sol

Les sites d'herbages du NABO sont plus riches en matière organique que les sites de grandes cultures. Le rapport C_{org} :argile est lui aussi comparativement plus élevé (cf. Figure 21). Les teneurs absolues en C_{org} des sols d'herbages varient entre 2,9 et 10,6 % en poids (médiane : 4,7 % en poids). Sinon, elles présentent une image très similaire à celle des sites de grandes cultures, avec toutefois une teneur en carbone organique plus stable au fil du temps.

Les valeurs des différents cycles de relevés varient très peu les unes par rapport aux autres et ne permettent pas de dégager de tendance (cf. Figure 24). La teneur en C_{org} augmente ou diminue dans certains sites, mais reste autrement stable dans la plupart des sites. Les fluctuations sont en outre moins marquées que dans les sites exploités en grandes cultures. Cela provient probablement surtout de fait que les sites d'herbages accueillent toujours la même culture. Leurs sols ne sont travaillés que de manière ponctuelle, par exemple pour un nouveau semis.

Les connaissances du NABO sur le carbone organique sont résumées dans la Figure 25 : les sols des sites de grandes cultures et d'herbages présentent une image hétérogène, les sites individuels montrant des tendances à la hausse, stables ou à la baisse. Les teneurs en C_{org} sont toutefois plus stables dans les sols d'herbages : des hausses ou des baisses significatives ne s'observent que dans quelques sites. Le mode d'exploitation, et surtout les apports d'engrais de ferme, influencent de manière significative l'évolution dans le temps du C_{org} .

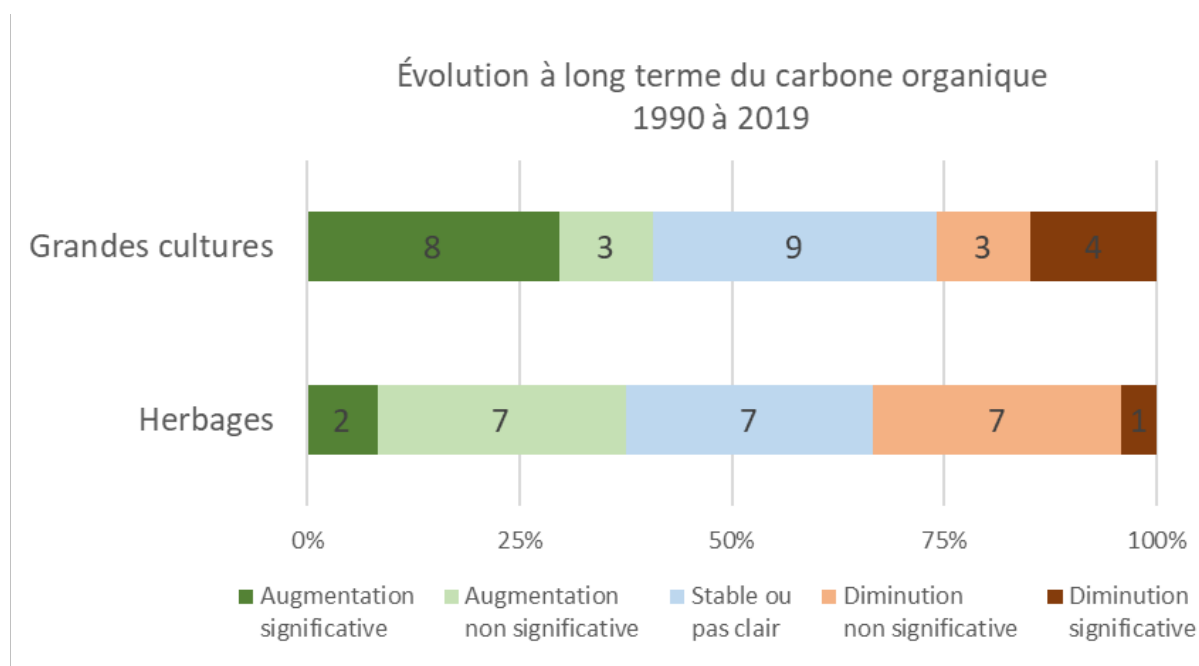


Figure 25: L'évolution des teneurs en carbone organique (C_{org}) dans les sites du NABO de grandes cultures et d'herbages ; sont indiquées les proportions de sites présentant une tendance à la baisse, stable et à la hausse.

Informations complémentaires

[Twenty-five years of observations of soil organic carbon in Swiss croplands showing stability overall but with some divergent trends.](#)

Article scientifique, Environmental Monitoring and Assessment, Gubler et al. 2019.

[Observatoire national des sols \(NABO\) 1985 à 2009 : État et évolution des polluants inorganiques et des paramètres associés aux sols.](#)

Rapport, Gubler et al. 2015.

www.nabo.ch > [Monitoring](#) > [Études portant sur des matières](#)

10 Produits phytosanitaires : un sujet brûlant considéré objectivement

Une grande partie des produits phytosanitaires utilisés aboutissent sur et dans le sol. Il n'est donc pas étonnant que de petites quantités de résidus soient décelables dans de nombreux sols de Suisse. Pour limiter le risque d'une atteinte à la qualité du sol, le Conseil fédéral a mis en vigueur un plan d'action. Le NABO y est chargé de développer un monitoring des résidus de produits phytosanitaires dans les sols, et de mettre à disposition des indicateurs permettant de mesurer les effets de ces résidus sur la fertilité du sol.

Le 13 juin 2021, deux initiatives populaires visant à réglementer plus strictement l'utilisation de produits phytosanitaires dans l'agriculture ont été soumises au vote au niveau fédéral. Les deux objets ont été rejetés. Cependant, les produits phytosanitaires continuent de susciter la polémique en raison des possibles atteintes qu'ils peuvent causer à la santé humaine et aux écosystèmes. Si le comportement et les effets des substances actives sur les eaux et sur la faune aquatique sont relativement bien étudiés (Guzzella et al. 2018 ; Rösch et al. 2019 ; Curchod et al. 2020 ; Spycher et al. 2018), il manque encore des données permettant d'évaluer leur influence sur la qualité du sol. Les études disponibles montrent seulement qu'il est très courant de trouver de faibles concentrations de résidus de substances (Chiaia-Hernandez et al. 2017 ; Humann-Guilleminot et al. 2019 ; Riedo et al. 2021). Mais la question de savoir dans quelle mesure les résidus détectés présentent des risques écologiques n'est pas encore clarifiée.

En 2019, environ 1950 tonnes de produits phytosanitaires ont été vendues en Suisse (OFAG, 2020). Derrière cette quantité se cachent plus de 300 substances actives différentes, y compris celles utilisées dans l'agriculture biologique. Les volumes des ventes dans l'agriculture conventionnelle ont certes diminué d'environ 40 % entre 2008 et 2019 (OFAG, 2020). Mais la quantité ne permet pas à elle seule de tirer de conclusions sur les conséquences d'une substance active. À quantités égales, certaines matières actives produisent beaucoup plus d'effets que d'autres. C'est pourquoi les différentes substances doivent être considérées individuellement.

L'utilisation des produits phytosanitaires est en constante évolution. Certaines matières actives problématiques sont retirées de la circulation, alors que de nouvelles substances plus efficaces et mieux biodégradables sont mises sur le marché. Cependant, les données mesurées de la pollution effective des sols par des produits phytosanitaires sont rares. Le NABO a consacré une étude pilote à cette problématique (Chiaia-Hernandez et al. 2017), complétée ultérieurement par une autre recherche. Les résultats sont présentés dans le sous-chapitre 10.1.

Le relevé de produits phytosanitaires ne fait pas encore partie du programme standard du monitoring NABO. C'est pourquoi une stratégie intégrant le relevé de données supplémentaires est en cours d'élaboration. Comme la plupart des autres pays européens, la Suisse n'a pas encore fixé de valeurs limites pour les produits phytosanitaires dans les sols. Les indicateurs des effets des PPh sur la fertilité du sol devraient être élaborés d'ici 2027 dans le cadre du Plan d'action Produits phytosanitaires (PA PPh) (cf. point 10.2).

10.1 Premier aperçu : un screening des produits phytosanitaires dans le réseau de mesure du NABO

En prolongement de l'étude pilote menée il y a une dizaine d'années (Chiaia-Hernandez et al. 2017), le NABO a réalisé un « screening » visant à étudier de manière approfondie la présence de produits phytosanitaires dans le réseau de mesure NABO. Ce type d'étude ne montre pas l'évolution temporelle, mais se concentre sur l'état actuel des sols. Les relevés ont été effectués dans 22 sites de grandes cultures, 3 vergers et 3 vignes pour lesquels des informations relatives à l'exploitation étaient disponibles (cf. chapitre 6). Les données d'exploitation ont notamment permis d'établir une corrélation entre les concentrations mesurées dans les différents sols, et l'utilisation de ces produits phytosanitaires.

Screening des produits phytosanitaires

Sites	Échantillons	Analyse
22 surfaces de grandes cultures, 3 surfaces de cultures fruitières et 3 vignes du réseau de mesures NABO	Échantillons archivés, profondeur 0-20 cm, prélevés entre 2005 et 2009	Méthode d'analyse de résidus multiples de 34 substances actives et 8 produits de dégradation développée dans le cadre de la chimie analytique environnementale d'Agroscope. Les substances actives ont été sélectionnées sur la base de la quantité et de la fréquence d'utilisation, des chiffres des ventes, des résultats de l'étude pilote, de l'avis d'experts ainsi que de la faisabilité analytique.

Cette comparaison montre l'image suivante : depuis le milieu des années 1980 et jusqu'à la période d'échantillonnage (2005-2009), 193 utilisations ont été dénombrées sur les 28 champs suivis pour les 34 matières actives analysées (Figure 26). Dans près des trois quarts des cas, les substances correspondantes ont pu être décelées dans le sol. Dans les autres cas, les produits phytosanitaires n'étaient plus décelables. La substance était déjà dégradée ou avait été lessivée. Une analyse de la durée écoulée entre l'application et l'échantillonnage montre que les produits phytosanitaires sont persistants. Seulement un quart des substances avaient été appliquées depuis moins de deux ans. La plupart provenaient de la période antérieure ; certaines utilisations remontaient à plusieurs années en arrière. Les méthodes d'analyse actuelles permettent de détecter des concentrations très faibles de produits phytosanitaires. Pour la plupart des substances, le seuil de détection des mesures du NABO était de 0,3 µg/kg. Il est ainsi possible de déceler des résidus même minimes longtemps après leur utilisation, lorsqu'il ne reste dans le sol qu'une très faible partie de la quantité initialement appliquée. La question de savoir si ces résidus posent un problème pour les écosystèmes est encore controversée et fait actuellement l'objet de recherches.

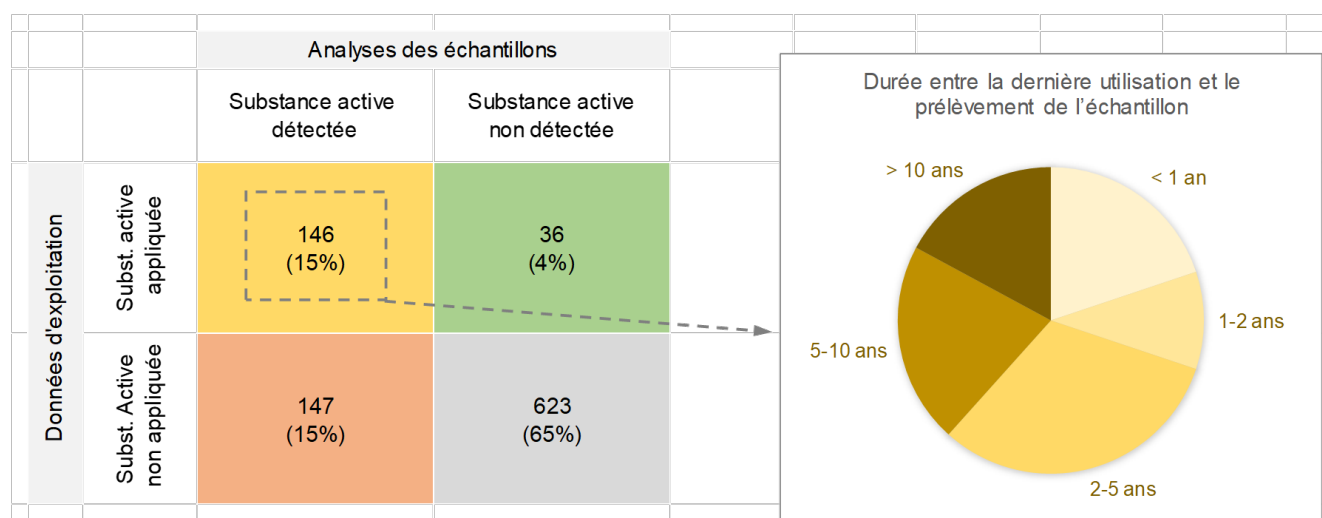


Figure 26: À gauche : utilisation et détection de produits phytosanitaires sur des sites agricoles du NABO (grandes cultures, cultures fruitières, viticulture). À droite : persistance dans le sol des produits phytosanitaires mesurés (le graphique montre la durée entre la dernière utilisation connue de la substance et le prélèvement de l'échantillon).

La Figure 26 montre en outre que les analyses ont assez souvent détecté des substances qui n'avaient pas été mentionnées dans les données d'exploitations demandées. Plusieurs raisons peuvent expliquer cela. Dans de nombreux cas, la présence de ces substances a pu être imputée à des produits de traitement des semences. En revanche, le rôle joué par une dérive d'une parcelle voisine ou par un autre apport involontaire de l'extérieur ne peut pas être établi avec certitude. D'une manière générale, les variantes d'apports suivantes peuvent être prises en compte dans l'analyse des causes :

- Quelques substances sont utilisées comme produits de traitement des semences. Elles n'apparaissent souvent pas dans les données d'exploitations demandées, car elles ne sont pas mises en relation avec l'utilisation de produits phytosanitaires.
- Les résidus de produits phytosanitaires peuvent provenir d'une époque antérieure à 1985, lorsque les données d'exploitation n'étaient pas encore collectées.
- Les substances se sont déposées depuis des champs voisins (par dérive) ou ont été transportées par l'environnement (p. ex. par les précipitations). Des études anciennes et récentes démontrent en effet que l'eau de pluie contient différents produits phytosanitaires. Ce constat a été documenté il y a plus de 20 ans pour la Suisse (Bucheli et al. 1998), et a été récemment confirmé pour les substances actives utilisées actuellement (Schlöpfer et al. 2021).

À titre d'exemple, deux produits phytosanitaires sont examinés ci-après de manière plus approfondie : le fongicide tébuconazole, utilisé notamment dans les cultures céréalières, fruitières, légumières ou florales contre des maladies fongiques, et l'herbicide terbuthylazine, destiné à lutter contre le développement d'adventices et de graminées dans une culture de maïs. Les deux produits phytosanitaires ont été détectés : le tébuconazole est présent dans le sol à

des concentrations de 0,3 à 173 µg/kg (médiane : 1,5 µg/kg; moyenne : 27 µg/kg). La plage de valeurs de la terbuthylazine va de 0,5 à 2,8 µg/kg (médiane = moyenne : 1,7 µg/kg). Ces concentrations sont très comparables aux résultats d'autres études menées en Suisse et en Europe. Les valeurs moyennes sont relativement proches les unes des autres (Figure 27). On relèvera toutefois les moyennes comparativement basses de l'étude récente sur les sols indigènes de Riedo et al. (2021) : ce résultat s'explique par le fait qu'un tiers de sols étudiés ici sont exploités en culture biologique. Ces sols présentent en général des concentrations très faibles de produits phytosanitaires.

Des différences marquées s'observent entre les valeurs maximales des diverses études : les écarts et les fortes déviations sont sans doute principalement imputables au calendrier de prélèvement des échantillons. En hiver, la dernière utilisation de produits phytosanitaires remonte souvent à plusieurs semaines, voire mois en arrière. Alors qu'un échantillonnage au printemps peut très bien avoir eu lieu seulement quelques jours après la dernière application. Dans cette étude, le NABO n'avait pas adapté son calendrier de prélèvement des échantillons en fonction de l'utilisation de produits phytosanitaires. C'est pourquoi les concentrations élevées sont ici aussi partiellement d'origine saisonnière.



Figure 27: Valeurs mesurées dans le sol pour le tébuconazole (fongicide) et la terbuthylazine (herbicide) ; le graphique indique les valeurs moyennes et maximales de concentrations respectives de différentes études. Les résultats du screening réalisé dans le réseau de mesure du NABO (NABO-Screening) sont comparés avec les études suivantes : étude pilote NABO (Chiaia-Hernandez et al. 2017), étude de sites de grandes cultures et de cultures maraîchères en Suisse (CH ; Riedo et al. 2021), étude de sols de grandes cultures en République tchèque (CZ ; Kosubova et al. 2020), étude de sols de grandes cultures et de cultures maraîchères en Espagne et au Portugal (ES & PT ; Sánchez-González et al. 2013), screening européen de sols de grandes cultures (EU ; Silva et al. 2019).

10.2 Plan d'action Produits phytosanitaires : élargissement des substances actives analysées et des sites étudiés

Les produits phytosanitaires doivent être utilisés de manière plus durable, et il faut veiller à réduire les risques environnementaux lors de leur utilisation. C'est ce que demande le Conseil fédéral dans le Plan d'action visant à la réduction des risques et à l'utilisation durable des produits phytosanitaires (PA PPh). Dans cette optique, il a défini plusieurs mesures. Pour établir la pollution des sols suisses par des produits phytosanitaires, il convient d'une part de déterminer l'état actuel, d'autre part d'évaluer les évolutions futures et les risques. Le monitoring doit contrôler un objectif clairement mesurable : le PA PPh demande que les risques liés à l'utilisation de produits phytosanitaires soient réduits de moitié d'ici 2027.

Le NABO a l'intention d'élargir le réseau de mesure principalement avec des cultures spéciales (Figure 28). Il prévoit en outre de collaborer avec les services cantonaux. Les coopérations avec des projets de gestion des ressources menés par un ou plusieurs cantons, comme les projet « AquaSan », « Innover pour réduire les phytos » (PestiRed) et « PFLOPF » (Optimierung und Reduktion des Pflanzenschutzmitteleinsatzes mit Precision-Farming-Technologien), sont également souhaitables.

Le NABO a subdivisé son mandat pour le PA PPh en différents blocs et calendriers:

- Jusqu'à fin 2021, il poursuivra le développement des méthodes d'analyse des produits phytosanitaires dans les sols. À l'avenir, environ 150 substances actives et produits de dégradation dans le sol devront pouvoir être analysés simultanément.

- Des clarifications méthodologiques complémentaires pour la conception du futur monitoring des PPh se poursuivront ensuite jusqu'à fin 2022. Différentes questions seront étudiées, comme la variabilité dans le temps des résidus de PPh dans le sol – dans leur évolution saisonnière et en comparaison annuelle.
- Jusqu'en 2023, il est prévu de procéder à des relevés de l'état actuel dans l'arboriculture fruitière et la viticulture. La pollution aux PPh sera étudiée dans une cinquantaine de sites à l'intérieur et à l'extérieur du réseau de mesures NABO.
- Jusqu'en 2023, un relevé de l'état actuel sera effectué dans les sols de grandes cultures. Pour cela, l'échantillonnage sera élargi à des sites à l'extérieur du réseau de mesures NABO. Ce relevé sera mené en coopération avec le projet de gestion des ressources « PestiRed ».
- Jusqu'en 2023, un relevé de l'état actuel est prévu dans les sols de cultures maraîchères. La pollution aux PPh y sera étudiée comme dans les autres relevés de l'état actuel des sols.
- À partir de fin 2024, le NABO prévoit de transformer ces relevés de l'état actuel en un monitoring à long terme. Le programme, notamment l'étendue et la fréquence des échantillonnages, seront déterminés sur la base des connaissances acquises et des clarifications méthodologiques résultant des travaux préliminaires. Les sites étudiés lors des relevés de l'état actuel seront intégrés avec ceux du réseau de mesures NABO actuel dans un futur monitoring des produits phytosanitaires.

Le Plan d'action PPh prévoit en outre le développement d'instruments d'évaluation de l'utilisation des produits phytosanitaires axés sur la pratique, et demande que les bases manquantes soient complétées. L'objectif est de pouvoir évaluer à l'avenir les concentrations de PPh dans le sol au moyen de valeurs de référence basées sur les risques analogues aux valeurs limites en vigueur pour les eaux superficielles. L'évaluation se concentrera sur l'impact des PPh sur les organismes. Ces travaux seront menés sous la direction du centre d'écotoxicologie appliquée de la Suisse (Centre Ecotox) et du bureau EnviBioSoil.



Figure 28: Pour déterminer la pollution par les produits phytosanitaires, des sols sont échantillonnés dans et à l'extérieur du réseau de mesures actuel du NABO, à l'exemple de ce site viticole.

Informations complémentaires

[Long-Term Persistence of Pesticides and TPs in Archived Agricultural Soil Samples and Comparison with Pesticide Application.](#)

Article scientifique, Envir. Science & Technology, Chiaia-Hernandez et al. 2017.

[Plan d'action Produits phytosanitaires](#)

www.nabo.ch > [Enquêtes complémentaires](#) > [Produits phytosanitaires](#)

11 Monitoring de la biodiversité : la collaboration avec l'Observatoire national des sols est recherchée

Les informations pédologiques disponibles en Suisse ne couvrent pas l'ensemble du territoire. C'est pourquoi le NABO et le Monitoring de la biodiversité en Suisse MBD ont mené un projet commun dans le cadre duquel des échantillons de sol ont été prélevés dans plus de 1100 sites parallèlement aux relevés phytosociologiques, puis analysés et archivés. Cette série élargie de données pédologiques devrait également aider d'autres domaines de la recherche et de l'exécution à améliorer leur base de connaissances sur les sols suisses.

Une grande partie de la diversité des espèces est cachée sous la surface de la Terre. Pourtant, le Monitoring de la biodiversité en Suisse (MBD) a négligé jusqu'ici cet écosystème du sol. Il n'existe qu'un seul indicateur (E6 « Charge en nutriments dans le sol ») fournissant des informations spécifiques, basées sur l'évaluation de la teneur en nutriments du sol à partir de plantes vasculaires (MBD 2014a). Les espèces de mollusques dans le sol sont également relevées pour l'indicateur Z9 « Diversité des espèces dans les habitats » (MBD 2014b) - mais pour le reste, jusqu'à récemment, aucune autre donnée pédologique spécifique, comme l'acidité (pH), la granulométrie et la teneur en carbone organique, n'était relevée. Cependant, grâce à un projet commun de l'Observatoire national des sols et du Monitoring de la biodiversité, cette lacune a pu être comblée. De 2011 à 2015, les relevés phytosociologiques effectués dans 1150 sites MBD ont été complétés par un échantillonnage du sol. Le NABO a organisé les prélèvements et préparé les échantillons de manière à ce que les différentes caractéristiques pédologiques puissent être analysées et archivées. Les résultats proprement dits des analyses seront mis à la disposition du BDM. Cette collaboration doit servir à établir un lien entre informations phytosociologiques et caractéristiques pédologiques, et à élaborer un ensemble de données pédologiques proportionnelles à la surface pour tout le territoire suisse. Celui-ci sera publié sous la même forme que l'Atlas géochimique des sols de Suisse.

Les données de base peuvent être mises à la disposition des milieux scientifiques et des autorités d'exécution pour traiter d'autres questions environnementales. Certains offices fédéraux peuvent s'y référer pour des analyses au plan suisse. Les cantons ont la possibilité de recourir à ces informations pour étayer leurs tâches d'exécution et de reporting. Les informations pédologiques du MBD peuvent en outre être associées à celles de l'infrastructure européenne de données géospatiales sur l'environnement (INSPIRE, <https://inspire.ec.europa.eu/>)

11.1 Un ensemble de données à l'échelle suisse comportant plus de mille échantillons de sols

L'échantillonnage coordonné par le NABO et le MBD couvre de manière très homogène la surface de végétation de la Suisse avec un maillage de 4 km x 6 km (Figure 29). Sur les 1150 sites, le point orographique le plus bas se situe sur les rives du lac Majeur (199 m), le plus haut dans la commune grisonne de Vals (2741 m). L'altitude moyenne de l'ensemble des sites est de 1068 m, ce qui correspond assez exactement à l'altitude moyenne de la Suisse. Dans la mesure du possible, quatre échantillons ont été prélevés sur chaque site dans la couche supérieure du sol, jusqu'à une profondeur de 20 cm, à l'aide d'une sonde à percussion (cf. Meuli et al. 2017).

L'échantillonnage en grille utilisé dans le projet commun BMD-NABO permet de s'attendre à ce que les principales utilisations du territoire de la Suisse soient représentées de manière à peu près proportionnelle à la surface (Figure 30). Au total, 41 % des sites MBD-NABO se trouvent en région agricole et 41 % en forêt, 9% sont situés dans des alpages, et 3% dans des zones bâties. La répartition des sites de grandes cultures est toutefois très variable : ils sont bien représentés sur le Plateau et dans le Jura, mais moins bien dans les Alpes centrales orientales et sur les flancs alpins du nord et du sud. Les écarts par rapport à la statistique officielle de la superficie viennent du fait que certains sites sélectionnés n'ont pas pu être échantillonnés. Plusieurs points de la grille d'échantillonnage se trouvent en effet dans des zones bâties ou sur des surfaces de rochers ou d'éboulis où le prélèvement d'échantillons est impossible.

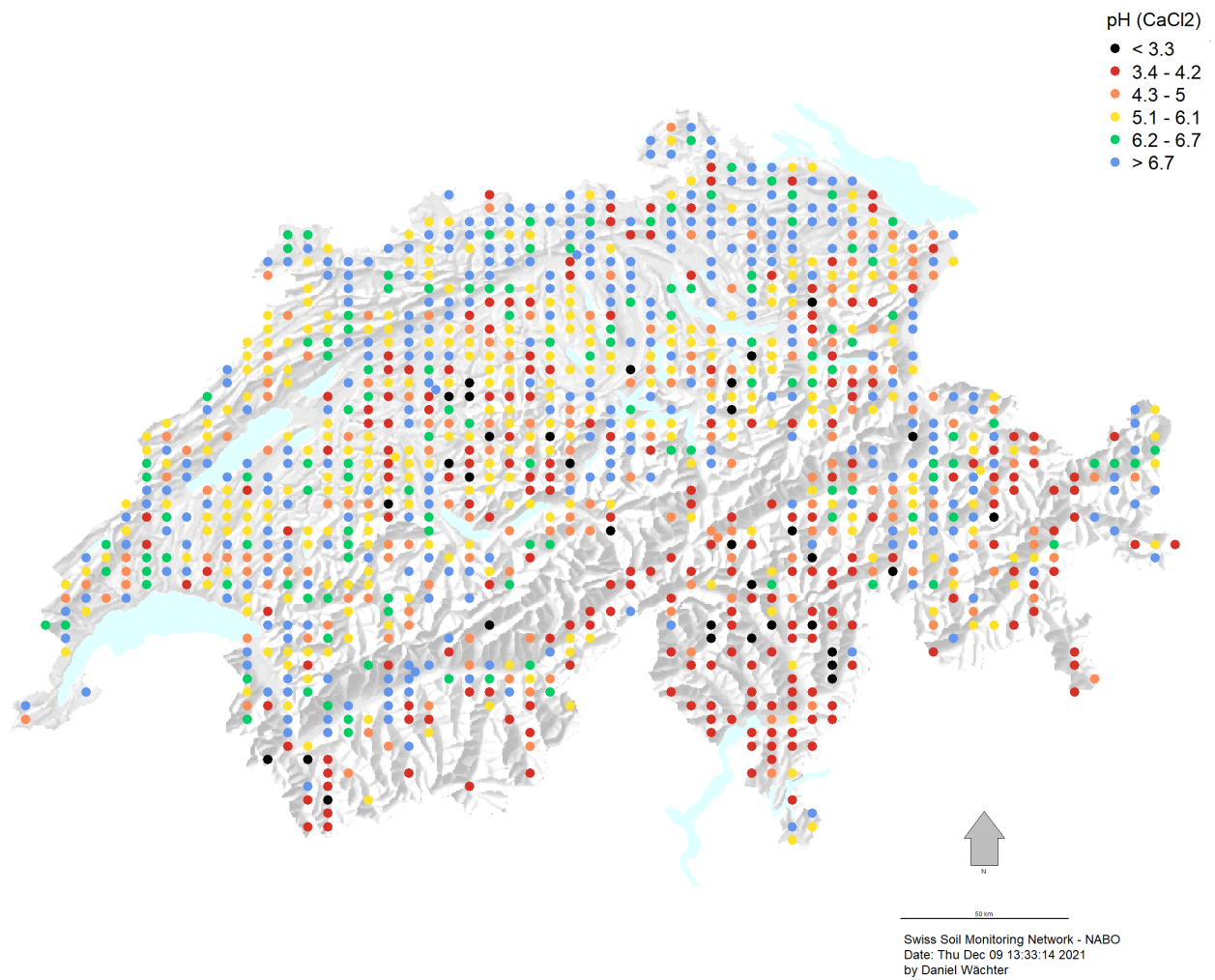


Figure 29: Le degré d'acidité (pH) dans la couche supérieure du sol (profondeur 0 - 20 cm ; mesuré dans une solution de CaCl₂) pour les 1150 sites du Monitoring de la biodiversité en Suisse (MBD) (selon l'indicateur Z9). Les valeurs par site sont calculées à partir de trois à quatre échantillons.

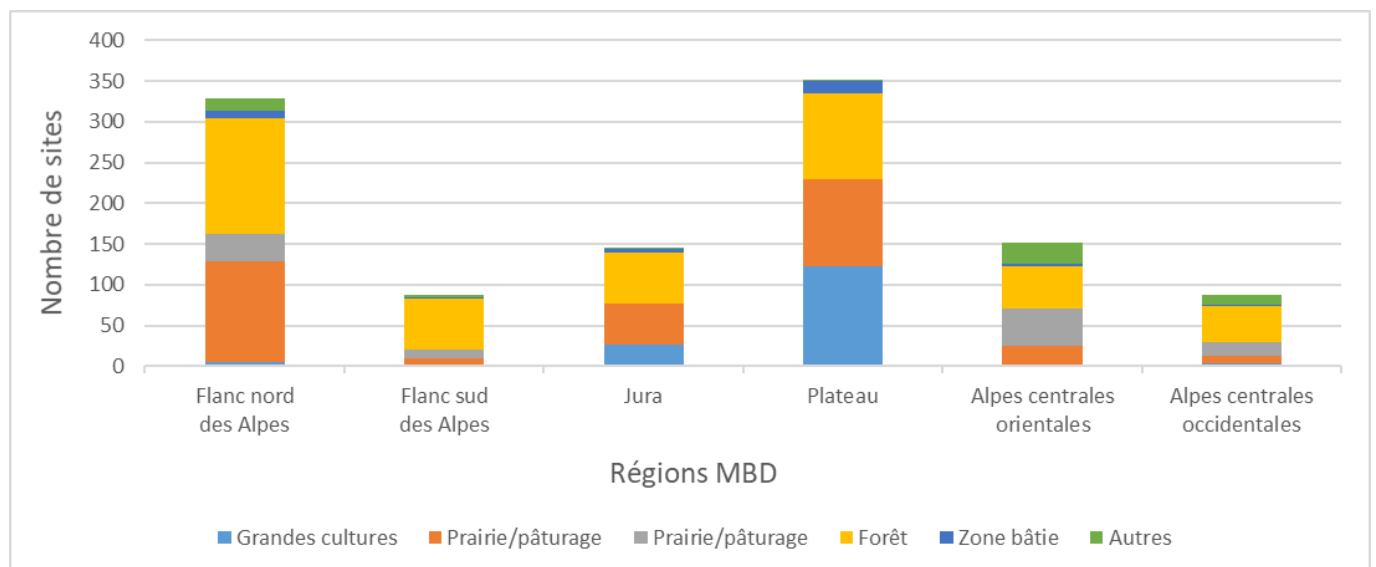


Figure 30: Vue d'ensemble des sites de mesure, différenciés par utilisation principale et régions du monitoring NABO-BDM.

11.2 Base pour des recherches supplémentaires

Les données communes du NABO et du MBD sont très demandées. Des groupes de recherche de nombreuses institutions les utilisent pour des contrôles de plausibilité et pour affiner leurs propres modèles de prévision. Par exemple, Decombes et al. (2020) ont effectué une comparaison entre les indicateurs écologiques selon Ellenber et les caractéristiques pédologiques mesurées. Ils ont pu ainsi améliorer la qualité des prévisions de la répartition des espèces. Dans une autre étude, Stumpf et al. (2020) se sont servi de données sur la végétation et les espèces présentes pour répartir les zones d'herbages en différentes classes en fonction de l'intensité d'exploitation. Mayerhofer et al. (2021) ont utilisé certaines parties de l'ensemble de données pour étudier les causes explicatives de la distribution spatiale de populations bactériennes au moyen d'un séquençage ADN de génétique moléculaire. Le même échantillon sera analysé pour un séquençage ADN de champignons. Les résultats devraient montrer comment les champignons se répartissent en Suisse et quel est leur rôle dans le développement de la biodiversité. Et une équipe de chercheurs de l'Université de Neuchâtel prévoit de développer un inventaire national des collemboles et des acariens dans le sol en recourant aux caractéristiques pédologiques relevées pour le MBD.

La résolution spatiale de l'ensemble de données combinées sur la biodiversité et le sol en fait un outil exceptionnel. Avec d'autres données du monitoring NABO, il constitue la base d'une future bibliothèque spectrale dans laquelle les sols suisses seront enregistrés dans le domaine infrarouge moyen (Baumann et al., 2021). Agroscope y recourt en outre pour valider des analyses sur la protection du climat dans le cadre du projet international de la FAO «GSOCseq». Un groupe de recherche calcule à cet effet les potentiels de séquestration du carbone dans le sol selon différents scénarios d'exploitation (C. Wüst, communication personnelle). L'Atlas géochimique de la Suisse s'appuiera lui aussi sur l'ensemble de données du NABO-MBD. Cet atlas peut être considéré comme étape importante dans la mise en œuvre de la protection des sols en Suisse. Son objectif est de reproduire sous forme cartographique la distribution spatiale de deux douzaines d'éléments principaux et d'éléments traces. Les évaluations ne sont toutefois pas encore achevées, car les données d'analyses de plus de 50 éléments principaux et éléments traces ainsi que d'autres caractéristiques pédologiques doivent être interprétées.

Informations complémentaires

[Environmental and anthropogenic factors shape major bacterial community types across the complex mountain landscape of Switzerland.](#)

Article scientifique, *Frontiers in Microbiology*, Mayerhofer et al. 2021.

[Developing the Swiss soil spectral library for local estimation and monitoring.](#)

Article scientifique, *Soil*, Baumann et al. 2021.

[Monitoring de la biodiversité en Suisse \(MBD\)](#)

www.nabo.ch > [Enquêtes complémentaires](#) >

[Échantillonnage en grille de la couche supérieure du sol](#)

12 Collaboration en Europe : une étude d'état actuel réalisée en commun avec les pays de l'UE

L'Observatoire national des sols NABO n'a pas à craindre la comparaison internationale. En 2015, année internationale des sols, la Suisse a participé à la campagne de mesures européenne LUCAS-Soil, qui permet des comparaisons transfrontalières dans l'espace UE. La recherche pédologique suisse suscite beaucoup d'intérêt, car elle propose une amélioration des méthodes de mesure. Une poursuite de la collaboration est souhaitée.

Le projet européen « Land Use/Land Cover Area Frame Survey », abrégé « LUCAS », a pour vocation de relever l'utilisation du sol et de suivre des changements au fil du temps. Dans le cadre du module « LUCAS-Soil », des échantillonnages de sols sont réalisés depuis 2009. Les informations pédologiques de tous les pays européens sont rassemblés et mises à disposition sous une forme cohérente (JRC-ESDAC, 2021). En 2015, la Suisse s'est associée à ce projet mené dans l'ensemble de l'Europe ; l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) avait financé cette participation unique à l'occasion de l'année internationale des sols. Pour la contribution nationale, 160 sites de mesures ont été sélectionnés de manière à obtenir une répartition la plus équilibrée possible des conditions naturelles de la Suisse, comme les étages altitudinaux, la pente, l'utilisation du sol, etc. (cf. Figure 31). Comme le prélèvement d'échantillons dans les régions alpines est très compliqué et que ces zones ne couvrent que 3 % de l'ensemble du continent européen, tous les relevés ont été effectués à une altitude inférieure à 1500 m. En Suisse, la région étudiée s'est trouvée ainsi ramenée à 63 % de la surface du pays.

La collaboration au projet européen fournit des informations pouvant être comparées entre elles, car tous les échantillons de sol ont été analysés dans un laboratoire centralisé. On dispose ainsi de données sur les propriétés chimiques et physiques du sol de sites représentatifs de la Suisse harmonisées avec les informations de nos pays voisins. Il est désormais possible d'effectuer des comparaisons directes de différentes caractéristiques pédologiques, comme la teneur en matière organique, l'acidité ou la granulométrie. De sorte que les conséquences du changement climatique sur différents espaces naturels en Suisse pourront aussi être évaluées dans le cadre des relevés européens. C'est une première étape pour la Suisse n'apparaisse plus à l'avenir comme une tache blanche sur la carte de l'Europe dans les visualisations des caractéristiques pédologiques.

L'étude d'état à l'échelle européenne constitue en outre une base importante pour des projets européens de recherche pédologique menés dans le cadre de l'European Joint Programme Soil (EJP Soil, 2021). De nombreux groupes de travail suisses sont associés à ce programme de recherche. C'est pourquoi la participation de la Suisse à de futures campagnes d'échantillonnage LUCAS-Soil revêt une grande importance.



Figure 31: Les sites d'échantillonnage en Suisse pour le projet LUCAS-Soil de l'UE sont représentés par des points verts. Les régions en rouge se situent au-dessus de 1500 m d'altitude et sont donc en dehors du périmètre étudié.

12.1 Une première comparaison avec les pays voisins révèle des différences notables

Une comparaison entre la Suisse et les pays voisins des valeurs de référence pour les sites de grandes cultures montre que les valeurs de pH dans la couche supérieure du sol sont très homogènes (cf. Figure 32 et Tableau A 3, annexe 16.3). En Suisse, l'écart entre valeur minimale et maximale s'étend d'un pH de 4,6 à 7,7 et est ainsi comparable à celui de l'Allemagne (pH de 4,7 à 7,7). Il est par contre plus resserré qu'en Italie (pH de 4,2 à 7,7) ou qu'en Autriche (pH de 3,9 à 7,6). En comparaison internationale, les médianes du pH se situent entre 6,3 et 7,0. En ce qui concerne la teneur en carbone organique (C_{org}) du sol, les différences entre pays sont plus marquées : la plus faible concentration de C_{org} mesurée en France (pour cent en poids 2,95 %) dépasse même la concentration la plus élevée en Autriche (1,69 %). La médiane pour la Suisse (2,20 %) est supérieure à celles de l'Allemagne (1,73 %) et de l'Italie (1,53 %) ; elle est en outre deux fois plus élevée qu'en Autriche (1,07 %). En comparaison, les sites français de grandes cultures présentent une teneur moyenne près de deux fois plus élevée que celle de la Suisse (4,37 %). Au total, 324 sites de grandes cultures sur sols minéraux ont été étudiés pour les cinq pays voisins.

La comparaison des sites d'herbages échantillonnés montre que les valeurs de pH relevées sont nettement plus basses que dans les sites de grandes cultures (cf. Tableau A 4). Les teneurs moyennes en C_{org} diminuent dans l'ordre suivant des pays : France, Suisse, Italie, Allemagne et Autriche (cf. Figure 32 et Tableau A 4, annexe 16.3). La médiane est particulièrement basse en Autriche (0,97 %). Elle n'atteint ainsi qu'un cinquième de la médiane en France, et environ un tiers de la moyenne pour l'Italie et la Suisse. Les teneurs en argile, qui ont également été relevées, diminuent dans l'ordre suivant : Autriche, Suisse, Allemagne, France et Italie. Toutes les moyennes sont relativement proches et se situent dans une plage de +/- 14 à 22 %. Les sites d'herbages en Allemagne (teneur en sable moyenne : 36 %) et en Italie (33 %) présentent toutefois une granulométrie moyenne nettement plus grossière que les sites en Suisse (23 %) et en Autriche (19 %).

Le carbone organique joue un rôle déterminant dans la préservation des fonctions du sol. La comparaison ci-dessus entre pays tient compte des données de 324 sites de grandes cultures et de 324 sites d'herbages. Il en ressort que le carbone du sol jusqu'à une profondeur de 20 cm diminue pour presque toutes les classes d'exploitation dans l'ordre suivant des pays : France, puis Suisse, Italie, Allemagne et Autriche. En France, les teneurs en carbone mesurées dans la couche supérieure du sol sont systématiquement plus élevées qu'en Autriche. On ne peut qu'émettre des conjectures sur les raisons de ces écarts marqués. Il ne faut notamment pas sous-estimer l'effet d'une différence du degré d'humidité du sol lors du prélèvement des échantillons. Suivant la teneur en argile et en matière organique, il peut en résulter des écarts massifs lors de l'échantillonnage. Des différences peuvent également apparaître dans la technique d'échantillonnage : les échantillons de sol ont en effet été prélevés par différentes équipes dans les pays et les régions concernés. Les procès-verbaux des relevés, destinés à l'information réciproque (LUCAS Soil Sampling Instructions, 2012), seront discutés dans le sous-chapitre suivant.

Remarque pour la compréhension de la comparaison entre les pays : seuls les relevés des régions NUTS2 des pays voisins directement adjacentes à la Suisse sont pris en compte (cf. Tableau A 2, annexe 16.3). De cette manière, les comparaisons des valeurs de référence sont également pertinentes et concluantes sous l'angle des espaces naturels et du climat. À des fins de simplification, les régions voisines sont désignées « globalement » par le nom de leur pays respectif.

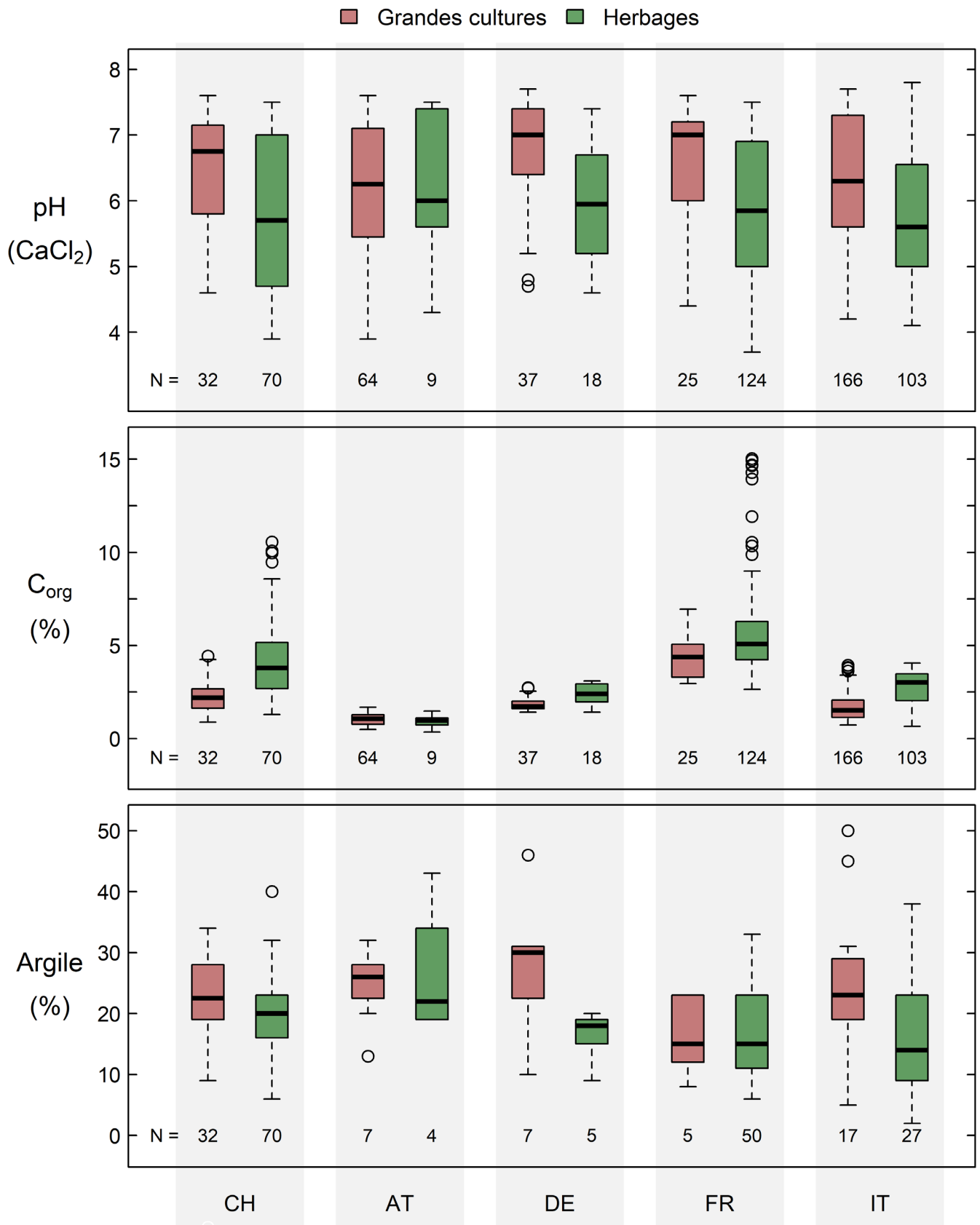


Figure 32: Caractéristiques pédologiques des sites de grandes cultures et d'herbages échantillonnés en Suisse et dans les régions NUTS2 limitrophes dans le cadre du projet LUCAS-Soil. Le graphique montre les boîtes à moustaches pour le pH (en solution CaCl₂), la teneur en carbone organique (C_{org}) et la teneur en argile. Le nombre de valeurs de mesure par groupe (N) est indiqué sous la boîte. CH (Suisse), AT (Autriche), DE (Allemagne), FR (France), IT (Italie)

12.2 Recommandations pour un échantillonnage harmonisé

Le NABO a également profité de cette collaboration unique au projet LUCAS-Soil pour effectuer une comparaison des méthodes de prélèvement des échantillons. Ainsi, en 2015, tous les sites suisses ont été échantillonnés simultanément de deux manières différentes, une fois selon la méthode de prélèvement officielle de LUCAS à l'aide d'une bêche (LUCAS, 2012), et une seconde fois avec une tarière à carottes selon le monitoring NABO usuel. Cette comparaison visait notamment à déterminer l'influence du mode de prélèvement sur le résultat des mesures, et à mettre en évidence d'éventuelles erreurs systématiques. Les documentations des prélèvements à la bêche LUCAS ont effectivement montré que la marge d'appréciation concernant la profondeur de prélèvement pratiquée était considérable. Il en résulte des écarts importants lors du prélèvement des échantillons. L'échantillonnage parallèle réalisé avec une tarière à carottes a permis de confirmer très clairement ce problème (Fernández-Ugalde et al. 2020). Le procès-verbal d'échantillonnage pour la campagne LUCAS-Soil de 2022 sera révisé sur la base des expériences acquises. Il s'agira notamment de préciser comment contrôler l'uniformité et l'exactitude de la profondeur de prélèvement. Cette optimisation méthodologique permettra d'obtenir des résultats mieux comparables malgré les différentes équipes de prélèvement.

Informations complémentaires

[Comparison of sampling with spade and gouge auger for topsoil monitoring at the continental scale.](#)

Article scientifique, EJSS, Fernández-Ugalde et al. 2020.

[Joint Research Centre > LUCAS](#)

www.nabo.ch > [Enquêtes complémentaires](#) > [LUCAS-Soil - Suisse](#)

13 Système d'informations pédologiques NABODAT : le NABO rend disponibles de précieuses données de monitoring portant sur plus de trois décennies

Depuis l'année dernière, les données du NABO sont conservées et régulièrement actualisées dans le système d'information pédologique NABODAT. Cette base de données nationale rassemble des informations pédologiques provenant de sources publiques, et harmonise sous un même format les données issues notamment de programmes cantonaux et nationaux de monitoring à long terme. Le Fichier national de données pédologiques tiré de cette base de données est librement mis à la disposition des intéressés et soutient ainsi l'utilisation et la valorisation des informations pédologiques rassemblées.

Comme on l'a vu dans les précédents chapitres, des informations pédologiques détaillées sont essentielles si l'on veut pouvoir protéger et utiliser durablement les sols de Suisse. Or actuellement, l'état et la nature des sols sont encore inconnus dans une grande partie du territoire national. Seulement 13 % de la surface agricole sont cartographiés et documentés dans des cartes des sols de bonne qualité (Rehbein et al. 2019). Et jusqu'à quelques années en arrière, il manquait un système coordonné et harmonisé au plan suisse pour le stockage des informations pédologiques existantes.

L'application spécialisée NABODAT est en service depuis 2012. Le centre de services qui lui est rattaché est chargé d'y intégrer les informations pédologiques disponibles auprès des offices fédéraux et des cantons, et d'harmoniser aussi bien les normes hétérogènes de relevés et de cartographies antérieurs, que les différents modèles de données. La migration des données demande beaucoup de travail, mais les efforts en valent la peine : aujourd'hui, une grande partie des informations pédologiques ponctuelles de la Suisse ont pu être standardisées et traitées dans NABODAT. C'est pourquoi ce travail de mise en place peut être qualifié d'important jalon pour la protection des sols en Suisse.

Fichier de données pédologiques de Suisse, version 5 (septembre 2020)

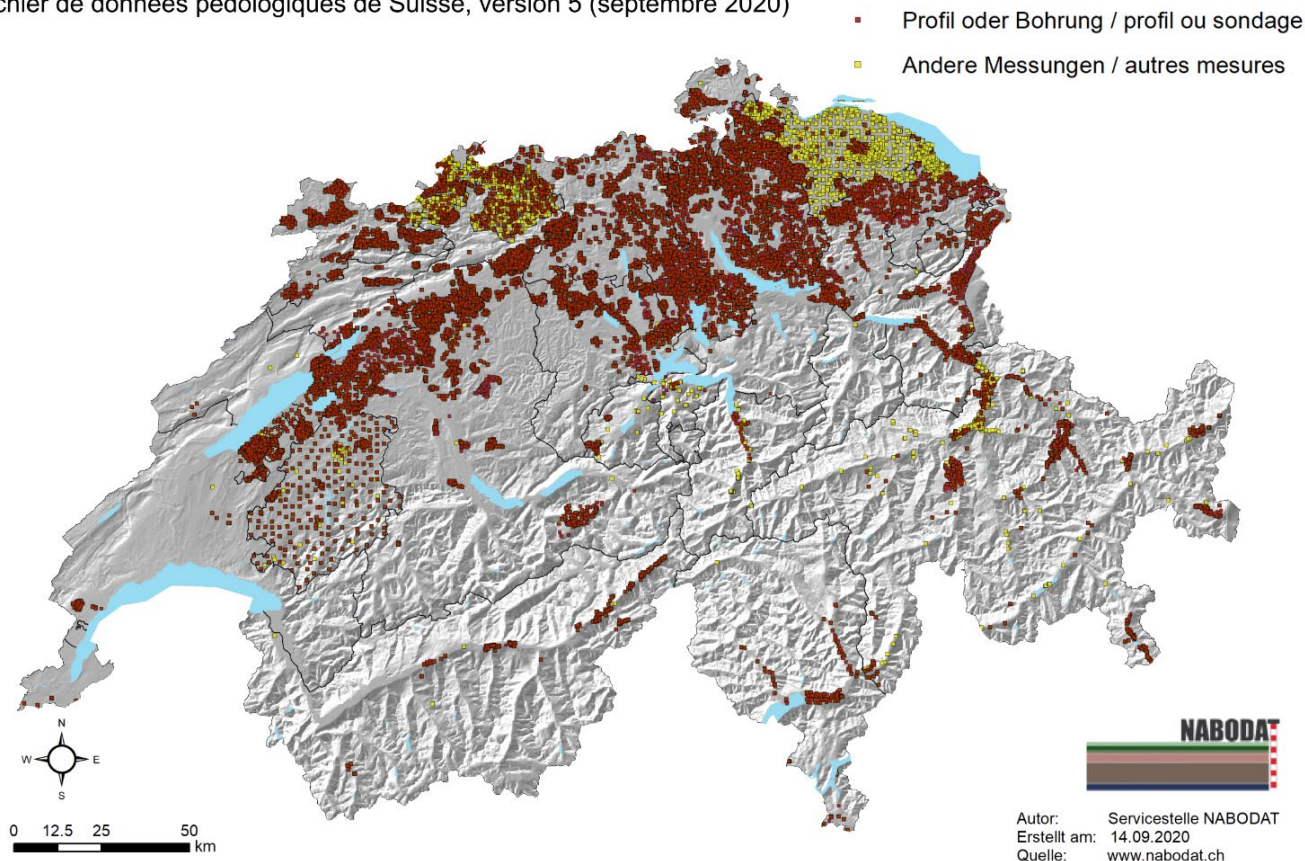


Figure 33: Fichier national de données pédologiques de Suisse

Les informations pédologiques détaillées et de haute qualité provenant du monitoring standard ainsi que d'études complémentaires du NABO comme celle réalisée pour LUCAS-Soil (cf. chapitre 12), ont été intégrées en 2020 dans NABODAT. Des mises à jour annuelles sont prévues pour actualiser les données. En stockant ses données dans NABODAT, l'observation des sols respecte également les exigences de l'ordonnance sur la géoinformation (OGéo). Celle-ci prévoit un transfert de données via INTERLIS, un langage indépendant d'une plateforme qui offre la possibilité de décrire très précisément les données spatiales et de les échanger facilement entre les utilisateurs (<https://www.interlis.ch/>).

Ces dernières années, les demandes externes d'informations pédologiques adressées au centre de services NABODAT n'ont cessé d'augmenter. Pour que les spécialistes hors des organisations de la Confédération et des cantons puissent aussi disposer de données standardisées, le centre de services NABODAT propose deux produits d'information harmonisés, le « [Catalogue des cartographies des sols en Suisse](#) », et le « [Fichier national de données pédologiques de Suisse](#) ». Ce dernier, qui correspond actuellement à la version 5, renferme des informations pédologiques de quelque 25 000 sites de mesure de 23 cantons (Figure 33). Ces données ont été libérées pour d'autres utilisations par leurs propriétaires respectifs et sont librement mises à disposition du public. Depuis qu'elles ont été intégrées dans NABODAT, les données du NABO s'ajoutent automatiquement aux produits d'information harmonisés. Elles aussi sont désormais disponibles sous une forme uniformisée et coordonnée comme les résultats de la plupart des programmes cantonaux de monitoring.

À l'avenir, le « [Catalogue des cartographies des sols en Suisse](#) » et le « [Fichier national de données pédologiques de Suisse](#) » seront proposés en tant que produits du Centre de compétences sur les sols et mis à disposition sur un portail de données qui est en cours d'élaboration. Quel que soit l'organisme auprès duquel elles peuvent être obtenues, les informations pédologiques harmonisées de NABODAT et du Fichier national de données pédologiques sont des données extrêmement précieuses, qui aideront à faire progresser la protection des sols en Suisse. Les produits de NABODAT contribuent à ce que les données sur l'état des sols de Suisse collectées au prix d'important travail, comme celles du monitoring du NABO, puissent être mises en valeur et utilisées de manière judicieuse et diversifiée.

Informations complémentaires

[NABODAT : le système national d'information pédologique \(www.nabodat.ch\)](http://www.nabodat.ch)

[Catalogue des cartographies des sols en Suisse](#)

[Fichier national de données pédologiques de Suisse](#)

[Centre de compétences sur les sols](#)

14 Remerciements

Les résultats présentés dans ce rapport se basent sur les prestations fournies durant plus de trois décennies dans le cadre de l'Observatoire national des sols (NABO). C'est pourquoi nous adressons des remerciements particuliers à toutes les anciennes collaboratrices et à tous les anciens collaborateurs qui ont posé le fondement de ces évaluations, ainsi qu'aux collaboratrices et collaborateurs actuels qui ont relevé et analysé ces données.

L'étendue de ce rapport montre clairement que de nombreux résultats n'ont pu être obtenus qu'en collaboration avec des spécialistes d'autres groupes de recherche d'Agroscope, à savoir les groupes Chimie analytique environnementale, Écologie moléculaire, Interactions entre plantes et sol, et Climat et agriculture. Nous tenons à les remercier chaleureusement pour leur collaboration stimulante.

Enfin, nous remercions tout spécialement les mandants - l'Office fédéral de l'Agriculture, représenté par Agroscope, et l'Office fédéral de l'environnement - pour la confiance qu'ils nous ont témoignée et le soutien financier qu'ils ont apporté à ces activités de monitoring pendant plusieurs décennies.

15 Références

- Agroscope 2016. Apports alimentaires recommandés pour les porcs (livre jaune). Agroscope, Posieux. <https://www.agroscope.ch/livre-jaune> (date de consultation 1.6.2021)
- Agroscope 2021. Apports alimentaires recommandés pour les ruminants (Livre vert). Agroscope, Posieux. <http://www.agroscope.ch/livre-vert> (date de consultation 1.6.2021)
- Anderson T.-H. & Domsch K.H. 2010. Soil microbial biomass: The eco-physiological approach. *Soil Biol. Biochem* 42: 2039-2043.
- Baumann P., Helfenstein A., Gubler A., Keller A., Meuli R.G., Wächter D., Lee J., Viscarra Rossel R., Six J. 2021. Developing the Swiss soil spectral library for local estimation and monitoring. *Soil* 2020-105. <https://doi.org/10.5194/soil-2020-105>
- BBodSchV 1999. Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin.
- Canton de Berne 2021. Nationale Marktkampagne Dünger 2019/2020. Schlussbericht. Wirtschafts-, Energie- und Umweltdirektion (WEU), Kantonales Laboratorium Bern, Bern.
- Chiaia-Hernandez A.C., Keller A., Wächter D., Steinlin C., Camenzuli L., Hollender J., Krauss M. 2017. Long-Term Persistence of Pesticides and TPs in Archived Agricultural Soil Samples and Comparison with Pesticide Application. *Environ Sci Technol* 51 (18):10642-10651. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02529>
- Curchod L., Oltramare C., Junghans M., Stamm C., Dalvie M.A., Rööslé M., Fuhrmann S. 2020. Temporal variation of pesticide mixtures in rivers of three agricultural watersheds during a major drought in the Western Cape, South Africa. *Water Res X* 6:12. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2019.100039>
- Decombes P., Walthert L., Baltensweiler A., Meuli R.G., Karger D.N., Ginzler Ch., Zurell D., Zimmermann N.E. 2020. Spatial modelling of ecological indicator values improves prediction of plant distributions in complex landscapes. *Ecography*. 43:1-16. <https://doi.org/10.1111/ecog.05117>
- EJP Soil.2021. <https://ejpsoil.eu/>
- FAL, FAW, RAC. 1998. Schweizerische Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten, Band 2, Bodenuntersuchung zur Standortcharakterisierung.
- Fernandez-Alvarez M, Lamas J.P., Garcia-Chao M., Garcia-Jares C., Llompert M., Lores M., Dagnac T. 2010. Monitoring of pesticide residues in dairy cattle farms from NW Spain. *Journal of Environmental Monitoring* 12 (10):1864-1875. <https://doi.org/10.1039/c0em00054j>
- Fernández-Ugalde O., Jones A., Meuli R.G. 2020. Comparison of sampling with spade and gouge auger for topsoil monitoring at the continental scale. *European Journal of Soil Science*, 71:137-150. <https://doi.org/10.1111/ejss.12862>
- Fliessbach A., Oberholzer H., Gunst L., Mäder P. 2007. Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming. *Agric. Ecosyst. Environ.* 118, 273–284.
- Gross T., Keller A., Müller M., Gubler A. 2021a. Stoffbilanzen für Parzellen der Nationalen Bodenbeobachtung. Nährstoffe und Schwermetalle 1985-2017. *Agroscope Science* 123. <https://doi.org/10.34776/as123g>
- Gross T., Müller M., Keller A., Gubler A. 2021b. Erfassung der Bewirtschaftungsdaten im Messnetz der Nationalen Bodenbeobachtung NABO. *Agroscope Science* Nr. 122. <https://doi.org/10.34776/as122g>
- 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*. <https://doi.org/10.1111/mec.16036>
- Gubler A., Meuli R., Keller A. 2020. Besoins des cantons et de la Confédération en matière de monitoring de la ressource sol. Observatoire national des sols (NABO), sur mandat de l'office fédéral de l'environnement (OFEV). <https://ira.agroscope.ch/fr-CH/Page/Publikation/Index/44279>

- Gubler A., Schwab P., Wächter D., Meuli R. G., Keller A. 2015. Observatoire national des sols (NABO) 1985 à 2009 : Etat et évolution des polluants inorganiques et des paramètres associés aux sol. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne. État de l'environnement N° 1507. <https://ira.agroscope.ch/fr-CH/Page/Publikation/Index/34920>
- Gubler A., Wächter D., Schwab P., Müller M., Keller A. 2019. Twenty-five years of observations of soil organic carbon in Swiss croplands showing stability overall but with some divergent trends. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191 (277), 117. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7435-y>
- Guzzella L.M., Novati S., Casatta N., Roscioli C., Valsecchi L., Binelli A., Parolini M., Solca N., Bettinetti R., Manca M., Mazzoni M., Piscia R., Volta P., Marchetto A., Lami A., Marziali L. 2018. Spatial and temporal trends of target organic and inorganic micropollutants in Lake Maggiore and Lake Lugano (Italian-Swiss water bodies): contamination in sediments and biota. *Hydrobiologia* 824 (1):271-290. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3494-7>
- Hug A.S., Gubler A., Gschwend F., Widmer F., Oberholzer H., Frey B., Meuli R.G. 2018. NABObio – Bodenbiologie in der Nationalen Bodenbeobachtung, Ergebnisse 2012–2016, Handlungsempfehlungen und Indikatoren. *Agroscope Science* 63. <http://link.ira.agroscope.ch/de-CH/publication/38019>
- Hug A.S., Moll J., Gubler A. 2021. Monitoring Bodenbiologie. Auswertung bodenmikrobiologischer Daten von kantonalen und nationalen Bodenbeobachtungsstandorten. *Agroscope Science* 110. <https://doi.org/10.34776/as110g>
- Humann-Guillemot S, Binkowski Ł.J., Jenni L., Hilke G., Glauser G., Helfenstein F. 2019. A nation-wide survey of neonicotinoid insecticides in agricultural land with implications for agri-environment schemes. *J Appl Ecol.* 2019; 56: 1502–1514. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13392>
- Johannes A., Matter A., Schulin R., Weisskopf P., Paveye Ph.C., Boivin P. 2017. Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? *Geoderma* 302: 14-21. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.04.021>
- JRC-ESDAC. 2021. <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/projects/lucas>
- Keller A., Rossier N., Desaulles A. 2005. Bilans des métaux lourds sur les parcelles agricoles du réseau national d'observation des sols en Suisse. Les cahiers de la FAL 54, Agroscope, FAL Reckenholz, Zürich. <https://ira.agroscope.ch/fr-CH/Page/Publikation/Index/35845>
- Kosubová P., Škulcová L., Poláková Š., Hofman J., Bielská L. 2020. Spatial and temporal distribution of the currently-used and recently-banned pesticides in arable soils of the Czech Republic. *Chemosphere*, Volume 254, 126902, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126902>
- LUCAS 2012. LUCAS Soil Sampling Instructions. European Commission, Joint Research Center, Ispra.
- Mayerhofer J., Wächter D., Calanca P., Kohli L., Roth T., Meuli R.G., Widmer F. 2021. Environmental and anthropogenic factors shape major bacterial community types across the complex mountain landscape of Switzerland. *Frontiers in Microbiology*, March 2021, Vol. 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.581430>
- Menzi H. & Kessler J. 1998. Heavy metal content of manures in Switzerland. *Proc Eighth Int Conf FAO Netw Recycl Agric Munic Ind Residues Agric* 495–506.
- Menzi H., Lehmann E., Kessler J. 1999. Anfall und Zusammensetzung von Hofdünger aus der Rindviehmast. *Agarforschung* 6 (11+12), 417-420.
- Meuli R.G., Schwab P., Wächter D., Ammann S. 2014. Observatoire national des sols (NABO) 1985 à 2004 : Etat et évolution des polluants inorganiques et des paramètres associés aux sols. (Ed.) Office fédérale de l'environnement (OFEV), Berne. État de l'environnement 1409. <https://ira.agroscope.ch/fr-CH/Page/Publikation/Index/34087>
- Meuli R.G., Wächter D., Schwab P., Kohli L., Zimmermann R. 2017. Connecting biodiversity monitoring with soil inventory data – A Swiss case study. *Bulletin BGS* 38, 65-69.
- Monitoring de la Biodiversité en Suisse MBD 2014a. Basisdaten aus dem Biodiversitäts-Monitoring Schweiz E6. (Stand 23.02.2021) https://www.biodiversitymonitoring.ch/images/dokumente/daten/basisdaten_dt/1360_E6_Basisdaten_2015_V1.pdf

- Monitoring de la Biodiversité en Suisse MBD 2014b. Basisdaten aus dem Biodiversitäts-Monitoring Schweiz. Z9 (Stand 23.02.2021)
https://www.biodiversitymonitoring.ch/images/dokumente/daten/basisdaten_dt/1260_Z9_Basisdaten_2014_v1.pdf
- Oberholzer H.-R., Rek J., Weisskopf P., Walther U. 1999. Evaluation of soil quality by means of microbiological parameters related to the characteristics of individual arable sites. *Agribiological Research* 52 (2), 113–125.
- Oberholzer H.-R. & Scheid S. 2007. Bodenmikrobiologische Kennwerte. Erfassung des Zustands landwirtschaftlicher Böden im NABO-Referenzmessnetz anhand biologischer Parameter (NABObio). Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern, Umwelt-Wissen Nr. 0723.
- OFAG 2015. Campagne engrais 2011-2012. Étiquetage et métaux lourds (en allemand ; Marktkampagne Dünger 2011/2012. Kennzeichnung und Schwermetalle). Office fédéral de l'agriculture (OFAG), Berne.
- OFAG 2020. Substances actives de produits phytosanitaires : volume des ventes. État au 28.10.2020. Office fédéral de l'agriculture (OFAG), Berne. <https://www.blw.admin.ch/blw/fr/home/nachhaltige-produktion/pflanzenschutz/pflanzenschutzmittel/verkaufsmengen-der-pflanzenschutzmittel-wirkstoffe.html> (consulté le 01.06.2021)
- OFEV 2018. Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz. Moosanalysen 1990 – 2015 (Dépôts de polluants atmosphériques en Suisse Analyses chimiques des mousses de 1990 à 2015). Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne. Umwelt-Zustand Nr. 1818.
- OFEV 2019. La qualité de l'air en 2018. Résultats du Réseau national d'observation des polluants atmosphériques (NABEL). Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne. État de l'environnement n° 1916.
- OSol 1998. Ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol). RS 814.12.
- Rehbein K., Sprecher Ch., Keller A. 2019. Übersicht Stand Bodenkartierung in der Schweiz - Ergänzung des Bodenkartierungskataloges Schweiz um Bodeninformationen aus Meliorationsprojekten, Agroscope, Servicestelle NABODAT, Zürich. <https://www.are.admin.ch/dam/are/de/dokumente/raumplanung/dokumente/bericht/ubersicht-stand-bodenkartierung.pdf.download.pdf/ubersicht-stand-bodenkartierung.pdf>
- Riedo J., Wettstein F.E., Rösch A., Herzog Ch., Banerjee S., Büchi L., Charles R., Wächter D., Martin-Laurent F., Bucheli T.D., Walder F., van der Heijden M.G.A. 2021. Widespread Occurrence of Pesticides in Organically Managed Agricultural Soils—the Ghost of a Conventional Agricultural Past? *Environmental Science & Technology* 2021 55 (5), 2919-2928. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c06405>
- Rösch A., Beck B., Hollender J., Stamm C., Singer H., Doppler T., Junghans M. 2019. Geringe Konzentrationen mit grosser Wirkung. Nachweis von Pyrethroid- und Organophosphatinsektiziden in Schweizer Bächen im pg I-1-Bereich. *Aqua & Gas* 99 (11):54-66.
- Sánchez-González S., Pose-Juan E., Herrero-Hernández E., Álvarez-Martín A., Sánchez-Martín M.J., Rodríguez-Cruz S. 2013. Pesticide residues in groundwaters and soils of agricultural areas in the Águeda River Basin from Spain and Portugal, *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 93:15, 1585-1601- <https://doi.org/10.1080/03067319.2013.814122>
- Schlöpfer K., Farronato N., Zoller N., Tiefenbacher A., Winter F., Mazacek J., Ruppe S., Kutlar Joss M., Kappeler R., Roth Z., Fuhrmann S., Probst-Hensch N. 2021. Pilot-Messungen von Pflanzenschutzmitteln in Luft und Regen in der Schweiz. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Oekotoxzentrum, Lufthygieneamt beider Basel und OSTLUFT
- Schultheiss U., Roth U., Döhler H., Eckel H. 2004. Erfassung von Schwermetallströmen in landwirtschaftlichen Tierproduktionsbetrieben und Erarbeitung einer Konzeption zur Verringerung der Schwermetalleinträge durch Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft in Agrarökosysteme. Umweltbundesamt, Berlin.
- Schwab P. 2010. Eindringwiderstandsmessung mit dem Penetrometer – Referenzierung von Zeitreihen für die Boden-Dauerbeobachtung. *Bulletin BGS*, 30, 2010, 139-142. <http://link.ira.agroscope.ch/de-CH/publication/35680>
- Schwab P., Dietrich M., Gubler A. 2018. Messung des Eindringwiderstands und des Bodenwasserzustandes. Methodenvergleich verschiedener Geräte und Verfahren. Hrsg. NABO, Zürich-Reckenholz. <http://link.ira.agroscope.ch/de-CH/publication/38452>

- Schwab P. & Gubler A. 2015 (mis à jour mai 2016). NABO-Standortkonzept: Betrieb des Messnetzes ab 2015. Hrsg. Agroscope - Nationale Bodenbeobachtung NABO, Reckenholz. <http://link.ira.agroscope.ch/de-CH/publication/46421>
- Schwab P. & Gubler A. 2016. Methoden zur Bestimmung physikalischer Begleitparameter an Bodenproben. Agroscope Science, 40. <http://link.ira.agroscope.ch/de-CH/publication/36112>
- Schwab P. & Gubler A. 2019. Herleitung von Schätzwerten für Lagerungsdichte und Raumgewicht Feinerde: Pedotransferfunktionen für landwirtschaftlich genutzte Böden der Tiefe 0-20 cm. Nationale Bodenbeobachtung (NABO), Zürich-Reckenholz. <http://link.ira.agroscope.ch/de-CH/publication/42150>
- Schwab P., Weisskopf P, Berli M, Rehbein K., Brunner H., Scheid S., Sommer M., Ropka B. 2006. Langzeitbeobachtung von physikalischen und biologischen Bodeneigenschaften Pilotprojekt LAZBO. Teil 2 Boden-physikalische Untersuchungen. Agroscope FAL Reckenholz, Zürich. <http://link.ira.agroscope.ch/de-CH/publication/25555>
- Silva V., Mol H.G., Zomer P., Tienstra M., Ritsema C.J., Geissen, V. 2019. Pesticide residues in European agricultural soils-a hidden reality unfolded. *Sci. Total Environ.* 2019, 653, 1532–1545.
- Spycher S., Mangold S., Doppler T., Junghans M., Wittmer I., Stamm C., Singer H. 2018. Pesticide Risks in Small Streams—How to Get as Close as Possible to the Stress Imposed on Aquatic Organisms. *Environmental Science & Technology* 52 (8):4526-4535. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00077>
- Stumpf F., Schneider M.K., Keller A., Mayr A., Rentschler T., Meuli R.G., Schaepmann M., Liebisch F. 2020. Spatial monitoring of grassland management using multi-temporal satellite imagery. *Ecological Indicators*. 113. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106201>.
- Vasickova J., Hvezdova M., Kosubova P., Hofman J. 2019. Ecological risk assessment of pesticide residues in arable soils of the Czech Republic. *Chemosphere* 216:479-487. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.158>
- VBB/BSA 2009. Groupe de travail Biologie du sol – application BSA. Aide à la mise en œuvre – Utilisation et interprétation des paramètres biologiques du sol. Frick.

16 Annexe

16.1 Nouveaux sites dans le réseau de mesure NABO

Tableau A 1 Aperçu des régions NUTS-2 qui ont été utilisées pour la comparaison avec la Suisse.

No du site	Nom du site	Commune	Canton	Altitude (m)	Utilisation	Type de site	Premier prélèvement
107	Oberwald	Obergoms	VS	1'366	Herbage	Site principal	2015
108	Bedretto	Bedretto	TI	1'840	Herbage	Site principal	2015
109	Engstligenalp	Adelboden	BE	1'995	Herbage	Site principal	2016
110	Poschiavo	Poschiavo	GR	967	Herbage	Site principal	2016
110.1	Poschiavo	Poschiavo	GR	1'940	Herbage	Étage altitudinal	2016
111	Sarnen	Sarnen	OW	995	Herbage	Site principal	2016
111.1	Sarnen	Sarnen	OW	725	Herbage	Étage altitudinal	2016
111.2	Sarnen	Sarnen	OW	1'500	Herbage	Étage altitudinal	2016
112	Sevelen	Sevelen	SG	1'150	Herbage	Site principal	2016
112.1	Sevelen	Sevelen	SG	520	Herbage	Étage altitudinal	2016
112.2	Sevelen	Sevelen	SG	1'800	Herbage	Étage altitudinal	2016
113	Sent	Sent	GR	1'720	Herbage	Site principal	2017
113.1	Sent	Sent	GR	1'300	Herbage	Étage altitudinal	2017
113.2	Sent	Sent	GR	2'300	Herbage	Étage altitudinal	2017

16.2 Que signifient des « données centrées » ?

Si l'on observe des valeurs mesurées à différents moments, il est souvent difficile de reconnaître un modèle de leur évolution dans le temps. Car les changements d'une année à l'autre sont en général relativement petits par rapport aux différences entre les sites. Dans de tels cas, il est recommandé de centrer les valeurs des différents sites. Cela signifie que l'on calcule, pour chaque site et pour chaque paramètre, la médiane (ou bien la moyenne) de tous les relevés. La médiane (ou la moyenne) est ensuite soustraite des valeurs de mesure originales (cf. représentation schématique à la Figure A 1).

Une fois les données centrées, le niveau absolu des valeurs de mesure ne peut plus être évalué. Par exemple, on ne peut plus reconnaître quel site contient une biomasse élevée, plus de carbone, etc. Par contre, les différences entre les relevés individuels apparaissent clairement. Il est en outre possible d'évaluer si différents sites ou paramètres présentent des évolutions similaires ou différentes. De même, les anomalies dans les séries de mesures sont plus faciles à reconnaître, comme la dernière valeur de la série bleue dans le schéma.

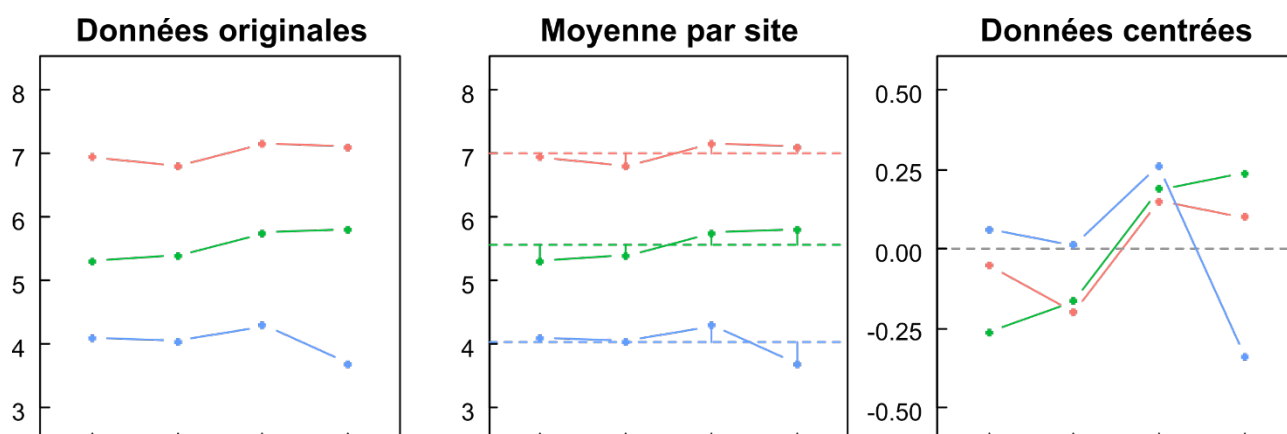


Figure A 1: Exemple schématique de centrage de séries de données.

Une autre option consiste à calculer d'abord le logarithme des valeurs de mesure initiales, puis à centrer les données log-transformées. On obtient ainsi l'écart proportionnel ou relatif des données originales par rapport à la médiane ou à la moyenne. Il est alors en général plus facile de comparer différents paramètres.

16.3 Tableaux de la comparaison entre pays de l'ensemble de données LUCAS-Soil

Les données ci-dessous sont discutées et présentées graphiquement au chapitre 12.

Tableau A 2 Aperçu des régions NUTS-2 qui ont été utilisées pour la comparaison avec la Suisse.

Pays	Région NUTS-2		Nombre de sites	Sites par pays
	N°	Nom		
Allemagne	DE13	Freiburg	36	71
	DE14	Tübingen	35	
France	FR42 / FRF1	Alsace	42	334
	FR43 / FRC2	Franche-Comté	95	
	FR71 / FRK2	Rhône-Alpes	199	
Italie	ITC1	Piemont	172	360
	ITC2	Valle d'Aosta	16	
	ITC4	Lombardia	121	
	ITH1	Provincia Autonoma di Bolzano	51	
Autriche	AT33	Tirol	65	82
	AT34	Vorarlberg	17	
Suisse			155	155

Tableau A 3 Aperçu des caractéristiques pédologiques des sites de grandes cultures de LUCAS-Soil en Suisse et dans les régions NUTS2 limitrophes en Allemagne, en France, en Italie et en Autriche.

		Argile	Limon	Sable	C _{org}	CaCO ₃	N _{tot}	P _{tot}	EC	pH _{H2O}	pH _{CaCl2}
Suisse	N	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
	Min.	9.0	34.0	11.0	8.9	0.0	1.0	16.3	12.3	5.0	4.6
	Max	34.0	70.0	49.0	44.4	190.0	4.0	108.7	52.1	8.1	7.6
	Médiane	22.5	48.0	26.5	22.0	1.0	2.0	42.7	24.6	7.1	6.8
	Moyenne	23.3	49.3	27.2	22.5	19.2	2.5	47.8	26.5	6.8	6.4
	Std. Dev.	6.2	7.7	10.3	8.7	43.2	0.8	23.7	10.7	1.0	1.0
Allemagne	N	7	7	7	37	37	37	37	37	37	37
	Min.	10.0	40.0	2.0	14.2	0.0	1.4	8.3	9.7	5.1	4.7
	Max	46.0	59.0	51.0	27.5	195.0	3.3	125.7	76.3	8.2	7.7
	Médiane	30.0	47.0	24.0	17.3	10.0	2.1	36.3	21.1	7.3	7.0
	Moyenne	27.6	48.6	23.9	18.6	48.5	2.2	44.5	27.1	7.1	6.8
	Std. Dev.	11.2	7.3	15.9	4.0	66.4	0.5	28.2	14.9	0.8	0.8
France	N	5	5	5	25	25	25	25	25	25	25
	Min.	8.0	38.0	28.0	29.5	0.0	1.8	7.7	22.3	4.5	4.4
	Max	23.0	53.0	46.0	69.6	484.0	6.5	179.0	142.1	8.1	7.6
	Médiane	15.0	47.0	40.0	43.7	38.0	3.7	73.9	32.9	7.2	7.0
	Moyenne	16.2	45.2	38.8	44.5	76.3	3.9	69.0	45.9	6.8	6.6
	Std. Dev.	6.7	6.9	7.5	10.9	107.0	1.4	40.0	29.1	1.0	1.0
Italie	N	17	17	17	166	166	166	166	166	166	166
	Min.	5.0	33.0	2.0	7.3	0.0	0.9	4.8	6.0	4.6	4.2
	Max	50.0	62.0	61.0	39.4	700.0	4.7	164.8	70.3	8.1	7.7
	Médiane	23.0	47.0	25.0	15.3	1.0	1.9	32.1	21.6	6.6	6.3
	Moyenne	24.9	49.4	25.3	16.9	43.9	2.1	40.1	25.4	6.7	6.4
	Std. Dev.	10.8	7.4	14.5	6.9	92.7	0.7	29.1	13.4	0.9	0.9
Autriche	N	7	7	7	64	64	64	64	64	64	64
	Min.	13.0	18.0	11.0	4.9	0.0	0.7	4.9	5.5	4.2	3.9
	Max	32.0	58.0	69.0	16.9	246.0	2.5	101.0	52.2	8.1	7.6
	Médiane	26.0	53.0	21.0	10.7	0.5	1.4	32.6	18.1	6.6	6.3
	Moyenne	24.6	49.1	26.1	10.7	30.6	1.4	35.4	19.6	6.6	6.2
	Std. Dev.	6.3	14.2	20.0	3.3	61.4	0.4	22.7	10.0	1.0	1.0

Tableau A 4 Aperçu des caractéristiques pédologiques des sites d'herbages de LUCAS-Soil en Suisse et dans les régions NUTS2 limitrophes en Allemagne, en France, en Italie et en Autriche.

		Argile	Limon	Sable	C _{org}	CaCO ₃	N _{tot}	P _{tot}	EC	pH _{H2O}	pH _{CaCl2}
Suisse	N	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
	Min.	6.0	35.0	6.0	13.0	0.0	2.0	0.0	4.8	4.2	3.9
	Max	40.0	73.0	52.0	105.6	410.0	9.0	167.8	90.0	7.7	7.5
	Médiane	20.0	54.0	23.0	37.9	0.0	4.0	23.8	38.7	6.1	5.7
	Moyenne	19.6	54.4	26.0	42.7	35.7	4.6	32.0	41.3	6.1	5.8
	Std. Dev.	6.5	7.7	11.8	21.0	80.0	1.7	27.4	19.8	1.1	1.2
Allemagne	N	5	5	5	18	18	18	18	18	18	18
	Min.	9.0	39.0	18.0	14.2	0.0	1.6	8.7	6.7	4.8	4.6
	Max	20.0	62.0	52.0	31.0	184.0	3.8	103.6	77.9	7.8	7.4
	Médiane	18.0	50.0	36.0	24.1	1.0	2.8	20.0	30.5	6.1	6.0
	Moyenne	16.2	50.4	33.6	23.7	27.1	2.7	35.7	31.8	6.3	6.0
	Std. Dev.	5	5	5	5.5	60.5	0.7	29.1	20.9	0.9	0.9
France	N	50	50	50	124	124	124	124	124	124	124
	Min.	6.0	32.0	11.0	26.4	0.0	2.4	6.2	6.4	3.9	3.7
	Max	33.0	67.0	62.0	150.4	531.0	12.8	129.7	184.9	7.7	7.5
	Médiane	15.0	55.0	28.5	50.9	1.0	5.3	26.2	45.0	6.1	5.9
	Moyenne	16.3	54.0	29.7	57.7	35.2	5.6	33.4	49.7	6.1	5.8
	Std. Dev.	7.1	8.2	13.4	26.0	88.1	2.0	25.4	35.9	1.0	1.0
Italie	N	27	27	27	103	103	103	103	103	103	103
	Min.	2.0	13.0	9.0	6.6	0.0	0.8	0.0	6.6	4.3	4.1
	Max	38.0	64.0	85.0	40.6	411.0	5.3	174.9	81.8	8.3	7.8
	Médiane	14.0	51.0	33.0	30.1	0.0	3.2	21.5	22.4	6.0	5.6
	Moyenne	16.2	48.7	35.1	27.4	23.2	3.1	31.9	27.4	6.1	5.8
	Std. Dev.	8.9	11.5	18.5	9.2	68.4	1.1	28.8	17.7	1.0	1.0
Autriche	N	4	4	4	9	9	9	9	9	9	9
	Min.	19.0	49.0	9.0	3.5	0.0	0.5	4.7	4.6	4.6	4.3
	Max	43.0	63.0	32.0	14.7	331.0	1.7	112.1	24.5	8.1	7.5
	Médiane	22.0	53.0	19.0	9.7	1.0	1.2	34.1	13.8	6.4	6.0
	Moyenne	26.5	54.5	19.8	9.6	62.9	1.2	37.1	14.1	6.8	6.3
	Std. Dev.	11.4	6.8	10.6	3.6	107.6	0.4	32.4	6.7	1.2	1.2