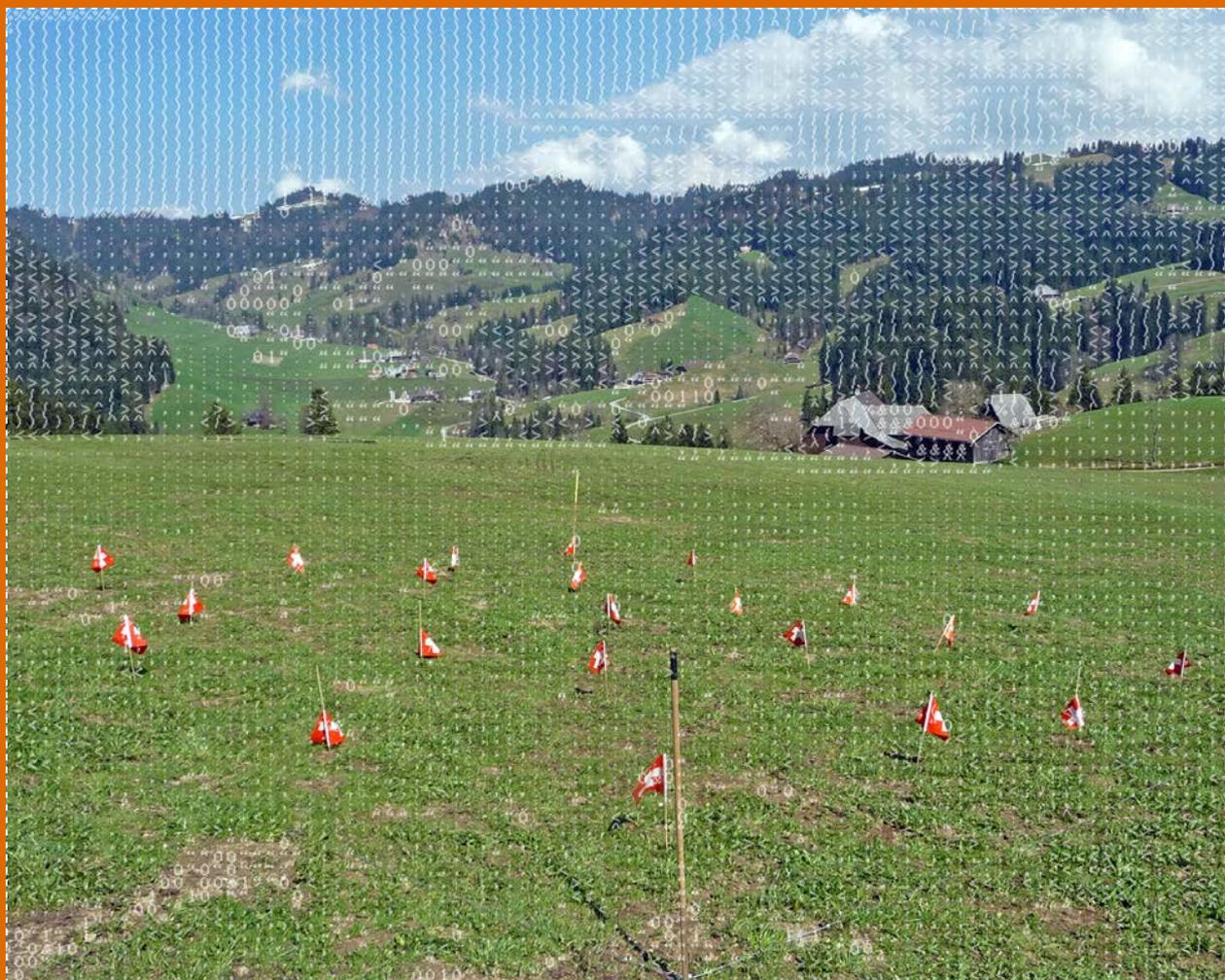


# > Observatoire national des sols (NABO) 1985 à 2009

*Etat et évolution des polluants inorganiques et  
des paramètres associés aux sols*



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'environnement OFEV



# > Observatoire national des sols (NABO) 1985 à 2009

*Etat et évolution des polluants inorganiques et  
des paramètres associés aux sols*

## **Impressum**

### **Editeur**

Office fédéral de l'environnement (OFEV)  
L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement,  
des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

### **Auteurs**

Andreas Gubler, Peter Schwab, Daniel Wächter, Reto G. Meuli,  
Armin Keller

### **Accompagnement**

Toni Candinas (OFAG), Andrea Ulrich (OFAG), Fabio Wegmann (OFEV)

### **Référence bibliographique**

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 sols.  
Office fédéral de l'environnement, Berne. Etat de l'environnement  
n° 1507: 81 p.

### **Traduction**

André Caruzzo, Genève

### **Graphisme, mise en page**

Stefanie Studer, Künten

### **Photo de couverture**

Prélèvement d'échantillons sur un site d'herbage de 10 m x 10 m  
à Trub (BE)

### **Téléchargement au format PDF**

[www.bafu.admin.ch/uz-1507-f](http://www.bafu.admin.ch/uz-1507-f)

Il n'est pas possible de commander une version imprimée.

Cette publication est également disponible en allemand.

© OFEV 2015

# > Table des matières

<b>Abstracts</b>	<b>5</b>	<b>7 Conclusions</b>	<b>47</b>
<b>Avant-propos</b>	<b>7</b>	7.1 Suivi des mesures de politique environnementale	47
<b>Résumé</b>	<b>8</b>	7.2 Mesures nécessaires pour le zinc et le cuivre	47
		7.3 Changements au niveau du carbone organique	49
		7.4 Les apports d'éléments nutritifs sont stabilisés à un niveau élevé	49
<b>1 Le sol, une ressource limitée</b>	<b>10</b>	<b>8 Perspectives</b>	<b>51</b>
		8.1 Adaptation du réseau et du programme de mesures	51
<b>2 Le réseau de mesure NABO</b>	<b>13</b>	8.2 Synthèse entre monitoring direct et indirect	52
2.1 103 sites	13	8.3 Etats actuels du niveau régional jusqu'à l'échelle nationale	53
2.2 Prélèvement des échantillons et analyses	15		
2.3 Le monitoring indirect, un complément important	16	<b>Annexes</b>	<b>54</b>
		A1 Précisions concernant les méthodes	54
<b>3 Métaux lourds</b>	<b>17</b>	A2 Détails concernant les métaux lourds	62
3.1 Variations des teneurs en métaux lourds dans la couche supérieure du sol	17	<b>Remerciements</b>	<b>76</b>
3.2 Apports de zinc et de cuivre par les engrais de ferme	22	<b>Bibliographie</b>	<b>77</b>
3.3 Bilan du zinc d'une parcelle du NABO	29	<b>Répertoire</b>	<b>79</b>
3.4 Recul des retombées atmosphériques de métaux lourds	31		
<b>4 Carbone organique</b>	<b>34</b>		
4.1 Herbages	34		
4.2 Grandes cultures	36		
4.3 Forêts	37		
4.4 Standardisation des séries temporelles	38		
<b>5 Eléments nutritifs</b>	<b>40</b>		
5.1 Herbages	41		
5.2 Grandes cultures	41		
5.3 Déduction de recommandations	42		
<b>6 Echantillonnage systématique dans des sites du Monitoring de la biodiversité en Suisse</b>	<b>45</b>		



## > Abstracts

The Swiss National Soil Monitoring Network (NABO), with 103 permanent monitoring stations, material flow analyses and process modelling, is both a reference network and an instrument for early detection and for evaluating the effectiveness of soil protection measures. This report presents the results of all five surveys performed so far (1985-2009). The focus rests on the temporal evolutions of soil pollution by heavy metals, on the soil contents of organic carbon, and on the nutrients nitrogen, phosphorus and potassium.

Die Nationale Bodenbeobachtung (NABO) mit ihren 103 Dauerbeobachtungsstandorten, Stoffflussanalysen und Prozessmodellierungen ist ein Referenznetz sowie ein Instrument der Früherkennung und Erfolgskontrolle zum Schutz des Bodens. Im vorliegenden Bericht werden die Resultate aller fünf bisherigen Erhebungen (1985–2009) vorgestellt. Im Zentrum stehen zeitliche Veränderungen bei der Bodenbelastung mit Schwermetallen sowie bei den Gehalten an organischem Kohlenstoff und bei den Nährstoffen Stickstoff, Phosphor und Kalium.

Avec ses 103 sites d'observation à long terme, ses analyses de flux de substances et ses modélisations de processus, l'Observatoire national des sols (NABO) est à la fois un réseau de référence et un instrument d'identification précoce et de contrôles de suivi pour la protection des sols. Ce rapport présente les résultats des cinq périodes de mesures réalisées jusqu'ici (1985–2009). L'accent est mis sur les évolutions temporelles de la pollution aux métaux lourds, des teneurs en carbone organique et des éléments nutritifs azote, phosphore et potassium.

Con 103 siti di osservazione permanente, l'analisi dei flussi di sostanze e la modellizzazione dei processi, la Rete nazionale di osservazione dei suoli (NABO) è una rete di riferimento, ma anche uno strumento di allerta precoce e di valutazione dell'efficacia delle misure di protezione del suolo. Questo rapporto illustra i risultati dei cinque rilevamenti effettuati tra il 1985 e il 2009. Significative appaiono soprattutto le variazioni temporali dell'inquinamento da metalli pesanti, come pure dei tenori di carbonio organico e di nutrienti quali l'azoto, il fosforo e il potassio.

**Keywords:**

Long term soil monitoring,  
Temporal trends,  
Inorganic contaminants,  
Soil organic carbon,  
Nutrients

**Stichwörter:**

Boden-Dauerbeobachtung,  
Zeitliche Entwicklung,  
Anorganische Schadstoffe,  
Organischer Kohlenstoff des  
Bodens, Nährstoffe

**Mots-clés:**

Observation à long terme des  
sols, Développement temporel,  
Polluants inorganiques,  
Carbone organique du sol,  
Éléments nutritifs

**Parole chiave:**

Monitoraggio a lungo termine  
dei suoli, Variazioni temporali,  
Inquinanti inorganici,  
Carbonio organico dei suoli,  
Nutrienti



---

## > Avant-propos

Les sols ont une épaisseur qui varie entre quelques centimètres et quelques mètres, ce qui est extrêmement peu par rapport aux 6370 kilomètres que mesure le rayon de la terre, mais cela signifie beaucoup pour toute la vie sur terre. L'histoire de l'humanité des 10 000 dernières années a fortement marqué les sols, tout comme, à l'inverse, les sols ont marqué et continuent de marquer l'évolution de l'humanité. Nous sommes en effet et serons toujours tributaires de sols fertiles en quantité suffisante. C'est donc notre devoir de faire attention et d'éviter les atteintes portées aux sols. La formation des sols est un processus lent: il faut environ 100 ans pour que se forme 1 cm de sol. De même, il faut beaucoup de temps pour que les sols dégradés se rétablissent.

L'Observatoire national des sols (NABO) se charge d'observer les sols et leur évolution depuis le milieu des années 1980. Il contribue ainsi pour une part importante à l'identification précoce des risques pour leur fertilité. Le NABO fait à cette fin des prélèvements réguliers dans le réseau de mesure de référence qui compte une centaine de sites d'observation permanente, répartis dans tout le pays. Le NABO surveille non seulement les substances polluantes, mais aussi d'autres aspects qui influent sur les fonctions du sol, comme les teneurs en nutriments et en carbone, l'activité biologique, le compactage et l'acidification.

Le présent rapport expose les résultats de cinq cycles de mesure dans le réseau de référence du NABO qui ont eu lieu entre 1985 et 2009. Il est d'abord centré sur l'évolution des teneurs en métaux lourds et en carbone. Il présente aussi les premiers résultats sur l'évolution des teneurs en nutriments dans une partie des sites d'observation. L'exemple d'une exploitation agricole permet de montrer quelle valeur ajoutée le monitoring dit indirect peut apporter. Ainsi, les données d'exploitation permettent d'établir des bilans concernant les substances pour la parcelle en question. Le rapport montre que le NABO en tant que tel fournit des données très utiles, mais qu'il doit être optimisé ces prochaines années pour répondre aux nouvelles questions qui ne manqueront pas de se poser.

2015, ce n'est pas seulement 30 ans d'observation nationale des sols, c'est aussi l'année internationale des sols. C'est un fait admis et reconnu à l'échelle mondiale que les sols sont un fondement indispensable à la vie. La Suisse compte les sols parmi les plus fertiles de la planète. Nous devons donc veiller à préserver leur qualité. Nous souhaitons à toutes et à tous une agréable et intéressante lecture.

Gérard Poffet  
Sous-directeur  
Office fédéral de l'environnement (OFEV)

Eva Reinhard  
Directrice suppléante  
Office fédéral de l'agriculture (OFAG)

## > Résumé

Le sol est à la base de notre production alimentaire. Il est donc important d'éviter les évolutions qui lui sont préjudiciables, comme les atteintes à la fertilité. S'appuyant sur un réseau de mesure de 103 sites d'observation à long terme, l'Observatoire national des sols (NABO) surveille depuis 1985 l'évolution des teneurs en polluants de nos sols. Les sites ont été choisis afin d'être représentatifs de différents types d'utilisation (grandes cultures, herbages, forêt et cultures spéciales). Ce rapport présente les résultats de cinq cycles de mesures (1985–2009) portant sur les métaux lourds cadmium, zinc, cuivre, mercure, plomb, nickel, chrome et cobalt ainsi que sur le carbone organique. Ils sont complétés, pour quelques sites choisis du NABO, par les résultats d'analyses de l'azote, du phosphore et du potassium en tant que principaux éléments nutritifs des plantes.

Pour le cadmium, le nickel, le chrome et le cobalt, aucune variation significative n'a été observée sur les 20 dernières années. En revanche, les teneurs en plomb et en mercure dans la couche supérieure du sol ont nettement diminué. D'une part le renforcement des prescriptions en matière de protection de l'air et l'interdiction de l'essence plombée produisent leurs effets; d'autre part, il est possible que le mélange des couches supérieure et sous-jacente du sol par la bioturbation et/ou le travail mécanique entraîne une dilution dans la couche supérieure.

Une augmentation régulière des concentrations de zinc et de cuivre a été observée dans la couche supérieure des sols d'herbages intensifs. Les hausses particulièrement marquées (>5 % de la valeur indicative) sont imputables à l'utilisation d'engrais de ferme (lisier de porcs et de bovins, mais aussi fumier). C'est ce qui ressort du bilan des flux de substances calculé d'après les données d'exploitation des agriculteurs. Le zinc et le cuivre sont utilisés dans les fourrages concentrés comme compléments alimentaires et pour accroître la productivité, et aboutissent ensuite dans les sols à travers les engrais de ferme. La concentration de ces deux éléments dans le lisier varie considérablement selon le mode d'exploitation. Des études ont montré que les quantités de zinc et de cuivre contenues dans les aliments pour animaux pourraient être notablement réduites sans effet négatif pour les animaux de rente.

Les valeurs indicatives fixées par l'ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol) pour les éléments étudiés ne sont dépassées que dans quelques sites, les concentrations excessives étant dues dans la plupart des cas à la composition de la roche-mère. L'exploitation de sols pendant de nombreuses années avec des cultures spéciales comme la viticulture, l'arboriculture et les cultures maraîchères a provoqué des dépassements de la valeur indicative pour le cuivre.

Depuis les années 1980, de nouvelles problématiques sont régulièrement venues s'ajouter aux atteintes par des polluants. Parmi celles-ci figure notamment le rôle de réservoir et l'effet tampon du sol dans le contexte du changement climatique. Jusqu'à la fin des années 1990, une légère diminution du carbone organique a été observée dans des sites

---

de grandes cultures; ensuite, les teneurs ont à nouveau légèrement augmenté. Les variations mesurées sont toutefois relativement faibles, de l'ordre de 0,1 à 0,2 % de carbone organique. Pour savoir s'il s'agit de variations effectives, ces résultats sont en train d'être analysés en corrélation avec d'autres facteurs de site pertinents, comme le régime hydrique et la teneur en éléments nutritifs.

Des analyses menées dans 16 sites sélectionnés du NABO ont permis d'observer des changements similaires chez des éléments nutritifs importants pour les plantes, comme l'azote, le phosphore et le calcium: ainsi, l'azote et le phosphore tendent à augmenter jusqu'à la fin des années 1990 dans les herbages intensifs. Mais au cours des dix dernières années, les concentrations dans le sol de ces deux principaux nutriments n'ont pratiquement plus changé. Des études sont en cours pour déterminer s'il existe un lien entre ces observations et l'introduction, au milieu des années 1990, des prestations écologiques requises (PER). L'analyse des teneurs en éléments nutritifs sur les 70 sites agricoles du réseau NABO doit permettre de mieux étayer ces résultats. Il en va de même pour le potassium, dont la concentration a continuellement diminué sur la plupart des sites d'herbages étudiés jusqu'ici.

Afin de pouvoir mieux déterminer et comprendre à l'avenir les variations et leurs causes, plusieurs améliorations méthodologiques et stratégiques sont prévues ou déjà mises en œuvre dans le NABO. Ainsi, la synthèse des résultats du réseau de mesure et du monitoring indirect (analyse des flux de substances et modélisation de processus) doit permettre une meilleure compréhension des changements observés. Par ailleurs, des données ponctuelles et surfaciques supplémentaires permettront d'étudier des états et des scénarios au niveau régional et jusqu'à l'échelle nationale.

# 1 > Le sol, une ressource limitée

*«Buy land, they're not making it anymore.»*

*Mark Twain, 1835–1910*

Il y a plus de 100 ans, l'écrivain américain Mark Twain conseillait déjà d'acheter du terrain, car on n'en fabriquerait plus. Aujourd'hui, ce conseil, qui se voulait ironique, se révèle plus actuel que jamais, en particulier lorsqu'il se réfère aux terres fertiles. Nous détruisons toujours plus de sols en construisant des maisons, des entrepôts, des routes ou encore des voies ferrées. On oublie que celui-ci est à la base de notre production alimentaire et qu'il fournit de nombreux autres services indispensables à l'être humain et à l'environnement. Sans sols fertiles, on ne pourrait produire ni céréales, ni légumes, ni viande.

Le sol est une ressource limitée, surtout dans un pays de faible étendue et très peuplé comme la Suisse. Entre 1983 et 2007, la surface bâtie a progressé de 23 % (+490 km<sup>2</sup>). Cette augmentation s'est faite en grande partie au détriment des terres cultivées (OFS & OFEV 2011). Le succès d'interventions politiques comme l'initiative sur les résidences secondaires ou la révision de la loi sur l'aménagement du territoire, montre que la protection du paysage rural et des terres cultivées est importante aux yeux de la population.

Outre sa fonction de production mentionnée ci-dessus, le sol remplit de nombreuses autres fonctions économiques et écologiques. Il emmagasine et filtre notre eau potable, régule le régime hydrique et fournit de l'eau aux plantes. Il offre un habitat à des organismes et représente donc un fondement de la biodiversité. Il a un effet tampon sur les agents acidifiants de polluants atmosphériques, et contribue à l'équilibre climatique en stockant du carbone sous forme d'humus.

Le sol doit aussi être étudié en profondeur, au sens propre du terme. Jusqu'ici, cette troisième dimension a été largement négligée dans les processus d'aménagement du territoire. Dans ce domaine, il est impératif de mieux tenir compte des services assurés par le sol, de manière à pouvoir gérer et désamorcer les divers conflits d'utilisation.

A l'objectif quantitatif de réduire au minimum l'imperméabilisation des terres s'ajoute un objectif qualitatif, celui de protéger les capacités spécifiques des sols. Certains se prêtent mieux à l'exploitation agricole, d'autres sont plus performants pour emmagasiner et filtrer l'eau. La qualité d'un sol dépend de nombreuses propriétés, telles que profondeur, texture, perméabilité, disponibilité des éléments nutritifs, ou encore proportion de matière organique. Ces propriétés et leur importance respective ont été principalement déterminées par le climat, la roche-mère, le relief et la végétation qui ont régi la formation du sol depuis la dernière période glaciaire, il y a environ 10 000 ans. L'exploitation agricole peut améliorer ou diminuer la qualité d'un sol. Les apports de

polluants, les excès de substances nutritives ou encore une exploitation inadaptée sont autant de facteurs qui affectent sa fertilité.

La loi sur la protection de l'environnement exige la conservation à long terme de la fertilité des sols (art. 33 LPE, 1983). Les modifications dans le sol (p. ex. pertes par érosion, compactations, accumulation de polluants persistants) sont en général des processus lents, mais souvent irréversibles. C'est pourquoi il est important de détecter précocement les changements préjudiciables afin de pouvoir prendre des mesures préventives.

**Fig. 1** > Prélèvement d'échantillons pour le NABO à Kiesen (BE)



Dans ce contexte, l'Observatoire national des sols (NABO) contribue depuis les années 1980 à la détermination de la qualité des sols au niveau national et à la détection précoce des évolutions néfastes. Au début, les mesures ont surtout porté sur les métaux lourds provenant des retombées atmosphériques ou apportés par certaines matières auxiliaires de l'agriculture comme les produits phytosanitaires, les boues d'épuration ou le lisier. Les analyses intégraient également l'acidité du sol. Avec le temps, de nouvelles questions se sont posées dans l'observation des sols. Ainsi, les progrès techniques de la chimie analytique ont permis d'étudier des polluants organiques comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (PAH), les biphényles, la dioxine ou les résidus de produits phytosanitaires dans les sols (Brändli et al. 2008, Desaulles et al. 2008, Schmid et al. 2005). Depuis quelques années, les analyses des propriétés chimiques ont été complétées par celles des propriétés physiques et biologiques. Sachant que les processus chimiques, biologiques et physiques interagissent dans les sols, cette approche élargie permet d'améliorer la détection et l'interprétation des atteintes insidieuses à la fertilité des sols.

L'ordonnance sur les atteintes portées aux sols prévoit que l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) gère en collaboration avec l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG) un réseau national de référence pour l'observation des atteintes portées aux sols (NABO) (art. 3, al. 1, OSol, 1998). Les tâches du NABO comprennent la détermination des atteintes actuelles des sols au niveau national, et la détection précoce des nouvelles atteintes et modifications. Cette tâche est assurée à l'aide de deux instruments combinés:

- 
- > un réseau de mesure constitué de sites d'observation à long terme et destiné à couvrir en particulier les contaminations de fond en Suisse (monitoring direct), et
  - > la détermination des flux de substances par la modélisation des processus pédologiques pertinents (monitoring indirect, cf. point 2.3).

L'utilisation conjointe de ces deux approches permet de garantir la plausibilité des variations temporelles mesurées des propriétés du sol. A l'aide de modèles de processus pédologiques appropriés, il est possible d'expliquer les causes des changements et d'établir ainsi des prévisions pour les évolutions futures.

Ce rapport présente les résultats des cinq premiers cycles de relevés (1985–2009) du monitoring direct du réseau de mesure du NABO. Il se concentre sur les atteintes par les métaux lourds. Il donne en outre pour 18 sites d'herbages un aperçu de l'évolution du carbone organique et des résultats d'analyse des éléments nutritifs et des cations.

## 2 > Le réseau de mesure NABO

---

Depuis le milieu des années 1980, l'Observatoire national des sols (NABO) gère un réseau de mesure constitué de sites d'observation permanente. Des échantillons de sol y sont prélevés et analysés tous les cinq ans afin de relever les atteintes par des polluants, en particulier les évolutions à long terme, mais aussi les concentrations actuelles.

### 2.1 103 sites

Le réseau de mesure NABO comprend aujourd'hui 103 sites d'observation<sup>1</sup>, répartis dans l'ensemble de la Suisse (fig. 2, tab. 1). Ils ont été sélectionnés dans les années 1980 en veillant à ce que différents espaces naturels de la Suisse et divers types d'utilisation et d'exploitation soient représentés. Environ la moitié d'entre eux font l'objet d'une exploitation agricole intensive (grandes cultures, cultures maraîchères, cultures fruitières, viticulture, exploitations herbagères intensives). Un cinquième des sites se trouvent dans des surfaces d'exploitation extensive (p.ex. pâturages peu intensifs, alpages), le tiers restant étant situé en zone forestière. En outre, deux sites d'observation ont été aménagés dans des parcs urbains.

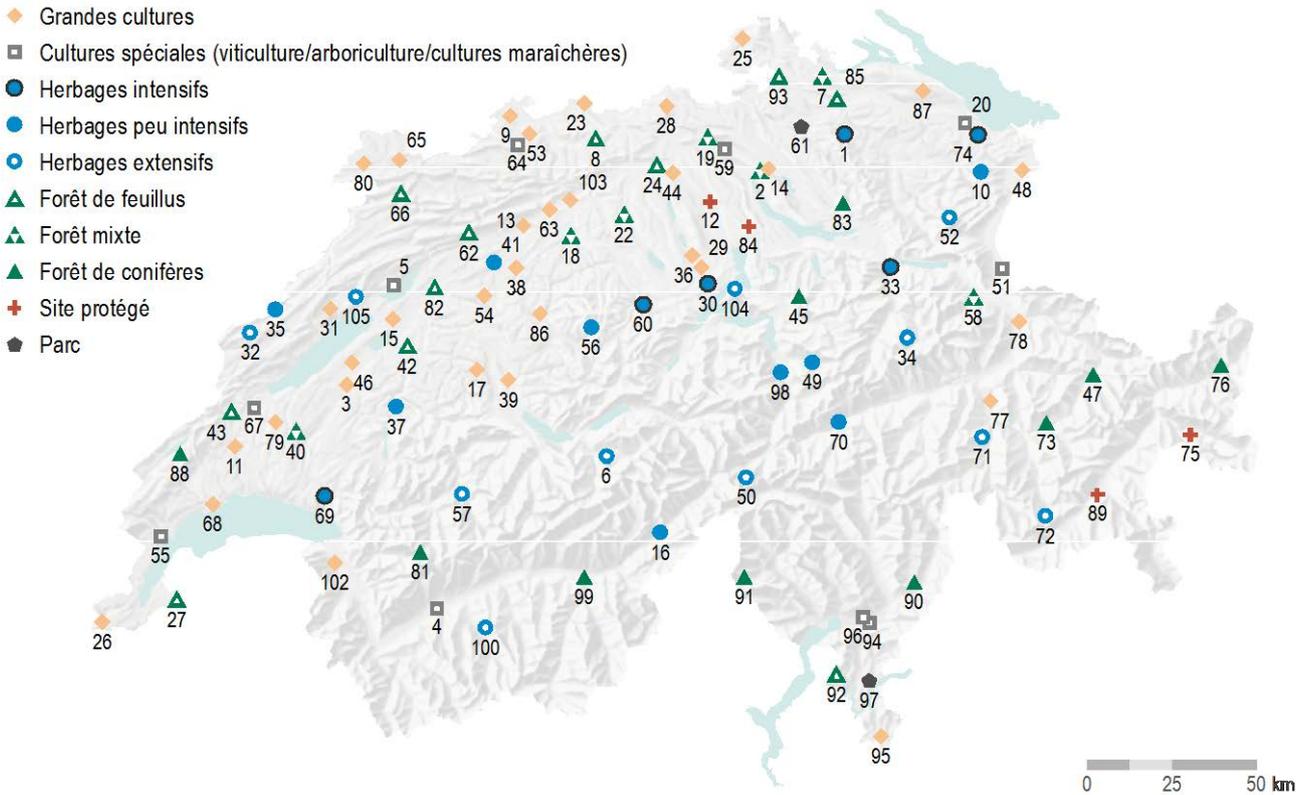
Les sites d'observation reflètent des combinaisons de paramètres (utilisation du territoire, type de sol, géologie, altitude et autres propriétés stationnelles) caractéristiques pour la Suisse. Pour que les relevés restituent le plus fidèlement possible les conditions pratiques de l'exploitation agricole ou forestière, les parcelles n'ont pas été marquées, délimitées ou protégées d'une autre manière, mais peuvent être localisées très précisément au moyen d'aimants enterrés. Les exploitants des parcelles d'observation à long terme ne sont donc pas influencés. Les résultats du réseau de mesure NABO (p.ex. l'évolution dans le temps des propriétés du sol ou des bilans de substances) reflètent ainsi les conditions réelles de l'exploitation agricole et de l'environnement. Cet aspect revêt une grande importance pour de nombreuses questions étudiées, comme les changements de teneur en carbone organique du sol, car il est ainsi possible de tirer des conclusions sur les combinaisons de facteurs stationnels susmentionnées et sur les types d'exploitation.

Des données détaillées sur les sites d'observation à long terme et leurs caractéristiques se trouvent dans les rapports de Desales & Studer (1993) et Desales & Dahinden (2000).

---

<sup>1</sup> Les sites 101 (Chamoson) et 21 (Köniz) ont dû être abandonnés après le 3<sup>e</sup>, respectivement le 4<sup>e</sup> cycle de prélèvement et ne font plus partie du réseau de mesure NABO.

Fig. 2 > Sites d'observation à long terme du NABO et leur utilisation lors du 5<sup>e</sup> cycle de prélèvements



**Tab. 1 > Nombre de sites d'observation permanente du NABO**

Disponibles pour ce rapport		Nbre total du réseau NABO	Détails
<b>Grandes cultures</b>	<b>33</b>	<b>33</b>	Surfaces d'assolement
<b>Herbages</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	
• intensifs	6	6	exploités & fertilisés plusieurs fois
• peu intensifs	9	9	exploités & fertilisés env. 3 fois
• extensifs	10	11	alpages ou prairies naturelles non fertilisés
<b>Forêts</b>	<b>27</b>	<b>28</b>	
• feuillus	10	11	
• mixtes	7	7	
• résineux	10	10	
<b>Cultures spéciales</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	
• culture maraîchère	3	4	
• arboriculture	3	3	
• viticulture	3	3	
<b>Autres</b>			
• sites protégés	4	4	Sites dans des réserves naturelles
• parcs	2	2	
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>103</b>	

## 2.2

**Prélèvement des échantillons et analyses**

Les sites d'observation sont échantillonnés à des intervalles de cinq ans. Chaque année, un cinquième environ des sites sont visités. Depuis 1985, cinq cycles de mesures ont été effectués, et la campagne sur le terrain pour le 6<sup>e</sup> cycle est en cours.

L'échantillonnage se fait toujours au même emplacement. Quatre échantillons composés (comprenant chacun 25 carottes) sont prélevés dans les 20 premiers cm du sol sur une placette de 10 x 10 mètres. Un cinquième échantillon composé, constitué lui aussi de 25 carottes, est directement congelé après prélèvement (sans être préparé). La profondeur d'échantillonnage de 0 à 20 cm correspond aux prescriptions de l'OSol (1998). Depuis le 5<sup>e</sup> cycle de mesure (dès 2005), des sondes de battage sont utilisées pour ramener du matériel prélevé jusqu'à 40 cm de profondeur. En plus des échantillons composés superficiels, depuis le lancement du 6<sup>e</sup> cycle en 2010, des échantillons sont prélevés à une profondeur maximale de 1 m afin de pouvoir mettre en évidence d'éventuelles modifications dans la couche sous-jacente du sol.

Les échantillons de sol sont préparés, séchés et tamisés par le NABO. Ainsi conditionnés, ils peuvent être stockés pendant plusieurs décennies. Les échantillons archivés peuvent à tout moment faire l'objet d'analyses de nouveaux paramètres. Un échantillon composé supplémentaire est en outre conservé à -20° C. Les archives du NABO sont une sorte de mémoire à long terme des sols suisses et servent de référence pour l'étude de nombreuses problématiques en relation avec la qualité du sol. A l'avenir, elles

permettront de mesurer des propriétés chimiques que nous ne connaissons pas ou que nous ne pouvons pas encore analyser à l'heure actuelle.

**Fig. 3** > Prélèvement des échantillons composés superficiels (4 échantillons de 25 carottes) sur le site de Disentis (GR), et détail d'une carotte à 0–20 cm



Les lecteurs intéressés trouveront des détails sur le prélèvement et la préparation des échantillons et sur les méthodes d'analyse dans les annexes du présent rapport (A1).

### 2.3 Le monitoring indirect, un complément important

Les apports et exports pertinents de polluants par les engrais minéraux, les engrais de ferme, les produits phytosanitaires, la pollution de l'air et les récoltes sont relevés sur 48 parcelles agricoles du réseau NABO. Les concentrations de métaux lourds mesurées sur les sites d'observation peuvent être comparées avec ces bilans de substances pour déterminer la cause d'éventuels apports de polluants. De cette manière, il est possible de prendre des mesures pour les réduire.

Les résultats actuels font apparaître des contradictions entre l'évolution des concentrations mesurées dans le sol et celles calculées sur la base des flux de substances. Des apports importants de substances ne sont pas forcément liés à une accumulation dans le sol. En ce moment, l'interprétation des modifications des réserves de substances dans le sol est restreinte à la couche supérieure (0 à 20 cm), ce qui limite les possibilités de comparaison entre monitoring direct et indirect. Le prélèvement d'échantillons sur toute la longueur du profil jusqu'à une profondeur maximale de 1 m constitue une première étape pour identifier sur l'ensemble du profil les réserves de substances et les migrations dans les couches profondes du sol, et les expliquer avec des modèles de processus appropriés.

On trouvera des informations complémentaires sur les bilans des flux de substances du NABO dans le rapport de Keller et al. (2005), et de premiers résultats sur la modélisation dynamique du phosphore pour les sites du NABO dans Della Peruta (2013).

## 3 > Métaux lourds

---

On dispose aujourd'hui d'une série temporelle de cinq cycles de relevés pour les sites du NABO. Celle-ci s'étend sur 20 ans et permet donc de détecter des augmentations ou diminutions même relativement faibles des concentrations. Les résultats de 100 sites sur les 103 que compte actuellement le NABO sont présentés dans ce chapitre<sup>2</sup>.

### 3.1 Variations des teneurs en métaux lourds dans la couche supérieure du sol

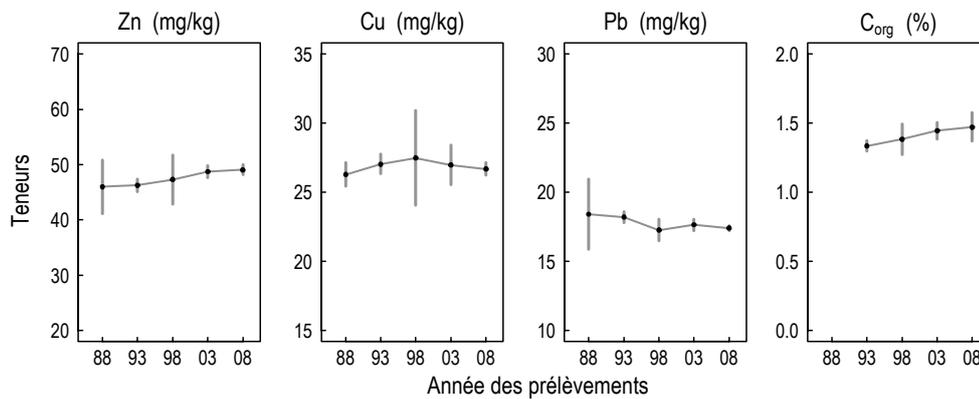
Les séries temporelles du zinc, du cuivre, du plomb et du carbone organique (C<sub>org</sub>) du site de grandes cultures d'Etoy (VD) offrent un exemple de la façon dont les valeurs sont déterminées et montrent comment les concentrations peuvent varier sur 20 ans (cf. fig. 4). Quatre échantillons composés ont été prélevés et analysés lors de chaque cycle. L'évaluation est effectuée sur la base de la moyenne (points noirs dans la fig. 4). La dispersion des quatre échantillons permet de calculer un intervalle de confiance de la moyenne (celui-ci est représenté par les barres verticales dans la fig. 4; cf. annexe A1-5). L'étendue de l'intervalle de confiance par site et par cycle de prélèvements dépend principalement de l'hétérogénéité naturelle du sol, mais aussi de facteurs liés au prélèvement et à la préparation des échantillons ainsi qu'à la précision des analyses.

Sur ce site de grandes cultures (cf. fig. 4), on observe de légères augmentations des teneurs en zinc et en carbone organique. Celles-ci sont faibles – inférieures à 5 mg de zinc par kg de terre fine<sup>3</sup> et à 0,2 % de C<sub>org</sub> – mais néanmoins claires. On constate par ailleurs une légère diminution de la teneur en plomb. Le cuivre en revanche ne montre pas de tendance claire. La teneur en carbone est un paramètre important pour identifier des anomalies lors de l'interprétation des séries temporelles de métaux lourds.

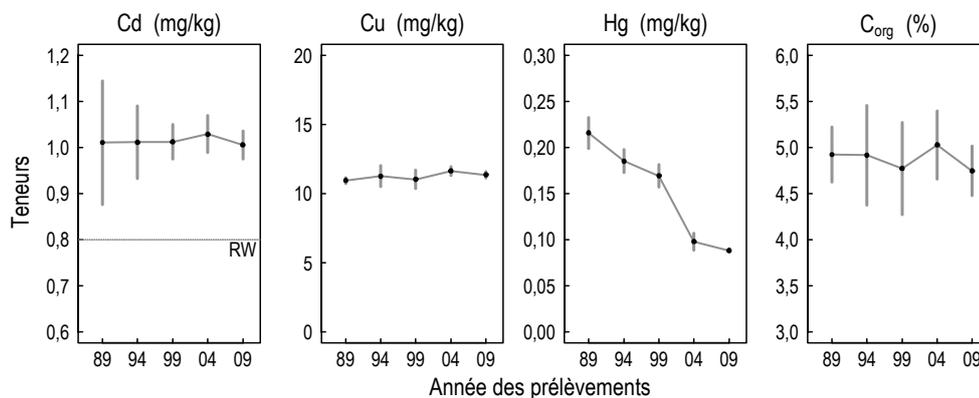
<sup>2</sup> Les sites 42 (Galmwald) et 67 (Mathod) n'ont pas pu être échantillonnés pour le 5<sup>e</sup> cycle. En raison de problèmes analytiques, le site 104 (Küssnacht) n'a non plus été pris en considération.

<sup>3</sup> La terre fine est la partie du sol d'une granulométrie inférieure à 2 mm. Cette fraction est obtenue par tamisage des particules de sol plus grosses, comme les pierres.

**Fig. 4** > Teneurs (moyenne avec intervalle de confiance à 95 %) en Zn, Cu, Pb et C<sub>org</sub> de 1988 à 2008 sur le site de grandes cultures d'Etoiy



**Fig. 5** > Teneurs (moyenne avec intervalle de confiance à 95 %) en Cd, Cu, Hg et C<sub>org</sub> de 1989 à 2009 sur le site de forêt de feuillus de Rothenfluh (BL) (RW: valeur indicative OSol)



Le deuxième exemple (fig. 5) montre l'évolution des teneurs en cadmium, en cuivre, en mercure et en carbone organique sur le site de Rothenfluh (forêt de feuillus, BL). Hormis une diminution marquée du mercure, les teneurs sont demeurées inchangées. Pour le cadmium, la concentration supérieure à la valeur indicative est d'origine géologique. Elle est aussi restée constante.

L'analyse des variations dans le temps par élément et catégorie d'utilisation pour l'ensemble des sites du NABO (tab. 2 et annexe A2-9) permet de dégager différentes tendances. On observe d'une part une diminution générale des concentrations de mercure et, dans une moindre mesure, de plomb. Les éléments nickel, chrome et cobalt ne varient pas beaucoup. Alors que les teneurs en zinc et en cuivre augmentent sur respectivement 15 et 11 sites du NABO (presque exclusivement de grandes cultures et d'herbages).

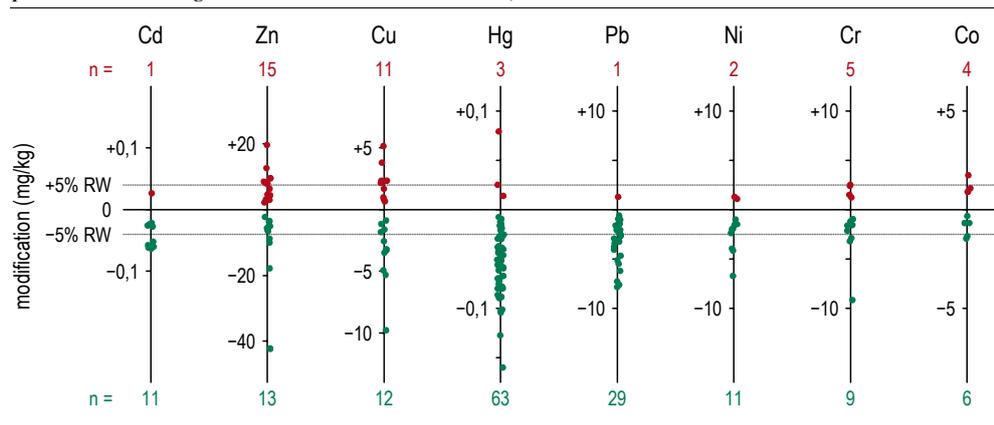
**Tab. 2 > Changements observés de la teneur en métaux lourds entre 1985 et 2009: fréquence des augmentations et diminutions par catégorie d'utilisation sur les sites du NABO**

Nbre de sites		Cadmium			Zinc			Cuivre			Mercure		
		+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-
Grandes cultures	33	0	29	4	9	21	3	5	22	6	3	12	12
Herbages	25	1	22	2	5	20	0	5	19	1	0	2	23
Forêts	27	0	24	1	0	23	4	0	24	3	0	5	22
Cultures spéciales	9	0	8	1	1	7	1	1	7	1	0	6	3
Autres	6	0	3	3	0	1	5	0	5	1	0	2	3
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>1</b>	<b>86</b>	<b>11</b>	<b>15</b>	<b>72</b>	<b>13</b>	<b>11</b>	<b>77</b>	<b>12</b>	<b>3</b>	<b>27</b>	<b>63</b>
Nbre de sites		Plomb			Nickel			Chrome			Cobalt		
		+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-
Grandes cultures	33	1	23	9	0	28	5	0	28	5	2	30	1
Herbages	25	0	18	7	1	23	1	2	23	0	0	25	0
Forêts	27	0	22	5	0	25	2	2	24	1	2	23	2
Cultures spéciales	9	0	5	4	0	6	3	0	7	2	0	6	3
Autres	6	0	2	4	1	5	0	1	4	1	0	6	0
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>1</b>	<b>70</b>	<b>29</b>	<b>2</b>	<b>87</b>	<b>11</b>	<b>5</b>	<b>86</b>	<b>9</b>	<b>4</b>	<b>90</b>	<b>6</b>

Les sites 42, 67 et 104 n'ont pas été pris en considération.

**Fig. 6 > Ordre de grandeur des augmentations et diminutions des métaux lourds dans le réseau NABO après 20 ans et leur relation avec les valeurs indicatives de l'OSol [RW]**

Sont représentées les différences absolues entre le 5<sup>e</sup> et le 1<sup>er</sup> cycle de prélèvements. Seuls les sites où des changements ont été observés sont pris en considération (n: nombre de sites présentant des augmentations et des diminutions).



Outre le nombre de sites présentant des augmentations ou des diminutions, l'intensité des modifications joue un rôle important. Le *changement minimal détectable* (minimum detectable change, MDC) est un indicateur de la qualité du monitoring dans la protection préventive des sols. La fig. 6 ne présente que les sites dans lesquels des augmentations ou diminutions claires ont été observées. On constate ainsi que la méthodologie du NABO permet de détecter des variations de seulement  $\pm 0,05$  mg de cadmium par kg de terre fine dans la couche supérieure du sol. Pour le zinc et le cuivre, des variations de l'ordre de quelques mg/kg de terre fine sont en général déjà détec-

tables. La méthodologie choisie pour le prélèvement, la préparation et l'archivage des échantillons et pour l'assurance de la qualité des analyses permet ainsi de détecter à un stade précoce des accumulations insidieuses de polluants dans la couche supérieure du sol.

Le MDC est toutefois dépendant de l'hétérogénéité du site. Plus un site est homogène, plus les variations peuvent être détectées rapidement de manière fiable. L'analyse de l'hétérogénéité du site et de son influence sur la détermination des variations temporelles fait l'objet d'évaluations complémentaires. D'une manière générale, le fait que les sites d'observation aient été définis sur des placettes relativement petites (100 m<sup>2</sup>) présente un grand avantage. Dans le réseau de mesure européen, une partie des sites d'observation ont été définies sur une surface de 300 x 300 m<sup>2</sup>. Dans ces cas, l'hétérogénéité spatiale couvre en général le signal temporel recherché (Morvan et al. 2008).

Les augmentations et diminutions des teneurs peuvent aussi être mises en relation avec la valeur indicative de chaque élément, ce qui permet d'appliquer à tous les éléments une méthode d'évaluation uniformisée. Les changements les plus marqués par rapport à la valeur indicative ont été constatés chez le mercure, dont la teneur a nettement diminué.

Les hausses les plus importantes par rapport à la valeur indicative s'observent chez le zinc et le cuivre. Pour le cadmium, le nickel, le chrome et le cobalt, les changements mesurés dans la couche supérieure du sol sont en revanche très faibles, infirmant ainsi les précédentes hypothèses (Desaules & Studer 1993) selon lesquelles les apports par les dépôts atmosphériques et les matières auxiliaires de l'agriculture auraient dû entraîner une accumulation de ces éléments. Les teneurs en nickel, chrome, cobalt et partiellement en cadmium sont en grande partie déterminées par les conditions géologiques. Elles n'ont pas beaucoup changé au cours de 20 dernières années, raison pour laquelle nous ne reviendrons pas sur ces éléments dans le présent rapport. Des informations détaillées sur l'ensemble des éléments figurent dans l'annexe A2.

Les augmentations des teneurs en zinc et en cuivre n'apparaissent que dans les sites de grandes cultures et d'herbages. Pour les pâturages et les prairies, une distinction est faite entre herbages intensifs, peu intensifs et extensifs. Les sites d'exploitation intensive sont fauchés et/ou pâturés plusieurs fois par année et fertilisés en conséquence. Les parcelles peuvent être exploitées cinq à six fois par année sur le Plateau, moins souvent à une altitude plus élevée. Les sites d'exploitation peu intensive sont fauchés et/ou pâturés environ trois fois par année et leur fumure réduite en conséquence. Quant aux herbages extensifs, la plupart sont constitués d'alpages pâturés ne recevant pas d'apports supplémentaires de fertilisants.

Comme le montre le tableau 3, les augmentations des teneurs en zinc et en cuivre n'ont été constatées que dans des exploitations herbagères intensives. Les séries temporelles des six sites concernés sont présentées dans les figures 9ss. Ces hausses s'expliquent par l'utilisation d'engrais de ferme, et sont discutées de manière plus détaillée sous le point 3.2. Les sites de grandes cultures n'ont pas été subdivisés, mais on pourrait envisager de les classer par exemple en fonction des rotations culturales.

La fig. 7 résume de manière schématique l'évolution dans le temps des concentrations dans la couche supérieure du sol. On constate que les tendances suivent un modèle dépendant d'une part du mode d'exploitation, d'autre part des propriétés de l'élément. Les causes des modifications des concentrations de zinc et de cuivre d'une part, de mercure et de plomb de l'autre sont discutées ci-dessous.

**Tab. 3 > Modifications observées pour les métaux lourds dans les sites d'herbages du NABO: fréquence des augmentations et diminutions selon l'intensité d'exploitation**

	Nbre de sites	Zinc			Cuivre		
		+	0	-	+	0	-
<b>Herbage</b>	<b>25</b>	<b>5</b>	<b>20</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>19</b>	<b>1</b>
• intensif	6	5	1	0	4	2	0
• peu intensif	9	0	9	0	0	9	0
• extensif	10	0	10	0	1	8	1

**Fig. 7 > Tendances générales pour les métaux lourds selon l'utilisation du terrain**

	Cd	Zn	Cu	Hg	Pb	Ni	Cr	Co
<b>Grandes cultures</b>	→	↗	↗	↘	↘	→	→	→
<b>Herbages</b>								
intensifs	→	↗	↗	↘	↘	→	→	→
peu intensifs	→	→	→	↘	↘	→	→	→
extensifs	→	→	↘	↘	→	→	→	→
<b>Forêts</b>								
feuillus	→	→	→	↘	→	→	→	→
mixtes	→	→	↘	↘	↘	→	→	→
résineux	→	→	→	↘	→	→	→	→
<b>Cultures spéciales</b>								
légumes	→	→	→	→	→	→	→	→
fruits	→	→	→	→	→	→	→	→
vigne	→	→	→	↘	↘	→	→	→
<b>Autres</b>								
site protégé	→	↘	→	↘	↘	→	→	→
parc urbain	↘	↘	→	↘	↘	→	→	→

Fig. 8 > Prélèvement d'échantillons sur un site d'herbage de 10 m x 10 m à Trub (BE)



#### Pourquoi les teneurs en métaux lourds diminuent-elles?

*Les métaux lourds sont des éléments et ne peuvent donc pas être décomposés. Si la concentration d'un élément diminue dans la couche supérieure du sol, cela signifie qu'il a migré à un autre endroit. Les processus qui interviennent varient selon les éléments et les conditions de la station.*

*Les métaux lourds peuvent être déplacés dans d'autres couches pédologiques par les organismes du sol (phénomène dit de bioturbation). Les travaux agricoles peuvent aussi conduire à une migration, par exemple lorsqu'une profondeur de labour plus importante est choisie. Dans les sols acides, le lessivage (transport par la circulation de l'eau dans le sol) joue en outre un rôle important.*

*Si des matériaux terreux sont entraînés par l'érosion, les métaux lourds qu'ils renferment sont également emportés. Certains éléments sont en outre absorbés par les plantes et évacués avec les récoltes. Par ailleurs, des éléments volatils comme le mercure peuvent s'évaporer dans l'atmosphère.*

*Tous ces phénomènes et processus peuvent se superposer sur un même site. Si les pertes sont supérieures aux apports dans la couche supérieure du sol, la teneur de l'élément en question diminue. Les métaux lourds sont toutefois toujours présents, mais à un autre endroit.*

### 3.2 Apports de zinc et de cuivre par les engrais de ferme

Dans les herbages faisant l'objet d'une exploitation intensive, les concentrations de zinc et de cuivre ont continuellement augmenté. Sur les six sites du NABO de cette

catégorie d'utilisation, cinq présentent une hausse marquée des teneurs en zinc, et quatre une hausse des teneurs en cuivre (fig. 9ss et fig. 32). En revanche, aucune augmentation n'a été constatée dans les autres surfaces herbagères (exploitation peu intensive ou extensive).

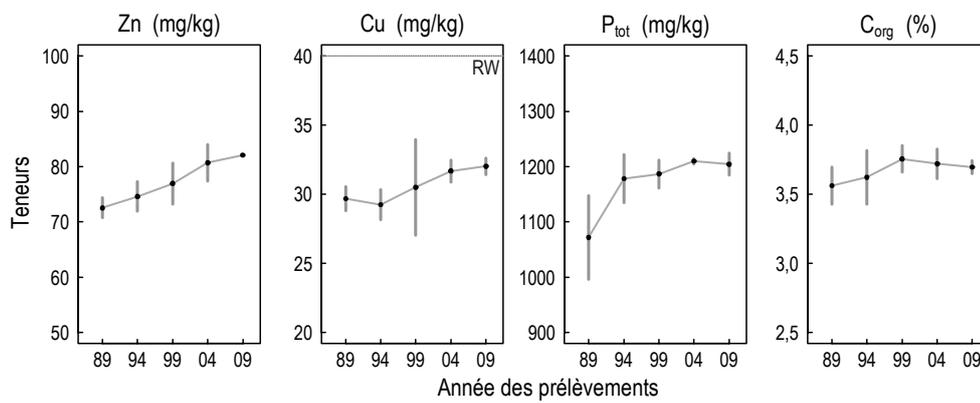
La distinction entre exploitations herbagères intensives, peu intensives et extensives a été définie d'après les «Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages» (DBF, Flisch et al. 2009). Les surfaces exploitées de manière intensive sont fauchées et/ou pâturées cinq à six fois par année et régulièrement fertilisées avec du lisier. Suivant le type d'exploitation et la densité du bétail, ces sites peuvent recevoir des apports de lisier de bovins, de porcs ou de lisier mixte. Sur les surfaces herbagères peu intensives, la fumure est sensiblement réduite; les surfaces exploitées de manière extensive (p. ex. alpages) ne reçoivent souvent que les déjections des animaux lors de la pâture. Les sites d'herbages des zones de plaine, de collines et de montagne reflètent les différentes conditions liées à leur altitude et à leur durée de végétation.

L'utilisation d'engrais de ferme permet de boucler les cycles de substances nutritives comme l'azote et le phosphore au sein du système agricole. Cependant, ces engrais peuvent aussi contenir des quantités importantes de zinc et de cuivre. Ces éléments sont mélangés à certains fourrages à des fins sanitaires et pour améliorer la productivité des animaux (Bolan et al. 2004, Schultheiss et al. 2004). En outre, le zinc entre dans la composition de produits désinfectants utilisés dans les étables, et peut ainsi aboutir dans les engrais de ferme.

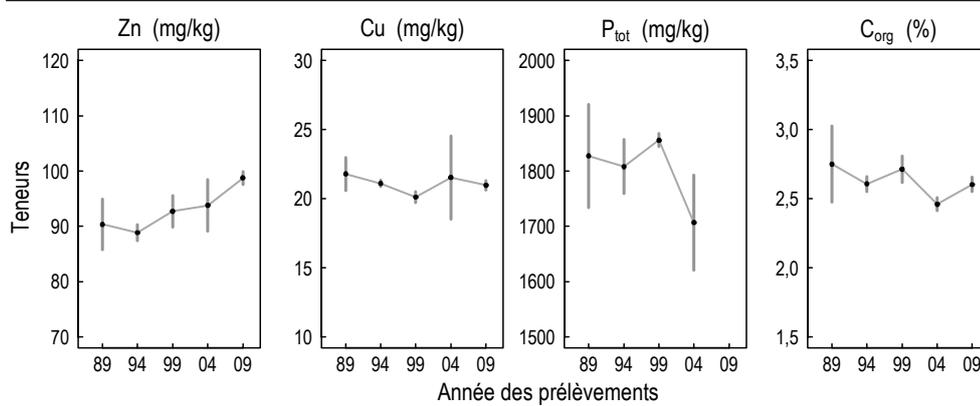
Comme le confirment les analyses des engrais de ferme réalisées depuis les années 1980 en Suisse (Menzi et al. 1993, Kessler et al. 1994, Menzi und Kessler 1998, Menzi et al. 1999), la quantité de zinc et de cuivre contenue dans ces engrais dépend dans une large mesure de l'orientation et du mode d'exploitation (espèce animale, type d'étable) ainsi que des matières auxiliaires utilisées. Ces études montrent que le lisier de porcs contient des quantités de zinc et de cuivre nettement plus élevées que le lisier de bovins, mais que les concentrations varient considérablement chez les deux types de lisier. Par conséquent, des incertitudes considérables subsistent lors de l'établissement des bilans des apports de substances par les engrais de ferme (cf. point 3.3, Keller et al. 2002).

Pour réduire au minimum ces incertitudes, des échantillons d'engrais de ferme ont été prélevés en 2006 dans 14 exploitations agricoles du réseau NABO selon la méthode de Menzi et Kessler (1998) afin d'analyser leurs teneurs en substances nutritives et en métaux lourds (tab. 4). Les concentrations mesurées étaient comparables aux résultats de précédentes études en Suisse, mais parfois sensiblement plus faibles que celles d'enquêtes comparables effectuées dans des pays voisins (cf. p.ex. Schultheiss et al. 2004, Eckel et al. 2005). Ces différences sont imputables à la plus grande taille des exploitations d'engraissement à l'étranger, qui va de pair avec une utilisation accrue d'additifs fourragers et d'antibiotiques. Dans le domaine de l'observation des sols, ce sont les bilans au niveau de la parcelle, et donc la qualité spécifique des engrais de ferme de l'exploitation, qui sont déterminants. En l'occurrence, des différences considérables apparaissent d'une exploitation à l'autre. L'écart-type par rapport à la moyenne des teneurs en zinc et en cuivre des différents types d'engrais de ferme varie entre 30 % et près de 100 %.

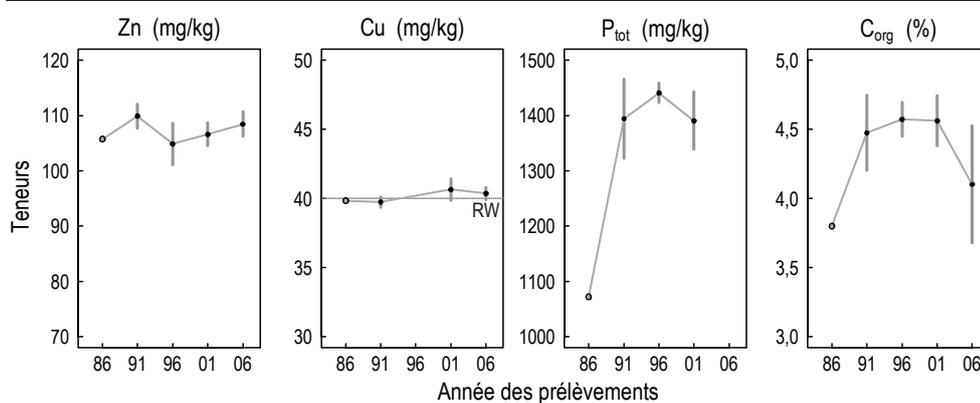
**Fig. 9** > Séries temporelles de 1989 à 2009 pour le Zn, le Cu, le P<sub>tot</sub> et le C<sub>org</sub> sur le site d'herbage intensif de Tännikon. (RW = valeur indicative selon l'OSol)



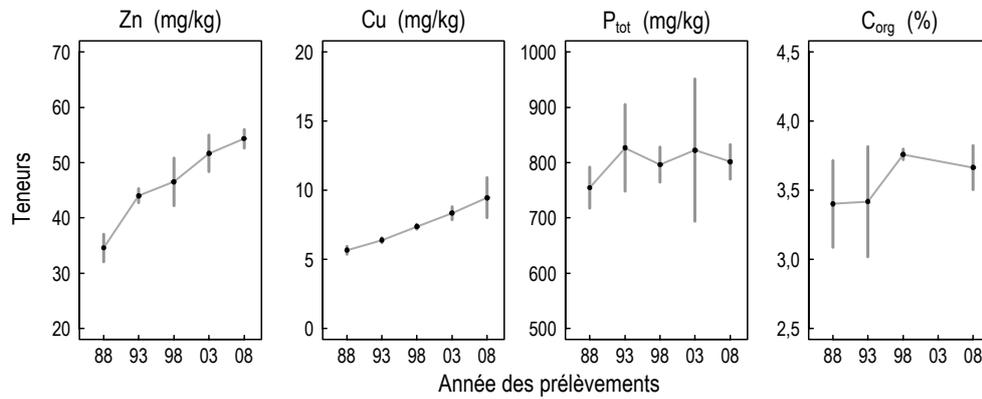
**Fig. 10** > Séries temporelles de 1989 à 2009 pour le Zn, le Cu, le P<sub>tot</sub> et le C<sub>org</sub> sur le site d'herbage intensif d'Ebikon



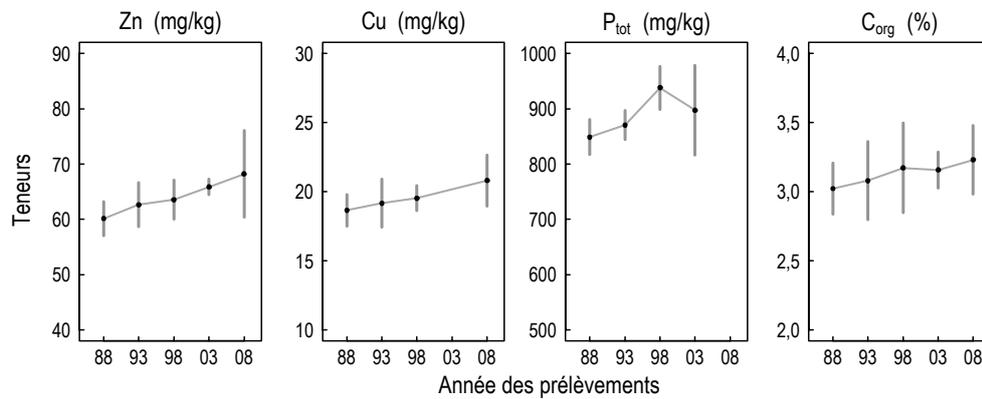
**Fig. 11** > Séries temporelles de 1986 à 2006 pour le Zn, le Cu, le P<sub>tot</sub> et le C<sub>org</sub> sur le site d'herbage intensif de Mollis. (RW = valeur indicative selon l'OSol)



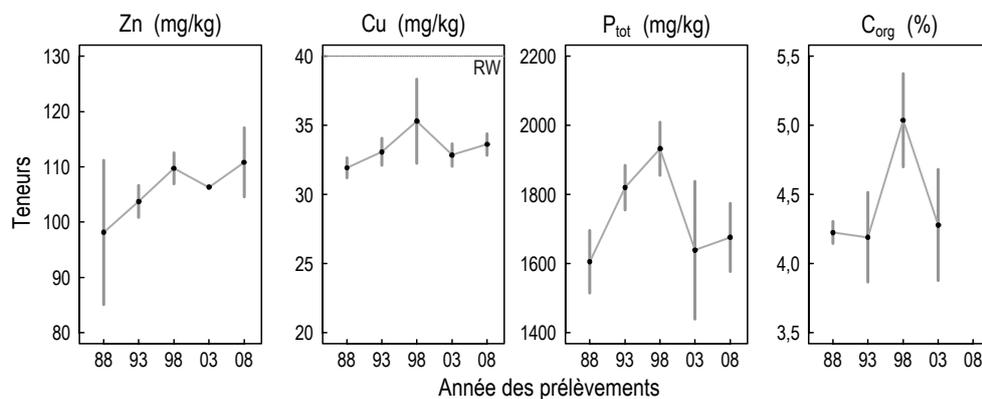
**Fig. 12** > Séries temporelles de 1988 à 2008 pour le Zn, le Cu, le P<sub>tot</sub> et le C<sub>org</sub> sur le site d'herbage intensif d'Entlebuch



**Fig. 13** > Séries temporelles de 1988 à 2008 pour le Zn, le Cu, le P<sub>tot</sub> et le C<sub>org</sub> sur le site d'herbage intensif d'Attalens



**Fig. 14** > Séries temporelles de 1988 à 2008 pour le Zn, le Cu, le P<sub>tot</sub> et le C<sub>org</sub> sur le site d'herbage intensif de Mörschwil. (RW = valeur indicative selon l'OSol)



**Tab. 4 > Concentrations de phosphore, de zinc et de cuivre dans le lisier de 14 exploitations agricoles du réseau NABO en 2006**

		Hiver/printemps			Eté			Total		
		P g/kg MS	Cu mg/kg MS	Zn mg/kg MS	P g/kg MS	Cu mg/kg MS	Zn mg/kg MS	P g/kg MS	Cu mg/kg MS	Zn mg/kg MS
Lisier bovin	Nombre d'échantillons	15	15	15	6	6	6	21	21	21
	Minimum	4,4	22,5	84,6	5,5	17,2	86,1	4,4	17,2	84,6
	Maximum	11,7	70,5	705,2	10,3	43,1	728,4	11,7	70,5	728,4
	Médiane	7,2	27,2	102,1	7,1	27,2	122,1	7,2	27,2	113,3
	Moyenne	7,1	31,7	186,0	7,5	28,3	222,1	7,2	30,7	196,3
	Ecart-type	2,1	12,1	164,5	2,1	8,6	250,3	2,0	11,1	186,8
Lisier porcin	Nombre d'échantillons	12	12	12	10	10	10	22	22	22
	Minimum	12,8	77,1	524,6	13,1	55,9	432,0	12,8	55,9	432,0
	Maximum	25,0	196,6	3390,7	24,0	203,8	4244,0	25,0	203,8	4244,0
	Médiane	19,4	117,4	898,6	18,6	116,4	799,7	18,9	117,4	882,8
	Moyenne	19,1	125,4	1304,0	18,2	119,5	1341,1	18,7	122,7	1320,8
	Ecart-type	3,8	34,8	990,4	4,1	49,7	1195,7	3,9	41,2	1061,5
Lisier mélangé	Nombre d'échantillons	14	14	14	5	5	5	19	19	19
	Minimum	4,6	15,6	120,0	6,5	25,2	115,5	4,6	15,6	115,5
	Maximum	13,4	140,0	725,2	14,6	191,4	789,5	14,6	191,4	789,5
	Médiane	10,0	58,3	321,0	9,9	56,9	367,5	9,9	58,0	338,4
	Moyenne	9,7	68,6	341,1	10,2	72,9	359,5	9,8	69,7	345,9
	Ecart-type	2,4	36,7	190,1	3,7	68,6	274,5	2,7	44,9	207,2

**Fig. 15 > Prélèvement d'échantillons pour l'analyse des engrais de ferme d'exploitations agricoles du réseau NABO**

*Le lisier a été mélangé pendant plusieurs heures dans les cuves, puis échantillonné sur toute la profondeur afin d'obtenir un échantillon représentatif.*



L'exploitation intensive d'herbages avec des apports importants d'engrais de ferme peut entraîner une augmentation continue des teneurs en zinc et en cuivre. Les hausses effectives dépendent de la quantité d'engrais de ferme épandue et de sa concentration en zinc et en cuivre. Dans une moindre mesure, les propriétés du sol peuvent aussi avoir une influence. Sur les sites du NABO concernés, des augmentations de l'ordre de 2 mg de cuivre et de 10 mg de zinc par kg de terre fine ont été mesurées en 20 ans, ce qui correspond à 5 % de la valeur indicative pour le cuivre, et à 6 à 7 % de la valeur indicative pour le zinc. A ce rythme, la valeur indicative serait dépassée d'ici 80 à 200 ans. Sur le site d'Entlebuch, les hausses sur 20 ans ont été supérieures à 10 % de la valeur indicative pour les deux éléments.

Les apports de zinc et de cuivre étant principalement dus aux engrais de ferme, il est également intéressant de connaître les concentrations d'éléments fertilisants comme l'azote (N), le phosphore (P) ou le potassium (K) parvenant dans les parcelles du NABO à travers ces engrais. On s'attendait à ce que les concentrations de phosphore dans le sol des sites concernés augmentent. Si cette hypothèse avait été confirmée, le P aurait pu être utilisé comme indicateur pour mettre en évidence des changements de concentration de cuivre et de zinc liés au régime de fumure. Cependant, les résultats obtenus jusqu'ici montrent que l'évolution temporelle des trois éléments peut suivre différents modèles. On a notamment constaté que les teneurs en phosphore total ( $P_{tot}$ ) dans la couche supérieure du sol pouvaient rester constantes, voire diminuer alors que celles du zinc et du cuivre augmentaient parallèlement (cf. fig. 9ss).

Les évolutions contraires de ces éléments peuvent s'expliquer par les différences de propriétés du zinc, du cuivre et du phosphore. C'est pourquoi celles-ci ont été modélisées sur la base du modèle EPIC (Della Peruta 2013), qui intègre les processus de sorption dans le sol, la migration dans les couches profondes, la bioturbation, le travail du sol, le régime hydrique et le climat, la croissance des plantes et la récolte, le ruissellement, ainsi que d'autres processus pertinents. EPIC modélise le comportement à long terme et la persistance des éléments dans le sol. Les premiers résultats montrent qu'une diminution des teneurs en P dans des sites herbagers recevant d'importants apports d'engrais de ferme est plausible, si l'activité biologique (bioturbation) entraîne une certaine redistribution entre la couche supérieure et la couche sous-jacente du sol. Des substances stockées dans la partie supérieure de ces sols sont ainsi transportées dans les couches profondes et n'apparaissent plus dans les échantillons du NABO prélevés dans la couche supérieure des sols.

Des augmentations des teneurs en zinc et/ou en cuivre ont aussi été constatées dans quelques sites du NABO exploités par l'agriculture (fig. 16 s. et fig. 4). Ces parcelles ont reçu entre autres une fumure de base au printemps sous forme d'engrais de ferme. Ces derniers sont donc probablement aussi à l'origine de ces hausses, comme chez les herbages.

Dans les sites de grandes cultures, l'évolution dans le temps peut être fortement influencée par le travail du sol. En cas d'augmentation (ponctuelle ou permanente) de la profondeur de labour, il se produit un mélange entre les horizons A et B. Les apports dans la couche supérieure du sol migrent partiellement dans la couche sous-jacente et ne sont plus relevés lors des échantillonnages du NABO dans les 20 premiers centimètres de sol. Une série d'autres sites du NABO ayant également reçu des apports d'engrais de ferme n'ont pas présenté d'augmentation de zinc ou de cuivre.

**Fig. 16** > Evolution du Zn, du Cu, du P<sub>tot</sub> et du C<sub>org</sub> sur le site de grandes cultures de Schleithem. (RW = valeur indicative selon l'OSol)

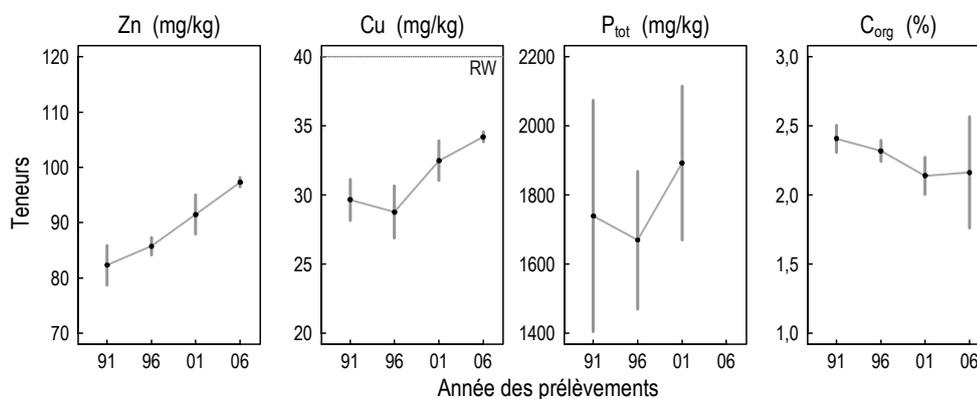
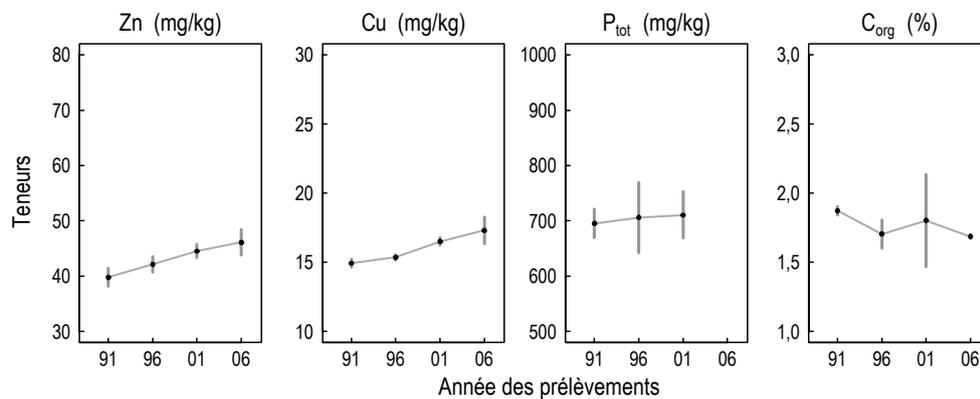


Fig. 17 > Evolution du Zn, du Cu, du P<sub>tot</sub> et du C<sub>org</sub> sur le site de grandes cultures de Koppigen



### 3.3 Bilan du zinc d'une parcelle du NABO

Le bilan du zinc d'un site du NABO présenté ci-dessous à titre d'exemple, illustre l'importance des engrais de ferme pour les apports de substances dans les sols agricoles. Le site se trouve sur un sol brun faiblement acide. La parcelle fait partie d'une exploitation laitière mixte avec une densité de bétail moyenne (1,1 unité de gros bétail par hectare). La rotation repose principalement sur du maïs d'ensilage, du blé d'hiver et de la prairie artificielle. La fumure de base est assurée par des épandages de lisier de porcs et de bovins. Elle est complétée par des apports d'engrais minéraux composés pour couvrir les besoins des plantes. Jusqu'à leur interdiction, des boues d'épuration provenant d'une STEP située à proximité ont aussi été utilisées occasionnellement.

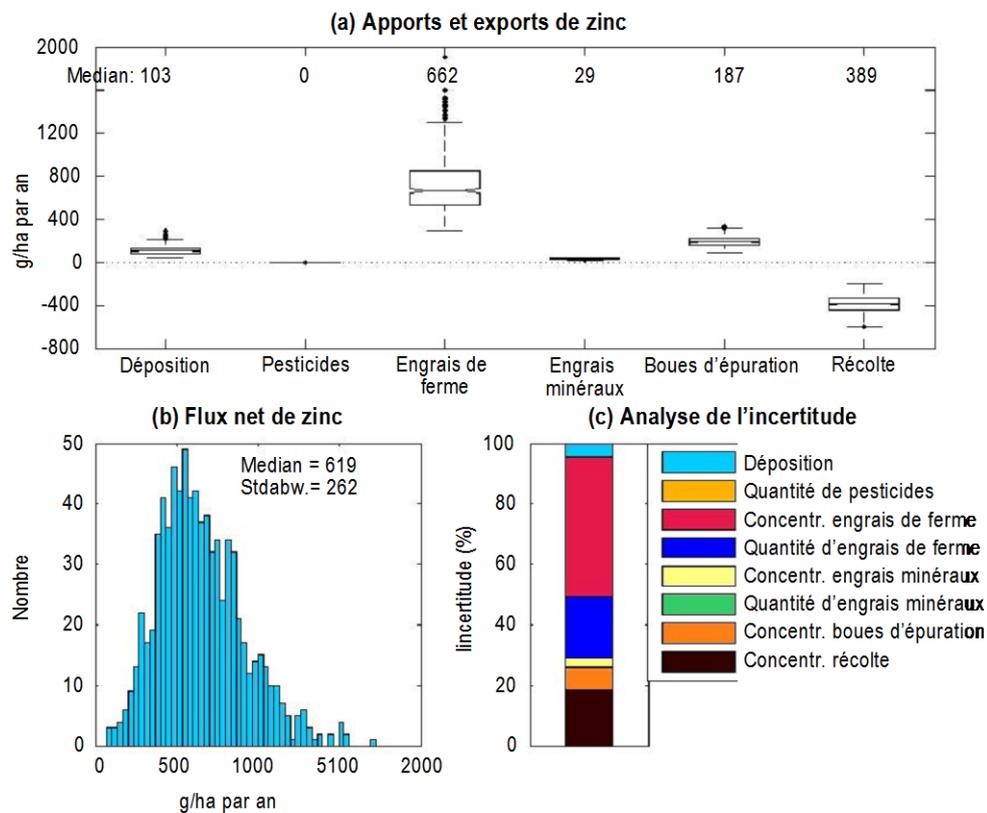
Entre 1996 et 2006, les apports annuels moyens de zinc se sont élevés à 662 g/ha pour les engrais de ferme, 187 g/ha pour les boues d'épuration, et 103 g/ha pour les dépôts atmosphériques (fig. 18a). En ce moment, le calcul des bilans de substances n'est possible que pour cette période, car en raison des différentes méthodes employées pour les relevés, les données d'exploitation ne sont pas encore disponibles pour toute la période de 1985 à 2010. Sachant que 40 % des apports ont été retirés du sol avec les récoltes, le flux net annuel de zinc se monte à 619 g/ha (fig. 18b). En 20 ans, la teneur en zinc dans la couche supérieure aurait en principe dû augmenter de 5 à 6 mg par kg de terre fine. Or les teneurs mesurées ont au contraire légèrement diminué entre le premier cycle de relevés (62,5 mg/kg) et le cinquième (58,5 mg/kg). Les teneurs en phosphore (total et assimilable par les plantes) sont restées stables pendant cette période, alors que la teneur totale en azote a légèrement diminué.

Dans un site de grandes cultures, il est plausible que le travail du sol entraîne un mélange du matériel de l'horizon labouré avec celui des couches plus profondes. Quoi qu'il en soit, cet exemple montre qu'un bilan simplifié de la couche superficielle n'est pas suffisant pour assurer l'observation des sols dans le cadre du monitoring indirect. Un bilan plus complet tenant compte des différents processus ayant une influence sur la persistance à long terme des substances nutritives et des polluants dans le sol se révèle nécessaire. En outre, pour pouvoir effectuer une comparaison complète entre monito-

ring direct et indirect, il faut aussi connaître l'évolution temporelle des quantités de substances présentes dans la couche sous-jacente du sol.

**Fig. 18** > Exemple d'un bilan simplifié du zinc (moyenne 1996–2006) pour une parcelle de grande culture d'une exploitation laitière mixte avec une densité de bétail moyenne de 1,1 UGB/ha

(a) Box-plot des apports et exports; (b) Histogramme des apports moins les exports (flux net); (c) Analyse de l'incertitude.

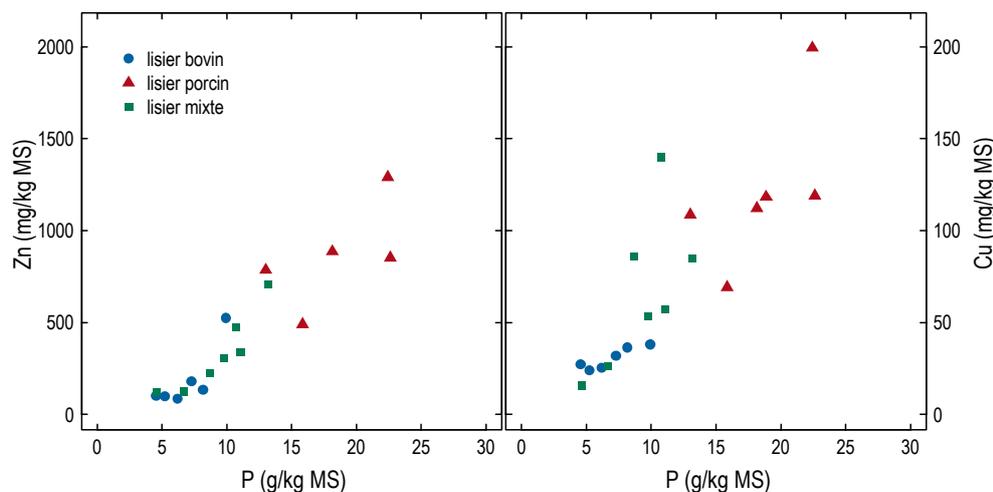


La fiabilité des bilans de substances à l'échelle des parcelles a été évaluée au moyen d'une méthode stochastique tenant compte des incertitudes des données et de la variation spatiale et temporelle des paramètres du bilan (Keller et al. 2005). Il en est ressorti que la fiabilité dépendait davantage de l'incertitude des données sur les concentrations des matières auxiliaires de l'agriculture, que de l'incertitude des données sur les quantités. La sensibilité des bilans nets aux paramètres incertains définis différait selon le mode d'exploitation, le type d'entreprise, la culture et l'élément étudié. Pour les bilans du zinc et du cuivre, la dispersion atteignait la moitié des moyennes respectives. L'importance de ces écarts provient essentiellement de l'incertitude des mesures de concentrations dans les engrais de ferme et les plantes récoltées. Dans l'exemple ci-dessus, plus de 40 % de l'incertitude a été expliquée par la dispersion des teneurs en zinc des engrais de ferme (fig. 18c).

Les teneurs en zinc et en cuivre des engrais de ferme sont très variables d'une exploitation à l'autre, mais présentent une corrélation marquée avec leur teneur en phosphore. Ce lien avait déjà été attesté par Menzi et al. (1993), et il a également été mis en évidence dans les analyses des engrais de ferme de 14 exploitations du NABO (fig. 16). La corrélation est due à l'alimentation (additifs fourragers et aliments concentrés). Ce lien entre les teneurs en zinc, en cuivre et en phosphore peut être mis à profit pour améliorer la fiabilité des bilans de substances au niveau de la parcelle pour les sites du NABO. Il s'ensuit que pour le monitoring direct et indirect, les éléments nutritifs doivent aussi être pris en considération en plus des bilans de polluants. Les évolutions temporelles des polluants dans le sol d'une parcelle agricole sont ainsi nettement mieux interprétables lorsqu'elles sont mises en perspective avec le mode d'exploitation et les variations correspondantes du phosphore, de l'azote, du potassium et d'autres macronutriments.

**Fig. 19 > Corrélation entre les teneurs en phosphore, en zinc et en cuivre du lisier de 14 exploitations agricoles du réseau NABO en 2006**

*Le lisier porcin d'une exploitation contenait 3400 mg/kg MS de zinc et se trouvait ainsi hors de la zone de valeurs présentée. Sa teneur en cuivre était de 120 mg/kg MS.*



### 3.4 Recul des retombées atmosphériques de métaux lourds

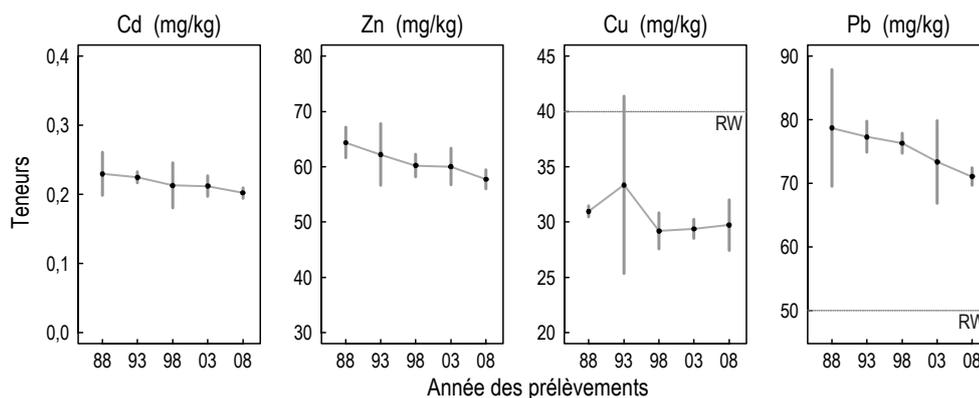
Depuis la fin des années 1980, les teneurs en plomb et en mercure de la couche supérieure du sol ont diminué pour de nombreux types d'utilisation du territoire. Les teneurs en zinc ont également baissé dans les surfaces du NABO situées dans des réserves naturelles. Sur les deux sites de parcs urbains, on a même observé un recul des concentrations de zinc et de cadmium, les teneurs en cuivre restant stables (cf. site de Winterthur, fig. 20).

Les dépôts secs d'origine atmosphérique sont une importante source de mercure et de plomb. Ces deux éléments sont contenus dans les particules fines et déposés avec elles à la surface du sol. Cependant, diverses mesures, comme l'assainissement d'usines

d'incinération des ordures ménagères et de crématoires, ou l'interdiction du plomb dans l'essence, ont permis de réduire sensiblement ces apports. C'est ainsi que le Réseau national d'observation des polluants atmosphériques (NABEL) a observé une nette diminution des quantités de plomb, de cadmium et de zinc dans les particules fines au cours des 20 dernières années (OFEV 2012).

Il est possible d'évaluer les dépôts d'après la concentration de polluants présents dans des mousses (Thöni et al. 2013). Ainsi, entre 1990 et 2010, la concentration de cadmium a diminué de 58 %, celle de mercure de 40 %, celle de plomb de 87 % et celle du zinc de 33 % au niveau suisse. Pour le cuivre en revanche, aucun changement n'a été observé dans les mousses.

**Fig. 20** > Evolutions entre 1988 et 1993 du Cd, du Zn, du Cu et du Pb dans le parc urbain de Winterthur (site 61)



Dans la plupart des sites du NABO, les dépôts atmosphériques restent la principale source de plomb et de mercure. En raison de l'important recul de ces apports, mais aussi du phénomène de bioturbation et du comportement physico-chimique des éléments dans l'environnement déjà évoqué, les concentrations dans la couche supérieure du sol ont diminué en de nombreux endroits (cf. encadré au point 3.1).

Fig. 21 > Prélèvement d'échantillons dans un parc urbain à Winterthur



Contrairement au mercure et au plomb, les teneurs en zinc n'ont diminué que dans quelques sites. Si les émissions industrielles ont reculé, celles générées par les transports (abrasion des pneumatiques) ont augmenté et pourraient être l'une des causes de cette situation (BAFU 2012). Les concentrations mesurées dans des mousses (Thöni et al. 2013) indiquent que la diminution des apports atmosphériques est moins marquée que chez les autres éléments.

Les dépôts atmosphériques de cadmium ont fortement diminué. Mais jusqu'ici, ce recul ne se retrouve pas dans l'évolution temporelle des concentrations dans le sol. Dans les parcelles agricoles, les quantités de cadmium apportées par les engrais minéraux et les engrais de ferme sont en général nettement plus élevées que celles des retombées atmosphériques (Keller et al. 2005). Il est probable que dans de nombreux sites, ces dernières ne jouent qu'un rôle accessoire. En ce qui concerne le cuivre, les résultats du NABO correspondent par contre à ceux du monitoring des mousses: les teneurs n'ont pas changé.

Les valeurs relevées par le NABO entre 1985 et 2009 font apparaître des tendances réjouissantes: les diverses mesures qui ont été prises depuis les années 1980 pour réduire les émissions de métaux lourds ont eu des effets positifs sur les sols. A l'exception du zinc et du cuivre, aucune augmentation des teneurs en métaux lourds n'est attendue dans un proche avenir. Le monitoring du cadmium, du mercure, du plomb, du nickel, du chrome et du cobalt pourrait donc être fortement réduit. Cependant, cette appréciation devra être régulièrement vérifiée et confirmée à l'aide de contrôles par sondage au sein du réseau NABO. L'état des atteintes peut en effet changer à tout moment, que ce soit en raison du développement de nouvelles technologies, ou de modifications des prescriptions légales (cf. l'exemple de l'utilisation éventuelle de charbon végétal (biochar) et/ou d'engrais phosphorés recyclés à partir de boues d'épuration).

## 4 > Carbone organique

La matière organique présente dans le sol revêt une importance essentielle pour de nombreuses fonctions du sol, comme le régime des éléments nutritifs, de l'air et de l'eau, l'effet tampon, ou encore les processus de décomposition et de filtration. Elle renforce en outre sa stabilité structurelle. La stratégie européenne en faveur de la protection des sols (EU Soil Thematic Strategy, CEC 2006) considère la diminution de la teneur en matières organiques comme l'un des huit dangers majeurs pour les sols. Dans ce contexte et compte tenu des prévisions annonçant une diminution de la matière organique sous l'effet du réchauffement climatique, il est indispensable d'établir des séries temporelles correspondantes à partir de l'observation des sols.

Fig. 22 > Prélèvement d'échantillons pour le NABO dans un haut-marais près de St. Moritz



4.1

### Herbages

La fig. 23 reproduit en haut les séries temporelles de la teneur en carbone organique dans la couche supérieure des sites d'herbages. La variation entre les sites étant plus importantes que les changements temporels, les teneurs sont présentées centrées sur la moyenne du site afin d'améliorer la visibilité (fig. 23 en bas).

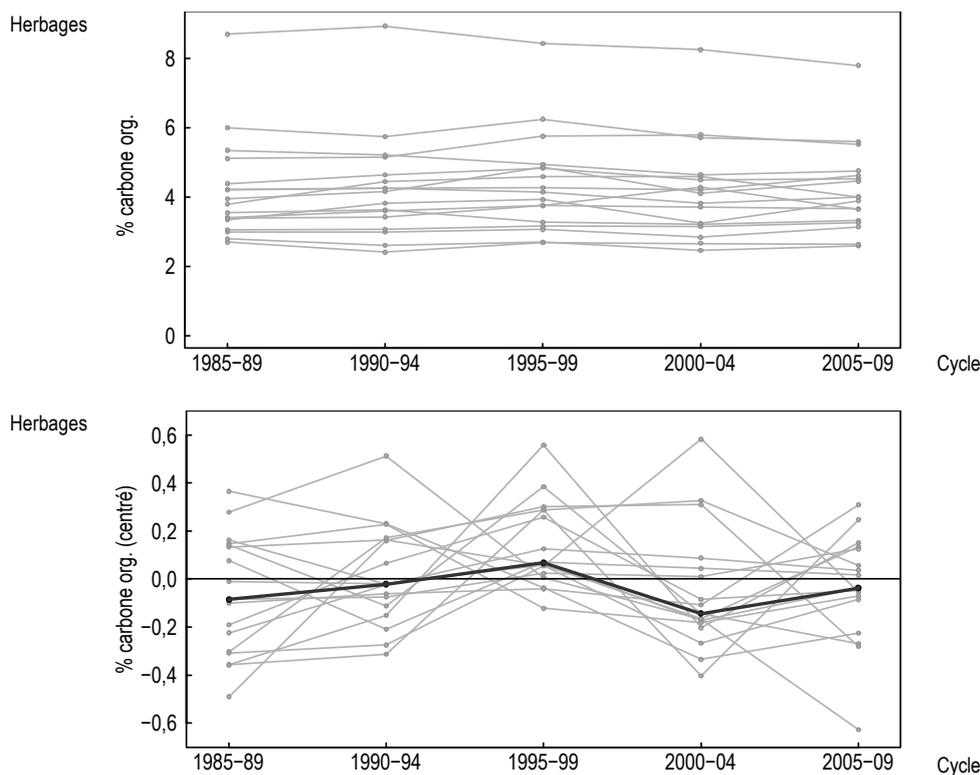
Dans les sols des sites d'herbages, les teneurs en carbone ont tendance à augmenter légèrement jusqu'à la fin des années 1990. Depuis lors, elles reculent légèrement. Ces modifications sont toutefois relativement faibles compte tenu des erreurs aléatoires de l'analyse, de la préparation et du prélèvement des échantillons ainsi que de l'hétérogénéité spatiale des parcelles du NABO. Lors de l'interprétation des variations effectives,

il faut en outre tenir compte des risques d'erreurs liées aux conditions du sol au moment du prélèvement des échantillons (teneur en eau, et donc densité apparente variable) (cf. Meuli et al. 2014, point 2.5.2). Ainsi, le 3<sup>e</sup> cycle de relevé a été réalisé en moyenne un à deux mois plus tôt que les autres. On suppose donc que les sols étaient en moyenne plus humides lors du troisième cycle et que cette situation a influencé les teneurs en carbone mesurées. Cette hypothèse est expliquée de façon plus détaillée dans l'analyse des sites forestiers (point 4.3).

Pour savoir si les légères hausses et diminutions de carbone organique relevées dans les sites d'herbages correspondent à des changements effectifs, celles-ci doivent être mises en parallèle avec les teneurs en substances nutritives et le régime de fumure. Dans neuf sites d'herbages sélectionnés, on constate que les concentrations d'azote suivent une évolution temporelle similaire (cf. point 5). Si ce lien est confirmé par les mesures des teneurs en azote d'autres sites d'herbages, les variations des teneurs en carbone pourraient être évaluées et modélisées quantitativement en intégrant le mode d'exploitation et l'intensité d'utilisation des parcelles suivies dans le cadre du monitoring indirect. Il serait ainsi possible de faire une distinction entre les changements effectifs (signal avec analyse des causes) d'une part, et les erreurs aléatoires liées au système (bruit de fond) d'autre part (Keller et al. 2006). Ce qui permettrait de tirer des conclusions fiables pour la mise en œuvre de la protection des sols et pour les décisions politiques.

**Fig. 23 > Carbone organique dans la couche supérieure (0–20 cm) des sites d'herbages du NABO (n=17)**

*En haut: série temporelle des teneurs absolues (méthode de référence FAL); En bas: teneurs centrées sur la moyenne du site. Ligne sombre: médiane.*



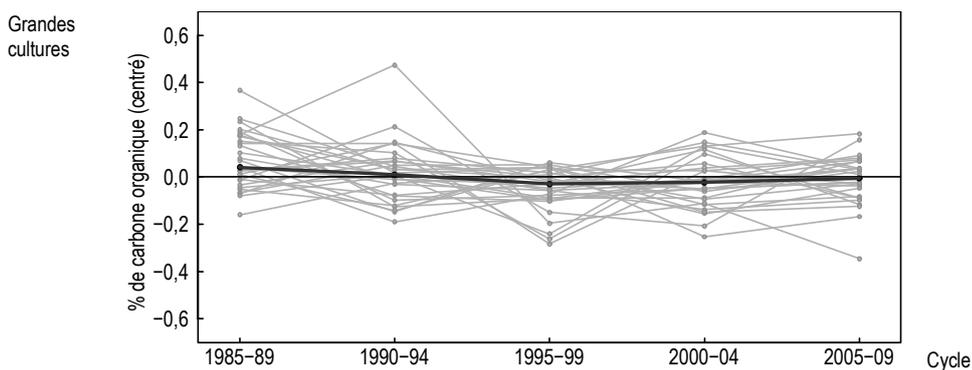
## 4.2

**Grandes cultures**

Les sites de grandes cultures présentent une légère diminution jusqu'à la fin des années 1990, puis remontent légèrement (fig. 24). Les changements temporels sont de l'ordre de 0,1 % de carbone organique. En raison du travail du sol par l'agriculture, les valeurs mesurées varient nettement moins entre les relevés que par exemple chez les sites d'herbages, où les évolutions dans le temps peuvent être plus rapidement détectées. Pour l'instant, il n'est pas encore possible de dire si les variations observées sont dues à la méthodologie, aléatoires, voire liées à l'introduction des prestations écologiques requises. Pour répondre à ces questions, des investigations complémentaires se révèlent nécessaires, comme l'établissement de bilans de carbone pour les parcelles du NABO sur la base des données d'exploitation collectées.

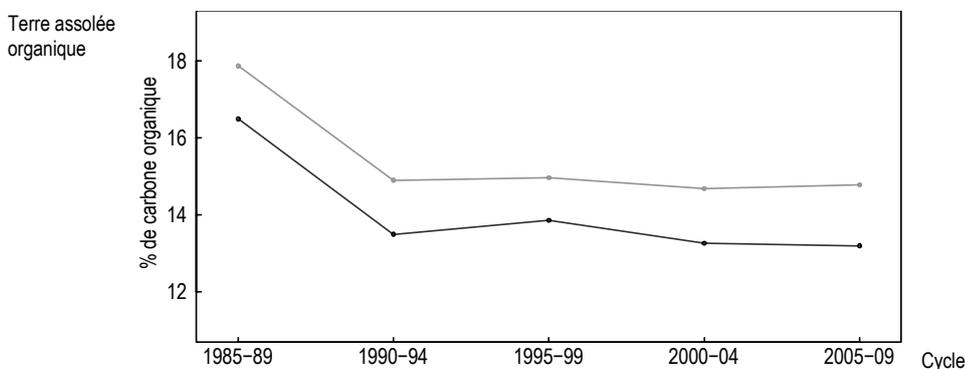
**Fig. 24** > Teneur en carbone organique de la couche supérieure (0–20 cm) des sites de grandes cultures du NABO (n=29), centrée sur la moyenne du site

*Ligne sombre: médiane.*



**Fig. 25** > Teneur en carbone organique de la couche supérieure (0–20 cm) de deux sites de grandes cultures du NABO riches en humus

*Ligne claire: site Oberriet; ligne sombre: site Ins.*



Dans deux sites de grandes cultures riches en carbone (plus de 15 % dans la couche supérieure du sol), cette teneur a très fortement baissé en raison du travail du sol (cf. fig. 25); pour des raisons graphiques, ces sites ne sont pas indiqués à la fig. 24.

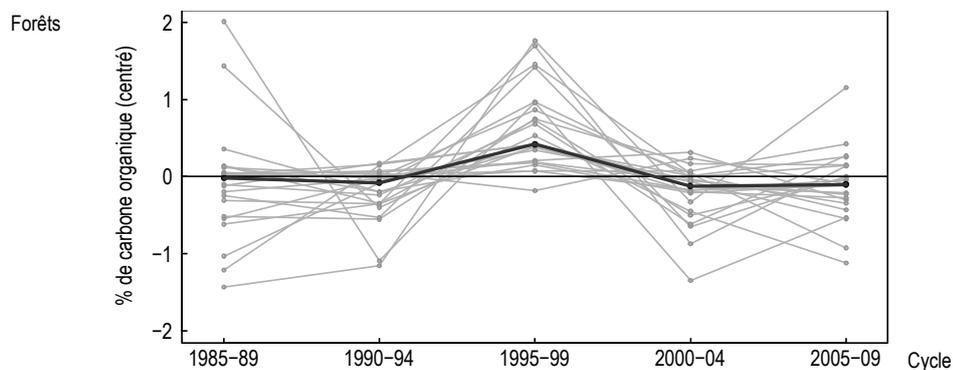
### 4.3 Forêts

Les teneurs en carbone organique mesurées dans les sols forestiers font apparaître des changements notables au 3<sup>e</sup> cycle de prélèvements (fig. 26). Dans les sols sous forêts de résineux riches en carbone, avec un horizon organique parfois marqué dans la couche supérieure, elles sont jusqu'à 2,5 % supérieures à celles des 2<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> cycle. En revanche, dans les sols sous forêts de feuillus plus pauvres en matière organique, cet effet est presque indétectable.

L'étude des variations possibles à court terme et de leurs causes (Desaules et al. 2004) et d'autres investigations détaillées menées au niveau des sites permettent de conclure que ces changements mesurés sont dus à des erreurs méthodologiques. A une profondeur de prélèvement fixe de 0–20 cm, les différences de teneur en eau du sol sont des sources d'erreurs systématiques, en particulier dans les sols riches en carbone. La matière organique a la particularité de se dilater ou de se contracter facilement en fonction de la teneur en eau. Ce phénomène, connu sous le nom de gonflement et rétraction, peut avoir une influence sur la composition du matériel prélevé à une profondeur de 0–20 cm. Celle-ci est particulièrement marquée lorsque les couches supérieures du sol présentent des changements d'horizons extrêmes (horizons humifères et horizons organiques). Dans un sol humide et donc gonflé, il faut s'attendre à ce que les teneurs en carbone à une profondeur de 0–20 cm soient plus élevées (cf. point 0 et Meuli et al. 2014). Lors de la planification des prochains prélèvements, on veillera donc à ce que les échantillons soient prélevés dans des conditions les plus similaires possibles. En périodes trop sèches ou trop humides, les sites ne seront pas échantillonnés.

**Fig. 26 > Teneur en carbone organique de la couche supérieure (0–20 cm)**

*Des sites forestiers du NABO (n=23), centrée sur la moyenne du site. Ligne sombre: médiane.*



## 4.4

**Standardisation des séries temporelles**

Pour pouvoir corriger les erreurs systématiques dues au prélèvement des échantillons et standardiser les mesures des teneurs en carbone d'une série temporelle en les ramenant à de mêmes conditions de station, les paramètres de la «densité apparente» et de la «teneur en eau de la terre fine» ont été intégrés depuis le 4<sup>e</sup> cycle dans le programme de mesure. La densité apparente indique la masse de terre fine contenue dans un volume de sol donné; elle est exprimée en  $\text{g/cm}^3$ . Si la teneur en eau augmente, le sol se dilate et la densité apparente diminue en conséquence. La dilatation est principalement provoquée par les minéraux argileux et la matière organique: tous deux gonflent lorsque de l'eau est ajoutée.

Pour le 4<sup>e</sup> et le 5<sup>e</sup> cycle de prélèvements, des mesures de la densité apparente sont disponibles pour environ deux tiers des sites du NABO (fig. 27, à gauche). Les résultats montrent que ce paramètre est bien reproductible d'un cycle à l'autre, malgré les variations dues à la fluctuation de la teneur en eau, qui peuvent atteindre  $0,2 \text{ g/cm}^3$ . On constate en outre que la relation entre densité apparente et teneur en eau change d'un site à l'autre. Dans certains sites, la densité apparente n'évolue pratiquement pas malgré de fortes variations de la teneur en eau, alors que dans d'autres elle y est très sensible. Ces réactions différentes entre sites s'expliquent principalement par des différences dans la quantité et la composition des minéraux argileux et de la matière organique.

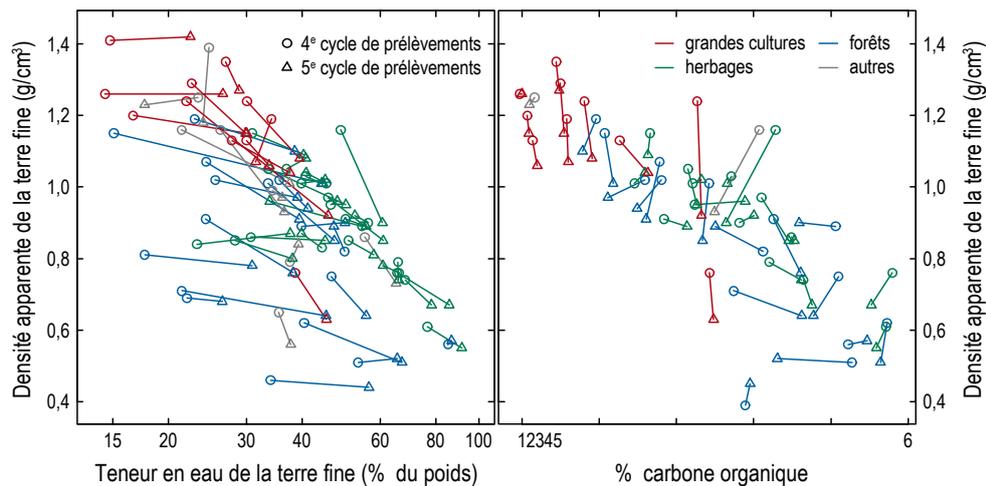
Comme on pouvait s'y attendre, les sols avec une proportion plus élevée de matière organique ont une densité apparente plus faible (fig. 27, à droite). Cependant, si les différences entre les cycles de prélèvements sont observées au niveau des sites, on constate quelques-uns ne laissent pas apparaître de corrélation entre densité apparente et teneur en carbone. On trouve par ailleurs certains sites où la teneur en carbone diminue alors que la densité apparente augmente, et d'autres où la densité apparente et la teneur en carbone évoluent dans la même direction. Ces résultats à première vue incohérents s'expliquent par la répartition du carbone dans le sol. Il est en outre plausible que les données présentées correspondent aussi à des changements effectifs de la teneur en carbone. Le graphique ci-dessous ne permet pas de distinguer les changements effectifs de ceux dus à l'échantillonnage.

Les échantillons du NABO sont toujours prélevés dans les 20 premiers cm mesurés depuis la surface du sol. Si l'échantillonnage est effectué dans un sol humide, la proportion relative de couche supérieure dans l'échantillon est plus importante que dans un échantillon prélevé dans un sol sec. Dans les sols sous une forêt ou sous un herbage, la teneur en carbone organique des horizons supérieurs est en général nettement plus élevée que dans les horizons inférieurs. On peut donc s'attendre à ce que les teneurs en carbone des échantillons de sol soient plus élevées dans les sols qui étaient humides au moment de l'échantillonnage et qu'elles sont par conséquent surestimées. Dans les grandes cultures en revanche, la teneur en carbone, en raison du travail du sol par le labour, est la plupart du temps régulièrement répartie dans la couche supérieure du sol. Par conséquent, aucune corrélation n'est attendue entre la teneur en eau et la teneur en carbone des échantillons, plus précisément entre la densité apparente et la teneur en carbone lors d'échantillonnages répétés d'un site.

La détermination complémentaire de la densité apparente, associée aux connaissances sur les gradients verticaux des concentrations de carbone, permettra au NABO de standardiser à l'avenir les séries temporelles mesurées des teneurs en carbone d'après des conditions de site comparables (Ellert et Bettany 1995, Schrumpf et al. 2011). Il sera ainsi possible d'éliminer en grande partie les erreurs systématiques décrites ci-dessus et de mieux identifier les modifications de la teneur en carbone. Pour les trois premiers cycles du réseau de mesure NABO, il faudra toutefois procéder à des estimations rétrospectives de la teneur en eau dans le sol. Celles-ci seront effectuées à l'aide de données climatiques et du modèle de processus EPIC.

**Fig. 27** > Densité apparente de la terre fine en relation avec la teneur en eau (à gauche; n = 58 sites), et la teneur en carbone organique (à droite; n = 42 sites) lors des 4<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> cycle de prélèvements

Sont présentées par site et par cycle la moyenne de quatre échantillons volumiques Humax (0–20 cm) pour la densité apparente et la teneur en eau, et la moyenne des quatre échantillons composés pour la teneur en carbone. Les lignes relient les deux mesures d'un même site.



## 5 > Eléments nutritifs

---

La fumure est un facteur important dans la production végétale. C'est elle qui permet d'obtenir les rendements élevés nécessaires à l'alimentation des êtres humains et des animaux de rente.

Les éléments nutritifs quantitativement les plus importants pour la production végétale sont l'azote, le phosphore et le potassium. Selon Spiess (2011), en 2008, les apports moyens sur la surface agricole utile de la Suisse se sont élevés à environ 150 kg/ha pour l'azote, 13,5 kg/ha pour le phosphore, et 38 kg/ha pour le potassium. Après déduction des récoltes, les excédents d'éléments nutritifs se montent en moyenne à 108 kg/ha pour l'azote, 5,5 kg/ha pour le phosphore, et 28 kg/ha pour le potassium. Extrapolés à l'ensemble de la surface agricole utile de la Suisse, ils représentent 114 000 t d'azote, 5800 t de phosphore et 29 400 t de potassium. Ces bilans se rapportent à des conditions moyennes, indépendamment du type d'entreprise, du mode d'exploitation et des cultures. C'est pourquoi les bilans de fumure des parcelles du réseau NABO peuvent fortement s'écarter du bilan moyen national.

En 2011, des échantillons de sol séchés et archivés de 16 sites sélectionnés de grandes cultures et d'herbages ont été étudiés par rapport à leurs teneurs en éléments nutritifs. Des échantillons des 5 premiers cycles de prélèvements ont été analysés simultanément en laboratoire. Les sites ont été choisis de telle sorte qu'ils fassent également partie du réseau du monitoring indirect et représentent une grande variété de types d'entreprise, d'intensité d'exploitation et de conditions de station. Les fig. 29 et fig. 30 montrent les variations temporelles absolues de l'azote, du phosphore (teneurs totales pour les deux) et du potassium (assimilable par les plantes, extrait à l'acétate d'ammonium-EDTA) dans les sols de parcelles d'herbages et de grandes cultures.

**Fig. 28 > Prélèvement d'échantillons NABO dans un champ de légumes à San Antonino (TI)**



## 5.1 Herbages

Dans les neuf parcelles d'herbages, les teneurs en éléments nutritifs de la couche supérieure du sol étaient en général relativement élevées (fig. 29). Dans les échantillons du 5<sup>e</sup> cycle de prélèvements, les teneurs totales en phosphore varient entre 0,9 et 2,1 g par kg de terre fine (moyenne 1,3 g/kg), celles d'azote entre 3,1 et 6,4 g/kg (moyenne 4,5 g/kg), et les concentrations de potassium entre 49 et 441 mg/kg (moyenne 201 mg/kg). Il est intéressant de relever que les trois sites classés peu intensifs depuis le début de la série temporelle, au milieu des années 1980, présentent aussi des teneurs élevées en éléments nutritifs. Il est très probable qu'à une époque plus ancienne, ces parcelles d'herbages ont fait l'objet d'une exploitation intensive et reçu d'importants apports d'engrais.

D'une manière générale, les changements mesurés au niveau des teneurs en éléments nutritifs étaient considérables. Des modèles temporels opposés ont été constatés en particulier entre les six sites d'herbages intensifs et les trois sites d'herbages peu intensifs. En moyenne sur les deux décennies, ces derniers présentaient une diminution de 0,12 g de phosphore et de 0,14 g d'azote par kg de terre fine, alors que les premiers enregistraient en moyenne une augmentation de 0,12 g/kg de phosphore et de 0,58 g/kg d'azote dans la couche supérieure. En tenant compte de la densité apparente de ces sols, l'évolution des réserves de phosphore et d'azote en 20 ans se monte ainsi à respectivement -221 kg/ha et -255 kg/ha pour les sites d'exploitation peu intensive, et respectivement +218 kg/ha et +1042 kg/ha pour les sites d'exploitation intensive. S'agissant du potassium, d'importantes fluctuations temporelles ont été observées ponctuellement. Dans l'ensemble, les sites d'herbages échantillonnés ont enregistré une augmentation de 101 mg/kg de potassium dans la couche supérieure (modification des réserves: 223 kg/ha). Leur fumure s'est faite principalement sous forme d'apports de lisier bovin, de fumier bovin, et parfois de lisier mélangé ou porcin. Aucun n'a reçu d'engrais minéraux.

Les teneurs en azote et en phosphore des sols des sites d'herbages intensifs ont eu tendance à augmenter jusqu'à la fin des années 1990, pour ensuite se stabiliser à un niveau donné. Cette interruption de la hausse pourrait être liée à l'introduction, au milieu des années 1990, des prestations écologiques requises (PER). Depuis lors, un bilan de fumure équilibré est nécessaire au niveau de l'ensemble de l'exploitation pour avoir droit aux paiements directs. Les teneurs en potassium de la couche supérieure du sol ont en revanche continué d'augmenter dans la plupart des sites d'herbages étudiés. Pour pouvoir vérifier globalement ces hypothèses, des analyses des teneurs en éléments nutritifs sont en cours dans l'ensemble des 70 sites agricoles du NABO.

## 5.2 Grandes cultures

Dans les sept parcelles de grandes cultures, l'azote et le phosphore montrent des tendances différentes (fig. 30). Les teneurs en azote diminuent légèrement pendant les dix premières années, puis augmentent légèrement. Le même modèle a été observé avec le carbone organique (cf. point 4.2). Environ 98 % de l'azote dans le sol étant contenu

dans la matière organique (Gisi et al. 1997), l'évolution des parcelles se révèle ainsi conforme aux attentes. Pour le phosphore, les modifications des teneurs correspondent aux tendances relevées dans les sites d'herbages intensifs, à savoir une hausse pendant les dix premières années, suivie d'une stabilisation. Quant au potassium assimilable par les plantes, de fortes variations ont été observées dans certains sites, mais aucun changement n'est observable sur toute la période considérée.

La teneur moyenne en phosphore était de 1,2 g par kg de terre fine (fourchette de 0,7–1,9 g/kg), celle de l'azote de 4,6 g/kg (1,3–11,5 g/kg), et celle du potassium de 270 mg/kg (59–761 mg/kg). Durant la période considérée, les teneurs en phosphore dans les différents sites ont évolué entre des baisses de 0,1 g/kg (correspondant à une modification des réserves de –218 kg/ha), et des hausses de 0,15 g/kg (+327 kg/ha). Pour l'azote, ces valeurs allaient de –0,2 g/kg (–330 kg/ha) à +0,3 g/kg (719 kg/ha), et pour le potassium de –89 mg/kg (–196 kg/ha) à 118 mg/kg (259 kg/ha).

### 5.3 Déduction de recommandations

Le projet de comparaison entre monitoring direct et indirect permettra d'identifier à l'avenir les mesures d'exploitation susceptibles d'entraîner une accumulation ou une diminution de certains éléments nutritifs dans le sol en fonction du régime de fumure, des assolements ou de l'intensité d'exploitation ainsi que des caractéristiques du sol. Les résultats permettront de déduire des recommandations de mesures préventives.

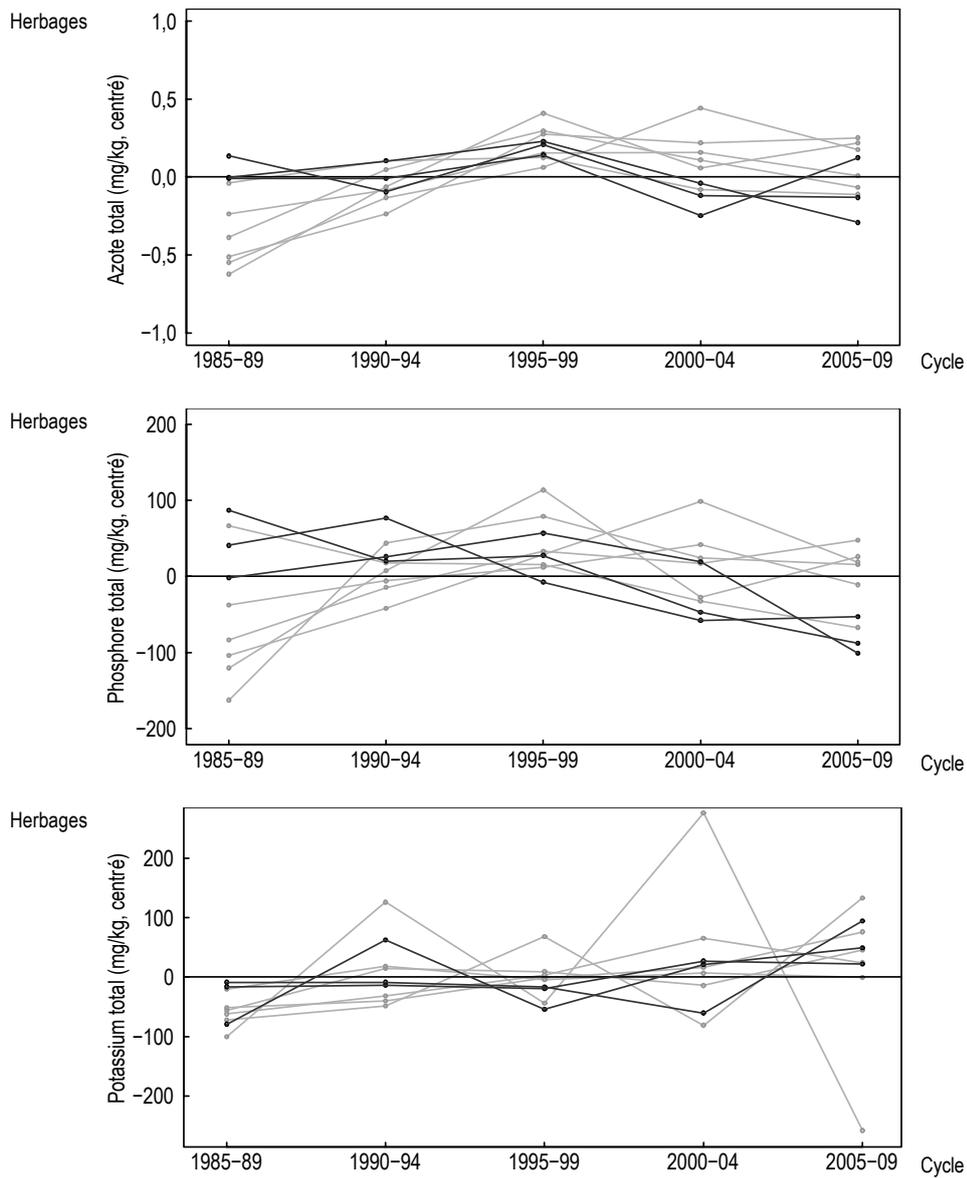
Dans le droit fédéral suisse, plusieurs dispositions traitent des engrais et de la fumure. Un résumé et une aide à l'interprétation sont disponibles dans Dettwiler et al. (2006). Les bases légales actuelles régissant l'utilisation des engrais sont résumées dans la publication «Éléments fertilisants et utilisation d'engrais dans l'agriculture» (OFEV & OFAG 2012). Celle-ci renferme également des explications sur les dispositions relatives aux bilans de fumure et aux valeurs limites maximales. En ce qui concerne le réseau NABO, il s'agira de développer les analyses d'éléments fertilisants sur les parcelles exploitées par l'agriculture (y compris les alpages).

Le phosphore et le potassium sont essentiellement apportés par les engrais. Chez l'azote en revanche, la fixation par les légumineuses et les dépôts atmosphériques représentent d'importantes voies d'introduction supplémentaires. Les principales sources sont les émissions d'ammoniac par l'agriculture, et les oxydes d'azote résultant de processus de combustion (p. ex. transports). Les apports élevés d'azote entraînent en général une acidification des sols, en particulier de ceux dont la capacité tampon est limitée.

Selon les dernières prévisions sur les flux d'azote en Suisse (Heldstab et al. 2010, 2013), aucune réduction notable des apports globaux d'azote dans le sol n'est attendue jusqu'en 2020. On prévoit certes une diminution des importations d'engrais minéraux et des émissions atmosphériques par l'agriculture, mais en contrepartie, les importations de fourrages et les quantités d'engrais de ferme devraient augmenter. Par conséquent, les données sur les teneurs en azote de parcelles du NABO, associées à d'autres caractéristiques du sol, comme l'acidité, la saturation en bases et la matière organique, fournissent d'importantes informations complémentaires pour l'observation des sols.

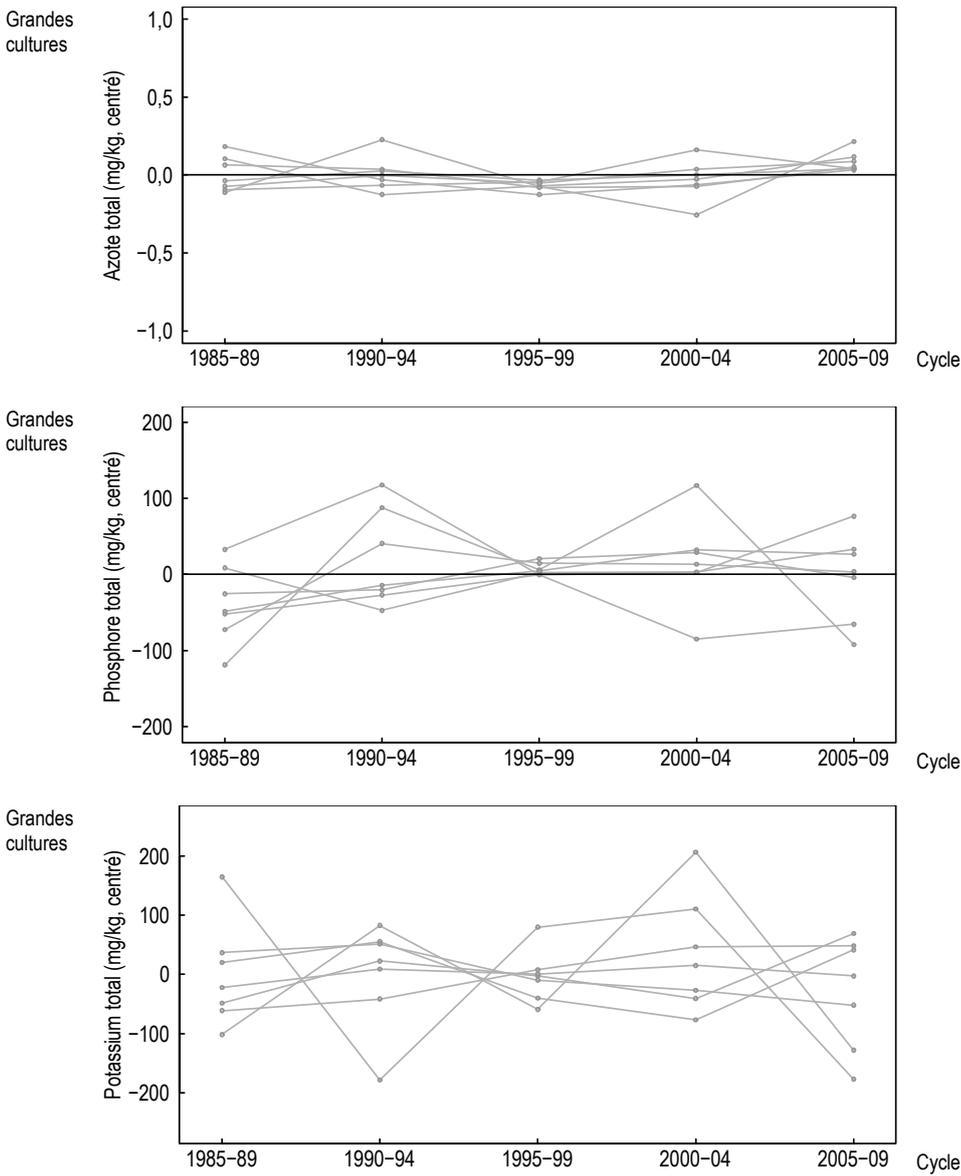
**Fig. 29** > Teneurs en azote ( $N_{tot}$ ), phosphore ( $P_{tot}$ ) et potassium ( $K_{EDTA}$ ) dans la couche supérieure du sol (0-20 cm, centré sur la moyenne des parcelles) de neuf parcelles d'herbages

Lignes claires: exploitation intensive ( $n=6$ ); lignes sombres: exploitation extensive ( $n=3$ ).



**Fig. 30** > Teneurs en azote ( $N_{tot}$ ), phosphore ( $P_{tot}$ ) et potassium ( $K_{EDTA}$ ) dans la couche supérieure du sol (0–20 cm, centré sur la moyenne des parcelles) de sept parcelles de grandes cultures

Lignes claires: exploitation intensive (n=6); lignes sombres: exploitation extensive (n=3).



## 6 > Echantillonnage systématique dans des sites du Monitoring de la biodiversité en Suisse

---

Le Monitoring de la biodiversité en Suisse (MBD, Bureau de coordination du Monitoring de la biodiversité en Suisse 2009) relève depuis quelques années la diversité biologique sur la base de différents indicateurs. Pour l'indicateur d'état Z9 «diversité des espèces dans les habitats», des spécialistes répertorient des plantes vasculaires, des mousses et des espèces d'escargots sur 1600 placettes régulièrement réparties dans tout le pays. Depuis 2011, les échantillonneurs prélèvent sur mandat du NABO quatre échantillons volumiques à une profondeur de 0 à 20 cm dans les sites de l'indicateur Z9. Les échantillons de sol sont préparés par le NABO (séchage et tamisage) et archivés. Un premier cycle d'analyses est consacré à la détermination du pH (degré d'acidité) et des teneurs totales en carbone et en azote. Grâce à l'échantillonnage volumétrique, il est possible de calculer la densité apparente de la terre fine et de déterminer ainsi des teneurs ou réserves (p.ex. réserves de carbone) rapportées au volume des 20 cm de sol. Les résultats de 40 % des sites Z9 sont actuellement disponibles.

L'échantillonnage des sites est une enquête transversale. Celle-ci permet de tirer des enseignements sur l'état actuel des sols en Suisse, mais pas sur leur évolution temporelle. Un premier résultat de cette intéressante collaboration est illustré par la fig. 31, où sont présentés les degrés d'acidité de quelque 700 sites de l'indicateur Z9 ainsi que des sites du NABO.

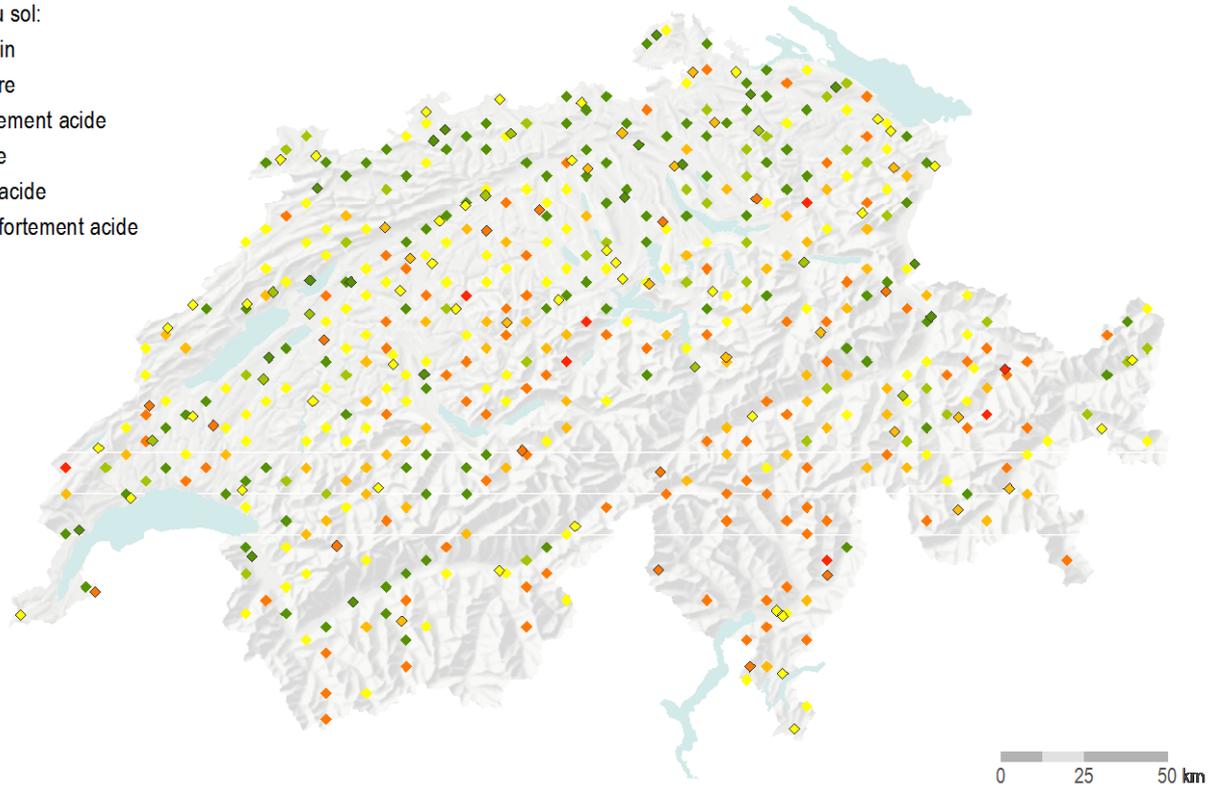
Le classement en sols alcalins à acides est établi sur la base du pH. L'acidité est l'une des plus importantes caractéristiques du sol: elle a une grande influence sur l'activité biologique, sur la disponibilité en éléments nutritifs assimilables par les plantes, et sur la mobilité des polluants. Des conditions acides freinent l'activité biologique et entraînent un enrichissement en matières organiques. Parallèlement, les métaux lourds sont moins solidement fixés et peuvent migrer dans les horizons plus profonds. Le degré d'acidité est donc un important paramètre pour l'évaluation des teneurs appropriées en métaux lourds.

L'acidité du sol fait clairement apparaître des modèles géographiques. Les conditions neutres à alcalines sont très fréquentes dans le nord et le nord-est de la Suisse. On les trouve aussi dans quelques petites régions des Alpes. Sur le Plateau, ce sont les sols légèrement acides qui dominent. On remarquera à ce propos que l'acidité est influencée par l'exploitation agricole, par exemple en raison de la fumure à la chaux. Les sols très acides à très fortement acides se rencontrent principalement dans les Alpes, le long des Préalpes, au sud des Alpes, et occasionnellement dans le Jura.

**Fig. 31 > Acidité du sol: résultats intermédiaires du projet MBD-NABO (échantillons de 2011 et 2012, représentant 40% des sites Z9) complétés par les sites d'observation à long terme du NABO (symboles avec bord noir)**

Acidité du sol:

- ◆ alcalin
- ◆ neutre
- ◆ faiblement acide
- ◆ acide
- ◆ très acide
- ◆ très fortement acide



## 7 > Conclusions

---

L'Observatoire national des sols (NABO) relève depuis plus de 20 ans la pollution aux métaux lourds des sols suisses à travers son réseau de mesure. Depuis l'achèvement du 5<sup>e</sup> cycle de prélèvements (2004 à 2009), des archives d'échantillons de sol bien documentées sont disponibles et peuvent être utilisées rétrospectivement pour l'étude de nombreuses questions. Le présent rapport se concentre avant tout sur d'importantes propriétés chimiques des sols. A l'avenir, l'intégration de paramètres biologiques et physiques et la modélisation de processus devraient permettre d'acquérir des connaissances supplémentaires sur l'évolution de la qualité des sols. Par conséquent, la valeur du NABO et de son réseau de mesure devrait aussi être jugée au-delà des propriétés pédologiques étudiées. Dans les années 1980, personne n'aurait pensé que l'intérêt se focaliserait sur le sol en tant que réservoir de carbone. Aujourd'hui, nous ne savons pas quelles seront les problématiques centrales dans deux décennies. C'est pourquoi l'une des tâches importantes du NABO est de transmettre aux générations futures des archives d'échantillons de sols bien documentées et cohérentes.

### 7.1 Suivi des mesures de politique environnementale

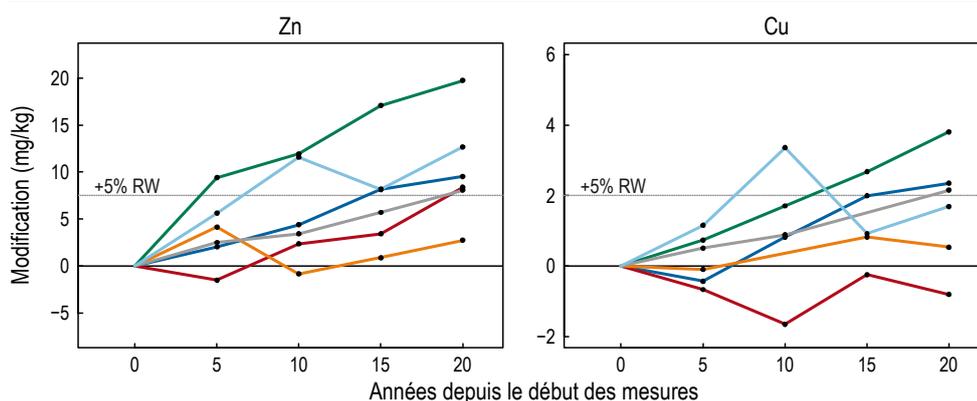
Comme le montrent les résultats du présent rapport, le réseau de mesure du NABO et la stratégie de prélèvement, de préparation et d'archivage des échantillons de sol répondent aux attentes concernant une observation fiable des sols en vue d'identifier les changements à un stade précoce. Le NABO permet de déceler de manière fiable l'évolution de tendances pour d'importantes propriétés chimiques des sols. C'est le cas pour les métaux lourds, qui sont au centre du présent rapport, mais aussi pour d'autres propriétés, comme la teneur en carbone organique ou en éléments fertilisants importants. S'agissant des métaux lourds, des changements à partir de 5 % de la valeur indicative sont mis en évidence avec une grande certitude. Dans la plupart des cas, des modifications encore plus faibles sont déjà identifiables. Il est ainsi possible de proposer rapidement des mesures préventives pour le domaine de l'application, tout en garantissant le suivi des mesures politiques.

### 7.2 Mesures nécessaires pour le zinc et le cuivre

Au milieu des années 1980, lorsque le NABO a été planifié, la politique environnementale s'intéressait essentiellement à la pollution des sols par les immisions atmosphériques. Au cours des deux dernières décennies, les mesures techniques adoptées (renforcement des prescriptions en matière de protection de l'air, interdiction de l'essence avec plomb) ont montré leur efficacité. Les résultats présentés sous le point 3.4 l'attestent. Aujourd'hui, les apports atmosphériques de métaux lourds ne semblent plus poser de problème. En revanche, les dépôts d'autres substances, notamment d'azote, restent à un niveau élevé, entraînant ainsi une acidification croissante des sols.

En ce qui concerne les apports de zinc et de cuivre par les engrais de ferme (lisier et fumier), la situation reste toujours aussi alarmante. Comme l'ont montré de précédents rapports (Desaules et al. 2006, Meuli et al. 2014), leurs teneurs sont en augmentation constante dans les sols sous herbages intensifs. Ces hausses se sont poursuivies sans fléchir ces cinq dernières années. En outre, des augmentations similaires ont été observées dans certains sites de grandes cultures ayant reçu des apports d'engrais de ferme. Les bilans des métaux lourds dans des sites du NABO (monitoring indirect; Keller et al. 2005) montrent que les hausses observées sont clairement imputables aux engrais de ferme. Suivant le mode d'exploitation, le lisier et le fumier renferment des quantités considérables de zinc et de cuivre (Della Peruta 2013). C'est principalement à travers les additifs fourragers que ces éléments parviennent dans le cycle des engrais. Les désinfectants utilisés dans les étables pourraient aussi constituer une source d'apports.

Fig. 32 > Evolution des teneurs en Zn et en Cu sous des herbages intensifs du réseau NABO



En l'espace de 20 ans, les teneurs en zinc et en cuivre sous herbages intensifs ont augmenté de 5 à 10 % par rapport à la valeur indicative (fig. 32). Des hausses permanentes de cet ordre de grandeur sont contraires à la conservation à long terme de la fertilité des sols exigée par l'art. 33 de la loi sur la protection de l'environnement (LPE 1983). Dans de tels cas, les cantons, en accord avec la Confédération, doivent prendre des mesures (art. 34, al. 1, LPE). Conformément à l'art. 8 de l'ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol 1998), les cantons doivent déterminer les causes et examiner les mesures à prendre si les atteintes augmentent de façon marquée, même si les teneurs actuelles sont (encore) inférieures à la valeur indicative.

Le recours aux engrais de ferme est judicieux d'un point de vue écologique, car il permet une utilisation efficace des ressources. La fumure avec du lisier et du fumier vient boucler les cycles de l'azote, du phosphore et d'autres éléments nutritifs. Il faut toutefois s'efforcer de réduire les apports de zinc et de cuivre dans ce cycle.

Les apports de zinc et de cuivre dans le sol par les engrais de ferme varient fortement selon l'affouragement (Reutimann 2006). L'ordonnance sur le Livre des aliments pour animaux (OLALA 2011) fixe des teneurs maximales juridiquement contraignantes pour les additifs fourragers. Par ailleurs, la station fédérale de recherche Agroscope publie

des recommandations sur les apports alimentaires pour les porcs et les ruminants. Ces recommandations fondées sur des bases scientifiques sont toutes nettement inférieures (de 2 à 30 fois) aux teneurs maximales autorisées. Les analyses de Reutimann (2006) ont montré que dans le cas des porcs et des bovins, les apports de zinc et de cuivre sont en général supérieurs aux recommandations. On peut donc partir du principe que les quantités de zinc et de cuivre contenues dans les fourrages pourraient être réduites considérablement sans effets préjudiciables pour les animaux et les paysans.

### 7.3 **Changements au niveau du carbone organique**

Des échanges étroits ont lieu entre le sol, l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère. Les sols remplissent ainsi une importante fonction médiatrice dans le régime des eaux et des substances des écosystèmes. Selon les prévisions, les changements climatiques entraînent en de nombreux endroits une diminution des teneurs en carbone dans les sols. Les séries temporelles cohérentes et fiables comme celles développées dans le NABO offrent donc une importante base pour les décisions (politiques).

Les teneurs en carbone des sols des sites d'herbages ont légèrement augmenté jusqu'à la fin des années 1990. Depuis lors, elles ont légèrement baissé ou sont restées stables. Dans l'ensemble, les changements mesurés sont toutefois très faibles (moins d'un demi-pourcent). En tenant compte des teneurs mesurées en éléments nutritifs et du régime de fumure des sites, ces modifications peuvent être évaluées de manière intégrale et mises en relation avec le mode et l'intensité d'exploitation des parcelles. Contrairement aux grandes cultures, les sites herbagers et forestiers n'ont pas permis de dégager des tendances dans l'évolution des teneurs en carbone.

A l'avenir, la fiabilité des séries temporelles sera encore optimisée. Le relevé de paramètres complémentaires (densité apparente et teneur en eau) permet de corriger les erreurs méthodiques et de faire ainsi une distinction entre changements effectifs (signal avec analyse des causes) et erreurs aléatoires et méthodiques (bruit de fond) dans les teneurs en carbone mesurées. Ces résultats sont pris en considération dans l'inventaire national des gaz à effet de serre et permettent de tirer des conclusions fondées en matière d'application et pour les décisions politiques.

### 7.4 **Les apports d'éléments nutritifs sont stabilisés à un niveau élevé**

La comparaison prévue entre monitoring direct et indirect permet d'identifier les mesures d'exploitation non durables qui, compte tenu du régime de fumure, des assolements, de l'intensité d'exploitation et des propriétés du sol, conduisent à une accumulation ou à une diminution effective d'éléments nutritifs dans le sol. Il est ainsi possible de déduire des recommandations pour des mesures préventives, et d'interpréter les changements mesurés en tenant compte du contexte de l'exploitation.

---

D'une manière générale, des changements considérables ont été observés dans les sols des sites d'herbages au niveau des teneurs en azote et en phosphore (teneurs totales pour les deux) ainsi qu'en potassium (extraction à l'acétate d'ammonium-EDTA). Dans les parcelles de grandes cultures en revanche, aucune tendance notable n'a été relevée sur les deux décennies.

Des modèles temporels opposés ont été mis en évidence entre les prairies et pâturages intensifs d'une part, et les sites d'exploitation herbagère peu intensive d'autre part. Dans les herbages intensifs, les teneurs en azote et en phosphore ont eu tendance à augmenter depuis le début des séries de mesures jusqu'à la fin des années 1990, puis ces deux principaux éléments nutritifs se sont stabilisés à ce niveau durant la dernière décennie. En revanche, les teneurs en potassium ont continuellement augmenté sur toute la période de mesure dans la majorité des sites d'herbages étudiés. Les résultats pour l'azote et le phosphore pourraient être liés à l'introduction, au milieu des années 1990, des prestations écologiques requises (PER). L'analyse des teneurs en éléments nutritifs des quelque 70 sites agricoles du réseau de mesure NABO permettra d'étayer cette hypothèse. Il en va de même pour les hausses des teneurs en potassium dans les sites d'herbages.

Les analyses des éléments nutritifs dans les parcelles agricoles du NABO (alpages compris) seront encore développées. Compte tenu des prévisions actuelles sur les flux d'azote en Suisse – celles-ci ne laissent entrevoir aucune réduction notable des apports d'azote dans les sols à moyen terme – il est important de suivre cette problématique par la mesure de caractéristiques pédologiques appropriées (p. ex. la saturation en bases).

## 8 > Perspectives

---

L'un des principaux objectifs du réseau NABO est de relever les changements affectant la qualité des sols. Il faut pouvoir identifier rapidement les évolutions préjudiciables afin de prendre des mesures pour écarter le danger et créer des conditions permettant une utilisation durable du sol. Pour que ce mandat puisse être encore mieux assumé à l'avenir, la stratégie éprouvée du réseau NABO sera progressivement optimisée au niveau de l'échantillonnage, du choix des sites et du programme de mesures. L'un des grands défis qui se pose est de veiller à ne pas trop orienter ce réseau vers un objectif donné ou une problématique déterminée. Personne ne peut dire aujourd'hui quelles seront les questions d'actualité dans 10 ou 20 ans. Par conséquent, le NABO doit pouvoir fournir des réponses au plus grand nombre possible de questions touchant à l'évolution de la qualité des sols.

En même temps, il importe d'accélérer la synthèse des résultats du monitoring direct et indirect afin de pouvoir mieux comprendre les processus responsables des variations temporelles des propriétés pédologiques. Des investigations complémentaires devraient permettre d'obtenir des enseignements sur certains paramètres au niveau régional et jusqu'à l'échelle nationale.

### 8.1 **Adaptation du réseau et du programme de mesures**

Si la pollution des sols était au centre des préoccupations dans les années 1980, de nouvelles problématiques sont apparues au cours des dernières années. Celles-ci reflètent un changement dans la façon dont la société perçoit le sol, considéré aujourd'hui comme une importante interface entre les différents écosystèmes. Par exemple, pendant longtemps, le rôle de réservoir et de tampon qu'il remplit dans le contexte du changement climatique n'a pas été reconnu. En outre, des séries temporelles fiables des teneurs en carbone des sols seront absolument nécessaires à l'avenir pour pouvoir offrir aux milieux politiques un conseil scientifiquement étayé.

Parmi les problématiques devenues prioritaires figurent aussi l'évolution de la biodiversité, les changements du régime hydrique et donc de l'humidité du sol liés au réchauffement climatique, la compaction du sol, ou encore les conséquences des transformations de propriétés pédologiques pour la prévention des dangers naturels. La combinaison des facteurs de station tels que type de sol, géologie, exploitation, altitude et climat que l'on trouve dans le réseau NABO ne permet pas de répondre de manière suffisante à toutes ces nouvelles questions. La stratégie en matière de sites va donc être révisée afin de combler les lacunes actuelles géographiques et stationnelles. Par exemple, l'analyse des effets du changement climatique sur les sols nécessitera l'intégration de sites complémentaires à différentes altitudes dans les Alpes et dans le Jura. En l'état actuel des connaissances, les régions de montagne devraient être davantage

touchées par les changements climatiques et enregistrer par conséquent des modifications plus importantes au niveau du bilan d'humus et du régime hydrique des sols.

**Fig. 33** > Carottes de forage (0 à 40 cm de profondeur) avec indication des horizons pédologiques provenant des sites d'herbages d'Entlebuch (exploitation intensive; à gauche) et d'Elm (exploitation extensive)

*Les carottes ont été prélevées lors du 5<sup>e</sup> cycle de relevés à l'aide de sondes de battage.*



## 8.2 Synthèse entre monitoring direct et indirect

Le regroupement des résultats du réseau de mesure (monitoring direct) et du monitoring indirect revêt une importance croissante. Dans le cadre du monitoring indirect, les bilans de substances de 50 à 70 sites agricoles du NABO sont calculés sur la base des données d'exploitation.

La synthèse des données des deux instruments de monitoring demande beaucoup de temps, parce que le volume des données est très important et que de nombreux sites du NABO présentent des particularités qui doivent être prises en considération. Cette synthèse doit permettre de mieux tenir compte du contexte d'utilisation du terrain lors de l'interprétation des résultats du réseau de mesure, et d'identifier les causes des variations temporelles constatées.

Inversement, les résultats des mesures du monitoring direct sont d'importants éléments pour obtenir une meilleure compréhension de l'influence de processus pédologiques sur le déroulement dans le temps de propriétés du sol. Ils permettent ainsi de mieux comprendre des modifications temporelles intervenant dans le sol et de promouvoir une utilisation durable en tenant compte des propriétés, de l'utilisation et du mode d'exploitation du sol. Cela vaut aussi bien pour les polluants que pour les éléments nutritifs et la teneur en humus du sol.

---

### 8.3 Etats actuels du niveau régional jusqu'à l'échelle nationale

Le troisième domaine important est la représentation d'états actuels et de scénarios du niveau local jusqu'à l'échelle nationale. A cet effet, les données des sites du NABO doivent être complétées par des données supplémentaires ponctuelles et surfaciques. Celles-ci peuvent provenir de relevés cantonaux ou de la collaboration du NABO avec d'autres programmes de monitoring. En ce moment, le NABO collabore avec le Monitoring de la biodiversité en Suisse (MBD, Bureau de coordination du Monitoring de la biodiversité en Suisse 2009) (cf. point 6). Des échantillons de sol supplémentaires sont prélevés dans les emplacements de l'indicateur d'état Z9, puis préparés par le NABO. A la fin du cycle d'échantillonnage de cinq ans, la Suisse aura ainsi été échantillonnée sur l'ensemble du territoire à un maillage de 4 x 6 km. Cette densité d'échantillons de sol est une nouveauté pour la Suisse. La préparation centralisée des échantillons assure une comparabilité maximale des données entre cantons. La série de données obtenue sera extrêmement précieuse, car on disposera également pour chaque site d'informations sur ses particularités et sur la biodiversité.

## > Annexes

### A1 Précisions concernant les méthodes

#### A1-1 Echantillonnage

Les sites du réseau NABO sont échantillonnés à des intervalles de cinq ans. Entre 1985 et 2009, cinq cycles d'échantillonnages ont eu lieu. La localisation des surfaces d'observation permanente est garantie par des mesurages avec des points fixes sur le terrain, par des aimants enterrés et par des données GPS. Sur quelques sites, les surfaces ont dû être déplacées au cours des 20 dernières années, par exemple parce que des matériaux de l'extérieur avaient été déposés sur les placettes d'origine.

Quatre échantillons composés sont collectés dans chaque site sur une surface de 10 x 10 m (Hämman et Desaulés 2003). A cet effet, on prélève un échantillon par mètre carré jusqu'à 20 cm de profondeur au moyen d'une tarière à carottes (tube métallique d'un diamètre intérieur de 2,5 cm). Les 100 échantillons individuels sont répartis entre les quatre échantillons composés selon la fig. 34. Un cinquième échantillon composé comprenant 25 carottes est prélevé puis directement congelé après l'échantillonnage (sans préparation).

Sur une surface de 100 m<sup>2</sup>, les propriétés du sol peuvent fortement varier. Cependant, le fait que chaque échantillon composé soit constitué de 25 échantillons individuels permet d'égaliser la variabilité à petite échelle et d'obtenir ainsi un échantillon représentatif de la surface échantillonnée. La répartition en quatre échantillons composés permet d'une part d'évaluer la variabilité au sein des surfaces d'échantillonnage, d'autre part de réaliser un contrôle de qualité sur l'ensemble de la chaîne de processus (prélèvement, préparation et analyse des échantillons).

Depuis le 4<sup>e</sup> cycle (dès 2000), quatre échantillons volumétriques (Humax) supplémentaires sont prélevés sur chaque site dans les 20 premiers cm du sol. Le NABO les utilise pour déterminer la densité apparente de la terre fine (autrement dit la quantité de terre fine par m<sup>3</sup> de sol). Les données sur les concentrations (mg/kg de terre fine) des échantillons composés peuvent ainsi être converties en indications sur les réserves (mg/m<sup>3</sup>). Il est important de connaître ce paramètre, car le sol se dilate ou se contracte en fonction de l'humidité.

Le NABO est conscient que les couches situées sous les 20 premiers cm de sol sont aussi importantes. Par exemple, si la concentration d'une substance diminue dans les 20 premiers cm, il est nécessaire de savoir si cette substance a effectivement disparu ou si elle a simplement migré en profondeur. Lors du 5<sup>e</sup> cycle (2005–2009), quatre carottes ont été prélevées dans chaque site jusqu'à 40 cm de profondeur au moyen de forets sondes à percussion d'un diamètre intérieur de 4,8 cm. Depuis le début de la 6<sup>e</sup> campagne d'échantillonnage (2010–2014), des carottes sont prélevées jusqu'à un mètre

de profondeur. Contrairement aux échantillons composés superficiels, le matériel des carottes est réparti par horizons pédologiques et analysé séparément.

L'état du sol (p. ex. humidité), les conditions climatiques ainsi que les particularités ou problèmes éventuels observés lors de l'échantillonnage sont consignés dans un journal, de manière à pouvoir garantir la qualité. Des métadonnées comme le type d'exploitation actuel et la culture sont également relevées.

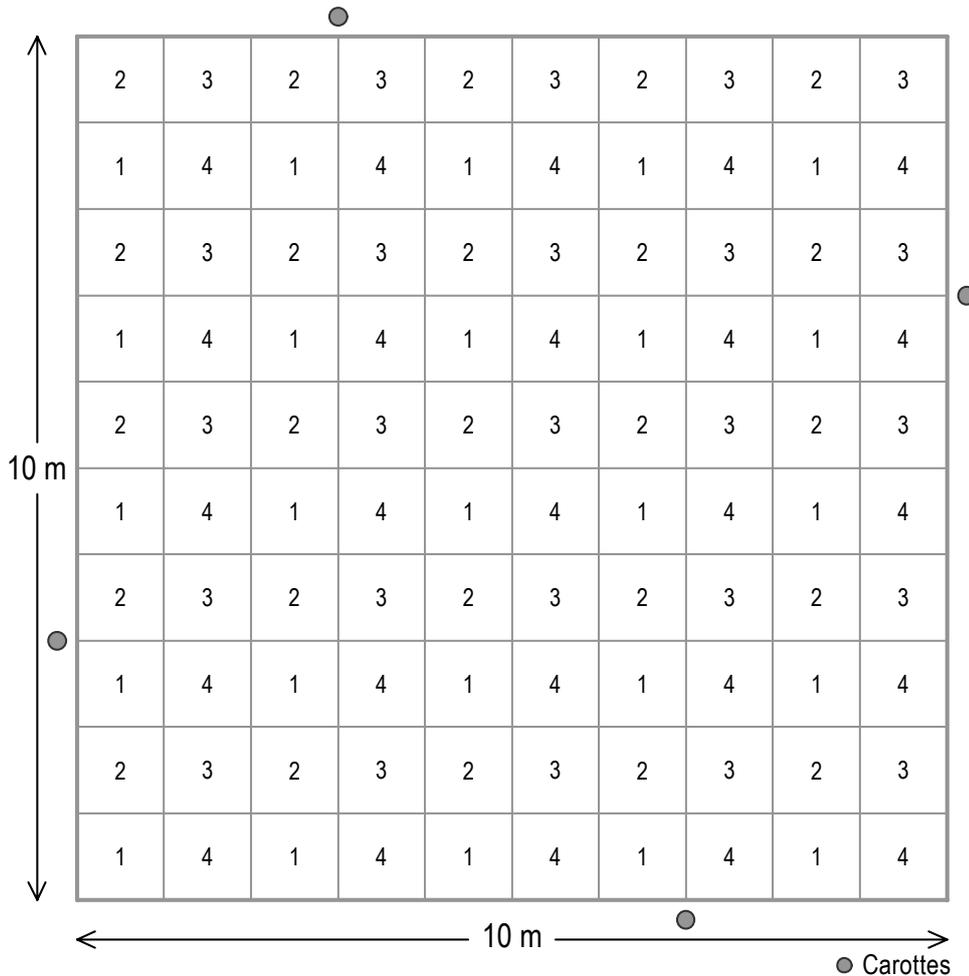
**Tab. 5 > Sites d'observation à long terme du réseau NABO**

N°	Commune / lieu	Canton	Altitude	Occupation du sol	Premier relevé	Type de sol
1	Aadorf / Tänikon	TG	537	Herbage, intensif	1989	Sol brun
2	Zürich / Zürichberg	ZH	668	Forêt mixte	1989	Sol brun-pseudogley
3	Payeme / Les Innuardes	VD	488	Grandes cultures	1985	Sol brun
4	Conthey / Les Fougères	VS	478	Cultures fruitières	1985	Fluvisol
5	La Neuveville / Schafis	BE	475	Viticulture	1985	Sol brun calcaire
6	Grindelwald / Itramen	BE	1915	Herbage, extensif	1989	Sol ocre podzolique
7	Oberstammheim / Stammerberg	ZH	581	Forêt mixte	1989	Sol brun
8	Rothenfluh / Kei	BL	695	Forêt de feuillus	1989	Rendzine
9	Binningen / Bruderholz	BL	324	Grandes cultures	1985	Sol brun lessivé
10	Gais	AR	935	Herbage, peu intensif	1989	Sol brun-Gley
11	La Sarraz	VD	515	Grandes cultures	1985	Sol brun
12	Aristau / Werd	AG	380	Site protégé	1989	Fahlgley
13	Wiedlisbach	BE	455	Grandes cultures	1985	Sol brun
14	Dübendorf / Stettbach	ZH	440	Grandes cultures	1985	Sol brun calcaire
15	Ins / Heumoos	BE	433	Grandes cultures	1985	Sol semi-tourbeux
16	Mühlebach / Schwenni	VS	1220	Herbage, peu intensif	1989	Phaeozem
17	Niedermühlern / Uecht	BE	945	Grandes cultures	1986	Sol brun
18	Langenthal / Riedhof	BE	525	Forêt mixte	1989	Sol brun lessivé
19	Wettingen / Lägern	AG	685	Forêt mixte	1989	Sol brun lessivé
20	Roggwil / Esserswil	TG	460	Cultures fruitières	1986	Sol brun
22	Staffelbach / Wiliberg	AG	675	Forêt mixte	1989	Sol brun acide
23	Möhlin / Forstzelgli	AG	343	Grandes cultures	1986	Sol brun lessivé
24	Niederlenz / Länzert	AG	387	Forêt de feuillus	1989	Sol brun lessivé
25	Schleitheim / Milten	SH	545	Grandes cultures	1986	Sol brun
26	Avully / Champagne	GE	428	Grandes cultures	1986	Sol brun
27	Jussy / Les Grands Bois	GE	505	Forêt de feuillus	1989	Pseudogley
28	Leuggern / Etwil	AG	465	Grandes cultures	1986	Sol brun-pseudogley
29	Eschenbach / Hööndlen	LU	450	Grandes cultures	1986	Sol brun-gley
30	Ebikon / Dottenberg	LU	635	Herbage, intensif	1989	Sol brun acide
31	Coffrane	NE	770	Grandes cultures	1986	Sol brun
32	La Brévine / Les Fontenettes	NE	1215	Herbage, extensif	1989	Sol brun
33	Mollis / Riet	GL	431	Herbage, intensif	1986	Gley réduit
34	Elm / Ämpächli	GL	1880	Herbage, extensif	1989	Sol brun acide

N°	Commune / lieu	Canton	Altitude	Occupation du sol	Premier relevé	Type de sol
35	Le Cerneux-Péquignot	NE	1 093	Herbage, peu intensif	1989	Sol brun
36	Hochdorf	LU	500	Grandes cultures	1986	Sol brun
37	Ependes	FR	735	Herbage, peu intensif	1989	Sol brun
38	Koppigen / Oeschberg	BE	478	Grandes cultures	1986	Gley oxydé
39	Kiesen / Chlinau	BE	534	Grandes cultures	1987	Fluvisol
40	St. Cierges	VD	851	Forêt mixte	1989	Sol brun acide
41	Kyburg-Buchegg	SO	464	Herbage, peu intensif	1989	Sol brun-gley
42	Galmwald	FR	580	Forêt de feuillus	1989	Sol brun acide
43	Orbe / Chassagne	VD	622	Forêt de feuillus	1989	Sol brun lessivé
44	Hendschiken	AG	417	Grandes cultures	1987	Sol brun lessivé
45	Alpthal / Erlentobel	SZ	1 180	Forêt de résineux	1989	Gley réduit
46	Vallon	FR	439	Grandes cultures	1987	Sol brun-gley
47	Davos / Seehornwald	GR	1 655	Forêt de résineux	1989	Humus-podzol ferrugineux
48	Oberriet / Kriessern	SG	409	Grandes cultures	1987	Moor
49	Unterschächen / Breiten	UR	1 100	Herbage, peu intensif	1989	Sol brun
50	Realp / Witenwasseren	UR	2 120	Herbage, extensif	1989	Humus-podzol ferrugineux
51	Wartau / Weite	SG	464	Cultures maraîchères	1987	Fluvisol
52	Krummenau / Wideralp	SG	1 338	Herbage, extensif	1989	Sol brun
53	Gempen / Stollen	SO	626	Grandes cultures	1988	Sol brun
54	Zuzwil	BE	557	Grandes cultures	1988	Sol brun
55	Nyon / Changins	VD	440	Viticulture	1988	Sol brun calcaire
56	Trub / Buechsachen	BE	998	Herbage, peu intensif	1988	Sol brun acide
57	St. Stephan	BE	1 030	Herbage, extensif	1988	Sol brun
58	Mels / Rütliwald	SG	910	Forêt mixte	1988	Sol brun acide
59	Dällikon	ZH	425	Cultures maraîchères	1988	Gley réduit
60	Entlebuch / Ebnet	LU	955	Herbage, intensif	1988	Gley oxydé
61	Winterthur	ZH	445	Parc urbain	1988	Sol brun
62	Bettlach / Bettlachstock	SO	1 065	Forêt de feuillus	1988	Sol brun
63	Oensingen	SO	450	Grandes cultures	1988	Sol brun-pseudogley
64	Duggingen / Oberäsch	BE	375	Cultures fruitières	1988	Régosol carbonaté
65	Cornol	JU	482	Grandes cultures	1988	Sol brun
66	St. Ursanne / Haute Côte	JU	540	Forêt de feuillus	1988	Rendzine
67	Method	VD	432	Cultures maraîchères	1988	Moor
68	Etoy	VD	435	Grandes cultures	1988	Sol brun
69	Attalens / Rombuet	FR	818	Herbage, intensif	1988	Sol brun
70	Disentis	GR	1 105	Herbage, peu intensif	1988	Sol brun
71	Lohn / Dros	GR	1 818	Herbage, extensif	1988	Sol brun acide
72	Bivio	GR	2 118	Herbage, extensif	1988	Sol brun
73	Alvaneu	GR	1 560	Forêt de résineux	1988	Régosol
74	Mörschwil / Beggetwil	SG	526	Herbage, intensif	1988	Pseudogley
75	Zernez / Munt la Schera	GR	2 400	Site protégé	1988	Sol brun
76	Sent / Dartòs	GR	1 690	Forêt de résineux	1988	Sol brun
77	Paspels	GR	830	Grandes cultures	1988	Phaeozem

N°	Commune / lieu	Canton	Altitude	Occupation du sol	Premier relevé	Type de sol
78	Igis / Landquart	GR	532	Grandes cultures	1988	Humus-sol silico-calcaire
79	Pailly	VD	684	Grandes cultures	1988	Sol brun
80	Chevèze	JU	538	Grandes cultures	1988	Sol brun
81	Gsteig / Heitibüel	BE	1355	Forêt de résineux	1988	Sol brun
82	Kappelen / Stockeren	BE	441	Forêt de feuillus	1988	Sol brun calcaire
83	Wald / Bachtel	ZH	1040	Forêt de résineux	1988	Sol brun acide
84	Rifferswil / Hagenholz	ZH	597	Site protégé	1988	Moor acide
85	Frauenfeld / Wuer	TG	383	Forêt de feuillus	1988	Zone alluviale
86	Lützelflüh	BE	618	Grandes cultures	1988	Sol brun
87	Klarsreuti	TG	559	Grandes cultures	1988	Sol brun
88	L'Abbaye / Grand Bois à Ban	VD	1358	Forêt de résineux	1988	Rendzine
89	St. Moritz / Mauntschas	GR	1825	Site protégé	1988	Moor acide
90	Sta. Maria / Bosch de Bald	GR	1245	Forêt de résineux	1988	Sol ocre podzolique
91	Campo / Cimalmotto	TI	1517	Forêt de résineux	1988	Sol ocre podzolique
92	Novaggio / Cima Pianca	TI	1080	Forêt de feuillus	1988	Humus-podzol ferrugineux
93	Marthalen / Abist	ZH	405	Forêt de feuillus	1988	Sol brun
94	S. Antonino / Magadino	TI	209	Cultures maraîchères	1988	Sol brun-gley
95	Coldrerio	TI	336	Grandes cultures	1988	Sol brun
96	Gudo / Progero	TI	265	Viticulture	1989	Humus-podzol ferrugineux
97	Lugano	TI	273	Parc urbain	1989	Sol brun
98	Erstfeld	UR	455	Herbage, peu intensif	1989	Fluvisol
99	Visp / Albulawald	VS	830	Forêt de résineux	1989	Sol brun
100	St. Martin / Eison	VS	2340	Herbage, extensif	1989	Podzol ferrugineux
102	Vouvry	VS	379	Grandes cultures	1989	Fluvisol
103	Härkingen	SO	431	Grandes cultures	1995	Sol brun-gley
104	Küssnacht / Seebodenalp	SZ	1025	Herbage, extensif	1995	Sol brun
105	Neuchâtel / Chaumont	NE	1138	Herbage, extensif	1995	Rendzine

Fig. 34 > Schéma du prélèvement des échantillons composés 1 à 4 et des quatre carottes prélevées respectivement jusqu'à 40 cm (4<sup>e</sup> cycle), 1 m de profondeur (depuis le 5<sup>e</sup> cycle)



#### A1-2 Préparation des échantillons

Au laboratoire, les échantillons sont mis à sécher pendant 48 heures à 40° C après un tri manuel des pierres et des corps étrangers. Ils sont ensuite réduits à l'aide d'un concasseur à mâchoires. La terre fine est séparée du reste au moyen d'un tamis (mailles de 2 mm). La terre fine (plusieurs kg) et les résidus de tamisage sont archivés. Une partie de la terre fine est utilisée pour les analyses en laboratoire. Si nécessaire, elle est mouluée avec un broyeur à billes.

En principe, les quantités mesurées d'une substance ou d'un polluant sont comparées avec le poids de la matière sèche de la terre fine pour obtenir une concentration (p. ex. mg/kg). C'est pourquoi la teneur en eau résiduelle de la terre fine doit être déterminée par gravimétrie (séchage à 105° C). La densité apparente de la terre fine (*DAtf*) est établie à partir du volume des échantillons. Elle correspond à la quantité de terre fine contenue dans un volume de sol donné:

$$RG_{FE} = \frac{MS_{TF}}{V_{\text{échantillon}}} = \frac{M_{\text{échantillon}} - M_{\text{eau}} - M_{\text{pierre}}}{V_{\text{échantillon}}}$$

Dans la présente formule,  $MS_{TF}$  désigne le poids de la terre fine. C'est le poids de la fraction de sol restant après élimination des pierres (parties >2 mm;  $M_{\text{pierre}}$ ) et de l'eau ( $M_{\text{eau}}$ ).  $M_{\text{échantillon}}$  indique le poids total de l'échantillon et  $V_{\text{échantillon}}$  son volume.

Pour obtenir des informations complémentaires sur la préparation des échantillons, nous vous renvoyons aux rapports de Desaulles & Dahinden (2000) et de Desaulles et al. (2006).

#### A1-3 Analyses

Les teneurs totales des métaux lourds plomb, cadmium, chrome, cobalt, cuivre, nickel, mercure et zinc ont été déterminées conformément à l'ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol, 1998). Celle-ci prévoit une extraction avec une solution de 2 moles d'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ), le rapport du poids de l'échantillon au volume de solvant étant de 1:10. L'OSol ne fixe pas de méthode spécifique pour la détection des métaux lourds dans l'extrait. Les mesures des derniers cycles de relevés ont été effectuées avec un spectromètre de masse à plasma induit (ICP-AES) d'ARCOS. La seule exception est le mercure, qui a été analysé par spectrométrie à fluorescence à vapeur froide.

D'autres appareils ont parfois été utilisés lors des précédents cycles. Mais pour l'interprétation des séries temporelles, le fait que différents équipements et méthodes aient été employés ne joue aucun rôle, car le référencement des données (cf. annexe A1-4) permet d'éliminer les différences éventuelles entre les méthodes.

Les limites de détection pour la détermination des métaux lourds sont résumées dans le tab. 6. D'une manière générale, elles ont pu être considérablement améliorées depuis le 1<sup>er</sup> cycle de prélèvements. La seule exception est le cadmium, où elle a augmenté d'un facteur de 10. Cette différence s'explique par l'utilisation de l'ICP-AES depuis le 4<sup>e</sup> cycle. La limite de détection du cadmium est plus élevée avec ce système qu'avec l'ancien appareil, mais en contrepartie celle de tous les autres métaux lourds est abaissée.

**Tab. 6 > Limites de quantification en mg/kg de matière sèche**

	Élément	Limites de quantification (mg/kg) par cycle					Teneurs fréquentes (mg/kg) NABO
		1985–1989	1990–1994	1995–1999	2000–2004	2005–2009	80 % des valeurs mesurées <sup>1)</sup>
	Cd	0,01	0,01	0,01	0,19	0,10	0,11–0,50
	Cu	2,5	2,5	1,0	1,5	0,7	7–41
	Pb	10	10	2,5	2,2	0,93	16–40
	Zn	4,0	4,0	2,5	9,8	2,7	37–98
	Hg	0,005	0,005	0,005	0,075	0,003	0,05–0,18
	Cr	5,5	5,5	0,5	0,4	0,17	15–42
	Ni	5,0	5,0	0,5	1,2	0,12	8–43
	Co	0,1	0,1	0,01	0,4	0,03	3–11

<sup>1)</sup> percentile 10 % à 90 % du 5<sup>e</sup> cycle (2005–2009)

D'autres propriétés du sol ont été mesurées en tant que paramètres complémentaires: l'acidité du sol a été relevée au moyen du pH, et la teneur en carbone organique ( $C_{org}$ ) a servi d'indicateur pour la teneur en humus. Ces deux paramètres ont été déterminés selon les méthodes de référence FAL (1996) (pH: suspension de sol de 1:2,5 dans une solution de 0,01 mole de  $CaCl_2$ ;  $C_{org}$ : oxydation au dichromate de potassium puis titrage en retour). Pour une petite partie des échantillons, la teneur en carbone a été déterminée au moyen d'un analyseur CN par calcination à sec avec déduction – si nécessaire – de la teneur en carbone anorganique (calcaire). Cette méthode fournissant des résultats systématiquement plus élevés que la méthode de référence (facteur de 1,15 environ), les valeurs ont été corrigées pour être ramenées au niveau de mesure de la méthode de référence.

D'autres paramètres, comme la granulométrie du sol et la capacité d'échange cationique, sont connus depuis le premier échantillonnage pour la plupart des sites.

#### A1-4 **Référencement**

L'un des plus grands défis pour le monitoring du sol par le NABO est de garantir la comparabilité des valeurs mesurées au fil des décennies. Le remplacement et la réparation des appareils de laboratoire peuvent provoquer des fluctuations dans les résultats de mesure. Il importe de pouvoir distinguer ces fluctuations des hausses ou baisses réelles des teneurs en polluants. Pour cela, le NABO a développé une méthode permettant de référencer les nouvelles mesures avec les précédentes.

Le référencement est réalisé séparément pour chaque site d'observation. Il consiste à analyser, parallèlement aux quatre échantillons composés du cycle en cours, les quatre échantillons prélevés sur le même site lors d'un précédent cycle. La différence entre les mesures répétées et les mesures originales des anciens échantillons reflète l'erreur (systématique) due aux modifications techniques. Avec ces informations, il est possible de corriger en conséquence les nouvelles mesures (cf. Meuli et al. 2014).

**A1-5 Moyenne du site et intervalle de confiance**

Toutes les interprétations ont été effectuées sur la base de la moyenne des quatre échantillons composés par site et par cycle. Dans quelques cas, elles ne reposent que sur les valeurs de trois échantillons composés (erreurs de mesure de certains échantillons). Pour une partie des sites, un seul échantillon composé est disponible pour le premier cycle (1985–89).

Pour les sites et les cycles de relevés dont trois ou quatre échantillons étaient disponibles, l'intervalle de confiance à 95 % pour le site *i* et le cycle *j* a été calculé au moyen de la formule suivante:

$$\bar{x}_{ij} \pm t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-1} \cdot \frac{s_{ij}}{\sqrt{n}}$$

*t* correspondant à la valeur *t* pour le niveau de signification  $\alpha$  (pour un intervalle de confiance à 95 %,  $\alpha = 5\%$ ) avec  $n - 1$  de degré de liberté, et  $n$  au nombre d'échantillons composés.  $\bar{x}_{ij}$  est la moyenne du site pour le cycle *j*, et  $s_{ij}$  l'écart-type correspondant. Ce dernier est évalué comme suit:

$$s_{ij} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x}_{ij})^2}$$

## A2 Détails concernant les métaux lourds

### A2-1 Cadmium

Les teneurs en cadmium de la couche supérieure des sols n'ont pas beaucoup changé au cours de 20 dernières années (cf. fig. 35).

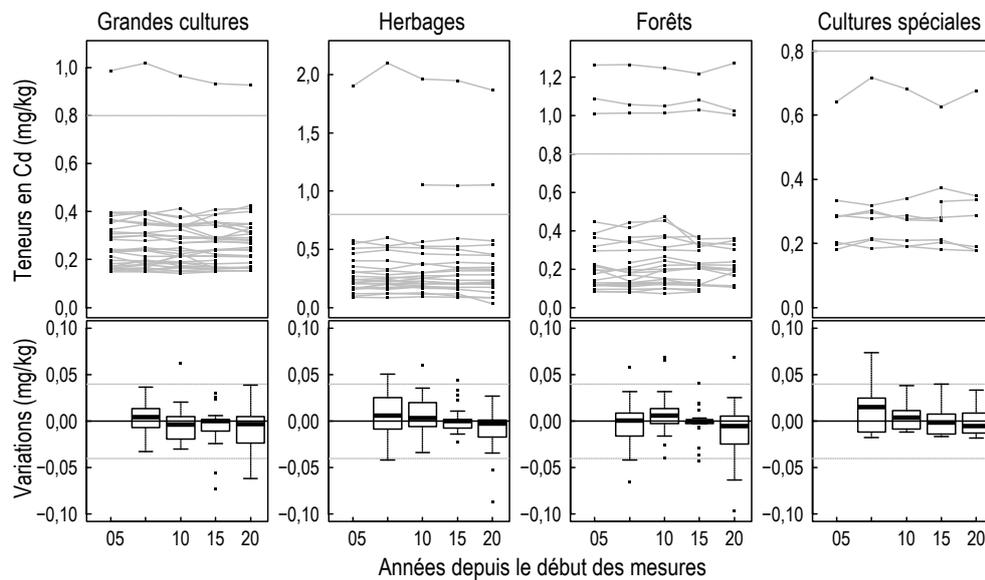
Pour les trois principales catégories d'occupation du terrain (grandes cultures, herbages et forêts), les médianes des teneurs en cadmium sont de l'ordre de 20 à 30 % de la valeur indicative de l'OSol (tab. 7). La teneur la plus élevée en cadmium (1,9 mg/kg) est mesurée sur le site d'herbages extensifs de La Brévine et est probablement due à la composition de la roche mère géologique (Dubois et al. 2002, Prudente et al. 2002, Quezada-Hinjosa et al. 2009).

**Tab. 7 > Données statistiques pour le cadmium**

*Teneurs en mg/kg MS. Valeur indicative selon l'OSol: 0,8 mg/kg.*

	Tous les sites	Grandes cultures	Herbages	Forêts	Cultures spéciales
n	100	33	25	27	9
Minimum	0,03	0,15	0,03	0,07	0,18
Percentile 10 %	0,11	0,16	0,09	0,08	0,18
<b>Médiane</b>	<b>0,24</b>	<b>0,25</b>	<b>0,23</b>	<b>0,20</b>	<b>0,29</b>
Moyenne	0,31	0,27	0,36	0,30	0,31
Percentile 90 %	0,50	0,40	0,57	0,88	0,55
Maximum	1,87	0,93	1,89	1,27	0,68

**Fig. 35** > Teneurs en cadmium entre 1985 et 2009 dans les sites du NABO selon l'occupation du terrain



**A2-2 Zinc**

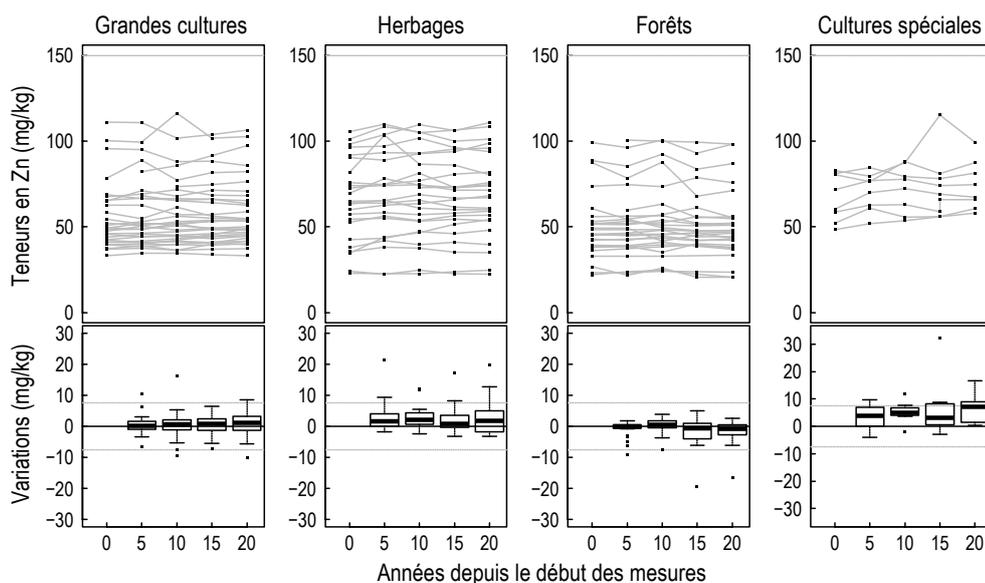
Les évolutions au cours des 20 dernières années classées d'après les principales catégories d'occupation du terrain ne montrent pas de changement important (fig. 36). Comme discuté au point 3.2, une hausse marquée du zinc s'observe toutefois sous les herbages intensifs et dans quelques sites de grandes cultures.

Les teneurs en zinc dans les sites de référence du NABO varient entre 21 mg/kg (site forestier d'Alvaney) et 140 mg/kg (parc urbain de Lugano [tab. 8]). Le percentile 10 % des sites de grandes cultures (40 mg/kg) est supérieur à celui des sites d'herbages et de forêts (respectivement 35 et 26 mg/kg). Cependant, la médiane des sites d'herbages (68 mg/kg) est plus élevée que celle des sites de grandes cultures (53 mg/kg).

**Tab. 8** > Données statistiques pour le zinc

Teneurs en mg/kg MS. Valeur indicative selon l'OSol: 150 mg/kg.

	Tous les sites	Grandes cultures	Herbages	Forêts	Cultures spéciales
n	100	33	25	26	9
Minimum	20,5	33,3	22,4	20,5	57,9
Percentile 10 %	37,4	40,0	34,9	25,6	59,0
<b>Médiane</b>	<b>55,7</b>	<b>53,4</b>	<b>68,2</b>	<b>47,1</b>	<b>74,5</b>
Moyenne	61,3	58,0	68,7	50,5	75,4
Percentile 90 %	97,7	88,0	101,1	84,8	94,8
Maximum	139,8	106,4	110,8	98,2	99,6

**Fig. 36** > Teneurs en zinc entre 1985 et 2009 dans les sites du NABO selon l'occupation du terrain

A2-3

**Cuivre**

Abstraction faite des hausses observées sous herbages intensifs et dans quelques sites de grandes cultures (cf. point 3.2), le cuivre ne présente pas de changement au cours des 20 dernières années (fig. 37).

Le teneur moyenne en cuivre (médiane) dans les sites de grandes cultures du NABO est de 20 mg/kg, soit la moitié de la valeur indicative (tab. 9). Elle est environ deux fois plus élevée que la teneur moyenne dans les sites forestiers. La teneur moyenne dans les sites d'herbages se situe entre ces deux valeurs. Le percentile 90 % est supérieur à la valeur indicative dans les sites de grandes cultures (41 mg/kg), mais inférieur à celle-ci dans les sites d'herbages et de forêts.

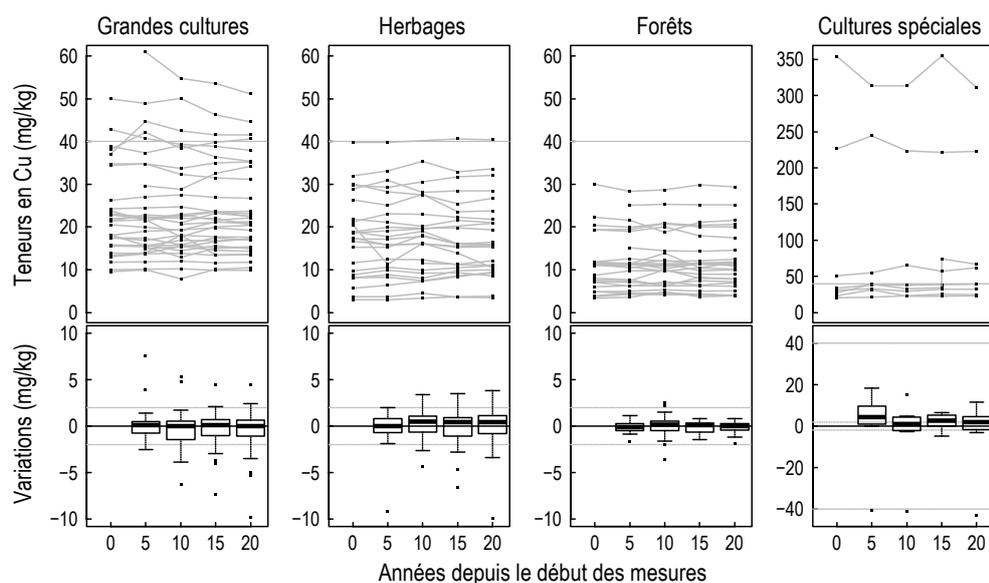
Les teneurs en cuivre les plus élevées sont enregistrées dans les trois sites du NABO occupés par la viticulture, où elles atteignent respectivement 355, 311 et 223 mg/kg (sites recensés sous «Cultures spéciales» dans le tab. 9). Ces dépassements de la valeur indicative sont principalement dus à l'utilisation pendant de nombreuses années de fongicides cupriques (Studer et al. 1995). Les charges élevées en cuivre relevées dans le site de Duggingen (cultures fruitières; 62 mg/kg) et de Dällikon (cultures maraîchères; 67 mg/kg) sont probablement aussi causées par des produits phytosanitaires. Quant au parc urbain de Lugano, le dépassement de la valeur indicative devrait être dû à une combinaison d'immissions. Par contre, les dépassements permanents de la valeur indicative dans les sites de Mollis, Vallon, Oberriet et Paspels sont certainement d'origine géogène (Desaules & Studer 1993).

**Tab. 9** > Données statistiques pour le cuivre

Teneurs en mg/kg MS. Valeur indicative selon l'OSol: 40 mg/kg.

	Tous les sites	Grandes cultures	Herbages	Forêts	Cultures spéciales
n	100	33	25	27	9
Minimum	3,5	9,9	3,5	3,9	23,1
Percentile 10 %	6,8	13,2	8,6	4,0	23,7
<b>Médiane</b>	<b>17,2</b>	<b>20,7</b>	<b>15,7</b>	<b>10,9</b>	<b>62,2</b>
Moyenne	28,0	23,7	17,5	11,7	126,3
Percentile 90 %	40,5	40,8	32,0	21,4	337,3
Maximum	354,7	51,1	40,4	29,5	354,7

**Fig. 37** > Teneurs en cuivre entre 1985 et 2009 dans les sites du NABO selon l'occupation du terrain



A2-4 **Mercure**

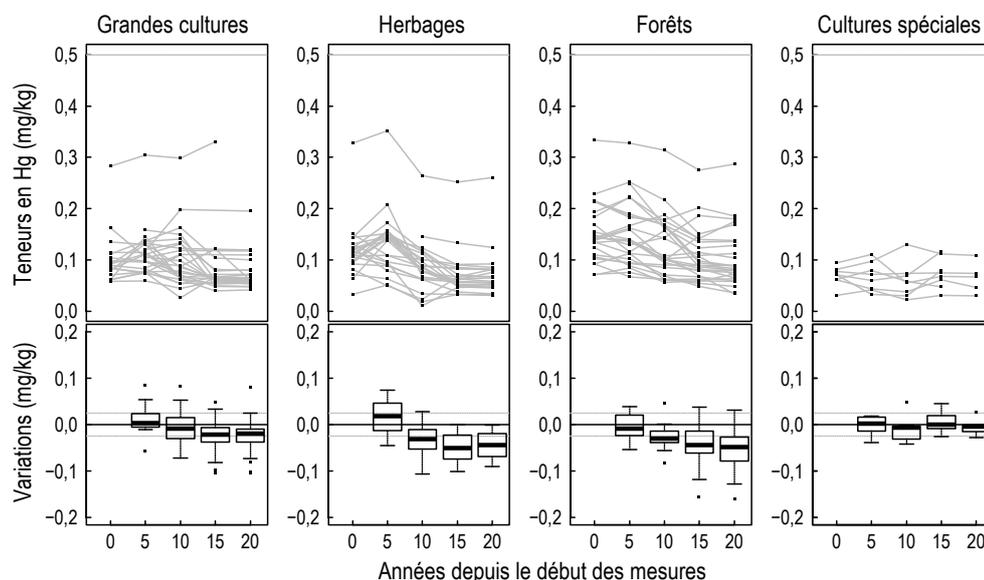
Le mercure fait apparaître des diminutions marquées au cours de 20 dernières années (fig. 38). Ce recul est certainement lié à la réduction des émissions atmosphériques (cf. point 3.4). Dans tous les sites du NABO, les teneurs en mercure sont nettement inférieures à la valeur indicative (tableau 10).

**Tab. 10 > Données statistiques pour le mercure**

*Teneurs en mg/kg MS. Valeur indicative selon l'OSol: 0,5 mg/kg.*

	Tous les sites	Grandes cultures	Herbages	Forêts	Cultures spéciales
n	99	33	25	27	9
Minimum	0,01	0,04	0,03	0,03	0,03
Percentile 10 %	0,05	0,05	0,03	0,05	0,04
<b>Médiane</b>	<b>0,08</b>	<b>0,07</b>	<b>0,07</b>	<b>0,09</b>	<b>0,08</b>
Moyenne	0,09	0,09	0,07	0,11	0,10
Percentile 90 %	0,18	0,17	0,09	0,18	0,22
Maximum	0,39	0,20	0,26	0,29	0,26

**Fig. 38 > Teneurs en mercure entre 1985 et 2009 dans les sites du NABO selon l'occupation du terrain**



A2-5 **Plomb**

Les teneurs moyennes pour les principales catégories d'occupation varient entre 24 (grandes cultures) et 30 mg/kg (forêts). Les percentiles 10 % des sites de grandes cultures, d'herbages et de forêts se situent tous à un peu plus de 15 mg/kg (tab. 11). Certains sites de forêts et d'herbages présentent des teneurs supérieures à la valeur indica-

tive de 50 mg/kg. Ces dépassements peuvent être causés par les activités humaines, comme au site de Krummenau (utilisation militaire) ou dans les parcs urbains de Winterthur et de Lugano (pollution par le trafic routier et d'autres sources d'immissions; cf. OFEFP 1992, AfU SG 1996). Cependant, les valeurs élevées en plomb peuvent aussi avoir des origines géologiques, comme le montre l'exemple du site du Parc national (Obrecht & Schluep 1994).

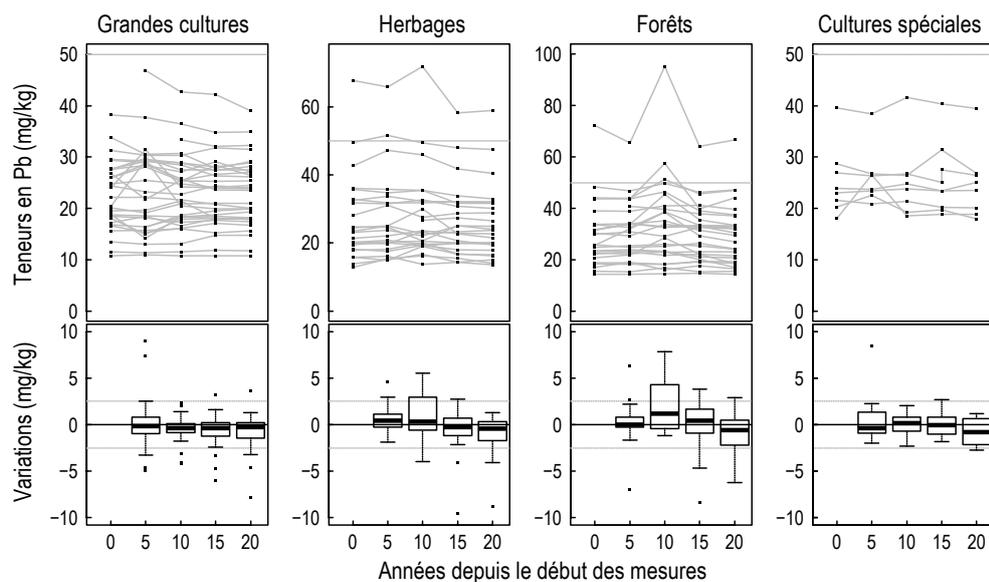
Grâce au recul de la pollution atmosphérique, les teneurs en plomb mesurées dans les sols au cours des 20 dernières années sont en diminution ou stables (fig. 39 et point 3.4).

**Tab. 11 > Données statistiques pour le plomb**

*Teneurs en mg/kg MS. Valeur indicative selon l'OSol: 50 mg/kg.*

	Tous les sites	Acker	Herbages	Forêts	Cultures spéciales
n	100	33	25	26	9
Minimum	10,8	10,8	13,5	14,2	18,0
Percentile 10 %	16,4	15,5	15,1	16,6	18,3
<b>Médiane</b>	<b>24,6</b>	<b>23,5</b>	<b>23,7</b>	<b>29,5</b>	<b>24,8</b>
Moyenne	27,9	22,9	26,0	29,7	24,8
Percentile 90 %	40,0	31,7	40,4	46,3	34,4
Maximum	124,6	39,0	59,0	66,6	39,5

**Fig. 39 > Teneurs en plomb entre 1985 et 2009 dans les sites du NABO selon l'occupation du terrain**



A2-6 **Nickel, chrome et cobalt**

Comme expliqué au point 3.1, les teneurs en nickel, en chrome et en cobalt des sites du NABO sont principalement déterminées par les conditions géologiques. Les concentrations dans le sol ne présentent pratiquement aucune modification.

**Tab. 12 > Données statistiques pour le nickel**

Teneurs en mg/kg MS. Valeur indicative selon l'OSol: 50 mg/kg.

	Tous les sites	Grandes cultures	Herbages	Forêts	Cultures spéciales
n	100	33	25	27	9
Minimum	2,0	14,3	2,0	2,2	12,4
Percentile 10 %	8,1	16,3	7,2	7,4	14,4
<b>Médiane</b>	<b>23,4</b>	<b>24,8</b>	<b>22,9</b>	<b>18,1</b>	<b>24,5</b>
Moyenne	26,7	28,7	32,5	20,8	26,8
Percentile 90 %	42,5	48,2	43,9	39,2	49,6
Maximum	269,0	77,6	269,0	44,5	62,2

**Tab. 13 > Données statistiques pour le chrome**

Teneurs en mg/kg MS. Valeur indicative selon l'OSol: 50 mg/kg.

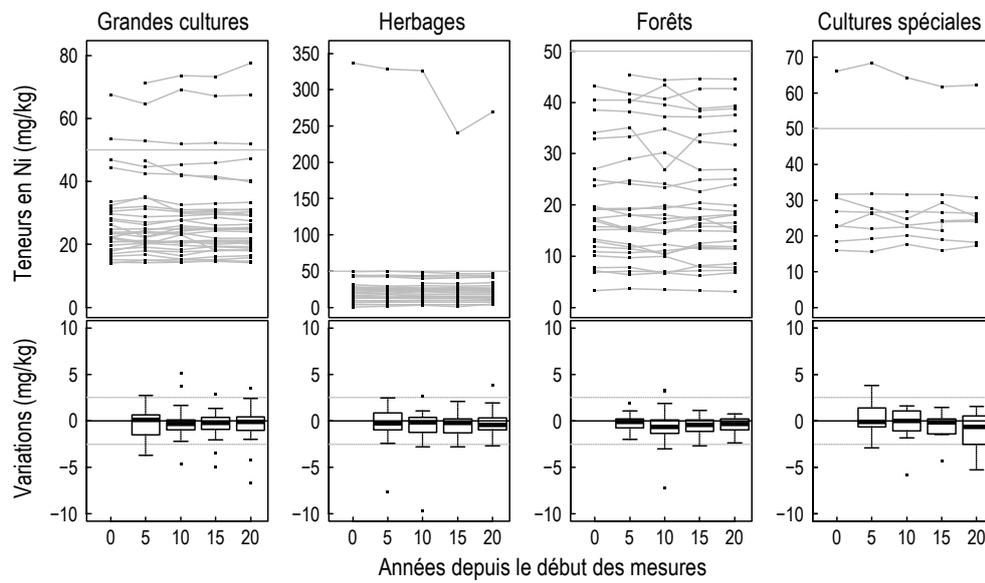
	Tous les sites	Grandes cultures	Herbages	Forêts	Cultures spéciales
n	100	33	25	27	9
Minimum	1,6	18,4	6,9	3,6	13,2
Percentile 10 %	14,8	19,5	14,4	13,4	14,5
<b>Médiane</b>	<b>25,6</b>	<b>25,2</b>	<b>30,4</b>	<b>22,0</b>	<b>25,8</b>
Moyenne	32,8	28,5	52,8	25,2	26,8
Percentile 90 %	41,8	40,5	45,3	42,9	43,3
Maximum	621,5	58,1	621,5	60,2	48,7

**Tab. 14 > Données statistiques pour le cobalt**

Données statistiques pour le cobalt.

	Tous les sites	Grandes cultures	Herbages	Forêts	Cultures spéciales
n	100	33	25	27	9
Minimum	0,5	4,3	1,0	1,3	3,1
Percentile 10 %	3,3	4,6	2,0	2,6	3,9
<b>Médiane</b>	<b>6,0</b>	<b>6,3</b>	<b>6,6</b>	<b>5,1</b>	<b>6,0</b>
Moyenne	6,9	7,5	7,7	5,7	7,0
Percentile 90 %	11,0	11,2	10,4	10,8	10,6
Maximum	45,7	24,1	45,7	13,2	11,0

**Fig. 40** > Teneurs en nickel entre 1985 et 2009 dans les sites du NABO selon l'occupation du terrain



**Fig. 41** > Teneurs en chrome 1985–2009 des sites du NABO selon l'occupation du terrain

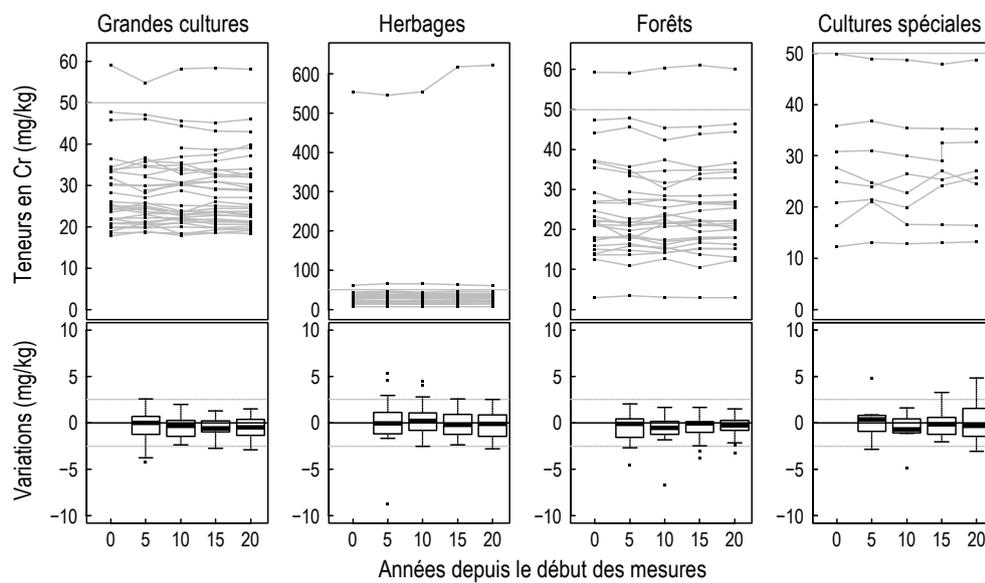
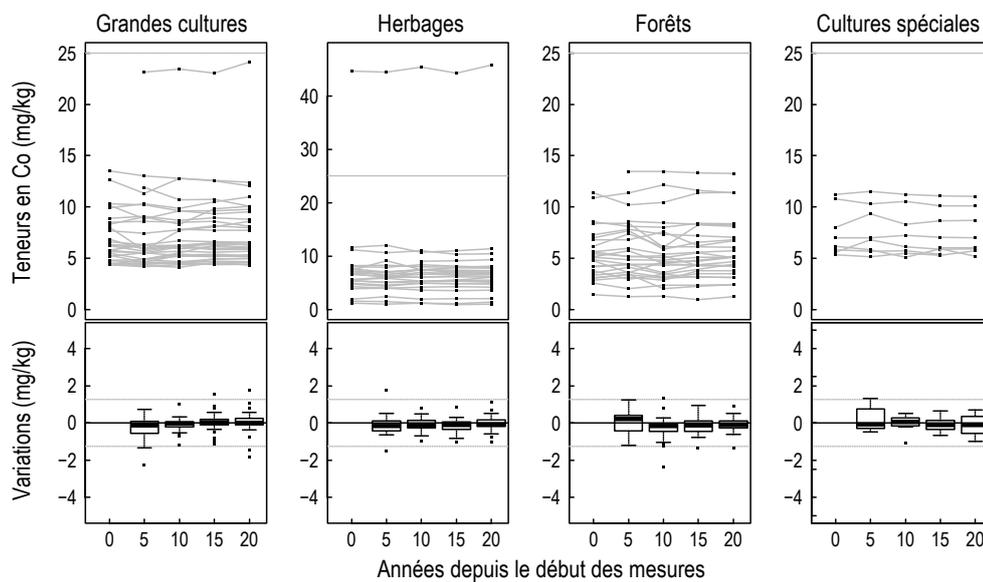


Fig. 42 > Teneurs en cobalt entre 1985 et 2009 dans les sites du NABO selon l'occupation du terrain



A2-7 Carbone organique

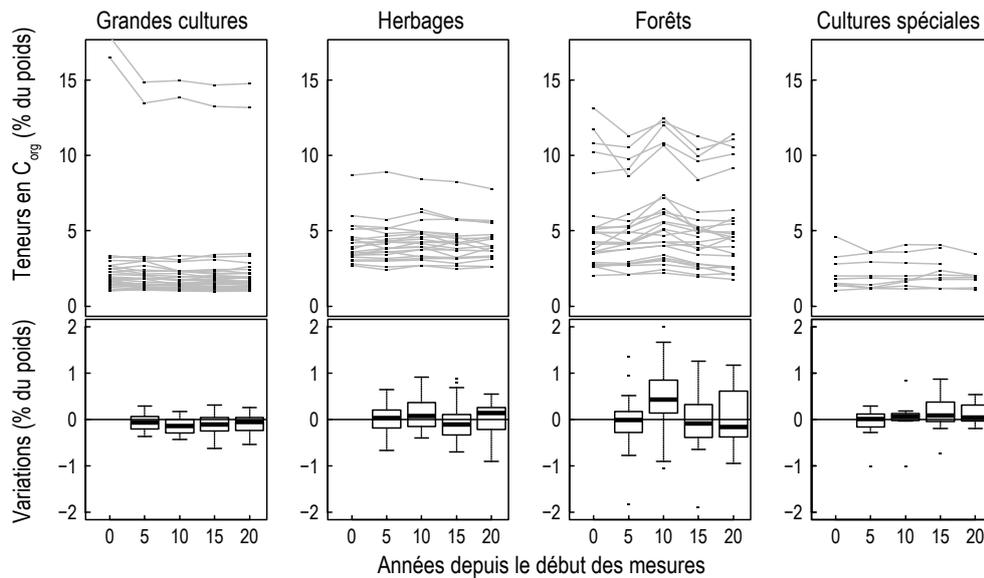
L'importance de la matière organique dans le sol et de son évolution dans le temps ayant été décrite en détail dans un chapitre du texte principal, nous nous limitons ici à indiquer les données statistiques et les graphiques. Les valeurs ont été déterminées soit selon la méthode de référence de la FAL, soit par calcination avec conversion des résultats au niveau équivalent.

Tab. 15 > Données statistiques pour le carbone organique

Teneurs en % du poids (g/g MS x 100).

	Tous les sites	Grandes cultures	Herbages	Forêts	Cultures spéciales
n	97	34	26	28	11
Minimum	1,0	1,0	2,6	1,8	1,1
Percentile 10 %	1,3	1,1	2,9	2,4	1,2
<b>Médiane</b>	<b>3,1</b>	<b>1,6</b>	<b>4,0</b>	<b>4,6</b>	<b>2,0</b>
Moyenne	3,7	2,5	4,1	5,1	2,2
Percentile 90 %	5,8	3,2	5,6	10,2	3,6
Maximum	14,8	14,8	7,8	11,4	3,9

**Fig. 43** > Teneurs en carbone organique entre 1985 et 2009 dans les sites du NABO selon l'occupation du terrain



**A2-8 pH**

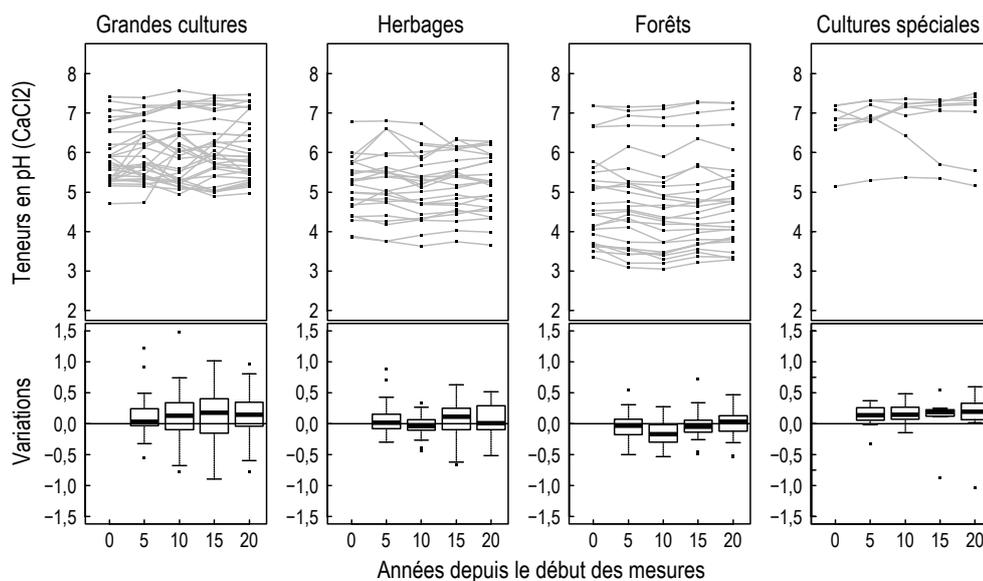
Le pH est un indicateur de l'acidité du sol. Comme on pouvait s'y attendre, les valeurs relevées dans les sites de grandes cultures (médiane: 5,9) ont tendance à être plus élevées que dans les sites d'herbages et de forêts (médiane: respectivement 5,2 et 4,7; cf. tab. 16). Chez ces derniers, les conditions acides, et donc les pH bas, ont surtout été observés sous les forêts de résineux. La médiane sous les forêts de feuillus se situe à 5,0, sous les forêts de résineux à 4,4. L'exploitation du terrain et le pH exercent une influence réciproque, et il en va de même pour la végétation et le pH. Autrement dit l'exploitation et la végétation influencent le pH, mais le pH a aussi une grande influence sur la façon dont un sol est exploité et sur la végétation qui s'y développe.

Les valeurs de pH des sites du NABO n'ont pratiquement pas changé au cours des 20 dernières années (fig. 44). Des hausses marquées ont toutefois été observées sur quelques sites de grandes cultures. Ces terrains ont probablement reçu des amendements calcaires.

Tab. 16 > Données statistiques pour le pH (CaCl<sub>2</sub>)

	Tous les sites	Grandes cultures	Herbages	Forêts	Cultures spéciales
n	100	33	25	27	9
Minimum	3,3	5,0	3,7	3,3	5,2
Percentile 10 %	3,9	5,2	4,3	3,4	5,3
<b>Médiane</b>	<b>5,4</b>	<b>5,9</b>	<b>5,2</b>	<b>4,7</b>	<b>7,2</b>
Moyenne	5,5	6,1	5,2	4,8	6,7
Percentile 90 %	7,2	7,3	6,2	7,0	7,5
Maximum	7,5	7,5	6,3	7,3	7,5

Fig. 44 > Valeurs de pH entre 1985 et 2009 dans les sites du NABO selon l'occupation du terrain



A2-9 **Augmentations et diminutions par élément**

**Tab. 17 > Augmentations et diminutions entre 1985 et 2009 dans les sites de NABO pour le cadmium, le zinc, le cuivre et le mercure**

	Nbre de sites	Cadmium			Zinc			Cuivre			Mercure		
		+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-
<b>Grandes cultures</b>	<b>33</b>	<b>0</b>	<b>29</b>	<b>4</b>	<b>9</b>	<b>21</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>22</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>12</b>	<b>12</b>
<b>Herbages</b>	<b>25</b>	<b>1</b>	<b>22</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>20</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>19</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>23</b>
• intensifs	6	1	5	0	5	1	0	4	2	0	0	0	6
• peu intensifs	9	0	8	1	0	9	0	0	9	0	0	0	9
• extensifs	10	0	9	1	0	10	0	1	8	1	0	2	8
<b>Forêts</b>	<b>27</b>	<b>0</b>	<b>24</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>23</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>24</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>22</b>
• feuillus	10	0	8	1	0	10	0	0	10	0	0	2	8
• mixtes	7	0	6	0	0	5	2	0	5	2	0	1	6
• résineux	10	0	10	0	0	8	2	0	9	1	0	2	8
<b>Cultures spéciales</b>	<b>9</b>	<b>0</b>	<b>8</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>3</b>
• légumes	3	0	3	0	1	2	0	1	1	1	0	2	1
• fruits	3	0	3	0	0	3	0	0	3	0	0	3	0
• vigne	3	0	2	1	0	2	1	0	3	0	0	1	2
<b>Autres</b>		<b>0</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
• site protégé	4	0	3	1	0	1	3	0	3	1	0	1	2
• parc urbain	2	0	0	2	0	0	2	0	2	0	0	1	1
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>1</b>	<b>86</b>	<b>11</b>	<b>15</b>	<b>72</b>	<b>13</b>	<b>11</b>	<b>77</b>	<b>12</b>	<b>3</b>	<b>27</b>	<b>63</b>

**Tab. 18 > Augmentations et diminutions entre 1985 et 2009 dans les sites de NABO pour le plomb, le nickel, le chrome et le cobalt**

	Nombre de sites	Plomb			Nickel			Chrome			Cobalt		
		+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	0	-
<b>Grandes cultures</b>	<b>33</b>	<b>1</b>	<b>23</b>	<b>9</b>	<b>0</b>	<b>28</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>28</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>30</b>	<b>1</b>
<b>Herbages</b>	<b>25</b>	<b>0</b>	<b>18</b>	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>23</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>23</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>25</b>	<b>0</b>
• intensifs	6	0	3	3	0	6	0	0	6	0	0	6	0
• peu intensifs	9	0	6	3	1	8	0	0	9	0	0	9	0
• extensifs	10	0	9	1	0	9	1	2	8	0	0	10	0
<b>Forêts</b>	<b>27</b>	<b>0</b>	<b>22</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>25</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>24</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>23</b>	<b>2</b>
• feuillus	10	0	9	1	0	9	1	1	8	1	1	8	1
• mixtes	7	0	3	4	0	7	0	1	6	0	1	5	1
• résineux	10	0	10	0	0	9	1	0	10	0	0	10	0
<b>Cultures spéciales</b>	<b>9</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>7</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>3</b>
• légumes	3	0	2	1	0	2	1	0	2	1	0	2	1
• fruits	3	0	2	1	0	3	0	0	3	0	0	3	0
• vigne	3	0	1	2	0	1	2	0	2	1	0	1	2
<b>Autres</b>		<b>0</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>0</b>
• site protégé	4	0	1	3	1	3	0	1	3	0	0	4	0
• parc urbain	2	0	1	1	0	2	0	0	1	1	0	2	0
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>1</b>	<b>70</b>	<b>29</b>	<b>2</b>	<b>87</b>	<b>11</b>	<b>5</b>	<b>86</b>	<b>9</b>	<b>4</b>	<b>90</b>	<b>6</b>

A2-10 **Dépassements de la valeur indicative**

L'ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol, 1998) fixe des valeurs indicatives. Il est admis que si la charge en métaux lourds reste en dessous des valeurs indicatives respectives, la fertilité du sol n'est pas affectée à long terme (art. 35, al. 2, LPE, 1983). Un regard sur le tableau 19 permet de constater que seuls quelques sites du NABO présentent des dépassements de ces valeurs indicatives. Ces résultats correspondent aux attentes, car le réseau NABO a été conçu pour relever les niveaux de fond.

De nombreux dépassements des valeurs indicatives ne sont pas causés par l'être humain et ses activités. Ainsi, tous les dépassements observés chez le cadmium, le cobalt, le chrome et le nickel sont probablement d'origine géologique. Ce qui signifie que les métaux lourds détectés proviennent de la roche-mère à partir de laquelle s'est formé le sol. Par exemple, tous les sites présentant des concentrations élevées de cadmium se trouvent dans le Jura sur des roches calcaires. Il est connu que le cadmium contenu dans la roche s'accumule lors du lessivage du calcaire (Tuchschnid 1995, Dubois et al. 2002, Prudente et al. 2002, Quezada-Hinjosa et al. 2009).

**Tab. 19 > Dépassements des valeurs indicatives selon l'occupation du terrain**

Occupation	Nbre de sites	Cd	Zn	Cu	Hg	Pb	Ni	Cr	Co*
<b>Grandes cultures</b>	<b>33</b>	<b>1</b>		<b>4</b>			<b>3</b>	<b>1</b>	
<b>Herbages</b>	<b>25</b>								
• intensifs	6			1					
• peu intensifs	9								
• extensifs	10	2				1	1	2	1
<b>Forêts</b>	<b>27</b>								
• feuillus	10	2				1		1	
• mixtes	7								
• résineux	10	1							
<b>Cultures spéciales</b>	<b>9</b>								
• légumes	3			1					
• fruits	3			1					
• vigne	3			3			1		
<b>Autres</b>									
• site protégé	4					1			
• parc urbain	2			1		2			
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>11</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>1</b>

\* Valeur indicative de l'Osol (1986)

Les sites 42, 67 et 104 ne sont pas pris en considération.

---

Les concentrations élevées de cuivre dans les sites viticoles, arboricoles et maraîchers ont été causées par des produits phytosanitaires contenant du cuivre. Dans les sites viticoles par exemple, on a longtemps utilisé de la bouillie bordelaise (sulfate de cuivre) comme fongicide (Studer et al. 1995). Les valeurs élevées dans le parc urbain de Lugano sont certainement aussi provoquées par l'homme. En revanche, les autres dépassements de la valeur indicative pour le cuivre sont d'origine géologique.

S'agissant du plomb, les dépassements de la valeur indicative peuvent être causés par l'être humain: immissions dues aux transports dans les parcs urbains, utilisation comme place de tir pour le site d'herbages, ou effet d'interception pour le site forestier de Novaggio. Mais les teneurs élevées en plomb peuvent aussi avoir une origine géologique, comme le montre le terrain dans le Parc national (Obrecht & Schluep 1994).

Par rapport au précédent cycle, le nombre de dépassements de la valeur indicative n'a changé que dans un seul cas: un site de cultures maraîchères (Dällikon) se trouve désormais au-dessus de la valeur limite. Mais ce changement est lié au fait que le site a dû être déplacé dans un autre terrain plus pollué.

Le nombre de dépassements de la valeur indicative dans le réseau de mesure du NABO est resté pratiquement constant sur toute la période de 1985 à 2009. Dans la plupart des sites, les teneurs sont nettement inférieures à la valeur indicative, ce qui signifie que le nombre de dépassements réagit très lentement à d'éventuelles hausses. Pour pouvoir détecter rapidement les changements, surtout s'ils sont négatifs, il faut donc tenir compte de l'évolution des teneurs.

---

## > Remerciements

Un réseau national d'observation des sols, comme le gère le NABO depuis 1985, ne peut être mis en place et développé qu'avec la contribution et le soutien de nombreux acteurs. Le Réseau national d'observation des sols remercie tout d'abord les propriétaires et les gérants des surfaces d'observation permanente. Sans leur coopération, aucun réseau de mesure ne serait possible.

Nous tenons à exprimer aussi notre reconnaissance à la direction du projet pour son soutien et sa confiance. Nous ne voulons pas non plus oublier de remercier Toni Candinas et Dominique Kohli, qui, après des années d'engagement pour le bien du NABO, se tournent vers d'autres tâches. Nous remercions aussi le groupe de suivi pour son travail et ses suggestions précieuses. Tout comme Gregor Klaus, qui s'est chargé de la relecture du manuscrit.

Nous saisissons également cette occasion pour adresser nos vifs remerciements à toutes les personnes qui travaillent dans les laboratoires du groupe de recherche Chimie analytique environnementale chez Agroscope et à leur direction pour leurs années de collaboration intensive. Nous n'oublions pas non plus l'équipe de terrain et de coordination de l'indicateur Z9 du Monitoring de la biodiversité en Suisse (MBD), qui a fourni sans compter un grand surcroît de travail dans le projet MBD-NABO. Enfin, nous voulons adresser nos remerciements les plus sincères à tous nos collègues anciens et actuels du NABO pour leur aide active et précieuse sur le terrain et au laboratoire.

## > Bibliographie

- AfU SG 1996: Schadstoffbelastung siedlungsnaher Landwirtschaftsböden im Kt. St.Gallen. Amt für Umweltschutz des Kantons St. Gallen, Fachstelle Bodenschutz, St.-Gall, 63 p.
- Bolan N.S., Adriano D.C., Mahimairaja S. 2004: Distribution and bioavailability of trace elements in livestock and poultry manure by-products. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 34: 291–338.
- Brändli R.C., Bucheli T.D., Ammann S., Desaulles A., Keller A., Blum F., Stahel W.A. 2008: Critical evaluation of PAH source apportionment tools using data from the Swiss soil monitoring network. *Journal of Environmental Monitoring*, 10: 1278–1286.
- Bureau de coordination du Monitoring de la biodiversité en Suisse 2009: Etat de la biodiversité en Suisse. Synthèse des résultats du Monitoring de la biodiversité en Suisse (MBD). Etat: mai 2009. Etat de l'environnement n° 0911. Office fédéral de l'environnement, Berne, 112 p.
- Commission des communautés européennes: Stratégie thématique en faveur de la protection des sols, communication (COM 2006: 231). Bruxelles, 12 p.
- Della Peruta R. 2013: Modelling long-term phosphorus dynamics in Swiss agricultural soils using EPIC. Dissertation n°21490. EPF Zurich, 130 p.
- DEFR 2011: Ordonnance sur le Livre des aliments pour animaux. RS 916.307.1.
- Desaulles A., Dahinden R. 2000: Réseau national d'observation des sols. Variations des teneurs en polluants après 5 et 10 ans de suivi. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Berne, 129 p.
- Desaulles A., Keller A., Schwab P., Dahinden R. 2004: Analysen von Zeitreihen und Ursachen gemessener Konzentrationsveränderungen von Schwermetallen und Phosphore in Böden auf Dauerbeobachtungsflächen. Agroscope FAL Reckenholz, Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zurich, 107 p.
- Desaulles A., Ammann S., Blum F., Brändli R.C., Bucheli T.D. 2009: PAK- und PCB-Gehalte in Böden der Schweiz. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon, Zurich, 87 p.
- Desaulles A., Brändli R.C., Ammann S., Bucheli T.D., Blum F., Keller A. 2008: PAH and PCB in soils of Switzerland – Status and critical review. *Journal of Environmental Monitoring* 10: 1265–1277.
- Desaulles A., Schwab P., Keller A., Ammann S., Paul J., Bachmann H.J. 2006: Polluants inorganiques dans les sols suisses et évolutions après 10 ans – Résultats de l'Observation nationale des sols de 1985 à 1999. Agroscope FAL Reckenholz, Station fédérale de recherches en agroécologie et agriculture, Zurich, 139 p.
- Desaulles A., Studer K. 1993: NABO – Réseau d'observation des sols: période d'observation 1985–1991. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Berne, 134 p., annexes 175 p.
- Dettwiler J., Clément J.-P., Chassot G. 2006: Fumure et environnement. Commentaire du droit fédéral axé sur la pratique. Connaissance de l'environnement n° 0617. Office fédéral de l'environnement, Berne, 83 p.
- Dubois J.-P., Benitez N., Liebig T., Baudraz M., Okopnik F. 2002: Le Cadmium dans les sols du haut Jura suisse. In: Baize D., Tercé M. (Hrsg.) 2002: Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales. INRA, Orléans: 33–52.
- Ellert B.H., Bettany J.R. 1995: Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Canadian Journal of Soil Science*, 75(4): 529–538.
- Flisch R., Sinaj S., Charles R., Richner W. 2009: Données de base pour la fumure des grandes cultures et des herbages (DBF-GCH). *Revue suisse d'agriculture*. 41, (1), 2009, 1–98
- Gisi U., Schenker R., Schulin R., Stadelmann F.X., Sticher H. 1997: *Bodenökologie*. 2. Auflage. Thieme, Stuttgart, 351 p.
- Hämmann M., Desaulles A. 2003: Manuel: Prélèvement et préparation d'échantillons de sols pour l'analyse de substances polluantes. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), CH-3003 Berne, 100 p.
- Heldstab J., Reutimann J., Biedermann R., Leu D. 2010: Stoffflussanalyse Azote Schweiz 2005. *Umwelt-Wissen* Nr. 1018. Office fédéral de l'environnement, Berne, 128 p.
- Heldstab J., Leippert F., Biedermann R., Schwank O. 2013: Azoteflüsse in der Schweiz 2020. Stoffflussanalyse und Entwicklungen. *Umwelt-Wissen* Nr. 1309. Office fédéral de l'environnement, Berne, 107 p.
- Keller A., Abbaspour K.C., Schulin R. 2002: Assessment of uncertainty and risk in modeling regional heavy-metal accumulation in agricultural soils. *Journal of Environmental Quality*, 31: 175–187.
- Keller A., Rossier N., Desaulles A. 2005: Bilans des métaux lourds sur les parcelles agricoles du réseau national d'observation des sols en Suisse. Agroscope FAL Reckenholz, Station fédérale de recherches en agroécologie et agriculture, Zurich, 61 p.
- Keller A., Desaulles A., Schwab P., Weisskopf P., Scheid S., Oberholzer H. 2006: Monitoring soil quality in the long term: Examples from the Swiss Soil Monitoring Network. *Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 73: 5–12.
- Kessler J., Zogg M., Bächler E. 1994: Phosphor, Kupfer und Zink im Schweinetrog. *Agrarforschung* 1(11–12): 480–483.

- Menzi H., Haldemann C., Kessler J. 1993: Schwermetalle in Hofdüngern – Ein Thema mit Wissenslücken. Schweiz. Landw. Forschung 32: 159–167.
- Menzi H., Kessler J. 1998: Heavy Metal Content of Manure in Switzerland. In: Martinez J. (Hrsg.) 1998: Proceedings of the FAO-Network on Recycling Agricultural, Municipal and Industrial Residues in Agriculture (RAMIRAN 98), Rennes: 495–506.
- Menzi H., Lehmann E., Kessler J. 1999: Anfall und Zusammensetzung von Hofdüngern aus der Rindviehmast. Agrarforschung 6: 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. Etat de l'environnement n° 1409. Office fédéral de l'environnement, Berne, 94 p.
- Morvan X. al. 2007: Une analyse des stratégies d'échantillonnage des réseaux de surveillance de la qualité des sols en Europe. Etude et Gestion des Sols 14 (4): 317–325.
- Obrecht J.-M., Schluep M. 1994: Untersuchungen über die Herkunft der Schwermetalle in den Böden am Munt la Schera im Schweizerischen Nationalpark. EPF Zurich, Zurich, 103 p.
- OFEFP 1992: Bodenverschmutzung durch den Strassen- und Schienenverkehr in der Schweiz. Schriftenreihe Umwelt Nr. 185. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Berne, 144 p.
- OFEV 2012: La pollution de l'air 2011. Résultats du Réseau national de l'observation des polluants atmosphériques (NABEL). Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne, 128 p.
- OFEV, OFAG 2012: Eléments fertilisants et utilisation des engrais dans l'agriculture. Un module de l'aide à l'exécution pour la protection de l'environnement dans l'agriculture. L'environnement pratique n° 1225. Office fédéral de l'environnement, Berne, 62 p.
- OFS, OFEV 2011: Environnement, statistique de poche 2011. Neuchâtel, 36 p.
- Prudente D., Baize D., Dubois J.-P. 2002: Le Cadmium naturel dans une forêt du haut Jura français. In: Baize D., Tercé M. (Hrsg.) 2002: Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales. INRA, Orléans: 53–70.
- Quezada-Hinjosa R.P., Matera V., Adatte T., Rambeau C., Föllmi K.B. 2009: Cadmium distribution in soils covering Jurassic oolitic limestone with high Cd contents in the Swiss Jura. Geoderma 150: 287–301.
- Reutimann J. 2006: Kupfer- und Zink-Einträge durch Rindvieh- und Schweinefutter in landwirtschaftliche Systeme. Semesterarbeit. EPF Zurich, 56 p.
- Schmid P., Gujer E., Zennegg M., Bucheli T.D., Desales A. 2005: Correlation of PCDD/F and PCB concentrations in soil samples from the Swiss soil monitoring network (NABO) to specific parameters of the observation sites. Chemosphere 58: 227–234.
- Schrumpf M., Schulze E.D., Kaiser K., Schumacher J. 2011: How accurately can soil organic carbon stocks and stock changes be quantified by soil inventories? Biogeosciences 8: 1193–1212
- Schultheiss U., Roth U., Döhler H., Eckel H. et al. 2004: Erfassung von Schwermetallströmen in landwirtschaftlichen Tierproduktionsbetrieben und Erarbeitung einer Konzeption zur Verringerung der Schwermetalleinträge durch Wirtschaftsdünger tierischer Herkunft in Agrarökosysteme. Umweltbundesamt, Berlin, 130 p.
- Spiess E. 2011: Nitrogen, phosphoreus and potassium balances and cycles of Swiss agriculture from 1975 to 2008. Nutrient Cycling in Agroecosystems 91: 351–365.
- Studer K., Gsponer R., Desales A. 1995: Erfassung und Ausmass der flächenhaften Kupferbelastung in Rebbergböden der Schweiz. Schriftenreihe der FAC-Liebefeld Nr. 20. Eidg. Forschungsanstalt für Agrilkulturchemie und Umwelthygiene (FAC), Berne, 44 p.
- Thöni L., Seidler E., Schnyder E., Ehrenmann J. 2013: Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz. Moosanalysen 1990–2010. Umwelt-Zustand Nr. 1328. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne, 170 p.
- Tuchschnid M.P. 1995: Quantifizierung und Regionalisierung von Schwermetall- und Fluorgehalten bodenbildender Gesteine der Schweiz. Schriftenreihe Umwelt-Materialien Nr. 32. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Berne, 130 p.
- LPE 1983: Loi fédérale sur la protection de l'environnement (LPE). RS 814.01.
- OSol 1998: Ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol). RS 814.12
- OSol 1986: Ordonnance du 9 juin 1986 sur les polluants du sol (OSol). Abrogée le 1.10.1998 par l'OSol 1998.

# > Répertoire

## Figures

<b>Fig. 1</b> Prélèvement d'échantillons pour le NABO à Kiesen (BE)	11	<b>Fig. 12</b> Séries temporelles de 1988 à 2008 pour le Zn, le Cu, le $P_{tot}$ et le $C_{org}$ sur le site d'herbage intensif d'Entlebuch	25
<b>Fig. 2</b> Sites d'observation à long terme du NABO et leur utilisation lors du 5 <sup>e</sup> cycle de prélèvements	14	<b>Fig. 13</b> Séries temporelles de 1988 à 2008 pour le Zn, le Cu, le $P_{tot}$ et le $C_{org}$ sur le site d'herbage intensif d'Attalens	25
<b>Fig. 3</b> Prélèvement des échantillons composés superficiels (4 échantillons de 25 carottes) sur le site de Disentis (GR), et détail d'une carotte à 0–20 cm	16	<b>Fig. 14</b> Séries temporelles de 1988 à 2008 pour le Zn, le Cu, le $P_{tot}$ et le $C_{org}$ sur le site d'herbage intensif de Mörschwil. (RW = valeur indicative selon l'OSol)	25
<b>Fig. 4</b> Teneurs (moyenne avec intervalle de confiance à 95 %) en Zn, Cu, Pb et $C_{org}$ de 1988 à 2008 sur le site de grandes cultures d'Ettoy	18	<b>Fig. 15</b> Prélèvement d'échantillons pour l'analyse des engrais de ferme d'exploitations agricoles du réseau NABO	27
<b>Fig. 5</b> Teneurs (moyenne avec intervalle de confiance à 95 %) en Cd, Cu, Hg et $C_{org}$ de 1989 à 2009 sur le site de forêt de feuillus de Rothenfluh (BL) (RW: valeur indicative OSol)	18	<b>Fig. 16</b> Evolution du Zn, du Cu, du $P_{tot}$ et du $C_{org}$ sur le site de grandes cultures de Schleithem. (RW = valeur indicative selon l'OSol)	28
<b>Fig. 6</b> Ordre de grandeur des augmentations et diminutions des métaux lourds dans le réseau NABO après 20 ans et leur relation avec les valeurs indicatives de l'OSol [RW]	19	<b>Fig. 17</b> Evolution du Zn, du Cu, du $P_{tot}$ et du $C_{org}$ sur le site de grandes cultures de Koppigen	29
<b>Fig. 7</b> Tendances générales pour les métaux lourds selon l'utilisation du terrain	21	<b>Fig. 18</b> Exemple d'un bilan simplifié du zinc (moyenne 1996–2006) pour une parcelle de grande culture d'une exploitation laitière mixte avec une densité de bétail moyenne de 1,1 UGB/ha	30
<b>Fig. 8</b> Prélèvement d'échantillons sur un site d'herbage de 10 m x 10 m à Trub (BE)	22	<b>Fig. 19</b> Corrélation entre les teneurs en phosphore, en zinc et en cuivre du lisier de 14 exploitations agricoles du réseau NABO en 2006	31
<b>Fig. 9</b> Séries temporelles de 1989 à 2009 pour le Zn, le Cu, le $P_{tot}$ et le $C_{org}$ sur le site d'herbage intensif de Tänikon. (RW = valeur indicative selon l'OSol)	24	<b>Fig. 20</b> Evolutions entre 1988 et 1993 du Cd, du Zn, du Cu et du Pb dans le parc urbain de Winterthur (site 61)	32
<b>Fig. 10</b> Séries temporelles de 1989 à 2009 pour le Zn, le Cu, le $P_{tot}$ et le $C_{org}$ sur le site d'herbage intensif d'Ebikon	24	<b>Fig. 21</b> Prélèvement d'échantillons dans un parc urbain à Winterthur	33
<b>Fig. 11</b> Z Séries temporelles de 1986 à 2006 pour le Zn, le Cu, le $P_{tot}$ et le $C_{org}$ sur le site d'herbage intensif de Mollis. (RW = valeur indicative selon l'OSol)	24	<b>Fig. 22</b> Prélèvement d'échantillons pour le NABO dans un haut-marais près de St. Moritz	34
		<b>Fig. 23</b> Carbone organique dans la couche supérieure (0–20 cm) des sites d'herbages du NABO (n=17)	35
		<b>Fig. 24</b> Teneur en carbone organique de la couche supérieure (0–20 cm) des sites de grandes cultures du NABO (n=29), centrée sur la moyenne du site	36

<b>Fig. 25</b> Teneur en carbone organique de la couche supérieure (0–20 cm) de deux sites de grandes cultures du NABO riches en humus	36	<b>Fig. 37</b> Teneurs en cuivre entre 1985 et 2009 dans les sites du NABO selon l'occupation du terrain	65
<b>Fig. 26</b> Teneur en carbone organique de la couche supérieure (0–20 cm)	37	<b>Fig. 38</b> Teneurs en mercure entre 1985 et 2009 dans les sites du NABO selon l'occupation du terrain	66
<b>Fig. 27</b> Densité apparente de la terre fine en relation avec la teneur en eau (à gauche; n = 58 sites), et la teneur en carbone organique (à droite; n = 42 sites) lors des 4 <sup>e</sup> et 5 <sup>e</sup> cycles de prélèvements	39	<b>Fig. 39</b> Teneurs en plomb entre 1985 et 2009 dans les sites du NABO selon l'occupation du terrain	67
<b>Fig. 28</b> Prélèvement d'échantillons NABO dans un champ de légumes à San Antonino (TI)	40	<b>Fig. 40</b> Teneurs en nickel entre 1985 et 2009 dans les sites du NABO selon l'occupation du terrain	69
<b>Fig. 29</b> Teneurs en azote ( $N_{tot}$ ), phosphore ( $P_{tot}$ ) et potassium ( $K_{EDTA}$ ) dans la couche supérieure du sol (0–20 cm, centré sur la moyenne des parcelles) de neuf parcelles d'herbages	43	<b>Fig. 41</b> Teneurs en chrome 1985–2009 des sites du NABO selon l'occupation du terrain	69
<b>Fig. 30</b> Teneurs en azote ( $N_{tot}$ ), phosphore ( $P_{tot}$ ) et potassium ( $K_{EDTA}$ ) dans la couche supérieure du sol (0–20 cm, centré sur la moyenne des parcelles) de sept parcelles de grandes cultures	44	<b>Fig. 42</b> Teneurs en cobalt entre 1985 et 2009 dans les sites du NABO selon l'occupation du terrain	70
<b>Fig. 31</b> Acidité du sol: résultats intermédiaires du projet MBD-NABO (échantillons de 2011 et 2012, représentant 40 % des sites Z9) complétés par les sites d'observation à long terme du NABO (symboles avec bord noir)	46	<b>Fig. 43</b> Teneurs en carbone organique entre 1985 et 2009 dans les sites du NABO selon l'occupation du terrain	71
<b>Fig. 32</b> Evolution des teneurs en Zn et en Cu sous des herbages intensifs du réseau NABO	48	<b>Fig. 44</b> Valeurs de pH entre 1985 et 2009 dans les sites du NABO selon l'occupation du terrain	72
<b>Fig. 33</b> Carottes de forage (0 à 40 cm de profondeur) avec indication des horizons pédologiques provenant des sites d'herbages d'Entlebuch (exploitation intensive; à gauche) et d'Elm (exploitation extensive)	52		
<b>Fig. 34</b> Schéma du prélèvement des échantillons composés 1 à 4 et des quatre carottes prélevées respectivement jusqu'à 40 cm (4 <sup>e</sup> cycle), 1 m de profondeur (depuis le 5 <sup>e</sup> cycle)	58		
<b>Fig. 35</b> Teneurs en cadmium entre 1985 et 2009 dans les sites du NABO selon l'occupation du terrain	63		
<b>Fig. 36</b> Teneurs en zinc entre 1985 et 2009 dans les sites du NABO selon l'occupation du terrain	64		

**Tables**

<b>Tab. 1</b>	Nombre de sites d'observation permanente du NABO	15	<b>Tab. 17</b>	Augmentations et diminutions entre 1985 et 2009 dans les sites de NABO pour le cadmium, le zinc, le cuivre et le mercure	73
<b>Tab. 2</b>	Changements observés de la teneur en métaux lourds entre 1985 et 2009: fréquence des augmentations et diminutions par catégorie d'utilisation sur les sites du NABO	19	<b>Tab. 18</b>	Augmentations et diminutions entre 1985 et 2009 dans les sites de NABO pour le plomb, le nickel, le chrome et le cobalt	73
<b>Tab. 3</b>	Modifications observées pour les métaux lourds dans les sites d'herbages du NABO: fréquence des augmentations et diminutions selon l'intensité d'exploitation	21	<b>Tab. 19</b>	Dépassements des valeurs indicatives selon l'occupation du terrain	74
<b>Tab. 4</b>	Concentrations de phosphore, de zinc et de cuivre dans le lisier de 14 exploitations agricoles du réseau NABO en 2006	26			
<b>Tab. 5</b>	Sites d'observation à long terme du réseau NABO	55			
<b>Tab. 6</b>	Limites de quantification en mg/kg de matière sèche	60			
<b>Tab. 7</b>	Données statistiques pour le cadmium	62			
<b>Tab. 8</b>	Données statistiques pour le zinc	64			
<b>Tab. 9</b>	Données statistiques pour le cuivre	65			
<b>Tab. 10</b>	Données statistiques pour le mercure	66			
<b>Tab. 11</b>	Données statistiques pour le plomb	67			
<b>Tab. 12</b>	Données statistiques pour le nickel	68			
<b>Tab. 13</b>	Données statistiques pour le chrome	68			
<b>Tab. 14</b>	Données statistiques pour le cobalt	68			
<b>Tab. 15</b>	Données statistiques pour le carbone organique	70			
<b>Tab. 16</b>	Données statistiques pour le pH (CaCl <sub>2</sub> )	72			