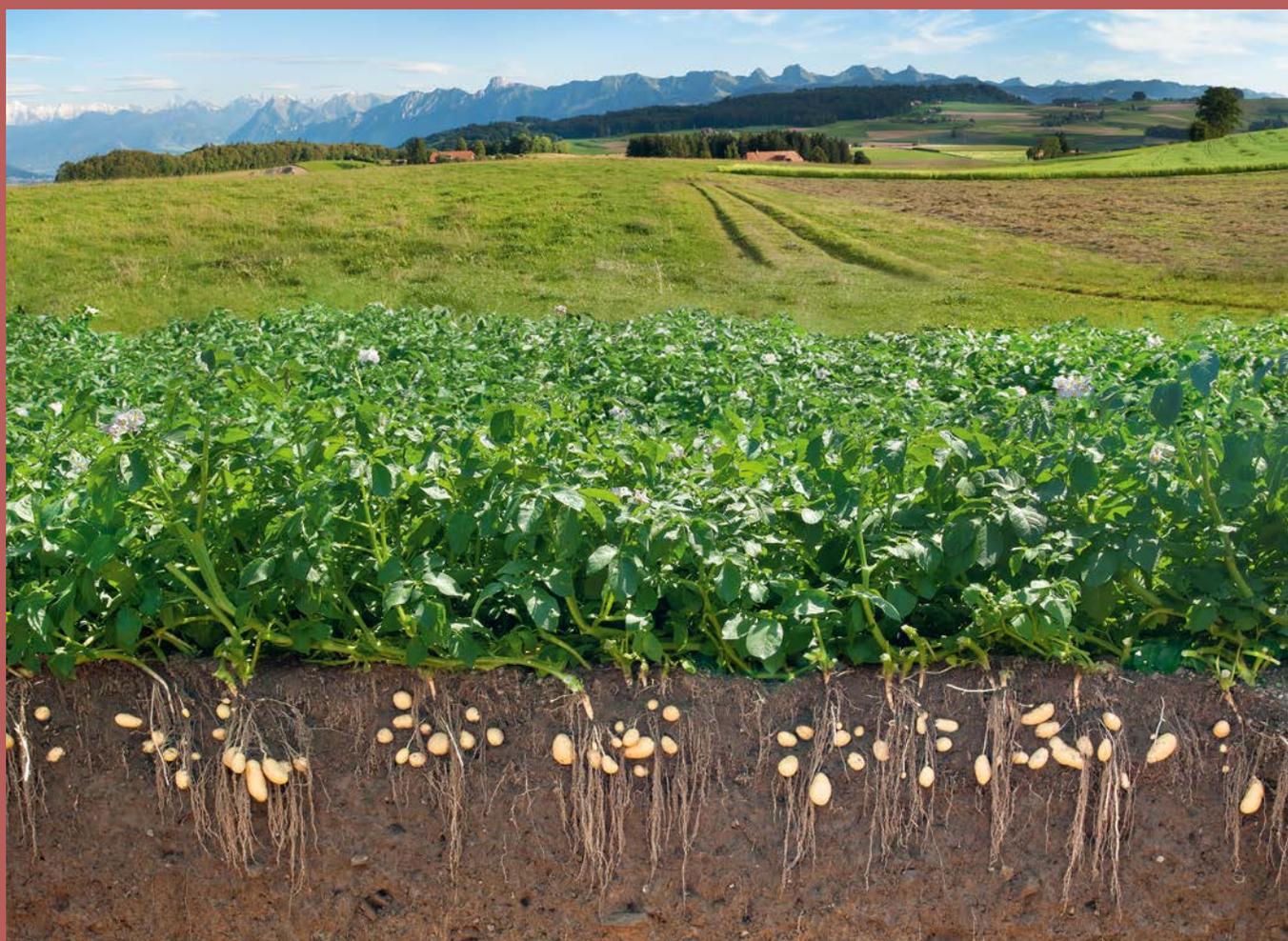


Sols suisses

État et évolution – 2017



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'environnement OFEV

Sols suisses

État et évolution – 2017

Impressum

Éditeur

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).

Direction du projet

Fabio Wegmann, OFEV

Auteur

Gregor Klaus

Accompagnement à l'OFEV

Bettina Hitzfeld, Jérémie Millot, Ruedi Stähli, Roland von Arx

Accompagnement à l'OFAG

Michael Zimmermann

Accompagnement à l'ARE

Reto Camenzind

Accompagnement d'experts

Sabine Augustin, OFEV; Sabine Braun, Institut für Angewandte Pflanzenbiologie, Schönenbuch; Andreas Fliessbach, FiBL; Andreas Gubler, Observatoire national des sols NABO; Frank Hagedorn, WSL; Elena Havlicek, OFEV; Anna-Sofia Hug, NABO; Armin Keller, NABO; Thomas Keller, Agroscope; Corsin Lang, OFEV; Magali Lebrun, OFEV; Jens Leifeld, Agroscope; Peter Lüscher, WSL; Reto Giulio Meuli, NABO; Volker Prasuhn, Agroscope; Kirsten Rehbein, NABO; Andreas Schellenberger, OFEV; Markus Steger, service de la protection des sols du canton de Zurich; Matthias Stettler, Haute école spécialisée bernoise; Christiane Wermeille, OFEV

Référence bibliographique

OFEV (éd.) 2017: Sols suisses. État et évolution – 2017.

Office fédéral de l'environnement, Berne.

État de l'environnement n° 1721: 86 p.

Traduction

Service linguistique de l'OFEV

Graphisme, mise en page

Cavelli AG, medien. digital und gedruckt, Gossau

Crédit photographique

Agroscope (Gabriela Brändle, Urs Zihlmann), LANAT (Andreas Chervet): page de couverture, points 1.0, 1.2, 1.3, 2.5

Agroscope, Urs Zihlmann: point 1.1 (gley, podzol, régosol)

Agroscope, Volker Prasuhn: point 2.2

OFEV/Ex-Press/C. Bärlocher: point 2.6

EPF Zurich, Denise König: point 1.1 (sols marécageux)

Gabriela Brändle: points 2.1, 4

HAFL, Moritz Müller: point 1.1 (pseudogley)

Agroscope, Gabriela Brändle: toutes les autres photographies

Commande de la version imprimée et téléchargement au format PDF

OFCL, Vente des publications fédérales, CH-3003 Berne

www.publicationsfederales.admin.ch

N° d'art.: 810.400.118f

www.bafu.admin.ch/uz-1721-f

Impression neutre en carbone et faible en COV sur papier recyclé.

Cette publication est également disponible en allemand (langue originale).

© OFEV 2017

11.17 275 860412188

Table des matières

Abstracts	7
------------------	----------

Avant-propos	9
---------------------	----------

1 Introduction	11
1.1 Les sols en Suisse	13
1.2 Les fonctions et les prestations du sol	15
1.3 Utilisation du sol en Suisse	17
1.4 Informations pédologiques disponibles	19

2 Bilan des menaces actuelles pesant sur le sol	23
2.1 Imperméabilisation du sol	27
2.2 Érosion du sol	31
2.3 Compaction du sol	37
2.3.1 Agriculture	37
2.3.2 Sylviculture	38
2.3.3 Secteur de la construction	39
2.3.4 Prévisions concernant l'évolution de la compaction du sol	39
2.4 Apports de polluants	41
2.4.1 Atteintes provoquées par l'industrie, l'artisanat et les transports au niveau suisse	42
2.4.2 Pollution le long des voies de transport	44
2.4.3 Pollution locale et ponctuelle par l'agriculture	45
2.4.4 Pollution locale et ponctuelle par les ménages privés	48
2.4.5 Pollutions locales et ponctuelles causées par différents acteurs	50
2.5 Perte d'humus	53
2.6 Eutrophisation et acidification	57
2.7 Perte de biodiversité du sol	61
2.8 Modifications de terrain	63

3 Protection du sol	67
3.1 Bases légales	67
3.2 Objectifs, mesures et déficits	69
3.3 Informations nécessaires sur les sols	73

4 Conclusions	75
----------------------	-----------

Bibliographie	76
----------------------	-----------

Liens	86
--------------	-----------

Abstracts

This report considers the condition of soils in Switzerland. Because comprehensive information on soil risks is not collected in this country, the report is based on fragmentary pieces of information gathered from the Confederation, the cantons and from research projects. Analysis shows that the non-renewable resource of soil is suffering both qualitative and quantitative damage. This suggests that it may be difficult to retain soil functions in the long-term. Although various measures have helped to prevent an increase in certain types of soil pollution and there has even been a decrease in some types of pollution, Switzerland does not have a sustainable approach to dealing with soil, a basic natural resource.

Le présent rapport fournit des renseignements sur l'état des sols en Suisse. Il se fonde sur des informations fragmentaires provenant de la Confédération, des cantons et de projets de recherche, car il n'existe pas en Suisse de données collectées à l'échelle nationale sur les menaces pesant sur le sol. L'analyse montre que le sol en tant que ressource non renouvelable subit diverses atteintes tant quantitatives que qualitatives, lesquelles compromettent la conservation à long terme de ses fonctions. Bien que diverses mesures aient contribué à stabiliser, voire diminuer certaines atteintes, l'utilisation du sol en tant que base de la vie n'est pas durable en Suisse.

Der vorliegende Bericht informiert über den Zustand der Böden in der Schweiz. Weil hierzulande keine flächendeckenden Informationen zu den Bodengefahren erhoben werden, stützt sich der Bericht auf fragmentierte Einzelinformationen des Bundes, der Kantone und aus Forschungsprojekten. Die Analyse zeigt, dass verschiedene Belastungen die nicht erneuerbare Ressource Boden quantitativ und qualitativ beeinträchtigen. Dadurch ist die langfristige Erhaltung der Bodenfunktionen in Frage gestellt. Obwohl verschiedene Massnahmen dazu beigetragen haben, dass bestimmte Bodenbelastungen nicht weiter zugenommen und einzelne Belastungen sogar abgenommen haben, erfolgt der Umgang der Schweiz mit der Lebensgrundlage Boden nicht nachhaltig.

Il presente rapporto informa in merito allo stato dei suoli in Svizzera. Dato che nel nostro Paese non sono raccolti dati a livello nazionale sulle minacce per il suolo, il rapporto si basa su informazioni frammentarie provenienti da Confederazione, Cantoni e progetti di ricerca. Dall'analisi si evince che numerose minacce pregiudicano la quantità e la qualità del suolo, una risorsa non rinnovabile. La conservazione a lungo termine delle funzioni del suolo è pertanto messa in discussione. Nonostante le diverse misure adottate abbiano contribuito ad arrestare l'aumento e, in alcuni casi, addirittura consentito di ridurre determinati carichi inquinanti nel suolo, in Svizzera la gestione del suolo quale base vitale non è sostenibile.

Keywords:

Soil risks, soil functions, information on soil, soil use, soil condition, monitoring

Mots-clés:

Menaces pour le sol, fonctions du sol, informations pédologiques, utilisation du sol, état du sol, monitoring

Stichwörter:

Bodenbedrohungen, Bodenfunktionen, Bodeninformationen, Bodennutzung, Bodenzustand, Monitoring

Parole chiave:

minacce al suolo, funzioni del suolo, informazioni sul suolo, utilizzazione del suolo, stato del suolo, monitoraggio

Avant-propos

Une nation qui détruit son sol se détruit elle-même : telle est la conclusion tirée il y a 150 ans par le juriste et scientifique Friedrich Albert Fallou dans son manuel de pédologie. Sa mise en garde est plus actuelle que jamais : les résultats d'une étude récente consacrée à l'état des sols au niveau mondial montrent en effet que la dégradation des terres a pris des proportions dramatiques. Rien qu'au cours des trois dernières décennies, la qualité du sol a chuté en partie massivement sur 33 % des pâturages, 25 % des terres assolées et 23 % de la surface forestière dans le monde [1]. L'espace vital de quelque 3,2 milliards d'êtres humains est ainsi touché. Selon cette étude, la dégradation du sol occasionne des coûts de l'ordre de 300 milliards d'euros par année et est l'une des causes de la migration et de la sous-alimentation.

On ne voit pas en Suisse de vastes étendues de terres détruites. Pourtant, chez nous aussi, la dégradation du sol est un problème à prendre au sérieux, comme le montre le présent rapport. La diminution de la qualité du sol et les pertes de surfaces sont un phénomène insidieux qui passe inaperçu. Les menaces qui pèsent sur le sol indiquent que nous n'utilisons pas de manière durable cette ressource précieuse au plan écologique et économique, mais non renouvelable.

De toutes les ressources naturelles, le sol est la plus négligée. Pourtant, il forme avec l'air, l'eau et la biodiversité le plus important fondement de la vie. En tant qu'interface centrale de tous les flux de substances et d'énergie sur la terre, le sol remplit de nombreuses fonctions : il est à la fois la base de la production alimentaire, un habitat pour les plantes et les animaux, un filtre à eau et un réservoir de carbone et d'eau. Cependant, l'utilisation actuelle des sols en Suisse ne garantit plus la préservation durable de toutes leurs fonctions.

Il nous faut donc prendre soin de lui ! Surtout en Suisse, où cette ressource se fait déjà rare alors que nos sols comptent parmi les plus fertiles au monde. La protection du sol étant une tâche transversale, de nombreux domaines sont concernés : aménagement du territoire, agriculture et sylviculture, industrie et artisanat, jardinage, assainissement de sites contaminés et secteur de la construction. Unissons nos efforts pour préserver notre sol – et donc notre nation !

Franziska Schwarz
Sous-directrice
Office fédéral de l'environnement (OFEV)



1 Introduction

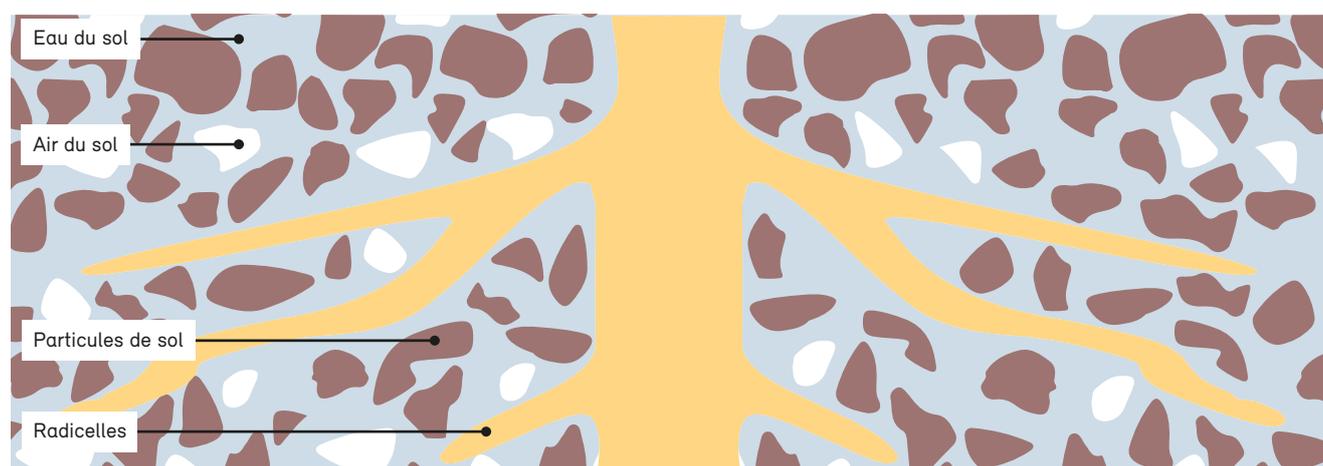
Le sol est la mince couche extérieure de la croûte terrestre, qui s'est formée avec le temps à partir de la roche-mère sous l'influence conjuguée du soleil, de la pluie, du gel et des organismes. Il est considéré comme un élément de liaison entre l'atmosphère (enveloppe gazeuse de la terre), la biosphère (habitat des organismes), l'hydrosphère (eaux souterraines) et la lithosphère (couche rocheuse externe de la Terre).

La composition de base du sol est constituée de différents types de minéraux de taille variable et de matières organiques (humus). Un réseau poral se développe entre les agrégats du sol (figure 1). Ces espaces interstitiels de différentes grandeurs assurent l'approvisionnement des plantes en air et en eau. Ils servent en outre à l'ancrage des racines des végétaux, et offrent un habitat à d'innombrables champignons, bactéries et animaux. Les proportions de ce milieu naturel sont gigantesques : la surface utile totale d'une seule poignée de terre argileuse peut dépasser 1 km².

Cette enveloppe fine et fragile entourant notre planète représente le fondement de toute vie sur Terre en même temps que la base de notre civilisation. Pourtant, de toutes les ressources naturelles, le sol est la plus sous-estimée et la plus négligée [2].

Figure 1

Le sol est constitué pour moitié environ de pores reliés entre eux.

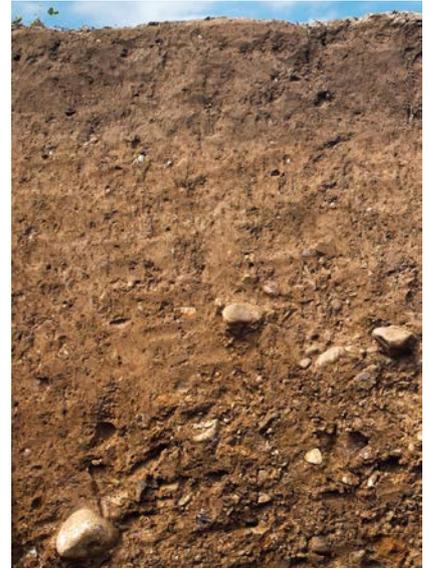




Sol brun



Sol brun calcaire



Sol brun lessivé



Sol marécageux



Régosol



Podzol



Sol alluvial (fluvisol)



Pseudogley sur limon alluvial



Gley sur limon alluvial

1.1 Les sols en Suisse

Le sol a besoin de beaucoup de temps pour se développer. La formation de la plupart des sols actuels du Plateau suisse a débuté il y a environ 10 000 ans, à la fin de la dernière glaciation. Sur les roches nues, les moraines ou les galets fluviaux, des processus chimiques, mécaniques et biologiques ont commencé à désagréger la roche et les particules minérales. La formation du sol s'est amorcée, permettant aux premières plantes de se développer (figure 2). Le sol s'est enrichi en humus issu de la transformation des résidus végétaux. L'évolution s'est poursuivie avec la formation de minéraux argileux, l'oxydation de minéraux ferreux et, suivant la disponibilité en eau, la migration en profondeur de substances. C'est ainsi que, petit à petit, sont apparues différentes couches, reconnaissables au premier coup d'œil par leur couleur: les horizons du sol.

Les minéraux argileux et l'humus peuvent accumuler des éléments nutritifs et les restituer aux plantes selon les besoins. En outre, l'humus emmagasine beaucoup d'eau, stocke le carbone, filtre les polluants et fournit des élé-

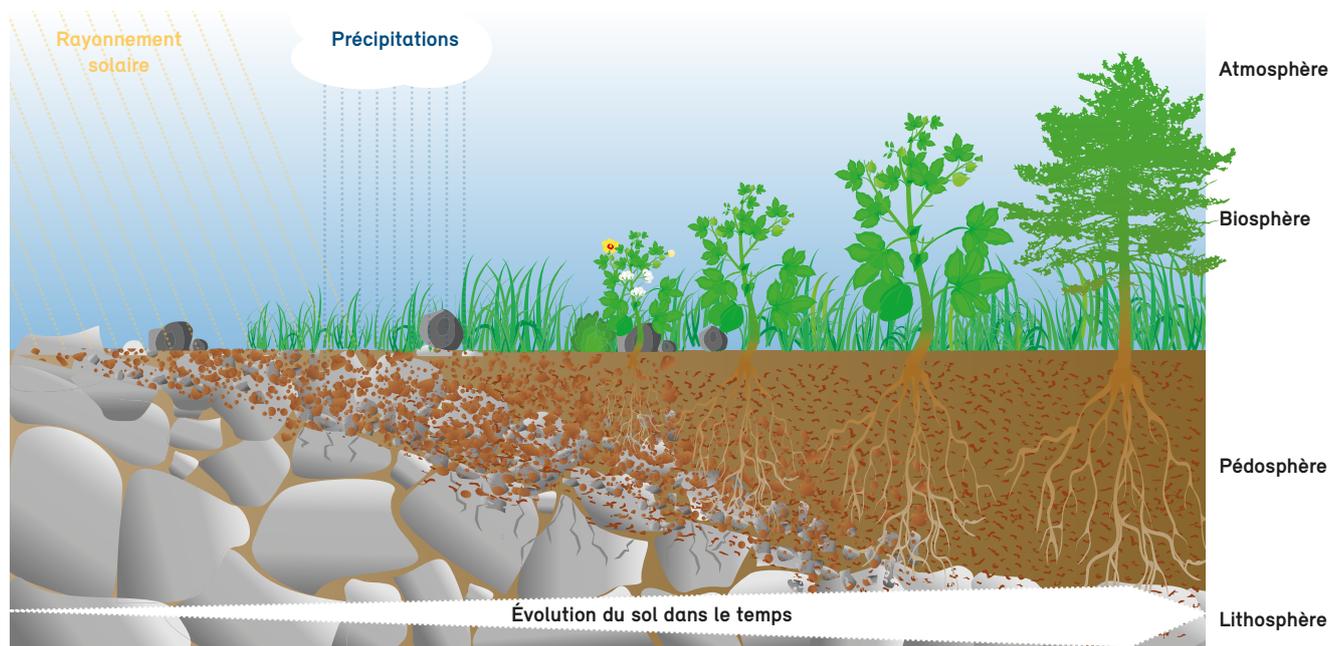
ments nutritifs et de l'énergie à des organismes qui jouent un rôle important dans la formation du sol.

La pédogenèse est un processus très lent: il faut entre 10 et 30 ans suivant les sites pour que l'épaisseur de la couche de terre augmente de 1 mm. Sur une terre assolée sans couverture végétale, une forte pluie suffit à éroder et détruire cette précieuse substance en quelques minutes.

La Suisse possède des milieux naturels d'une grande diversité qui ont donné naissance à des types de sols très variés. Suivant la roche-mère, le relief, le climat et la teneur en eau, les sols présentent une structure et des caractéristiques très différentes. En Suisse, les pédologues distinguent environ neuf types principaux de sols, subdivisés en de nombreux sous-types (voir page 12). Un coup d'œil à l'intérieur d'une fouille de chantier montre que la typologie du sol peut beaucoup changer en quelques mètres. Il existe des sols superficiels ou profonds, acides ou alcalins, riches ou pauvres en éléments nutritifs, humides ou secs, sableux ou argileux, dans toutes les combinaisons imaginables.

Figure 2

Différents processus interviennent dans la pédogenèse. Le sol (pédosphère) est l'interface commune entre l'atmosphère, l'hydrosphère, la lithosphère et la biosphère.





1.2 Les fonctions et les prestations du sol

Le sol remplit de nombreuses fonctions, qui jouent un rôle important dans l'équilibre de la nature et fournissent de précieux services aux êtres humains [3].

- **Fonction d'habitat :** le sol sert d'habitat à d'innombrables organismes. Ces derniers contribuent à la formation du sol ainsi qu'à sa fertilité et sont un réservoir de substances pharmaceutiques.
- **Fonction de régulation :** le sol constitue l'interface pour les cycles des substances et de l'énergie entre l'atmosphère, les eaux souterraines et la couverture végétale. Il retient ou transforme des substances (fonction de filtre, de tampon et de réservoir) et emmagasine notamment les éléments nutritifs et le carbone (protection du climat). Le sol peut en outre absorber de l'eau comme une éponge (protection contre les crues, réservoir d'eau pour les plantes) et filtrer les polluants présents dans l'eau d'infiltration (eau potable).
- **Fonction de production :** le sol permet la croissance des végétaux (biomasse) et fournit ainsi des denrées alimentaires et fourragères de même que du bois et des fibres.

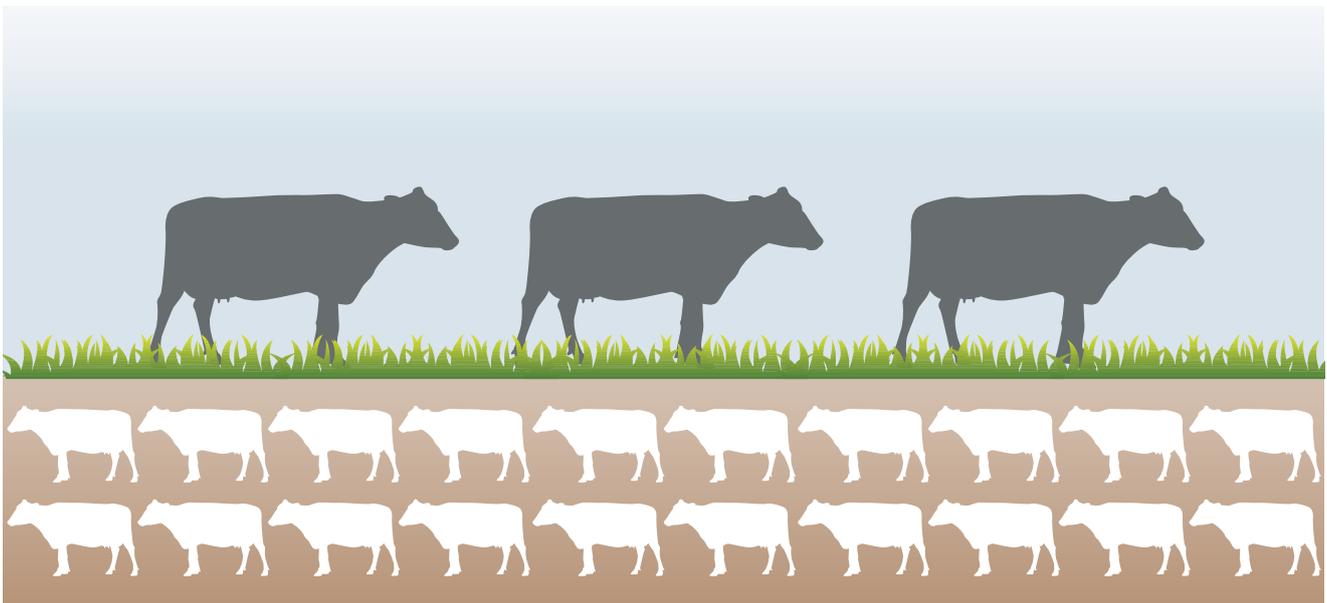
- **Fonction de support :** le sol sert de fondement aux constructions et aux infrastructures.
- **Source de matière première :** le sol emmagasine des matières premières (p. ex. gravier, sable).
- **Fonction d'archivage :** le sol conserve des informations sur notre histoire naturelle et culturelle.

Le potentiel de production d'un sol dépend de ses propriétés, lesquelles sont avant tout déterminées par le climat, la géologie et le temps. La composition et la grandeur des particules, la répartition et la dimension des pores, la teneur en air, la teneur et la disponibilité en éléments nutritifs, la diversité et le nombre d'organismes du sol, la teneur en matière organique et la réaction du sol (pH) sont des exemples de propriétés importantes.

Des organismes comme les bactéries, les champignons et les algues, ou encore les acariens, les nématodes, les vers de terre, les mille-pattes et les insectes jouent un rôle important dans le sol. Le nombre de microorganismes et d'animaux vivant dans le sol est colossal (figure 3) : un centimètre cube de terre peut renfermer plusieurs milliards de microorganismes appartenant à des dizaines de milliers d'espèces [4].

Figure 3

Le poids de l'ensemble des organismes contenus dans le sol d'un hectare de terrain peut atteindre 15 t [6]. Soit autant que 20 vaches. Alors que le poids de la biomasse au-dessus d'un hectare de prairie ne correspond qu'à celui de trois vaches.



Les organismes du sol :

- transforment des résidus végétaux et animaux en humus ;
- mélangent les particules minérales du sol avec la matière organique et créent ainsi des agrégats stables ainsi que des espaces interstitiels (pores) permettant la circulation de l'air et de l'eau ;
- stabilisent les agrégats du sol avec des substances mucilagineuses et diminuent ainsi le risque d'érosion ;
- emmagasinent et mobilisent des éléments nutritifs ;
- fixent l'azote atmosphérique ;
- favorisent l'altération chimique et donc la libération d'éléments nutritifs des roches ;
- emmagasinent du carbone et le stabilisent dans la matrice du sol ;
- dégradent des polluants organiques et purifient ainsi les eaux souterraines ;
- protègent les racines des plantes contre le dessèchement et les agents pathogènes ;
- accroissent la capacité de réservoir du sol et diminuent ainsi le risque de crues et de sécheresse ;
- sont d'importantes ressources pour le développement de médicaments (p. ex. antibiotiques).

L'utilisation humaine a de nombreuses répercussions sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols et, partant, sur leur aptitude à remplir leurs fonctions. Les sols sont extrêmement polyvalents, mais leurs prestations ne sont pas toujours assurées. Une utilisation (non durable) ou une pollution peuvent restreindre parfois drastiquement leurs fonctions. Par exemple, la capacité d'un sol à emmagasiner l'eau diminue de plus en plus selon les utilisations suivantes : forêts, prairies permanentes, grandes cultures et cultures fourragères biologiques, travail du sol sans labour et enfin grandes cultures conventionnelles [5].

Les nombreux et précieux services que le sol fournit sont souvent sous-estimés, quand ils ne passent pas complètement inaperçus de la population. Ce constat vaut également pour les utilisateurs directs : beaucoup d'agriculteurs ne considèrent pas le sol comme un milieu regorgeant de vie, et les consommateurs qui achètent des aliments ne pensent pratiquement jamais au sol qui assure pourtant leur alimentation.

1.3 Utilisation du sol en Suisse

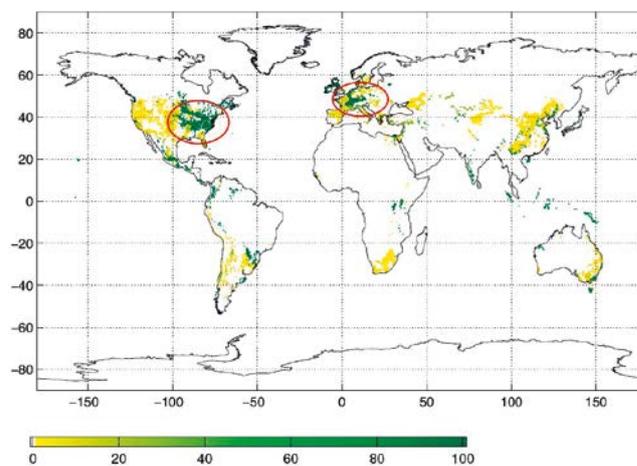
En Suisse, la plus grande partie des sols est utilisée par l'être humain. L'agriculture exploite à elle seule plus d'un tiers (35,9%) du territoire. Les champs cultivés se trouvent là où les terres sont naturellement très productives. Sur le Plateau suisse notamment, les sols qui se sont développés dans des conditions humides et relativement chaudes comptent parmi les plus fertiles au monde (figure 4). Cependant, en raison de l'imperméabilisation progressive des terres, les Suisses ne disposent plus que de 0,14 ha de surface cultivable par habitant – la valeur la plus faible d'Europe après les Pays-Bas (sans compter les petits États).

Les sols moins productifs sont utilisés en tant que forêts, prairies ou pâturages (figure 5). Au total, 31,3% du territoire suisse sont constitués de forêts ou de broussailles, et un quart de milieux naturels, qui se trouvent presque tous dans les étages supérieurs des Alpes (25,3%). La surface d'habitat couvre 7,5% de la Suisse. Ici, les sols sont en grande partie recouverts de constructions ou ont vu leur structure naturelle perturbée.

L'utilisation du sol est liée à ses fonctions et à ses caractéristiques (figure 6). Toute utilisation entraîne en principe une modification du sol et donc de la qualité de certaines

Figure 4

La carte montre les régions les plus appropriées à la production alimentaire avec les méthodes culturales actuelles. Les zones encadrées de rouge (Europe centrale, est des États-Unis) sont jugées optimales et peuvent être considérées comme un « patrimoine mondial agricole » pour lequel les États concernés assument une responsabilité particulière.

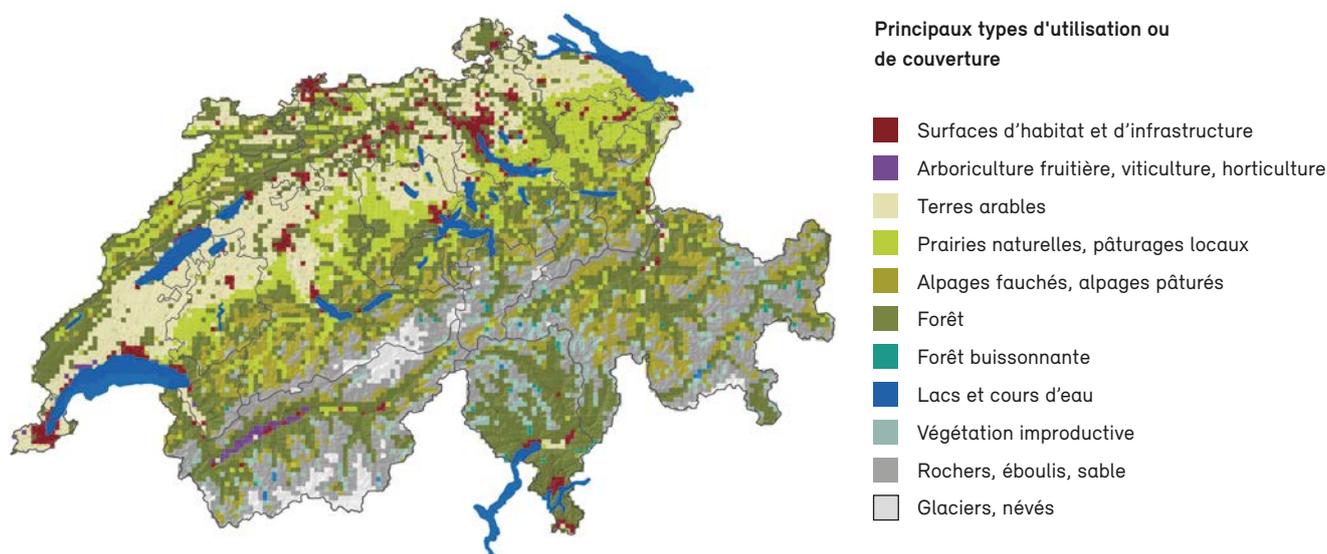


Part des surfaces (en %) les plus appropriées à la production alimentaire.

Source : Institut de recherche de Potsdam sur les effets du changement climatique (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung)

Figure 5

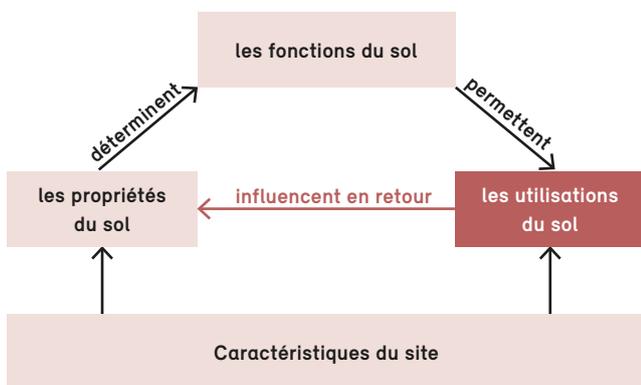
Principales utilisations actuelles du sol en Suisse [7]



de ses fonctions. Une utilisation non adaptée au site ou d'autres formes d'atteintes sont préjudiciables aux sols. Les services qu'ils fournissent aux humains ne sont alors plus disponibles que de façon limitée.

Figure 6

Les fonctions du sol sont déterminées par ses propriétés et permettent les différentes utilisations du sol. Ces utilisations influencent à leur tour les propriétés du sol et donc ses fonctions écologiques et économiques.



Culture céréalière sur sol brun fertile



1.4 Informations pédologiques disponibles

Le sol doit faire face à des exigences de plus en plus nombreuses et variées, mais pas toujours conciliables. Il est notamment appelé à fournir des denrées alimentaires et du bois, à conserver la biodiversité, à emmagasiner de l'eau et du carbone, à servir de fondation à des constructions. Pour pouvoir planifier son utilisation de telle sorte que ses fonctions ne subissent pas d'atteintes à long terme, il est indispensable de disposer de données pédologiques fiables pour l'ensemble de la surface. Les cartes et les systèmes d'informations pédologiques peuvent fournir les bases permettant de s'assurer que le sol soit utilisé de manière adaptée à ses propriétés [8]. Ces outils jouent un rôle déterminant dans l'intégration de la protection des sols dans les différents secteurs et domaines politiques et, partant, contribuent à résoudre ou prévenir les conflits d'intérêts et d'utilisation.

Relevé des propriétés pédologiques

Les informations sur les propriétés des sols suisses (p. ex. succession et épaisseur des horizons pédologiques, granulométrie, teneur en matière organique, teneur en eau) sont très lacunaires [9]. La seule carte nationale contenant des informations pédologiques pour l'ensemble du territoire est la carte de l'aptitude des sols de la Suisse au 1:200 000. Elle n'a toutefois été réalisée que sur la base du relief, de l'altitude, de la géologie et de profils ou sondages ponctuels et ne constitue donc pas à proprement parler une carte pédologique permettant de prendre des décisions en matière d'utilisation et de planification durables. À cette fin, il faudrait disposer de cartes pédologiques à l'échelle de 1:5000 ou plus.

Des cartes pédologiques détaillées n'ont été établies que pour moins d'un tiers de la surface agricole utile. Et dans les zones forestières, les régions urbaines et le reste de la Suisse, la cartographie est encore moins avancée. Depuis la fermeture à fin 1996 du service de cartographie des sols rattaché à l'ancienne Station de recherches en agroécologie et agriculture (aujourd'hui Agroscope), l'inventaire systématique des sols agricoles a pratiquement été abandonné. Des données d'analyse de 13 364 profils pédologiques, 5200 sondages et 26 027 horizons pédologiques portant sur la période de 1953 à 1996 sont documentées aux archives de la station de recherche

Agroscope. Au cours des dernières années, ces données ont été inventoriées, harmonisées et numérisées par des spécialistes, en collaboration avec l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG), l'Office fédéral du développement territorial (ARE), Agroscope, les cantons et la Société suisse de pédologie [10].

Pour sauvegarder, gérer et utiliser de manière uniforme toutes les informations pédologiques disponibles en Suisse, l'OFEV met à la disposition des cantons depuis 2012 un outil informatique sur Internet [11]. Ce système d'information est avant tout un instrument auquel les services cantonaux de la protection des sols peuvent recourir pour leurs tâches d'exécution. En 2017, entre la moitié et les deux tiers des données connues avaient déjà été importées. Celles de quelques cantons manquent encore, et d'importantes sources d'information (comme les analyses de sols effectuées dans le cadre des prestations écologiques requises ainsi que les informations provenant d'améliorations foncières) doivent encore être intégrées.

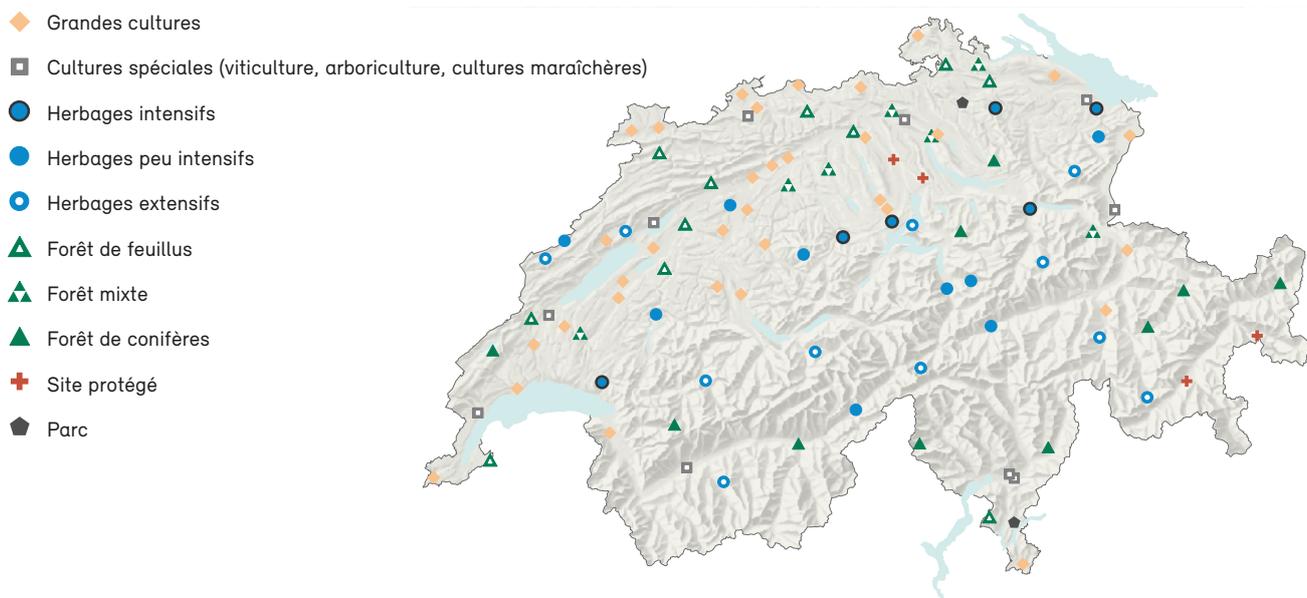
Le modèle de données NABODAT 1.5 permet de traiter des informations pédologiques ponctuelles et surfaciques. Les données ponctuelles comprennent par exemple les informations relatives aux profils de sol, aux sondages ou aux échantillons composites. Les données surfaciques sont présentées sous forme de cartes des sols ou de cartes d'application. Le modèle intègre les données pédologiques issues de cartographies des sols, de réseaux de mesure nationaux ou cantonaux et d'autres investigations spéciales [12]. Pour la mise en œuvre de la loi sur la géoinformation, un modèle de géodonnées minimal sur le sol a été élaboré sur la base du modèle de données NABODAT et publié en 2017 [13].

Observation à long terme et surveillance des sols

Les mesures et relevés périodiques de données pédologiques, par exemple sur le taux de pollution, fournissent de précieuses informations sur l'évolution des propriétés et des fonctions des sols. La surveillance incombe aux cantons (art. 4 de l'ordonnance sur les atteintes portées aux sols [OSol]), la Confédération – et donc l'Observatoire national des sols NABO – étant chargés de l'observation des sols (art. 3).

Figure 7

Sites d'observation à long terme de l'Observatoire national des sols NABO [17]



Depuis 1983, l'OFEV gère en collaboration avec l'OFAG un réseau de référence comprenant plus de 100 sites (NABO). Ces derniers ont été sélectionnés en veillant à ce que différents espaces naturels de la Suisse et divers types d'utilisation et d'exploitation soient représentés (figure 7) [14]. Le principal objectif de l'Observatoire national des sols NABO est le relevé des atteintes chimiques, physiques et biologiques auxquelles sont exposés les sols au niveau national. L'observatoire est également chargé d'établir des prévisions et d'identifier de manière précoce les changements. Il apporte ainsi une importante contribution à l'utilisation durable des sols.

Les exigences posées au réseau de mesure NABO évoluent constamment. Initialement, les mesures ont surtout porté sur les métaux lourds provenant des retombées atmosphériques ou apportés par certaines matières auxiliaires de l'agriculture (p. ex. produits phytosanitaires, engrais). Les analyses intégraient également le pH du sol. Entre-temps, le réseau de mesure de l'Observatoire national des sols NABO a toutefois dû être adapté pour répondre à de nouvelles problématiques, comme l'influence du changement climatique ou le recul de la biodiversité dans le sol. C'est ainsi que, depuis 2012, les relevés ont été étendus à des propriétés biologiques du sol, dont la biomasse

microbienne [15]. Les mesures périodiques associées aux relevés annuels de données d'exploitation permettent à l'Observatoire national des sols NABO d'identifier les causes des changements mesurés.

Depuis le début des années 1990 et à la suite de la création par la Confédération de l'Observatoire national des sols NABO en tant que réseau national de référence, de nombreux cantons ont également entrepris de collecter à grande échelle des informations pédologiques. Des réseaux cantonaux d'observation du sol ont été mis en place afin de pouvoir déterminer et suivre l'état du sol et surveiller les atteintes portées aux sols. Cependant, dans de nombreux cas, ces mesures ne peuvent pas être effectuées régulièrement faute de moyens financiers.

Depuis 2011, une collaboration a été mise en place entre l'Observatoire national des sols NABO et le Monitoring de la biodiversité en Suisse (MBD), qui relève l'évolution à long terme de la diversité de certaines espèces végétales et animales. Cette collaboration permet d'obtenir des informations pédologiques sur des sites qui n'ont pas encore été cartographiés ou étudiés jusqu'ici (ensemble de base et relevé proportionnel à la surface). Entre 2011 et 2015, des échantillons de sol ont été prélevés sur près

de 1200 sites du MBD. Par ailleurs, les relevés des plantes vasculaires, des mousses et des mollusques peuvent être directement mis en relation avec des propriétés pédologiques comme le pH ou la teneur en carbone et interprétés en conséquence [16].

Lacunes et mesures nécessaires

Malgré les efforts déployés jusqu'ici, les informations et les données sur les sols collectées en Suisse se révèlent insuffisantes. C'est pourquoi diverses informations pédologiques provenant d'études de cas, de projets de recherche et de relevés uniques de la Confédération et des cantons ont été prises en considération dans le présent rapport.

Les lacunes sont considérables [18, 19], d'autant plus que le besoin en informations pédologiques a augmenté : depuis quelques années, la société et le monde politique sont en effet nettement plus sensibles à la valeur écologique et économique du sol et aux menaces qui pèsent sur lui [20]. Pour pouvoir maîtriser des défis comme la destruction des sols par les constructions, la pénurie alimentaire, le changement climatique, le recul de la biodiversité ou encore les crues, il est indispensable de posséder des informations pédologiques très complètes [21]. Les lacunes s'observent non seulement au niveau de la saisie spatiale des données, mais aussi à celui des paramètres relevés. Les cartographies existantes avaient principalement pour objectif d'évaluer l'aptitude agricole des sols ; des paramètres complémentaires se révèlent donc nécessaires pour pouvoir protéger les sols et conserver leurs fonctions.

Prélèvement d'un échantillon de sol pour les mesures biologiques





2 Bilan des menaces actuelles pesant sur le sol

Essentiel à la vie, le sol est une ressource qui n'est pas renouvelable à l'échelle de temps humaine. Pourtant, nos sols sont exposés à diverses atteintes (tableau 1) qui entraînent en de nombreux endroits une perte de leurs fonctions et de leur capacité de production naturelles. L'étendue de ces atteintes va de la destruction complète du sol par des constructions à l'acidification provoquée par les apports excessifs d'azote atmosphérique.

Le présent chapitre donne un aperçu de l'état actuel et de l'évolution des sols en Suisse. L'analyse se base sur les données de différents programmes de monitoring de la Confédération et des cantons et sur des études menées par des instituts de recherche. Les données existantes étant trop incomplètes pour permettre une évaluation des menaces au niveau suisse, il a fallu se baser sur des informations ponctuelles fragmentaires de la Confédération, des cantons ainsi que de projets de recherche et les extrapoler pour en dégager une tendance nationale.

L'analyse montre qu'il n'existe plus de sols totalement préservés en Suisse. Les sols sont exposés à de nombreuses menaces (tableau 2) qui diminuent la qualité de leurs fonctions (p. ex. productivité, capacité de filtration d'eau).

Au cours des dernières années, différentes mesures ont contribué à atténuer, voire stopper, les atteintes les plus graves portées aux sols. La situation relative aux apports de métaux lourds ne s'est ainsi pas aggravée. Cependant, les quantités introduites par le passé restent stockées dans le sol ; et des métaux lourds sont encore apportés localement avec les fertilisants. La progression de l'utilisation du sol à des fins d'urbanisation et de construction d'infrastructures n'a que légèrement ralenti. Enfin, l'érosion et la compaction du sol ainsi que les dépôts d'azote atmosphérique sur l'ensemble du territoire continuent de poser des problèmes.

Tableau 1

Utilisations du sol et menaces qui en découlent

Utilisation	Diminution quantitative du sol	Diminution qualitative du sol
Habitat	Extension de la surface d'habitat	Apports de polluants (déchets, boues d'épuration)
Industrie et artisanat	Extension de la surface d'industrie et d'artisanat	Apports de polluants
Transports	Construction de nouvelles routes et lignes de chemin de fer	Apports de polluants le long des voies de circulation
Agriculture	Construction de routes, d'installations et de bâtiments (p. ex. étables, fermes isolées)	Érosion du sol Compaction Apports de polluants par les engrais minéraux, les engrais de ferme et les produits phytosanitaires Perte de biodiversité Drainages (perte de matière organique)
Sylviculture	Construction de routes de desserte et de bâtiments	Compaction du sol lors de la récolte des bois
Tourisme, activités de loisir	Construction de routes, d'installations et de bâtiments	Compaction du sol consécutive à l'utilisation intensive, à la circulation et au stationnement de véhicules dans les champs
Jardinage	Construction de chemins et d'installations	Apports de polluants par les engrais, les produits phytosanitaires, les cendres, etc.
Défense du territoire	Construction de routes, d'installations et de bâtiments	Pollution chimique des sols sur les places de tir Compaction du sol sur les places d'armes

Perte de sol naturel consécutive à des modifications de terrain

Les menaces mises en évidence montrent que la ressource sol n'est pas durablement utilisée en Suisse. Si ce problème est déjà connu, il se révèle à présent nécessaire

d'élaborer et de mettre en œuvre une stratégie sol et un plan de mesures correspondant.

Tableau 2

État des sols en Suisse selon le type d'atteinte

Type d'atteinte au sol	État actuel et évolution
Imperméabilisation	En 24 ans (de 1979/85 à 2004/09), la surface imperméabilisée (en particulier par des routes et des bâtiments résidentiels, commerciaux et administratifs) a augmenté de près d'un tiers. En 2009, un vingtième du territoire suisse était recouvert définitivement par des matériaux imperméables à l'eau. Au niveau national, le rythme de l'urbanisation a diminué depuis le début des années 2000. L'imperméabilisation s'est ainsi ralentie, mais reste encore très éloignée d'un niveau durable.
Érosion du sol sur les terres assolées	Plus d'un tiers de la surface de terres assolées est considérée comme potentiellement menacée d'érosion. L'érosion du sol apparaît de manière irrégulière et limitée dans l'espace, mais elle est très répandue dans les terres cultivées en Suisse. En de nombreux endroits, la profondeur et la fertilité des sols pourraient diminuer et le risque d'érosion, s'aggraver (p. ex. en raison du changement climatique).
Érosion du sol sur les alpages	Sur les alpages, le taux d'érosion enregistré lors d'une utilisation intensive excède nettement le taux de formation des sols.
Glissements de terrain	Entre 6 et 8 % du territoire suisse sont touchés par des processus de glissement de terrain. Ces derniers portent atteinte aux fonctions du sol et peuvent être déclenchés ou accélérés par une utilisation du terrain non adaptée au site.
Compaction	La compaction du sol est un phénomène très fréquent en Suisse, qui entraîne au moins localement une diminution des fonctions et de la fertilité des sols. La tendance persistante à utiliser des engins de plus en plus lourds dans l'agriculture, la sylviculture et la construction ajoutée aux contraintes extérieures dans l'agriculture imposant de travailler le sol et de récolter même dans des conditions défavorables vont encore aggraver la situation.
Apports (anciens) de polluants produits par l'industrie et l'artisanat	En raison des dépôts de polluants atmosphériques, il n'existe plus de sol totalement exempt de pollution en Suisse. Aujourd'hui encore, des polluants émis par l'industrie aboutissent dans les sols. Cependant, grâce au renforcement des prescriptions relatives à la protection de l'air, ces apports sont nettement moins élevés que par le passé.
Pollution le long des voies de circulation	En bordure des routes à fort trafic, le sol est pollué sur une bande de 5 à 10m de large. En ce qui concerne les voies ferrées, la pollution est nettement moins importante.
Apports de polluants par l'agriculture	Dans les herbages intensifs, on observe une hausse des apports de zinc et de cuivre. Ils proviennent du lisier et des aliments pour animaux. D'autres métaux lourds comme le cadmium et l'uranium parviennent dans les terres assolées à travers les engrais phosphatés minéraux.
Apports de cuivre en viticulture	La teneur en cuivre continue d'augmenter dans les sols de sites viticoles.
Pollution causée par les produits phytosanitaires	Certains produits phytosanitaires restent décelables dans le sol longtemps après leur application. C'est ainsi que des résidus de pesticides organochlorés interdits et leurs produits de dégradation peuvent aujourd'hui encore être mesurés dans les terres agricoles et les sols de jardins.
Sols de zones urbaines et de jardins fortement pollués	Les sols des jardins particuliers et familiaux sont souvent pollués. Les polluants proviennent surtout des engrais (fertilisation excessive avec des engrais minéraux, utilisation de cendres et de compost pollué) ainsi que d'une utilisation souvent inappropriée de produits phytosanitaires.
Élimination des boues d'épuration	Certaines surfaces sur lesquelles des boues d'épuration ont été épandues jusqu'en 1996 présentent aujourd'hui encore des dépassements de la valeur indicative ou du seuil d'assainissement de nombreux polluants (figure 33).

Type d'atteinte au sol	État actuel et évolution
Sites contaminés	On dénombre en Suisse environ 38 000 sites pollués (sites industriels, stockage définitif de déchets urbains et de déchets provenant de l'industrie et de l'artisanat, installations et places de tir, lieux d'accident). Ils couvrent une surface de quelque 225 km ² (0,6 % du territoire suisse).
Perte d'humus	Les terres assolées présentent des teneurs en humus très inférieures à celles des sols de prairies et de pâturages. Dans la plupart des sols agricoles, ces teneurs semblent rester stables à un bas niveau. En revanche, dans les anciens sols marécageux aujourd'hui exploités par l'agriculture, la matière organique ne cesse de diminuer.
Eutrophisation	Les dépôts atmosphériques d'azote assimilable par les plantes dans les sols dépassent nettement la valeur naturelle sur la quasi-totalité du territoire. Les sols s'acidifient et des écosystèmes naturels sont perturbés par ces apports d'azote. Quelque 98 % des hauts-marais, 95 % des forêts, 76 % des bas-marais et 49 % des prairies sèches sont touchés.
Acidification	L'acidification des sols forestiers représente une menace pour la forêt et pour les fonctions du sol. Elle a pu être ralentie, mais sans pouvoir être stoppée.
Perte de biodiversité du sol	Il faut partir du principe qu'en de nombreux endroits, l'exploitation agricole très intensive pratiquée en Suisse porte atteinte à la vie du sol.
Modifications de terrain	Les projets de construction en Suisse entraînent le déplacement de volumes considérables de matériaux terreux. Deux tiers des apports de matériaux terreux réalisés par le passé ont entraîné des atteintes persistantes au sol. La qualité des modifications de terrain s'est considérablement améliorée au cours des dernières années. C'est surtout vrai pour les projets pour lesquels un suivi par un spécialiste de la protection des sols sur les chantiers est exigé.



2.1 Imperméabilisation du sol

En ville en particulier, les sols sont recouverts avec des matériaux imperméables à l'air et à l'eau comme l'asphalte ou le béton, ce qui constitue la modification la plus grave qui soit. L'imperméabilisation provoque la perte des fonctions naturelles du sol en tant qu'habitat, réservoir et filtre et de sa capacité à transformer et décomposer des substances. Les échanges gazeux avec l'atmosphère sont en grande partie bloqués, et l'eau de pluie ne peut plus du tout ou que difficilement s'infiltrer. De fortes précipitations augmentent le risque que les grandes quantités d'eau de ruissellement ne puissent plus être recueillies par les canalisations, les ruisseaux et les rivières et provoquent des inondations. En même temps, l'alimentation des réserves d'eau souterraine est réduite. Il est très difficile et très coûteux de restaurer un sol imperméabilisé.

Évolution de la surface de l'habitat

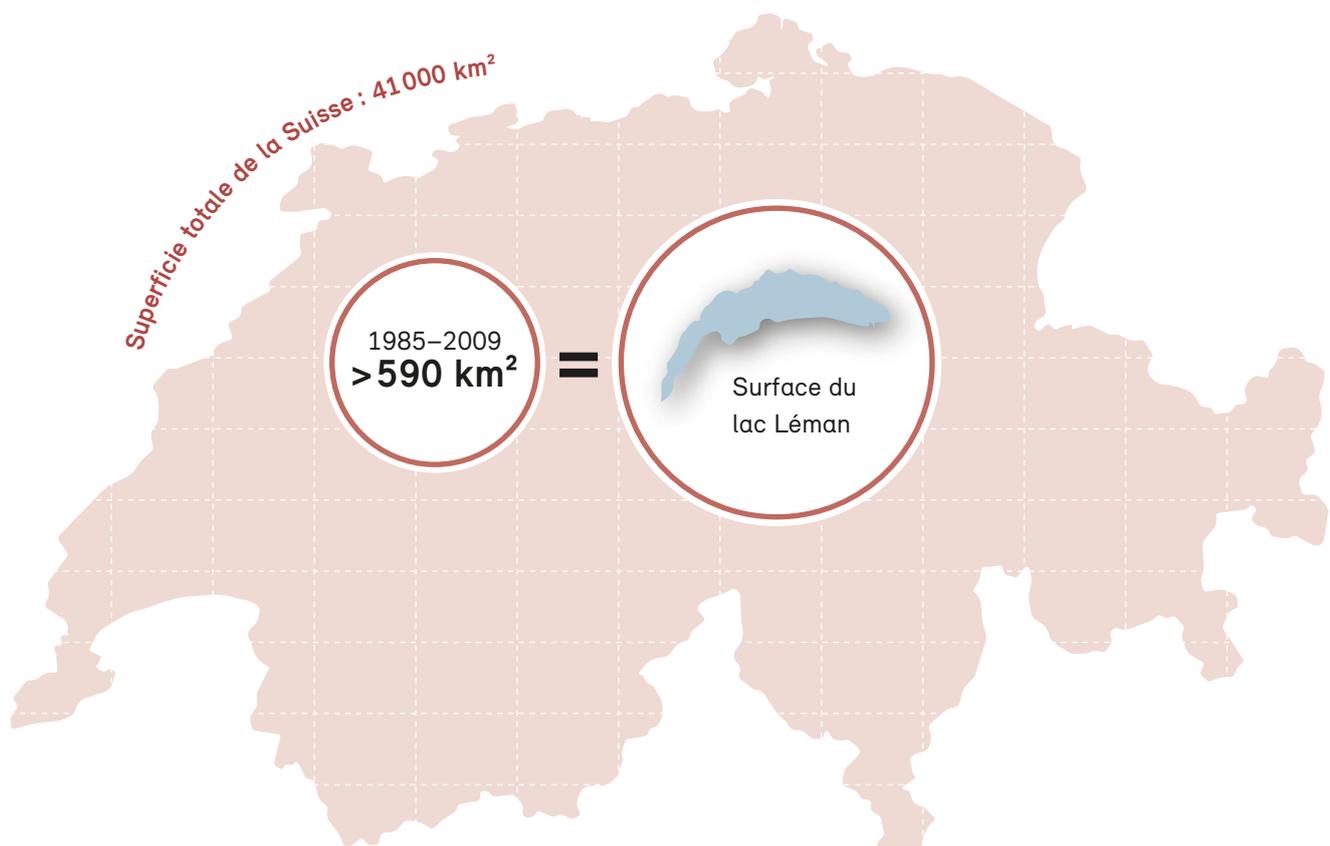
La croissance économique et démographique ajoutée au développement de la mobilité et à la hausse de la surface moyenne par habitant a entraîné au cours des dernières décennies une augmentation du besoin en bâtiments résidentiels et administratifs, en routes et voies ferrées, en centres commerciaux, en zones industrielles et artisanales, en installations sportives et de loisirs. En conséquence, la surface d'habitat a augmenté de 23,4 %, soit 584 km², entre 1985 et 2009, ce qui correspond à la taille du lac Léman (figure 8) ou à un accroissement de surface de 0,75 mètre carré par seconde [22]. En 2009, les zones urbanisées couvraient 7,5 % du territoire suisse.

Les sols les plus productifs sont menacés

Au total, 32 % des surfaces d'habitat apparues entre 1985 et 2009 étaient auparavant des terres assolées, 33 % des prairies naturelles, 13 % des surfaces consacrées à l'arboriculture fruitière, à la viticulture et à l'horticulture

Figure 8

Entre 1985 et 2009, la surface d'habitat en Suisse a augmenté de 23,4 %, soit une surface équivalente à celle du lac Léman.



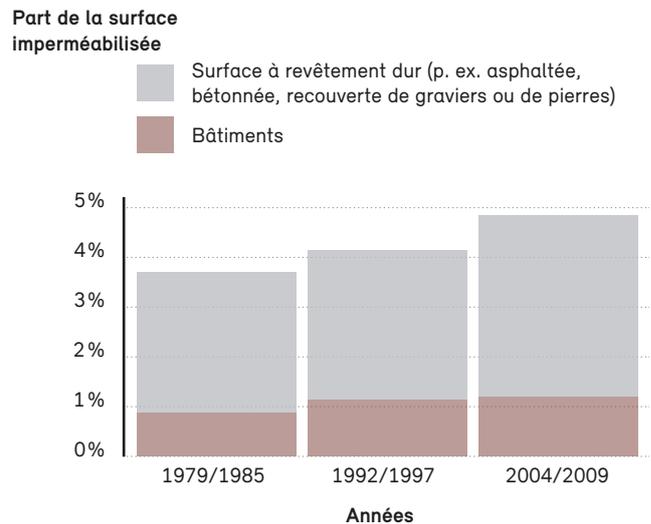
et 9% des pâturages. L'extension des zones urbaines s'est surtout faite en région de plaine et touche ainsi des sols agricoles particulièrement précieux et productifs de Suisse (figure 9).

Dans l'ensemble de la Suisse, on observe un ralentissement de la croissance des surfaces d'habitat et d'infrastructure entre les deux périodes d'observation de la statistique de la superficie (1985 à 1997 et 1997 à 2009). Le rythme de progression des aires industrielles et artisanales a nettement ralenti, tombant de 22% à 8,7%; la baisse est un peu moins marquée pour les aires de bâtiments (recul de 18% à 12%) et pour les surfaces de transports (de 9,5% à 5,5%).

Part de sol imperméabilisé

Plus de 62% des surfaces d'habitat et d'infrastructure (bâtiments et routes) sont imperméabilisés [23]. En l'espace de 24 ans (1985 à 2009), la proportion de sols imperméabilisés en Suisse a augmenté de 29% (figure 10). Au total, 4,7% de la surface agricole sont recouverts définitivement de matériaux étanches à l'air et à l'eau (1900 km²). Même dans des régions protégées comme les paysages, sites et monuments naturels d'importance nationale, les sites marécageux et les parcs

Figure 10
Part de la surface imperméabilisée en Suisse [24]

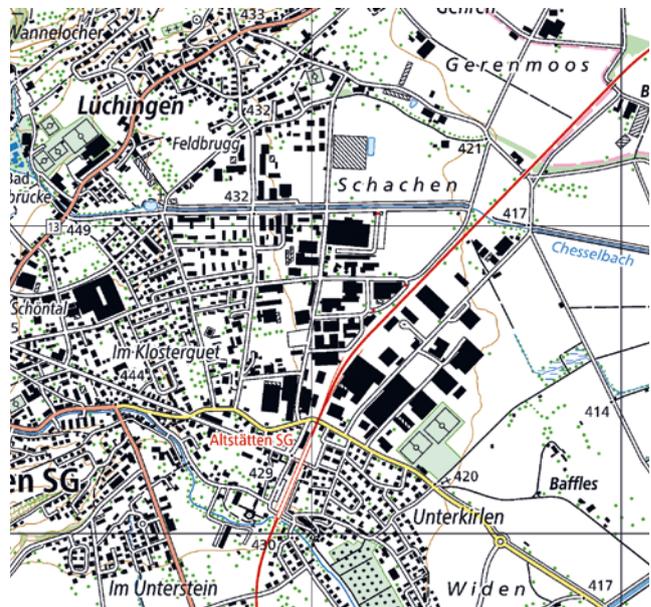
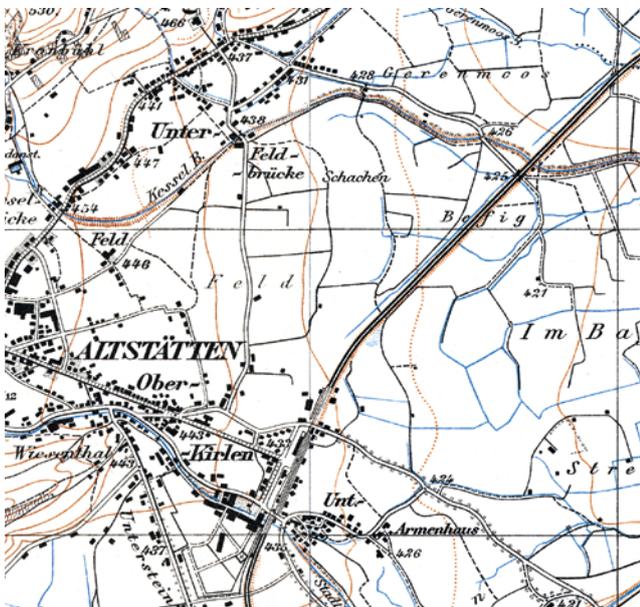


naturels, l'imperméabilisation a augmenté de façon préoccupante (entre 10 et 14%) [24].

Près de 40% des surfaces d'habitat et d'infrastructure sont constitués d'espaces verts comme des jardins, des parcs, des plates-bandes fleuries ou des bordures de route végétalisées [23]. Néanmoins, ces sols urbains ont subi de

Figure 9

Les zones urbanisées occupent les sols les plus productifs de Suisse. La carte montre la même zone de paysage en 1944 (à gauche) et en 2014. Le nom «Feld» («champ») a disparu. Reproduit avec l'autorisation de swisstopo (BA170160).



profondes transformations dues à des déplacements, à des apports de matériaux étrangers et à la pollution de l'environnement. Ces modifications s'observent aussi bien au niveau de la succession des couches pédologiques que des propriétés des sols. Toutefois, ces derniers parviennent dans une moindre mesure à fournir d'importants services écosystémiques. Ainsi, les sols urbains constituent la base de la nature en ville, ils retiennent les polluants et l'eau de pluie et exercent une influence favorable sur le climat à travers l'évapotranspiration.

Les constructions hors zones urbaines

Hors zones à bâtir, une partie du sol est recouverte notamment par des routes et d'autres installations d'infrastructure ainsi que par des bâtiments agricoles. Si l'on ajoute les surfaces affectées au tourisme, aux loisirs, à la communication, à l'énergie, à l'exploitation de ressources, à l'entreposage de déchets et à l'armée, on constate que près de 38 % des surfaces d'habitat et d'infrastructure se trouve ainsi hors zone à bâtir [25]. Ce pourcentage élevé est notamment dû au réseau relativement dense de routes de desserte agricole dans les espaces ruraux. Au total, deux tiers des surfaces de transport sont situés en zone non constructible (figure 11); pour les aires de bâtiments, la part se monte à 22 %.

Sols urbains non imperméabilisés

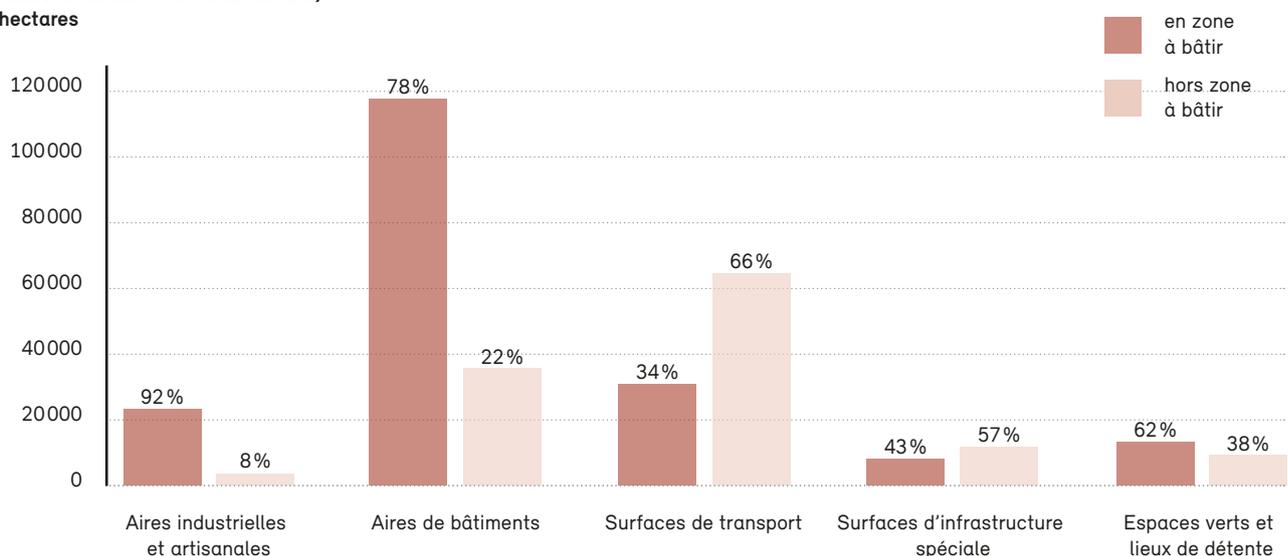
Entre les zones recouvertes de matériaux étanches subsistent des espaces ouverts comme des jardins et des parcs publics. Près de 40 % de l'espace urbain n'est pas imperméabilisé. Cependant, les sols qu'on y trouve ne sont généralement pas à l'état naturel; ils ont été déplacés au moins une fois et sont souvent mélangés à des gravats, des déchets, des scories ou des boues. Ces sols urbains remplissent néanmoins des fonctions importantes.

- Ils permettent à l'eau de s'infiltrer et réduisent ainsi le risque d'inondations.
- Ils retiennent des particules fines et des polluants nocifs et les lient durablement.
- Ils abritent des organismes vivants qui décomposent les polluants organiques.
- Ils permettent la croissance de plantes qui ont une influence favorable sur le climat urbain et constituent les principaux éléments des espaces de détente.
- Ils sont idéaux pour des activités de loisir et de détente et offrent un habitat à de nombreux animaux et végétaux.

Figure 11

Surfaces d'habitat et d'infrastructure en et hors zone à bâtir, par type d'utilisation (en ha)

Surfaces d'habitat et d'infrastructure, en hectares



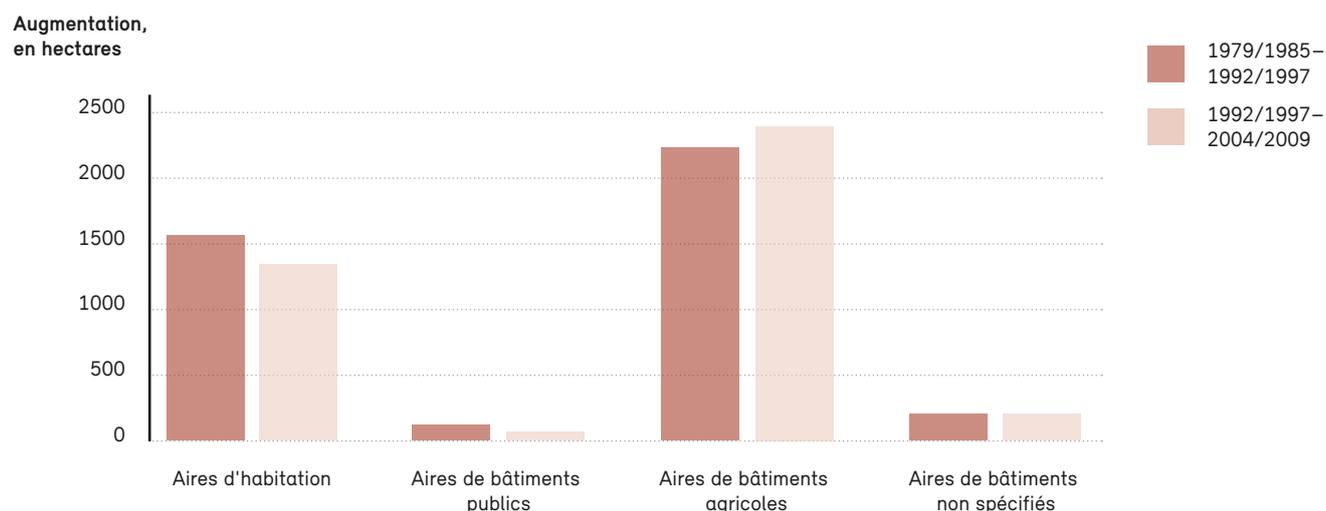
L'augmentation des surfaces de transport hors zone à bâtir a ralenti entre les deux périodes d'observation (1985-1997 et 1997-2009) [25], alors que celle des espaces verts et des lieux de détente a plus que doublé. Cette progression est due en particulier à l'aménagement de terrains de golf.

Les aires de bâtiments hors zone à bâtir se sont aussi accrues à raison de 8000 ha au total. Toutes les catégo-

ries de bâtiments ont contribué à cette hausse. L'augmentation a été alimentée pour une grande part par les aires d'habitation et les aires de bâtiments agricoles. Si l'on compare l'évolution entre les deux périodes d'observation de 1985 à 1997 et de 1997 à 2009, la croissance des aires d'habitation s'est essoufflée, tandis que celle des aires de bâtiments agricoles, déjà soutenue, s'est encore renforcée (figure 12).

Figure 12

Variation des surfaces d'habitat et d'infrastructure hors zone à bâtir, par type d'utilisation



2.2 Érosion du sol

Lors de très fortes pluies, l'eau ne peut plus s'infiltrer dans le sol et s'écoule en surface. Si ce phénomène se produit sur des champs en pente ayant une faible couverture végétale, des particules de sols sont emportées par l'eau. Un sol compacté, des précipitations abondantes et intenses, des terres assolées gorgées d'eau ou desséchées, des pentes longues et abruptes ainsi qu'une couverture végétale réduite peuvent entraîner une érosion particulièrement forte.

L'érosion a de nombreuses conséquences négatives [26] : la fertilité du sol diminue, des fonctions importantes sont affectées (comme la capacité du sol à emmagasiner du carbone, des éléments nutritifs et de l'eau et à purifier celle-ci), les cultures subissent des dommages. Des dégâts écologiques considérables peuvent survenir en dehors des surfaces directement touchées, car les engrais, les éléments nutritifs et les produits phytosanitaires liés aux particules de sol sont transportés dans les eaux avoisinantes et portent ainsi atteinte à leurs biocénoses [27]. Les matériaux terreux peuvent également souiller des routes et des zones d'habitation, présentant ainsi un risque pour la sécurité publique, et occasion-

ner des coûts élevés de nettoyage et de réparation des infrastructures publiques et privées.

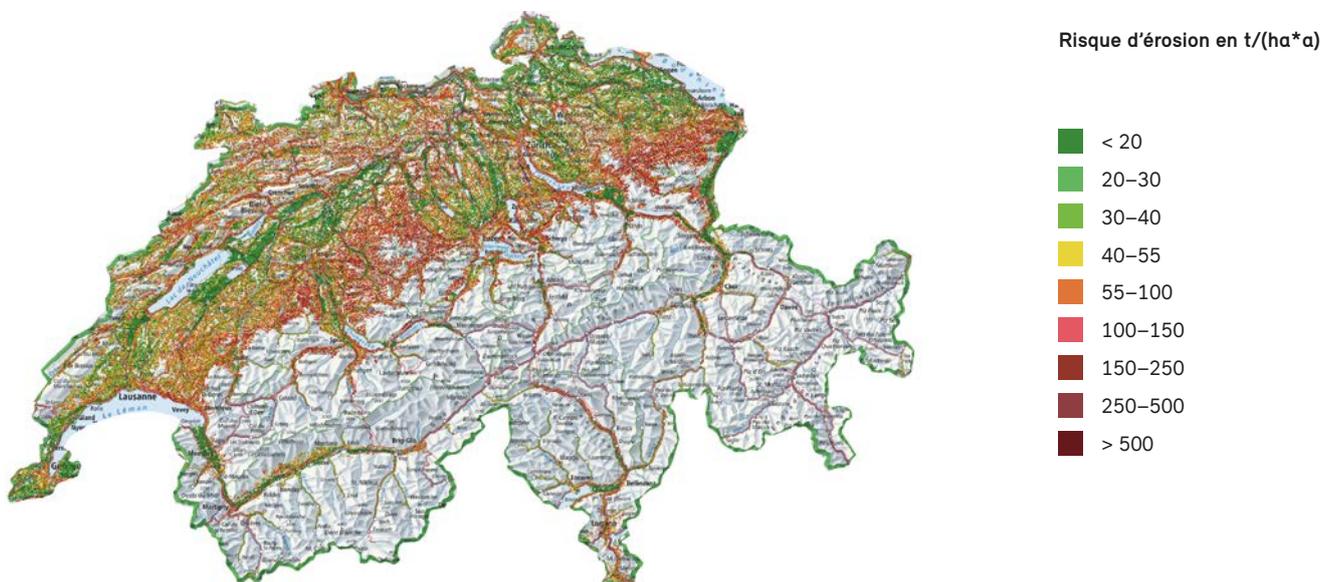
Risque d'érosion en Suisse

Au niveau mondial, l'érosion hydrique entraîne chaque année la disparition de quelque 5 milliards de tonnes de sol agricole [28], ce qui correspond à une perte annuelle de 1 % environ de la terre exploitable par l'agriculture.

En Suisse, l'érosion du sol a pendant longtemps été considérée comme un problème de moindre gravité en comparaison internationale. Cependant, des études plus précises menées dans les années 1980 dans le cadre du projet de recherche «Utilisation du sol en Suisse» ont montré que des mesures s'imposaient d'urgence [29]. C'est ainsi que la Confédération a introduit dans l'OSol les bases légales nécessaires pour réduire l'érosion du sol. En outre, les services de vulgarisation agricole de différents cantons ont publié des instructions sur la manière de déterminer le risque (clés d'estimation de l'érosion) ainsi que des fiches techniques [30, 31]. Une aide à l'exécution parue en 2013 concrétise les bases légales et présente des possibilités d'améliorer à l'avenir la protection du sol [32].

Figure 13

Risque d'érosion potentiel (sans prise en compte de l'exploitation actuelle) pour la région de plaine, en tonnes par hectare et par an [37]



Avec son relief vallonné formé de pentes plus ou moins marquées et ses précipitations importantes et fluctuantes selon les saisons, la Suisse présente un risque élevé d'érosion locale, comme le montre la carte du risque d'érosion de la Confédération (figure 13) [33]. Près d'un tiers de la surface agricole utile située en région de plaine et de collines est classée comme potentiellement très menacée par l'érosion. Ce classement ne tient toutefois pas compte de la couverture végétale.

Tous les cantons possèdent des surfaces agricoles utiles fortement exposées à l'érosion. Les cantons situés en bordure de zones de montagne notamment présentent une proportion élevée de surfaces potentiellement menacées d'érosion; il est toutefois probable que la plupart d'entre elles sont recouvertes d'herbages et donc protégées contre ce danger.

Le risque effectif d'érosion dépend en grande partie de l'utilisation actuelle du terrain (rotation culturale, travail du sol). Une carte améliorée du risque d'érosion en Suisse permettant de faire une distinction entre terres assolées et herbages devrait être disponible en 2018. Les herbages, les assolements diversifiés et le semis de prairies artifi-

cielles et de cultures dérobées réduisent le risque d'érosion. La pomme de terre est la culture présentant le plus grand risque d'érosion, alors que ce danger est minimal pour les prairies artificielles et permanentes. Les méthodes de travail sans labour respectueuses du sol permettent de diviser par dix la perte de sol [35]. Un dossier de fiches techniques portant sur 31 mesures différentes montre des possibilités de réduire les risques d'érosion [36].

Quelque 55 % des surfaces agricoles étant potentiellement connectées à des eaux (figure 14), l'érosion peut y entraîner une pollution aquatique. La plus grande partie de ces surfaces sont indirectement connectées à des eaux par des routes (évacuation des eaux de chaussées) et des lignes d'écoulement superficiel (thalweg). Environ 60 000 ha ou 10 % de la surface agricole utile en région de plaine et de collines présentent une probabilité élevée de transfert dans les eaux de surface [27].

Érosion locale

L'érosion hydrique des terres assolées peut se faire sous forme d'érosion en nappe ou d'érosion linéaire. Les eaux boueuses des ruisseaux et des rivières après de fortes pluies en sont des manifestations très visibles, de même

Figure 14

Carte des surfaces directement ou indirectement attenantes à des eaux de surface de la carte du risque d'érosion en Suisse pour les surfaces agricoles utiles et les régions de plaine et de collines ainsi que les zones de montagne 1 et 2 [27].



que les rigoles et ravines d'érosion qui se forment dans les champs, mais qui disparaissent rapidement après le travail du sol par l'agriculteur. Comme l'érosion survient en outre de façon irrégulière et localement limitée, il est parfois difficile de percevoir et de quantifier ce phénomène. De longues recherches sont nécessaires pour pouvoir déterminer la quantité de sol emportée par les eaux.

La plupart des études se basent sur des mesures effectuées dans des parcelles test ou sur des modélisations. Quant aux études sur le terrain, elles ne tiennent compte en général que d'événements ponctuels (le plus souvent d'événements extrêmes) ou ne portent que sur quelques années. Des recherches réalisées dans quatre régions des cantons d'Argovie, de Bâle-Campagne, d'Uri et de Berne constituent en l'occurrence une exception. Ces observations menées sur plusieurs années fournissent des renseignements importants sur le déroulement effectif de l'érosion en Suisse.

- Des études menées de 1975 à 1988 dans le paysage de collines de la vallée du Haut-Rhin dans le canton d'Argovie montrent que les sols de loess y sont très sensibles à l'érosion. L'érosion moyenne sur 13 ans s'est montée à 5 tonnes par hectare et par an [38]. Des valeurs atteignant jusqu'à 20 t ont même été relevées dans quelques champs. Certaines années, des pics

d'érosion de 95 tonnes par hectare et par an ont pu être mesurés sur quelques surfaces. Un tiers environ des terres assolées ont subi d'importants dégâts d'érosion durant la période étudiée (pertes de sol supérieures à 5 tonnes par hectare et par an).

- Les sols argileux étudiés dans une région du canton de Bâle-Campagne sont nettement moins menacés par l'érosion. La perte de sol moyenne sur la période de 1987 à 1999 était de 0,3 tonne par hectare et par an [39]. Dans quelques cas, elle a atteint jusqu'à 10 t. Des valeurs de 1 à 2 t ont régulièrement été observées sur de petites surfaces.
- Le problème de l'érosion se rencontre aussi dans les herbages alpins. Ainsi, dans la vallée d'Urseren, le taux d'érosion enregistré lors d'une exploitation intensive dépasse nettement le taux de formation des sols [40]. Le taux d'érosion moyen se montait à 1,8 tonne par hectare et par an. Des valeurs de 30 t ont été enregistrées par endroits. Compte tenu des faibles taux de formation des sols, les pertes maximales tolérables dans ce cas seraient de 0,27 à 1,02 tonne par hectare et par an.
- La zone étudiée à Frienisberg (265 ha), au nord-ouest de Berne, sur le Plateau suisse, fournit des données actuelles sur le déroulement de l'érosion. Elle représente une région de grandes cultures typique de la Suisse. Des données sur l'évolution de l'érosion du sol y sont collectées sans interruption depuis 1998, ce qui

Ravines d'érosion



constitue un cas unique en Suisse et en Europe. L'érosion moyenne sur la période de 1998 à 2007 a dépassé 0,7 tonne de terre par hectare et par an. Les fluctuations annuelles étaient toutefois considérables. Ainsi, l'érosion annuelle la plus élevée (481 t) est dix fois supérieure à l'érosion la plus faible (42 t) (figure 15). Les résultats montrent en outre que seule une petite partie des parcelles cultivées d'une région présentaient de graves dégâts d'érosion. Les événements extrêmes jouent en l'occurrence un rôle déterminant : les six plus importants événements érosifs survenus entre 1998 et 2007 ont été responsables de plus de 50 % de la perte totale de sol. Ils se sont tous produits à des années et à des mois différents. L'érosion maximale enregistrée sur une seule parcelle était de 96 t. Durant la période de 1998 à 2007, la valeur indicative légale (tableau 3) a été dépassée sur 7 % des parcelles [35]. Depuis le début des mesures, l'érosion moyenne totale dans l'ensemble de la région s'est montée à près de 200 t par an pendant les dix premières années, mais à seulement 56 t par an au cours des neuf années suivantes (2007-2016). On observe ainsi une diminution marquée de plus de deux tiers entre les deux périodes [42]. Les causes de cette baisse ne sont pas encore entièrement éluci-

dées. Les changements apportés aux rotations et aux méthodes de travail du sol (grâce aux contributions cantonales et fédérales, la part des systèmes culturaux sans labour ménageant le sol a considérablement augmenté en de nombreux endroits) et la sensibilisation des exploitants de la région par des spécialistes (p. ex. un collaborateur du service de la protection des sols travaillant dans l'agriculture, un entrepreneur de travaux agricoles novateur) ont probablement eu une influence considérable. L'évolution mise en évidence dans la région étudiée ne saurait toutefois être simplement transposée à l'ensemble de la Suisse. Les résultats montrent toutefois qu'il est possible de diminuer l'érosion, y compris dans les conditions réelles de la pratique.

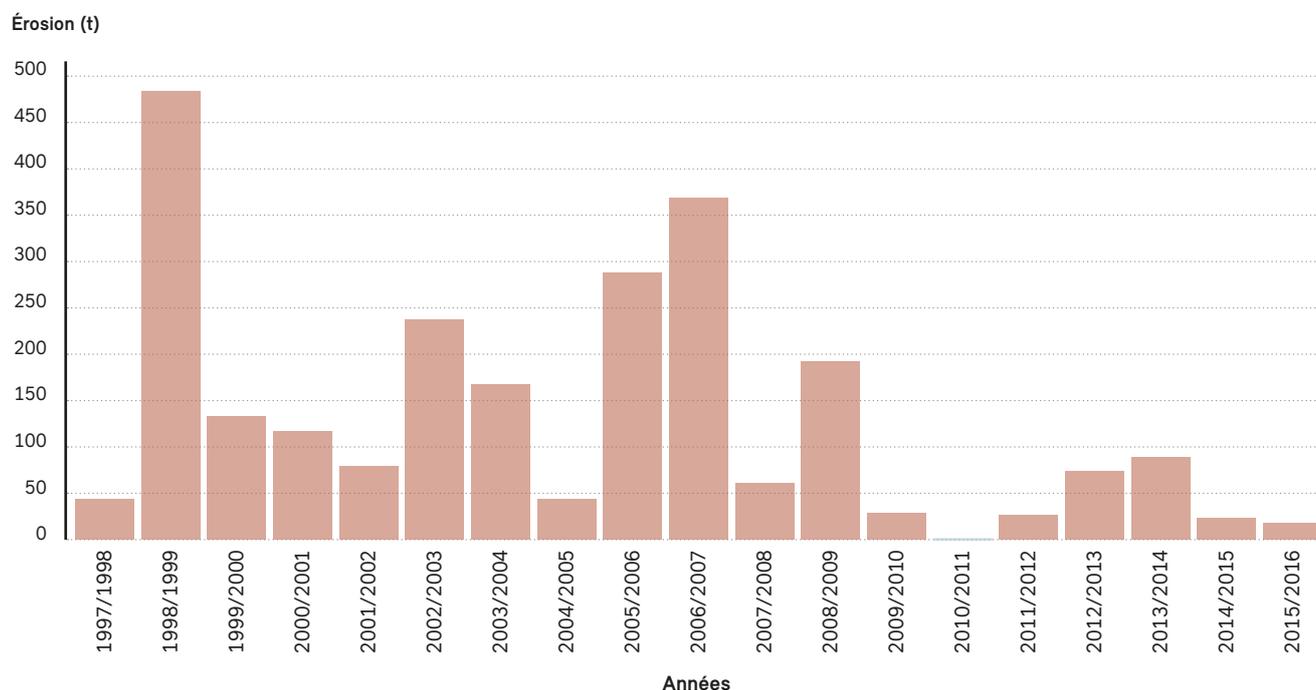
Tableau 3

Valeurs indicatives pour l'érosion selon l'OSol. Si elles sont dépassées, les cantons enquêtent sur les causes des atteintes et prennent des mesures.

Valeur indicative	Pertes de sol en tonnes par hectare et par an
Sols jusqu'à 70 cm d'épaisseur	2
Sols de plus de 70 cm d'épaisseur	4

Figure 15

Évolution de l'érosion annuelle en tonnes dans une région étudiée de 265 ha située au nord-ouest de Berne (Frienisberg) [42]



Les études montrent que l'érosion du sol est un phénomène largement répandu en Suisse et qu'elle se manifeste de façon très irrégulière dans l'espace et dans le temps [43]. Elle peut se faire discrète pendant plusieurs années jusqu'à ce que survienne une année de forte érosion. Par conséquent, des séries d'observation de longue durée sont nécessaires pour pouvoir déterminer avec fiabilité la masse de terre entraînée [44].

Compte tenu des pertes de sol mesurées et du risque d'érosion dans l'ensemble du pays, il apparaît qu'une partie des terres sont menacées par l'érosion. Une perte de sol de 1 à 2 tonnes par hectare et par an doit être considérée comme un événement érosif inquiétant qui nécessite des mesures. En de nombreux endroits, l'épaisseur des sols risque de diminuer.

De nombreuses surfaces vulnérables ne sont pas exploitées de manière adaptée au site, de sorte que le processus de perte de sol, peu visible et généralement progressif, diminue d'une manière générale la sécurité alimentaire et occasionne des coûts écologiques et économiques.

Évolutions futures

Il est difficile de prédire la façon dont le risque d'érosion évoluera au cours des prochaines décennies. D'une part, les techniques culturales freinant l'érosion (en particulier les cultures sans labour) se développent de plus en plus en Suisse, et les agriculteurs sont désormais mieux sensibilisés à ce problème. La Confédération soutient des mesures contre l'érosion du sol : depuis le 1^{er} janvier 2017, une nouvelle réglementation régit l'exécution. Si, après un événement érosif dû à l'exploitation, l'agriculteur met en œuvre des mesures appropriées, les paiements directs continueront de lui être versés. Dans le cas contraire, il s'expose à une réduction des paiements directs. D'autre part, certaines évolutions favorisent l'érosion :

- en raison du changement climatique, les fortes précipitations deviennent plus fréquentes ;
- le changement structurel dans l'agriculture favorise les grandes parcelles exploitées de façon intensive et augmente ainsi le risque d'érosion ;
- le travail intensif du sol avec des machines de plus en plus lourdes provoque une compaction du sol et, partant, favorise l'érosion ;

- en raison de l'extension des zones bâties dans les régions de plaine, les terres cultivées sont repoussées vers des terrains plus escarpés.

Glissements de terrain

L'érosion du sol est particulièrement visible lorsque des versants entiers se mettent à glisser. La plupart du temps, les mouvements de masse sont déclenchés par des pluies prolongées. Une faible couverture végétale favorise les glissements de terrain [45]. Lorsque des quantités parfois importantes de matériaux terreux se déplacent, la plupart des fonctions du sol sont fortement perturbées ou supprimées, et cela tant à l'endroit du glissement qu'à celui du dépôt des matériaux. Des modèles indiquent qu'il faut s'attendre à une fréquence accrue de phénomènes météorologiques extrêmes et donc de glissements de terrain.

Les glissements de terrain ne se produisent pas toujours en des laps de temps très courts et donc à des vitesses élevées [46]. La plupart d'entre eux se déroulent sur de longues périodes (quelques millimètres par an). En Suisse, 6 à 8 % du territoire sont affectés par des glissements de terrain (glissements actifs actuels et passés) [47].

Les glissements de terrain peuvent être déclenchés par des utilisations humaines du sol non adaptées au site :

- une utilisation agricole intensive de versants instables augmente le risque de glissement de terrain. Les racines d'arbres et de buissons peuvent améliorer la formation et la cohésion des agrégats ;
- une entaille dans le pied d'un versant, des conduites d'eau défectueuses et les compactations du sol peuvent déclencher des glissements ;
- une utilisation trop intensive réduit la diversité des espèces végétales ; dans les Alpes, on a pu démontrer que le sol présente une meilleure stabilité lorsqu'il est colonisé par une végétation diversifiée, qui plonge ses racines à des profondeurs variables [48].



2.3 Compaction du sol

Le sol est constitué pour moitié environ de pores remplis d'air et d'eau et connectés entre eux. Si ces derniers sont compressés ou que leur connexion est rompue, on parle de compaction du sol. Celle-ci peut être provoquée par la circulation d'engins lourds dans l'agriculture et la sylviculture et, sur les chantiers, par une mauvaise exécution des décapages, de l'entreposage et de la remise en place de matériaux terreux, par la pâture d'animaux trop nombreux et trop lourds, ou encore par la présence sur le sol d'un nombre excessif de personnes dans des installations de loisirs et pendant des manifestations récréatives (p. ex. concerts en plein air, fêtes de gymnastique, concours hippiques, moto-cross). L'humidité du sol et sa teneur en argile jouent un rôle déterminant dans la sensibilité à la compaction. Plus un sol est humide, plus il devient sensible à la compaction. À partir de précipitations de plus de 10 mm pendant 24 heures, tout travail du sol doit être considéré comme critique par rapport à la compaction [49].

Des accumulations d'eau temporaires dans les champs, en forêt et sur les chantiers sont des signes visibles de la compaction du sol et montrent que les eaux pluviales ne s'infiltrent plus suffisamment dans le terrain. Les compactations peuvent s'additionner et persister pendant très longtemps. La régénération naturelle de la porosité est un processus lent.

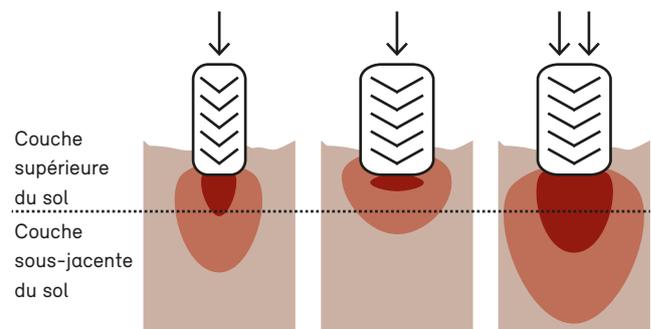
Les compactations sont particulièrement problématiques à partir d'une profondeur de 30 cm. Les machines et équipements lourds font pression sur ces zones même lorsque leur surface de contact est agrandie par des mesures techniques, comme l'utilisation de pneus plus larges et la diminution de la pression de gonflage (figure 16). Plus une compaction est profonde, plus elle est difficile à éliminer par l'ameublissement mécanique, l'activité des organismes du sol, l'action du gel et du dégel ou par le gonflement et le retrait de la terre. Dans de nombreux cas, ce genre de compactations se révèle irréversible ou demande plusieurs décennies pour disparaître.

Les compactations portent atteinte à la fertilité du sol et causent des dégâts écologiques et économiques [50].

Figure 16

Effet de la pression lors de la circulation sur le sol [51]

La figure montre les effets de deux charges par roue (une flèche : charge simple ; deux flèches : charge double) et de deux largeurs de pneus. La pression exercée sur le sol est la plus forte dans la zone rouge. Si la charge par roue augmente, la compaction atteint des zones de plus en plus profondes. L'utilisation de pneus larges ne permet de ménager la couche sous-jacente du sol que si la charge par roue n'augmente pas.



- La compaction perturbe les échanges de gaz et d'eau entre l'atmosphère et le sol et affecte ainsi d'importantes fonctions du sol. L'eau de pluie ne s'infiltré plus que lentement, la circulation de l'air est perturbée. Des conditions anaérobies peuvent apparaître.
- Les compactations du sol entravent la croissance des racines. Les plantes n'ont plus qu'un accès réduit aux réserves d'eau et d'éléments nutritifs. Cette situation peut entraîner des baisses de rendement considérables (figure 17) et rendre impossible une exploitation durable.
- Pour atteindre un même niveau de rendement, le travail et les coûts pour la préparation du sol et la fertilisation augmentent.
- Si les eaux pluviales ne peuvent s'infiltrer en raison de la compaction, l'érosion du sol peut s'aggraver lors de fortes pluies.

2.3.1 Agriculture

À la fin des années 1980, les spécialistes estimaient que 10 à 15% de la surface agricole était touchée par l'érosion [52]. Entre-temps, les véhicules et les engins utilisés dans l'agriculture, la sylviculture et le secteur du bâtiment sont devenus de plus en plus performants, mais généralement aussi plus lourds (figure 18). Dans des cas

Figure 17
Évolution des pertes de récolte après un épisode de compaction unique [51]

C'est directement après l'événement que la croissance des plantes est la plus affectée. Après cinq ans, la compaction de la couche supérieure du sol n'a pratiquement plus d'incidence, car le travail mécanisé du sol ajouté à l'action des organismes vivants et des racines ont permis d'ameublir le sol. En revanche, la compaction de la couche sous-jacente du sol persiste pendant une durée prolongée sans montrer d'évolution. Sur plusieurs décennies, il n'a été possible d'atteindre que 95 % environ du rendement potentiel en raison de la compaction de la couche sous-jacente du sol.

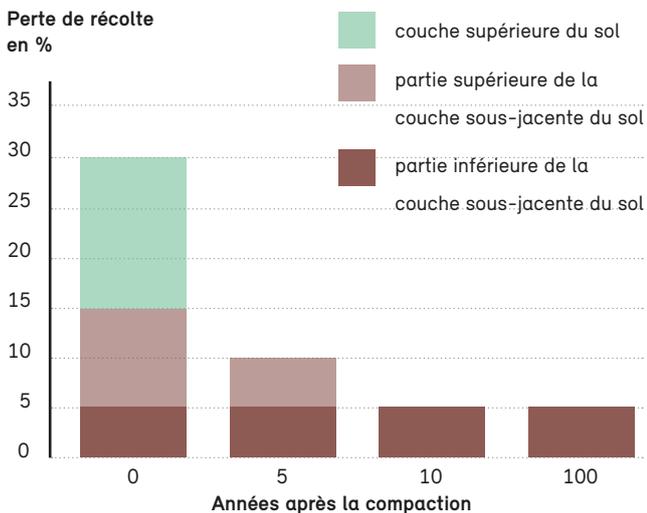
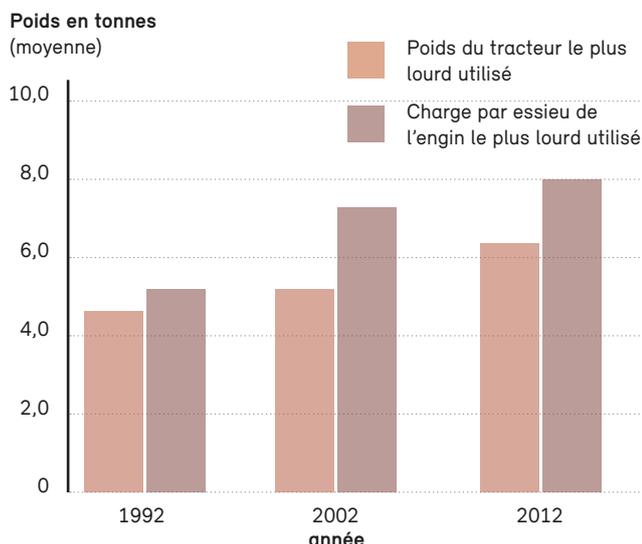


Figure 18
Évolution du poids des tracteurs et des charges par essieu dans des exploitations du canton de Bâle-Campagne pratiquant les grandes cultures sur la période allant de 1992 à 2012 [55]



extrêmes, les sols doivent supporter le poids de véhicules de 60 t avec des charges par roue atteignant jusqu'à 10 t. C'est nettement plus que le poids total maximal autorisé pour la circulation routière (40 t).

Des recherches effectuées sur des sols agricoles de Suisse centrale confirment que l'étendue actuelle de la compaction du sol dépasse sans doute largement les estimations des années 1980 et que ce phénomène est répandu en Suisse, où il est favorisé par les sols argileux et le climat humide. Sur la base de l'évaluation de spécialistes, on a estimé qu'environ un tiers des sites étudiés devaient être considérés comme faiblement à fortement touchés par des atteintes physiques au sol [53]. Il faut s'attendre au moins localement à des pertes de fonctions du sol dues aux compactations. Des études menées en Allemagne confirment l'ordre de grandeur de la part de surface touchée par la compaction du sol déterminé en Suisse centrale [54].

2.3.2 Sylviculture

Les compactations du sol forestier peuvent restreindre sa fonction d'habitat [56, 57]. Leurs conséquences pour les champignons et les bactéries qui y vivent et donc pour le rajeunissement sont considérables [58]. Elles favorisent les espèces bactériennes adaptées aux milieux pauvres en oxygène, ce qui entraîne la formation de protoxyde d'azote et de méthane ayant une incidence sur le climat. En outre, les champignons à mycorhizes vivant en bio-cénose avec les racines, qui revêtent une grande importance pour la croissance des arbres, disparaissent.

La proportion des surfaces atteintes est toutefois nettement plus faible en forêt que sur la surface agricole utile, et ce pour plusieurs raisons. En effet, la récolte des bois s'y fait en partie en hiver sur des sols gelés et donc portants. En outre, les engins ne circulent jamais sur toute la surface et leurs passages sont beaucoup moins fréquents que sur les terres cultivées. De plus, les sols forestiers sont souvent plus pierreux et donc moins sensibles à la compaction et, enfin, les forêts en pente ne sont pas accessibles aux véhicules.

Il n'en demeure pas moins que la compaction du sol par des engins lourds peut aussi avoir des conséquences localement considérables en forêt [59]. Les travaux de

déblaiement après la tempête Lothar (décembre 1999) ont causé en de nombreux endroits des dégâts et des atteintes aux sols.

Un premier relevé des ornières visibles effectué dans le cadre du troisième inventaire forestier national (2004 – 2006) a permis d'élaborer une vue d'ensemble au niveau suisse. Sur la base des relations entre l'aspect de l'ornière et la fonctionnalité du sol, on a défini un type d'ornière dont l'apparition signale clairement un dégât écologique dans le système sol. Au niveau suisse, 0,7 % de la surface forestière présente des ornières visibles de véhicules de récolte des bois [60]. Le pourcentage le plus élevé (2,2 %) est atteint sur le Plateau suisse, où ces engins sont le plus souvent utilisés. Les sols sont fortement dégradés sur 0,1 % de la surface forestière suisse.

Les données de base sur les aspects fondamentaux de la protection des sols forestiers contre les atteintes physiques sont désormais disponibles [59]. Les mesures proposées contribuent à limiter le plus possible les effets négatifs de la gestion des forêts.

2.3.3 Secteur de la construction

L'activité de construction d'infrastructures et de bâtiments reste très élevée (voir point 2.1). Les chantiers se situent aussi de plus en plus souvent dans des régions de montagne où les sols se régénèrent très lentement [61].

Lors de constructions, il arrive souvent que des quantités importantes de sol fertile soient décapées, entreposées puis réutilisées ultérieurement, par exemple pour la remise en état de terrains ou pour des remblais. Le sol est en outre sollicité temporairement pour des installations, des pistes ou des dépôts sur les chantiers. Si on ne fait pas suffisamment attention au sol, ces déplacements de matériaux et ces activités peuvent provoquer une compaction du terrain. Celle-ci entraîne en ville un affaiblissement, voire la perte d'importantes fonctions des sols, comme l'influence de l'évapotranspiration sur le microclimat, ou de la préservation de la nature – et donc de la qualité de vie – dans les agglomérations.

La prise de conscience que le sol est un bien environnemental non extensible et de plus en plus rare, et l'élaboration de bases légales, de directives et de programmes

de formation ont contribué à faire en sorte que la protection des sols est désormais bien acceptée dans le secteur de la construction [62]. Pour les projets prévoyant le décapage de sols, l'utilisation d'engins de chantier lourds ou le déplacement de quantités importantes de matériaux terreux décapés, les autorités recommandent d'engager un spécialiste de la protection des sols sur les chantiers, et cela dès la phase de planification. L'analyse de la pratique usuelle dans les cantons montre qu'un suivi pédologique est exigé pour les projets qui sollicitent temporairement une surface de plus de 5000 m² ou dans certaines situations délicates [63]. Des lacunes restent à combler au niveau des études préliminaires, des petits chantiers et en partie de l'engagement d'un spécialiste de la protection des sols sur les chantiers [62].

2.3.4 Prévisions concernant l'évolution de la compaction du sol

Les évolutions suivantes pourraient accroître la menace que la compaction présente pour les sols.

- Le poids des véhicules et des machines utilisées dans l'agriculture, la sylviculture et le secteur du bâtiment a encore tendance à augmenter [64].
- Le changement climatique devrait entraîner une humidité plus importante du sol et donc un risque accru de compaction [65].
- Les délais serrés fixés pour utiliser les machines (p. ex. pour la récolte et la logistique des betteraves sucrières) et pour livrer les produits agricoles (p. ex. livraison des légumes frais ne pouvant pas être stockés) exercent de plus en plus souvent une pression sur l'exploitation et la récolte [64]. Cette situation implique que le sol est exploité et parcouru par des véhicules même lorsque les conditions sont défavorables.
- Une récolte plus fréquente des bois sur des sols sensibles pourrait également accroître la menace.



2.4 Apports de polluants

Pratiquement tous les sols contiennent des concentrations plus ou moins importantes de polluants. Ceux-ci sont surtout constitués de métaux lourds, de substances organiques, de résidus de produits phytosanitaires et pharmaceutiques difficilement dégradables, ainsi que de radionucléides comme le césium. Ils proviennent parfois de sources naturelles, mais principalement d'activités humaines.

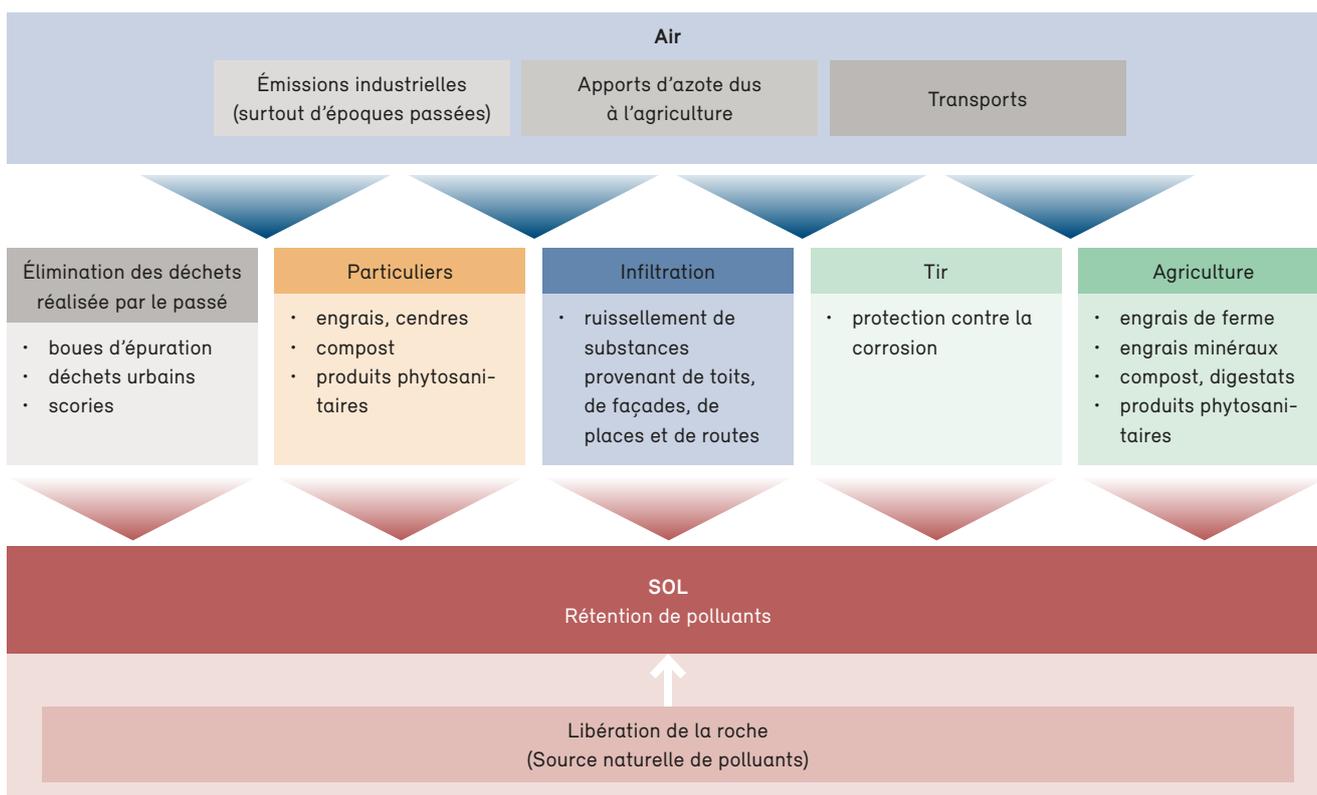
Les éléments et minéraux libérés par l'altération de la roche-mère constituent des sources naturelles de métaux lourds. Suivant les conditions chimiques, ils s'accumulent dans le sol ou y sont transformés ou lessivés. À cela viennent s'ajouter les polluants libérés dans l'environnement par les êtres humains à travers l'industrie, l'artisanat, les transports, l'agriculture et les ménages privés et qui parviennent tôt ou tard dans les sols, où ils s'accumulent et se superposent à la charge de fond naturelle (figure 19). Par exemple, les polluants atmos-

phériques rejetés par le passé par les cheminées d'évacuation dépourvues de filtres ont entraîné une importante pollution des sols au niveau local, voire régional [66].

Un nombre grandissant de polluants organiques tels que produits phytosanitaires, médicaments, adoucissants, agents ignifuges et divers additifs de produits ménagers et cosmétiques sont commercialisés par notre société industrielle. À l'heure actuelle, 18 000 substances chimiques sont en circulation dans l'industrie et les ménages en Suisse. Une partie de ces substances parviennent dans l'environnement et se dispersent dans les sols et dans les eaux, où certaines présentent un risque du fait de leur toxicité. Une fois dans le sol, les polluants organiques subissent une série de processus de transfert et de transformation. Comme il s'écoule souvent plusieurs dizaines d'années entre le moment où de nouvelles substances sont mises en circulation et celui où elles apparaissent dans le sol et entraînent des conséquences pour les humains, les animaux et l'environnement, les analyses

Figure 19

Voies d'apport des polluants dans le sol



environnementales et le législateur ont toujours du retard sur les évolutions [67].

Les polluants peuvent être liés et en partie dégradés dans le sol. La capacité de filtre et de tampon d'un sol dépend beaucoup de ses propriétés, mais aussi des caractéristiques du polluant ainsi que des quantités déjà présentes dans le sol. Suivant le contexte, une partie plus ou moins importante des polluants est absorbée par les plantes ou s'infiltré dans les eaux souterraines, et peut au final aboutir dans la chaîne alimentaire humaine.

Les communautés biologiques du sol sont également menacées. À partir d'une certaine quantité, les polluants peuvent perturber la croissance et la reproduction des organismes du sol. La biodiversité diminue, provoquant une perte de fertilité et une dégradation des propriétés du sol. Des fonctions importantes comme l'apport d'éléments nutritifs, la rétention hydrique ou la purification de l'eau potable sont ainsi affectées.

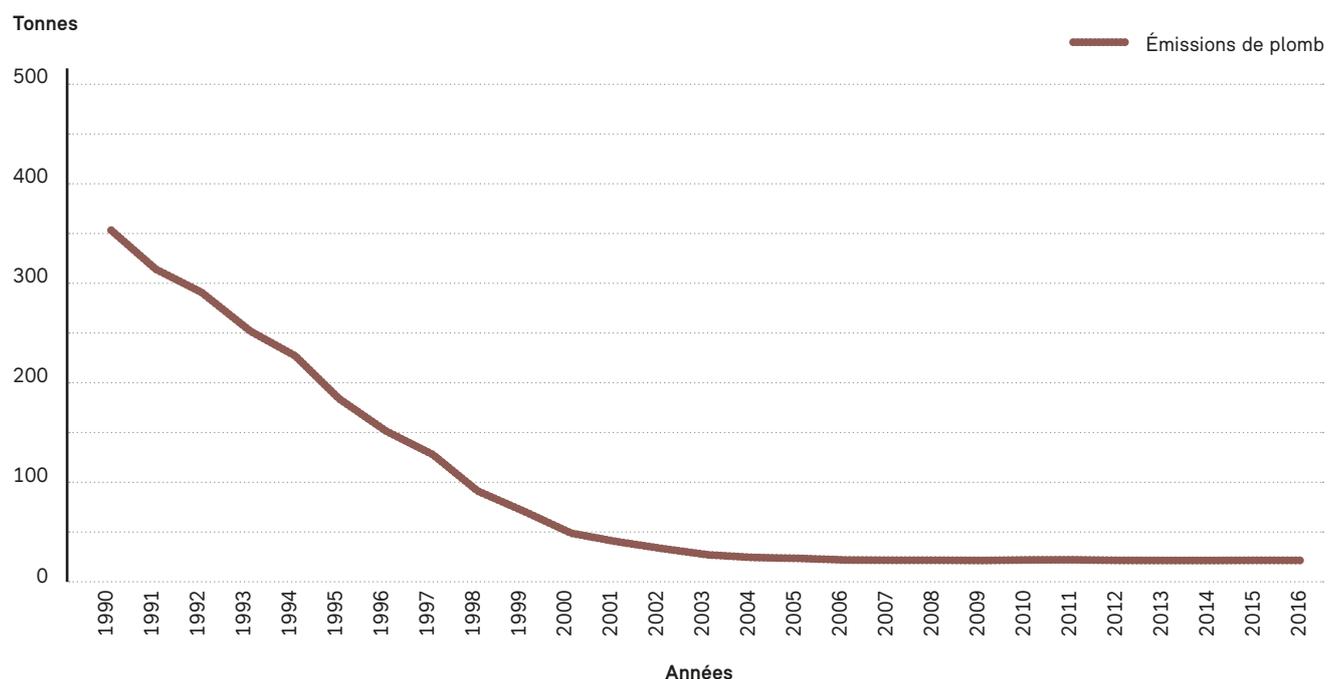
2.4.1 Atteintes provoquées par l'industrie, l'artisanat et les transports au niveau suisse

Les processus de transformation et de combustion du secteur industriel et artisanal et les transports routiers et ferroviaires génèrent des émissions de métaux lourds et de polluants organiques dans l'atmosphère. Ceux-ci sont transportés sur des distances plus ou moins longues et aboutissent dans les sols. C'est la raison pour laquelle il n'existe plus de sols indemnes de toute pollution en Suisse [68].

Les réglementations légales (p.ex. renforcement des prescriptions en matière de protection de l'air, interdiction de l'essence contenant du plomb, interdiction d'épandage de boues d'épuration) ont permis d'abaisser sensiblement les apports de polluants dans l'ensemble du territoire. Les résultats du Réseau national de l'observation des polluants atmosphériques (NABEL) montrent que les valeurs limites des retombées de poussières et des métaux lourds sont respectées depuis des années dans toute la Suisse

Figure 20

Les émissions de plomb ont fortement diminué depuis 1990. Le mercure et le cadmium présentent une évolution similaire. Le principe de précaution reste toutefois applicable, car les métaux lourds s'accumulent dans la chaîne alimentaire et les écosystèmes et ne peuvent pratiquement plus être éliminés.



[69]. L'interdiction de l'essence contenant du plomb en particulier s'est révélée efficace (figure 20).

Ainsi, aucune variation notable n'a été constatée au cours des vingt dernières années par l'Observatoire national des sols NABO pour les éléments cadmium, nickel, chrome et cobalt (tableau 4). Les teneurs en plomb et en mercure de la couche supérieure du sol ont même nette-

ment diminué. Ces éléments ont été en partie éliminés du sol, notamment par la récolte des plantes qui les avaient absorbés, et en partie déplacés dans les couches plus profondes par l'activité de fouissage des vers de terre notamment (bioturbation).

Des analyses de la concentration de polluants dans des mousses ont confirmé la diminution des dépôts atmos-

Tableau 4
Tendances générales en fonction de l'utilisation du terrain pour les teneurs en métaux lourds des quelque 100 sites sur lesquels l'Observatoire national des sols NABO prélève des échantillons [15].

→ teneurs constantes. ↘ teneurs en baisse. ↗ teneurs en hausse (cf. point 2.4.3)

	cadmium	zinc	cuivre	mercure	plomb	nickel	chrome	cobalt
Grandes cultures	→	↗	↘	↘	↘	→	→	→
Herbages								
intensifs	→	↗	↗	↘	↘	→	→	→
peu intensifs	→	→	→	↘	↘	→	→	→
extensifs	→	→	↘	↘	→	→	→	→
Forêts								
feuillus	→	→	→	↘	→	→	→	→
mixtes	→	→	↘	↘	↘	→	→	→
résineux	→	→	→	↘	→	→	→	→
Cultures spéciales								
légumes	→	→	→	→	→	→	→	→
fruits	→	→	→	→	→	→	→	→
vigne	→	→	→	↘	↘	→	→	→
Autres								
site protégé	→	↘	→	↘	↘	→	→	→
parc urbain	↘	↘	→	↘	↘	→	→	→

Pollution au césium après Tchernobyl

La catastrophe nucléaire de Tchernobyl du 26 avril 1986 a clairement montré que les sols pouvaient être rapidement pollués à grande échelle par un seul événement. L'explosion de la centrale nucléaire et l'incendie qui a suivi ont dégagé de grandes quantités de substances radioactives. À partir du 30 avril, une partie d'entre elles se sont aussi déposées en Suisse. La figure 21 montre la répartition géographique de la déposition de césium résultant de l'accident de Tchernobyl sur le territoire suisse [73]. Comme de fortes précipitations se sont produites au Tessin lors du passage du nuage radioactif, c'est dans cette région que la plus grande quantité d'éléments radioactifs a été déposée sur le sol et les plantes. La région du lac de Constance et différents endroits du Jura ont également été touchés, mais dans une moindre mesure. Dans le reste de la Suisse, les retombées ont été inférieures à celles des essais nucléaires (bombes atomiques) des années 1950 et 1960.

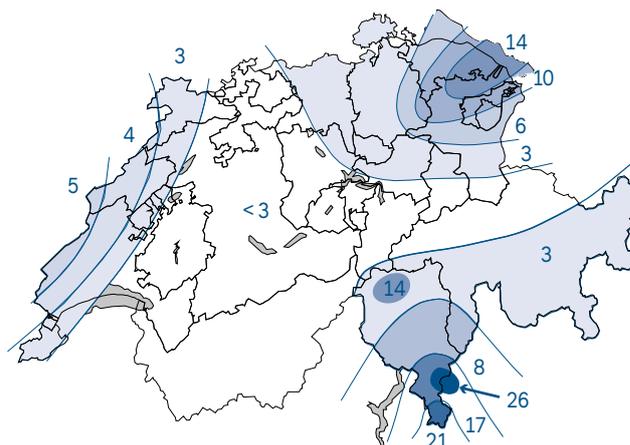
Aujourd'hui encore, 30 ans après l'accident nucléaire, le césium 137 (demi-vie : 30 ans) est toujours mesurable. C'est en particulier le cas au Tessin, bien que ce nucléide ait depuis lors décliné et pénétré dans les couches plus profondes du sol [74]. C'est toutefois aussi précisément là que pousse la truffe du cerf, un champignon qui a la particularité d'accumuler le césium. Il n'est pas comestible pour l'homme, mais les sangliers en sont friands. S'ils en mangent beaucoup durant le mois qui précède la chasse, leur viande peut aujourd'hui encore être fortement contaminée. En 2015, un dépassement de huit fois la valeur limite pour le césium 137 a été enregistré chez un sanglier.

phériques [70]. Ainsi, entre 1990 et 2010, la teneur en cadmium et en mercure a reculé respectivement de 58 % et de 40 % au niveau suisse.

La concentration de plomb a même chuté de 87 % et celle de zinc de 33 %. Quant au cuivre, aucune modification n'a été constatée dans les mousses. Cependant, étant donné

Figure 21

Déposition de césium 137 en kBq par mètre carré sur le territoire suisse due à l'accident de Tchernobyl [73]



que les polluants restent dans le sol une fois qu'ils s'y sont déposés, l'évolution à long terme des rejets polluants dans l'environnement doit continuer d'être suivie dans le cadre de la protection du sol.

Les polluants organiques aussi sont omniprésents dans les sols. En raison de leur persistance et de leur toxicité, ils ont assez rapidement attiré l'attention des milieux scientifiques et des autorités. Ainsi, l'OSol renferme des valeurs limites pour quatre groupes de polluants organiques : les dioxines polychlorés (PCDD), les furanes (PCDF), les polychlorobiphényles (PCB) et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (PAH). Les concentrations dans les sols suisses restent toutefois en général nettement inférieures aux valeurs limites [67]. Au cours des 30 dernières années, les teneurs en PAH lourds sont restées stables, tandis que celles en PAH légers ont reculé [71]. De même, l'évolution temporelle des PCB n'est pas préoccupante à l'heure actuelle. S'agissant des paraffines chlorées, les résultats ne sont pas univoques et des investigations supplémentaires seront nécessaires [72].

2.4.2 Pollution le long des voies de transport

Les projections de poussières, de gravillons et d'eau le long de routes à fort trafic sont chargées de polluants qui proviennent de l'abrasion des freins, des pneus et de la chaussée ou qui sont émis par les moteurs à combustion. Si la plus grande partie d'entre eux est évacuée avec les

eaux de chaussée, une partie est aussi déplacée par le vent et les projections d'eau et aboutit dans la bande de terrain et les talus longeant les routes. Les concentrations de polluants dépendent avant tout de l'intensité du trafic.

Le sol aux abords des routes à fort trafic présente une charge considérable en plomb, en cadmium, en zinc et en composés organiques (surtout des PAH), comme l'ont montré des études menées au niveau national [75] et dans les cantons [76, 77, 78]. La pollution diminue toutefois nettement lorsqu'on s'éloigne de la route (figure 22). À une distance de plus de 5 à 10 m, les teneurs en métaux lourds sont dans la plupart des cas inférieures aux valeurs limites fixées dans l'OSol.

Pour les PAH, la valeur indicative est le plus souvent dépassée même dans les zones plus éloignées des routes. La charge en PAH dépend surtout de la nature et de l'état de la chaussée.

Dans la pratique, une bande de 10 mètres de large le long des grandes routes est considérée à titre préventif comme polluée [44]. Il n'est pas autorisé de déposer ces sols décapés le long des voies de communication sur des surfaces agricoles.

Des bandes de sol polluées se trouvent aussi le long des lignes ferroviaires. Les polluants (cuivre et cadmium principalement) proviennent ici de l'abrasion des rails, des freins et des caténaires. L'ampleur de la pollution est toutefois moindre par rapport aux routes [79]. Les valeurs observées sont le plus souvent inférieures à la valeur indicative.

2.4.3 Pollution locale et ponctuelle par l'agriculture

Outre les dépôts atmosphériques, des polluants organiques et inorganiques sont aussi apportés sur de vastes surfaces de sols agricoles sous forme de substances actives de produits phytosanitaires et d'impuretés contenues dans les engrais minéraux et les engrais de ferme.

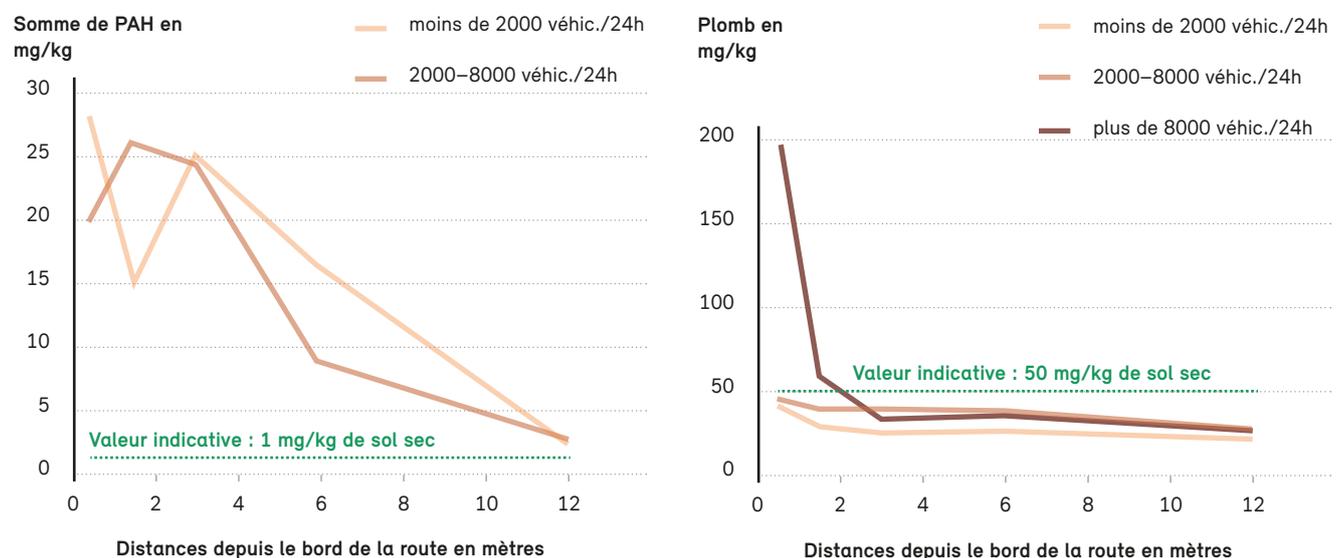
Apports avec les engrais de ferme

L'Observatoire national des sols NABO relève une hausse régulière des concentrations de zinc et de cuivre dans les sols des herbages intensifs (figure 23). À ce rythme, les valeurs indicatives seront dépassées d'ici 80 à 200 ans [15]. Des mesures effectuées dans les cantons confirment ces concentrations croissantes de cuivre et de zinc dans les sols agricoles suisses. En Argovie, près de la moitié des sites de grandes cultures présentent une hausse de la teneur en cuivre [80] et une augmentation

Figure 22

Pollution du sol par des PAH et par le plomb le long de routes en fonction de la distance depuis le bord de la chaussée et du trafic [78]

Véhic. = véhicules à moteur



importante de la teneur en zinc a été constatée dans le canton de Saint-Gall [81].

Il a été démontré que les hausses particulièrement marquées de ces deux métaux lourds sont imputables à l'utilisation d'engrais de ferme (lisier de porcs et de bovins, mais aussi fumier) [15]. Le zinc et le cuivre sont ajoutés aux fourrages concentrés en tant que compléments alimentaires et pour accroître la productivité, et ils 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 analyses ont montré que les apports de zinc et de cuivre étaient en général supérieurs aux recommandations [82]. On peut en déduire que les quantités de zinc et de cuivre contenues dans les aliments pour animaux pourraient être notablement réduites, et cela sans conséquences négatives ni pour les animaux de rente ni pour les agriculteurs.

En vertu de l'art. 33 de la loi sur la protection de l'environnement (LPE), la fertilité des sols doit être garantie à long terme ; or la hausse de la teneur en cuivre et en zinc des sols est contraire à cette disposition. Dans de tels cas, les cantons doivent prendre des mesures en accord avec la Confédération. Une concentration excessive de zinc dans le sol entraîne des retards de croissance et des

troubles du métabolisme chez les plantes. Les agriculteurs doivent s'attendre à des pertes de récolte.

Le lisier contient aussi des médicaments vétérinaires qui aboutissent par cette voie dans les champs, les prairies et les pâturages. La plus grande partie des substances actives sont en effet éliminées telles quelles par les animaux de rente. Les médicaments vétérinaires peuvent non seulement s'accumuler dans le sol et y modifier la composition des communautés de microorganismes [83, 84], mais aussi favoriser le développement de résistances aux antibiotiques [85]. Il n'existe pas d'études récentes consacrées à la fréquence et aux concentrations des antibiotiques dans les sols agricoles suisses [67]. Les résultats disponibles proviennent d'essais expérimentaux.

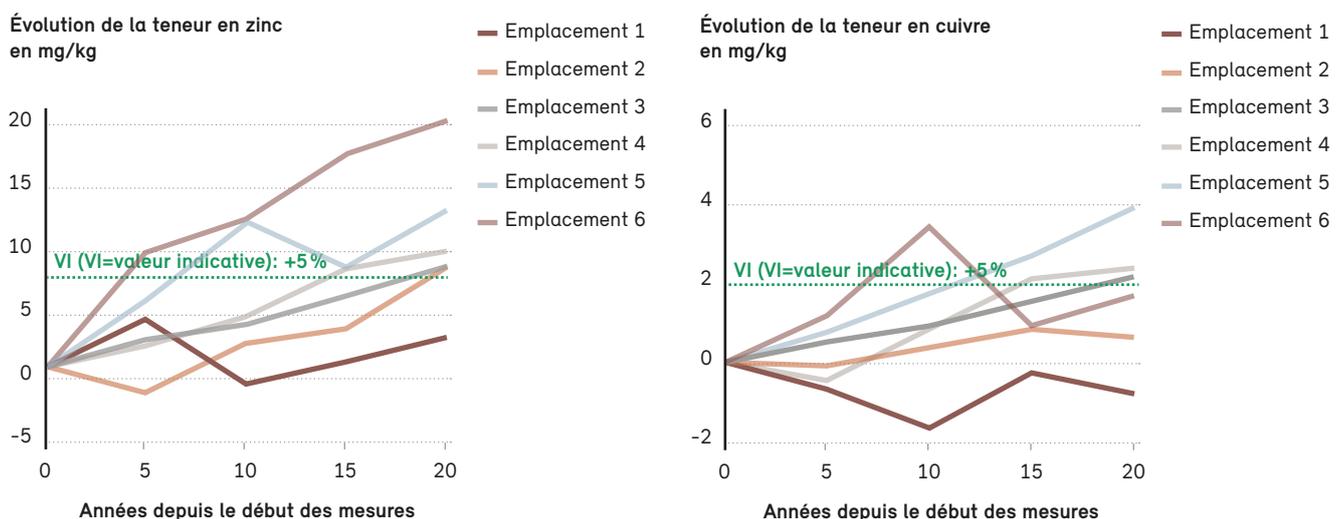
Apports avec les engrais minéraux

Des études actuelles d'échantillons de sol des programmes de suivi nationaux et cantonaux montrent que l'utilisation d'engrais minéraux dans la production agricole peut entraîner des apports accrus de métaux potentiellement toxiques dans les terres assolées [86]. C'est en particulier le cas du cadmium et de l'uranium [87].

En ce qui concerne les métaux lourds, les exigences du droit relatif aux engrais minéraux, organiques et organominéraux ne sont pas toujours entièrement respectées.

Figure 23

Évolution des teneurs en zinc et en cuivre dans le sol de six sites d'exploitation herbagère intensive du réseau de mesure NABO



Des dépassements de la valeur indicative du cadmium sont relativement fréquents. Les résultats d'analyse de dix métaux lourds montrent que les engrais minéraux phosphatés présentent des teneurs particulièrement élevées en métaux lourds [88]. Il est donc réjouissant que les importations d'engrais minéraux phosphorés aient pu être réduites depuis le début des années 1990 grâce à l'optimisation permanente de la gestion des éléments nutritifs dans l'agriculture suisse [64]. Le potentiel de réduction n'est toutefois pas encore épuisé, comme le montre le bilan national du phosphore : en 2012, on enregistrait en moyenne des excédents annuels de 2 kilogrammes de phosphore par hectare de surface agricole [89]. La fumure excessive des sols au phosphore s'observe aussi bien dans les grandes cultures que dans les herbages [90].

Pollution causée par les produits phytosanitaires

Dans les régions d'agriculture intensive, l'environnement est exposé aux produits phytosanitaires. Ceux-ci présentent un risque non seulement pour la biodiversité aquatique et terrestre (p.ex. poissons, batraciens, pollinisateurs) [91], mais aussi pour la biodiversité du sol, et donc pour sa fertilité. Par conséquent, l'objectif environnemental pour l'agriculture relatif aux produits phytosanitaires (« Éviter les atteintes environnementales et

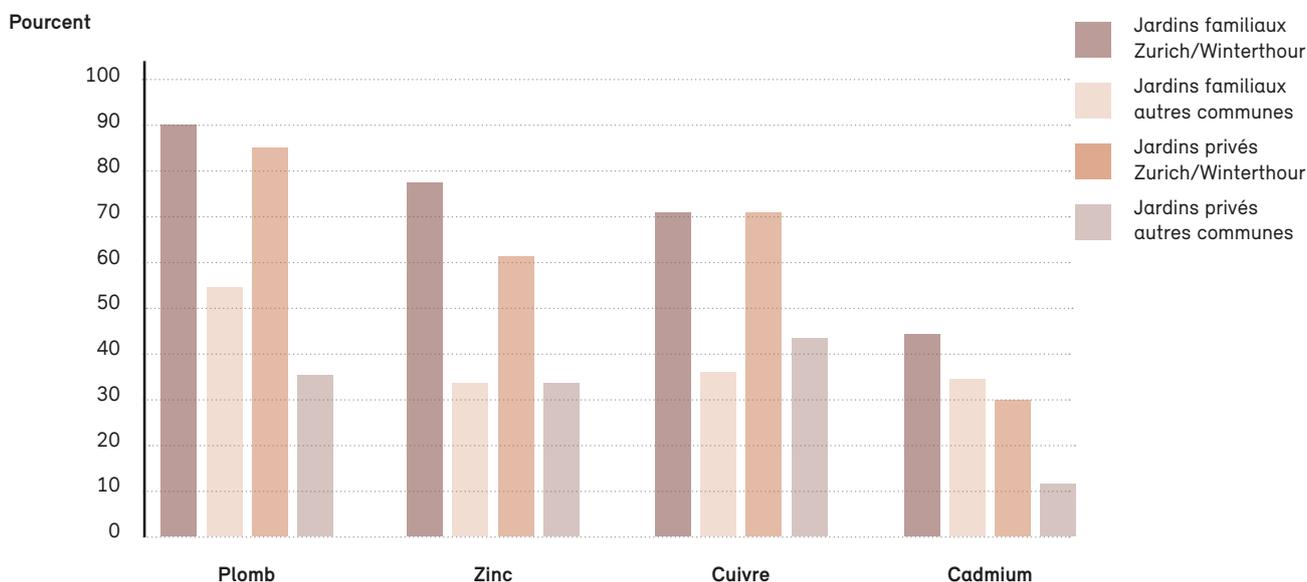
sanitaires liées à des produits phytosanitaires issus de l'agriculture ») est considéré comme non atteint [64].

Environ 250 substances actives sont homologuées en Suisse. Sur certains sites agricoles de l'Observatoire national des sols NABO, dix substances actives de produits phytosanitaires sont épandues par année en moyenne. Une étude pilote de l'observatoire a montré que sur 80 substances actives, 73 % restaient décelables dans le sol longtemps après leur application [67]. L'atrazine a même été trouvée dans 85 % des échantillons de sol. Il n'existe pas à proprement parler de monitoring pour les produits phytosanitaires dans le sol.

Une étude cantonale s'est penchée sur la pollution du sol aux pesticides organochlorés [92]. Des traces de l'ordre de quelques microgrammes de ces pesticides et de leurs produits de dégradation ont été découvertes dans tous les types d'utilisation du sol étudiés. Les pesticides organochlorés ont pratiquement cessé d'être utilisés, mais ils sont chimiquement très stables. Il s'agit de produits comme le dichlordiphényltrichloréthane, l'aldrine, la dieldrine, l'endosulfan et le lindane, qui ont été employés depuis les années 1950 pour lutter en particulier contre des insectes, des maladies fongiques et des acariens. Depuis l'entrée en vigueur de la Convention de Stockholm

Figure 24

Pourcentage de jardins familiaux et privés zurichois présentant une teneur en métaux lourds supérieure à la valeur indicative de l'OSol
Échantillons du service de la protection des sols provenant de 205 jardins familiaux et de 94 jardins privés de différentes communes [103]



en 2004 et de son complément en 2009, les pesticides organochlorés les plus dangereux sont interdits ou leur utilisation est fortement restreinte au niveau mondial. Cependant, leurs produits de dégradation resteront décelables dans le sol pendant plusieurs décennies.

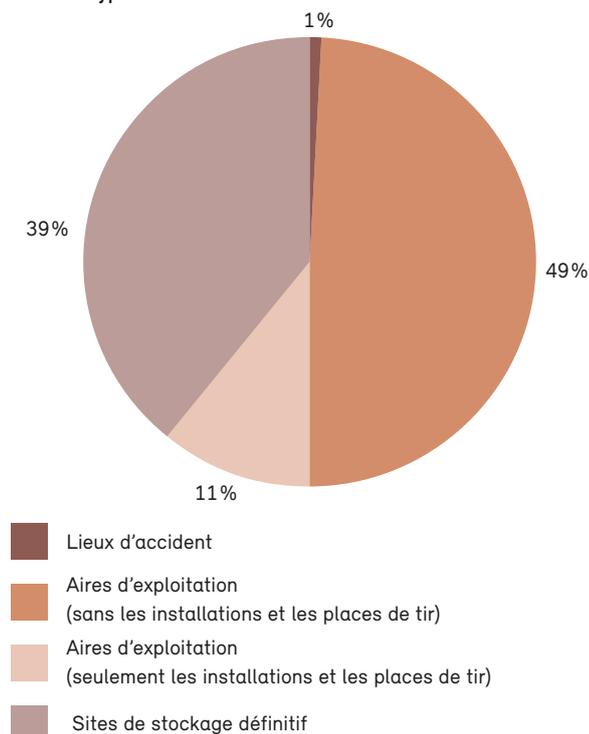
Teneurs en cuivre dans les vignes

Des augmentations continues des teneurs en cuivre sont enregistrées partout en Suisse dans des sites de cultures agricoles spéciales, notamment dans les régions viticoles et les pépinières [66, 93, 94]. Cette situation n'a rien d'étonnant, car le cuivre n'est pas biodégradable et continue d'être apporté par pulvérisation en quantités supérieures à celles pouvant être éliminées par lavage.

Figure 25

Origine des atteintes actuelles à l'environnement causées par des sites contaminés [105]. Les aires d'exploitation (y c. les installations et les places de tir) représentent plus de la moitié de la totalité des sites pollués.

Part des types de lieux



Le cuivre a été très utilisé en particulier durant les années 1920 à 1950. Depuis les années 1980, les doses appliquées par hectare et par an ont nettement diminué [95]. L'accumulation a ainsi pu être ralentie, à défaut d'être stoppée.

2.4.4 Pollution locale et ponctuelle par les ménages privés

En raison de la forte influence humaine à laquelle ils sont exposés, la plupart des sols urbains sont pollués [96, 97, 98]. En effet, l'utilisation intensive pendant de nombreuses années de jardins privés et familiaux a notamment laissé des traces évidentes dans de nombreux sols (figure 24). Par rapport à l'ensemble de la zone urbaine, ce sont eux qui présentent les charges les plus élevées en polluants [99]. Cette situation résulte notamment de l'utilisation intensive d'engrais minéraux, de compost pollué, de produits phytosanitaires et de cendres (de foyers, de grillades, de chauffages au bois), ainsi que de l'enfouissement et la combustion de déchets (surtout dans les sites anciens). En outre, les jardins se trouvent dans un environnement urbain (apports de polluants émis par l'industrie, l'artisanat et les transports) et parfois sur les sites d'anciennes décharges recouverts et remis en culture.

Les engrais et les produits phytosanitaires en particulier ont été et sont encore souvent employés à des doses beaucoup trop élevées [100]. Ainsi, pour la plupart des produits, la quantité moyenne de substance active utilisée par mètre carré dépasse nettement le dosage normal (parfois jusqu'à cinquante fois la dose recommandée).

Diverses études cantonales attestent la charge élevée en polluants de ces sols [44, 92, 99, 101, 102], la pollution pouvant toutefois être extrêmement variable d'un jardin à l'autre sur un même site. Les concentrations de PAH sont comparables à celles relevées au bord des routes, les teneurs en plomb sont dans de nombreux cas même plus élevées [44].

Bien que l'utilisation de pesticides organochlorés soit interdite depuis plusieurs dizaines d'années, de fortes concentrations ont été relevées dans les sols de jardins familiaux [92]. Il faut partir du principe que dans les années 1970 et 1980, elles étaient encore nettement plus

élevées et présentaient ainsi une menace plus importante pour les plantes, les animaux et l'être humain. Les concentrations actuellement enregistrées dans les jardins pourraient être expliquées par la stabilité des substances actives dans les sols ; en outre, il est probable que les jardiniers ont continué d'employer leurs stocks résiduels de produits après l'interdiction de vente et d'utilisation frappant ces derniers.

En général, la pollution ne présente pas de risque sanitaire pour les jardiniers, car la plupart des plantes alimentaires n'absorbent que de très faibles quantités de métaux lourds et de PAH présents dans le sol. Cependant, les enfants en bas âge sont particulièrement vulnérables en raison de leur faible poids (concentration plus rapide du polluant) et de leur propension à ingérer directement la terre. Conformément au principe de précaution et à celui d'une utilisation durable du sol, il importe d'éviter que les jardins ne soient davantage pollués.

Pollution résultant de l'élimination de boues d'épuration

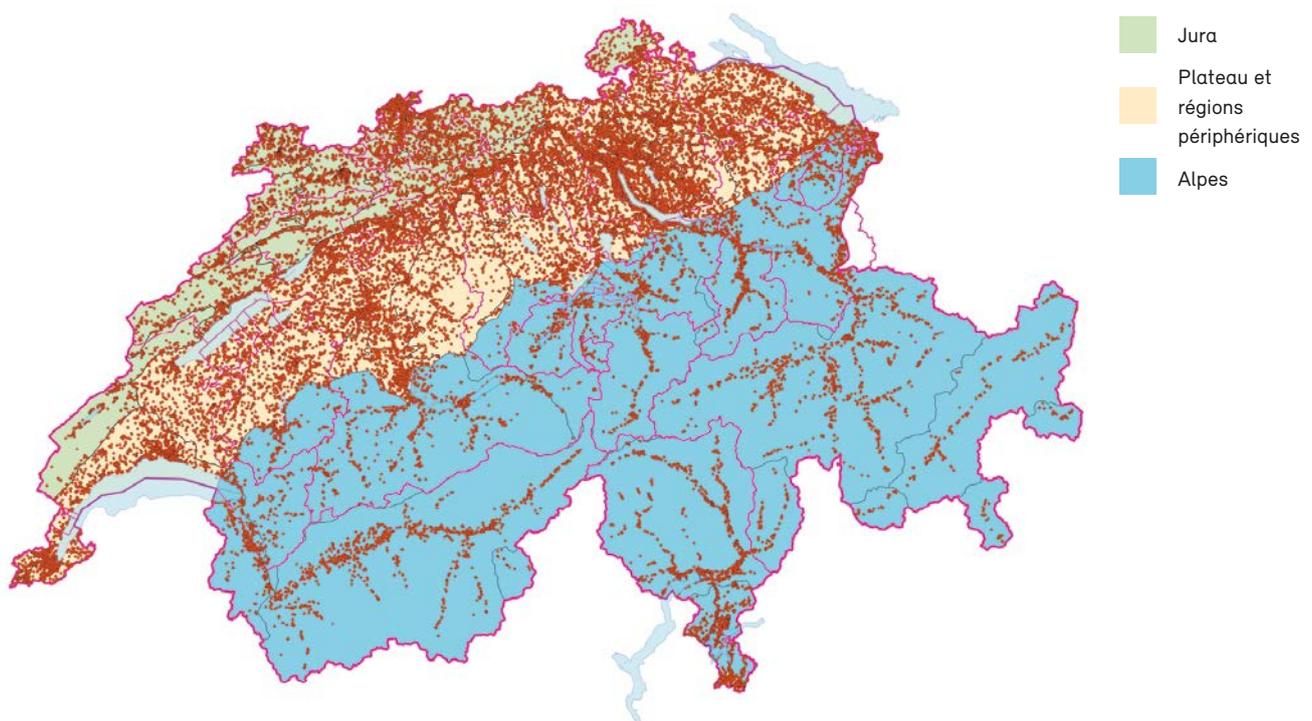
À partir des années 1960, les boues issues des stations d'épuration des eaux usées ont été valorisées sur les surfaces agricoles et sylvicoles, afin de réintroduire dans le cycle naturel les éléments nutritifs et la matière organique qu'elles contenaient. Cependant, les boues d'épuration sont aussi polluées par des métaux lourds, des résidus de médicaments, des particules de plastique et des hormones. À des concentrations excessives, ces substances peuvent avoir des effets préjudiciables sur les écosystèmes et les êtres humains.

C'est pourquoi leur utilisation comme engrais dans l'agriculture est interdite depuis 2006 à la fois pour des raisons sanitaires et pour protéger les sols. Aujourd'hui, elles sont incinérées dans des installations spéciales ou dans des usines d'incinération des ordures. Elles peuvent aussi être valorisées après séchage comme combustible auxiliaire dans des cimenteries.

Figure 26

Répartition des 38 000 sites pollués en Suisse [105]

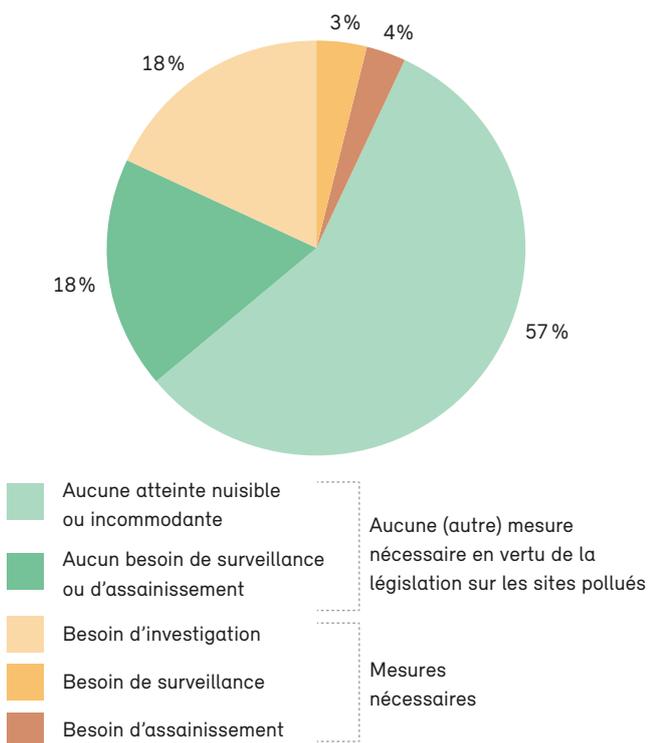
Le Plateau comprend en moyenne 1,9 site pollué par km², le Jura 1,2 et les Alpes 0,3 seulement. Leur répartition géographique reflète la densité de la population et l'intensité de l'activité économique. Chaque point correspond à un site pollué (pas à l'échelle).



Comme les métaux lourds s'accumulent dans le sol, les traces des épandages de boues d'épuration pratiqués surtout dans les années 1960 et 1970 sont aujourd'hui encore décelables dans les sols. D'une manière générale, l'utilisation de boues d'épuration a entraîné une augmentation de la pollution des sols par les métaux lourds (en particulier cadmium et zinc).

Pour le canton de Zurich, l'ampleur de la pollution est connue. Environ 400 parcelles agricoles d'une surface totale de 400 ha ayant reçu des apports de boues d'épuration y sont inscrites dans le périmètre d'investigation pour les déplacements de sol (Prüfperimeter für Bodenverschiebung). Douze sites de la surveillance cantonale des sols du canton de Zurich se trouvent sur ces anciennes surfaces d'épandage. Les mesures montrent que les teneurs en cadmium n'ont pas augmenté entre 2000 et 2010, mais qu'elles n'ont pas diminué non plus [104]. Deux tiers des sites présentent des dépassements de la valeur indicative ou du seuil d'investigation.

Figure 27
Répartition des 38000 sites pollués d'après leur statut selon l'ordonnance sur les sites contaminés



Source : OFEV

2.4.5 Pollutions locales et ponctuelles causées par différents acteurs

De nombreuses pollutions du sol limitées dans l'espace, causées par des déchets provenant d'une source clairement identifiée, sont recensées en Suisse. Il s'agit notamment de sites industriels (généralement désaffectés), de sites de stockage définitif de déchets urbains et de déchets de l'industrie et de l'artisanat (décharges), d'installations et places de tir, et de lieux d'accident (figure 25). Les atteintes actuelles à l'environnement sont principalement dues à la gestion négligente au siècle passé de substances dangereuses pour l'environnement et d'autres déchets problématiques.

Le recensement systématique réalisé par les services cantonaux et fédéraux compétents a révélé l'existence de quelque 38 000 sites pollués en Suisse (figure 26). Ils couvrent près de 225 km², soit 0,6 % du territoire helvétique, ou l'équivalent de la surface du canton de Zoug. Plus de la moitié de ces sites se trouvent en zone à bâtir. Selon les relevés effectués jusqu'ici, 10 % des sites pollués (4000) sont considérés comme des sites contaminés et présentent un risque potentiel pour la population

Pollutions des sols dans les stands de tir

On dénombre en Suisse près de 1500 installations de tir communales désaffectées et 2500 en exploitation. Leurs buttes pare-balles renferment plusieurs milliers de tonnes de plomb et d'autres métaux lourds dus à la pratique du tir [106].

Dans de nombreuses installations en service, il est encore habituel de tirer directement dans le sol. À l'heure actuelle, cette activité est celle qui introduit le plus de plomb dans l'environnement. Lorsque des buttes pare-balles polluées menacent des eaux souterraines, des eaux de surface ou des sols, des mesures doivent être prises pour éliminer le danger.

L'installation d'un système pare-balles artificiel capable de retenir les projectiles ainsi que les éclats, les poussières et les lixiviats permet d'éviter la pollution du sol. De plus en plus d'installations sont équipées de ce genre de système.

et pour l'environnement (figure 27). En 2015, près de 1000 sites contaminés avaient déjà été assainis.

La LPE est entrée en vigueur en Suisse au début de l'année 1985. Depuis lors, la Confédération a progressivement renforcé les prescriptions régissant la gestion des déchets et des produits chimiques dangereux pour l'environnement. L'apparition de nouvelles aires d'exploitation polluées ou de nouveaux sites de stockage contaminés est désormais pratiquement exclue.



2.5 Perte d'humus

Des organismes du sol se nourrissent de résidus végétaux, de cadavres d'animaux et de déjections animales et les transforment en une matière organique plus ou moins stable : l'humus. Lorsque l'activité biologique est intense, une grande partie de l'humus contenu dans la couche supérieure du sol se lie aux particules minérales du sol, contribuant ainsi à la formation d'un horizon pédologique de couleur foncée à la structure meuble.

L'humus influence directement ou indirectement la plupart des fonctions du sol. Constituant une source de nourriture pour les plantes et emmagasinant l'eau, le carbone ainsi que les polluants, il retient aussi les éléments polluants empêchant leur transfert dans les eaux. En outre, il favorise la formation de grumeaux stables et contribue ainsi à protéger la surface du sol contre l'érosion.

La teneur en humus revêt une extrême importance non seulement pour la fertilité du sol, mais aussi pour le cycle du carbone. En effet, les sols constituent le plus grand réservoir terrestre de carbone et, partant, remplissent une fonction importante dans la fixation du dioxyde de carbone (CO₂), un gaz ayant une influence sur le climat. Les marais qui se sont formés depuis la fin de la dernière glaciation, en captant le CO₂, auraient d'ailleurs eu un effet de refroidissement sur le climat.

Au niveau mondial, les sols retiennent davantage de carbone que l'atmosphère et la végétation réunies. Bien qu'ils ne couvrent que 3 % de la surface terrestre, les sols organiques (sols marécageux) emmagasinent environ un tiers du carbone organique présent dans les sols [107]. C'est pourquoi des pertes de matière organique dans ce type de sols ont des répercussions considérables sur le CO₂ atmosphérique.

La capacité des sols à stocker du carbone a été fortement amoindrie par l'être humain : la transformation d'écosystèmes naturels en écosystèmes agricoles a entraîné, suivant les zones climatiques, des pertes de 60 à 75 % du carbone dans les sols [108]. La teneur en humus des sols suisses varie considérablement, allant de près de 100 % (sols organiques de haut-marais intacts) à moins de 1 % (sols bruts ; nombreuses terres assolées minérales).

Teneur en humus des sols agricoles

Le taux de matière organique des sols cultivés dépend dans une large mesure de l'activité agricole (p. ex. mode et intensité d'exploitation). Parmi les sols exploités, on constate que les teneurs en humus sont élevées dans les sols d'herbages, et généralement faibles dans les terres assolées [15, 109]. Si une prairie est transformée en un champ ou qu'une surface est affectée pendant longtemps aux grandes cultures, la teneur en matière organique du sol diminue, comme l'ont montré des expériences menées à long terme [110, 111].

Dans les terres assolées, un recul du carbone organique a été constaté au cours des 100 dernières années [112] ; depuis les années 1990, les teneurs semblent toutefois s'être stabilisées [15, 113, 114]. Des mesures effectuées dans des exploitations agricoles montrent cependant que de nombreuses exploitations de grandes cultures ne possédant pas ou peu d'élevage (et n'ayant donc qu'un accès limité à des engrais organiques) présentent des bilans humiques négatifs [115]. La diminution de la matière organique a de nombreuses conséquences négatives : les sols contiennent moins de carbone, ils deviennent plus vulnérables à l'érosion, le régime hydrique et l'équilibre des éléments nutritifs sont affectés, et l'activité biologique s'affaiblit. À long terme, cette situation peut entraîner une baisse de la fertilité du sol. D'une manière générale, il faut toutefois constater que les informations pédologiques disponibles sont trop lacunaires pour tirer des conclusions fiables à grande échelle sur l'évolution de la teneur en matière organique des sols agricoles.

Matière organique dans les sols marécageux

Depuis 1900, 82 % des marécages en Suisse ont disparu [116]. L'exploitation de la tourbe et l'utilisation énergétique et horticole de cette matière organique ont dégagé d'énormes quantités de CO₂ [117]. De plus, l'exploitation agricole des sols de marécages asséchés, au travers de la décomposition microbienne de la tourbe, a également libéré d'importants volumes de CO₂ [118], phénomène qui se poursuit encore aujourd'hui [15, 119, 120]. Selon des recherches récentes, les herbages peuvent présenter des pertes de carbone aussi élevées que les terres assolées [121]. Dans l'ensemble, les émissions de gaz à effet de serre générées par les surfaces marécageuses exploitées ont même doublé depuis le début du XX^e s. [117], malgré

la diminution de la surface des sols organiques. Cette augmentation des émissions découle de l'intensification de leur utilisation.

Depuis 1850, environ 85 % du carbone initialement présent dans les sols marécageux ont disparu et contribué ainsi à l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère [117]. Si leur utilisation se poursuit au même rythme, les réserves de carbone contenues dans les sols organiques exploités auront été totalement oxydées dans 185 ans. Les estimations établies pour l'inventaire des gaz à effet de serre évaluent à 0,7 million de tonnes la quantité de CO₂ libérée annuellement par les marais asséchés [122, 123], ce qui correspond à 14 % des émissions par l'agriculture.

La minéralisation de la tourbe provoque un abaissement du terrain. Ainsi, depuis la première correction des eaux du Jura (de 1863 à 1885), un affaissement maximal de 2,3 m a été observé dans le Grand-Marais [42]. C'est presque autant que l'abaissement de 2,7 m du niveau du lac consécutif à la première correction des eaux du Jura. Dans les terrains ameublés plusieurs fois par an lors de la préparation du sol ou des récoltes, la perte atteint aujourd'hui encore jusqu'à 2 cm par année. Depuis le début de l'assèchement des marais, plusieurs centaines de tonnes de carbone du sol par hectare ont été libérées sous forme de CO₂ dans l'atmosphère par suite de la minéralisation de la tourbe. Cette perte progressive de sol et de niveau est extrêmement préjudiciable non seulement à la fertilité et aux possibilités de travail du sol (p. ex. manque de substrat, mise à jour de drainages, inclusions d'argile et de craie lacustre), mais aussi au climat. À moyen terme et sans changement d'exploitation, des surfaces étendues verront leurs possibilités d'utilisation limitées.

La photographie au début de ce chapitre en offre une impressionnante illustration : la couche d'humus de ce champ, qui se trouve dans le Grand-Marais, mesurait initialement plusieurs mètres d'épaisseur. Par un labour profond, les anciens sédiments lacustres (couche grise) ont été atteints. L'objectif était de mélanger en surface des parties de la couche de tourbe restante située sous le niveau de la nappe phréatique au matériel minéral situé sous cette couche. Cette mesure a permis de limiter la dégradation de l'humus, sans toutefois pouvoir la stopper.

En l'état actuel des connaissances, il n'existe pas de mode d'exploitation à la fois durable et économiquement intéressant qui permette de conserver la capacité de réservoir de carbone des sols marécageux [124]. D'autres utilisations (p. ex. valorisation des roseaux comme matériau de construction ou d'isolation ou pour la production de gaz et d'énergie) ou la remise en eau de surfaces appropriées (avec une monétarisation du service écosystémique « séquestration du carbone » dans le cadre de la politique climatique) n'ont pas encore été examinées de manière approfondie en Suisse [125].

Même dans les sols hautement protégés des marais d'importance nationale, la teneur en humus ne cesse de baisser, car le régime hydrique des zones humides est perturbé (p. ex. par des fossés et conduites de drainage posés à une époque antérieure, mais qui sont encore fonctionnels) [127]. Des marais supposés intacts deviennent ainsi des sources de CO₂.

Changement climatique et réserve d'humus

Il n'est guère possible de faire des prévisions sur l'évolution de la teneur en humus des sols dans le contexte du changement climatique, car tant la hausse des températures que la recrudescence des phases de sécheresse ont des répercussions sur différentes composantes du cycle du carbone [128]. En Suisse, ces pronostics sont rendus encore plus difficiles par la variabilité topographique, géologique et climatique et donc la diversité des types de sol ainsi que par les modifications de l'utilisation du sol dans de vastes régions de la zone subalpine (abandon des terrains agricoles à la friche) [129]. Les résultats d'une étude portant sur des sols forestiers situés à différentes altitudes – de même que des expériences de réchauffement effectuées à la limite de la forêt – indiquent que sous un climat plus chaud, il faut s'attendre à des pertes considérables de carbone [130, 131]. Le rapport entre la température annuelle moyenne et la teneur en humus de certains sols a été analysé sur la base de données du service de la protection des sols du canton de Zurich provenant de sites agricoles de la surveillance cantonale à long terme des sols [132]. Cette étude montre que dans la zone agricole de Zurich, le taux d'humus pourrait diminuer de près d'un quart en cas d'augmentation de 1 °C de la température annuelle moyenne. Une telle diminution entraînerait des émissions de CO₂ pouvant atteindre

26 grammes par kilogramme de sol. En même temps, la capacité des sols à retenir les éléments nutritifs et les polluants diminuerait.

L'analyse de la banque de données sur les sols forestiers de l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL) montre qu'une diminution de 100 mm des précipitations annuelles pourrait entraîner une baisse de la teneur en carbone du sol de l'ordre de 8 tonnes de carbone par hectare [133]. Les études menées le long de gradients altitudinaux permettent difficilement de faire une distinction entre les effets du changement des températures et ceux des modifications des précipitations. Une autre solution consiste à effectuer des inventaires répétés de la teneur en carbone des sols. Dans les Alpes bavaroises, une perte de 14 % de la matière organique de la couche supérieure de sols forestiers a pu être constatée de cette manière au cours des dernières décennies [134]. Cette baisse a été imputée en premier lieu à la hausse des températures moyennes.

La quantification des effets du changement climatique sur la teneur en matière organique des sols suisses reste un défi de taille. Ce qui semble établi, c'est que dans de nouvelles conditions climatiques, l'équilibre entre les phénomènes d'apport de carbone et de libération de CO₂ – et par conséquent la composition de la matière organique et sa distribution dans les différents horizons du sol – subiront des modifications spécifiques au site. En revanche, les effets sur la réserve totale de matière organique restent incertains.

Assainissement de drainages défectueux: accorder de l'attention à toutes les fonctions du sol

Environ 192 000 ha de sols agricoles sont considérés comme drainés [126], ce qui correspond à 5 % de la surface du territoire helvétique et à près d'un cinquième (18 %) de la surface agricole utile. Les installations actuelles ont souvent déjà 60 à 80 ans, voire plus de 100 ans. Elles ont atteint depuis longtemps leur durée de vie hypothétique. Une évaluation montre que plus d'un tiers de ces installations (68 400 ha) sont en mauvais état ou dans un état inconnu. De nombreux drainages atteindront bientôt simultanément la fin de leur durée d'utilisation, et leur valorisation nécessitera jusqu'à 1,7 milliard de francs rien que pour les 10 à 15 prochaines années. Il s'agit donc de savoir quelles autres possibilités seraient envisageables pour assurer à l'avenir une utilisation durable de ces régions en tenant compte à la fois de la protection du sol, de la biodiversité et du climat.



2.6 Eutrophisation et acidification

L'azote est un composant élémentaire présent chez tous les êtres vivants. Les plantes l'assimilent par les racines sous forme d'ammonium (NH_4) ou de nitrate (NO_3) et s'en servent pour fabriquer leurs propres protéines nécessaires à leur croissance et à leur reproduction. Dans la plupart des sols, l'azote assimilable par les plantes est une ressource naturellement rare, raison pour laquelle la majorité des espèces végétales se sont adaptées à une offre limitée. Cependant, en maîtrisant la synthèse chimique de l'azote, l'être humain a modifié le cycle naturel de l'azote et a massivement augmenté les flux d'azote au cours de ces 100 dernières années [135]. D'énormes quantités de composés azotés parviennent dans les sols soit directement, soit indirectement par voie aérienne sous forme d'engrais minéraux, de lisier ou d'émissions générées par les processus de combustion.

Fumure azotée sur tout le territoire

Les dépôts atmosphériques naturels d'azote assimilable par les plantes dans les sols se situent entre 0,5 et 2 kilo-

grammes par hectare et par an. Or, au cours des dernières décennies, cette valeur s'est multipliée et aujourd'hui, ce sont en moyenne 16 kg d'azote qui se déposent chaque année sur 1 ha de sol (figure 28). La quantité d'apports varie entre 3 et 50 kg suivant le site. Les dépôts moyens

Figure 29

Le nombre d'espèces de mycorhizes présentes au niveau des racines de hêtres diminue avec l'augmentation des apports d'azote [144].

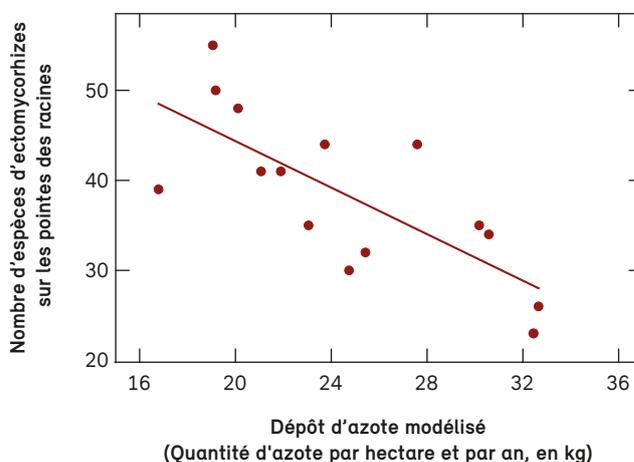
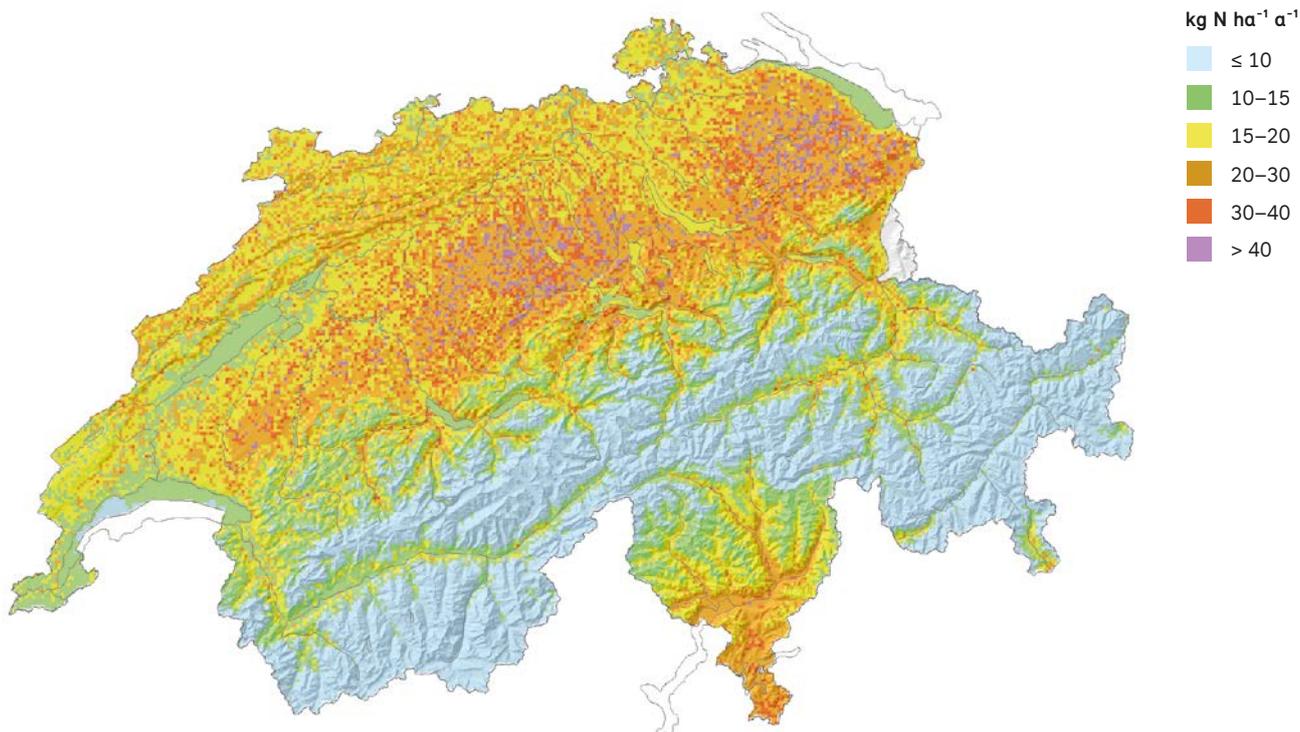


Figure 28

Apports atmosphériques d'azote dans les sols suisses en 2010. Au total, 66 700 tonnes d'azote aboutissent chaque année par cette voie dans les sols (maille de 1x1 km; en kg N par hectare et par an) [139].



en forêt s'élèvent à 23 kg, car les couronnes des arbres agissent comme un filtre qui intercepte les composés azotés.

Les apports d'azote dans le sol dus à l'activité humaine proviennent pour près des deux tiers de l'agriculture (éle-

Tableau 5
Charges critiques d'azote dans différents milieux naturels et leurs dépassements [139]

La « charge critique » est la quantité d'azote qu'un écosystème sensible, comme une forêt, un marais ou une prairie sèche, peut supporter sans subir de dommage.

Milieu naturel	Charge critique (en kilogramme d'azote par hectare et par an)	Part de la surface présentant un dépassement de la charge critique par rapport à la surface totale du milieu naturel en Suisse
Hauts-marais	5 – 10	98%
Bas-marais	10 – 15	76%
Prairies sèches	7 – 15	49%
Forêts	5 – 20	95%

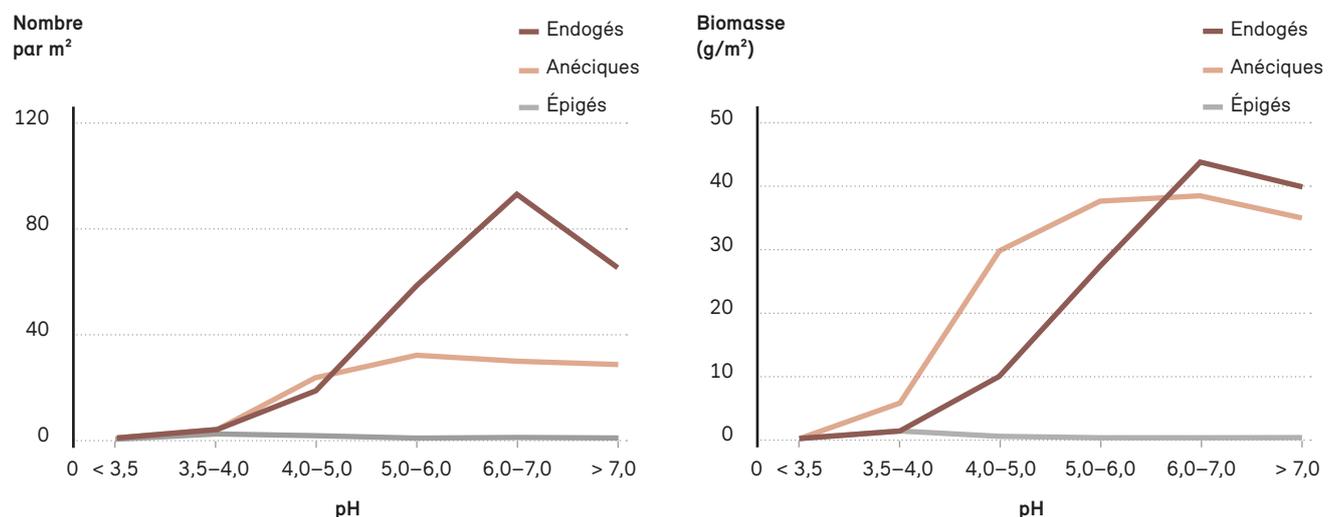
vage de bétail, stockage et épandage de lisier) et pour un tiers de processus de combustion (transports, industrie et artisanat, ménages). Si elle est souhaitable dans les champs, l'augmentation des apports azotés (eutrophication) se révèle en revanche préjudiciable aux milieux naturels et proches de l'état naturel. Les espèces végétales nitrophiles profitent de l'azote supplémentaire et croissent nettement plus vite. Elles concurrencent les plantes naturellement adaptées aux faibles taux d'azote, qui finissent par disparaître [136, 137, 138].

Excédent d'azote dans les écosystèmes

En Suisse, les charges critiques (critical loads) pour l'azote sont dépassées, parfois nettement, dans de nombreux milieux naturels (tableau 5). Il faut donc s'attendre à long terme à des modifications de la structure et du fonctionnement des écosystèmes. Les bas-marais sont en train de se transformer en banales mégaphorbiaies et les prairies maigres en herbages. Les apports excessifs d'azote sont considérés comme l'une des causes de la perte insidieuse et persistante de la biodiversité en Suisse [140, 141].

Figure 30
Nombre et biomasse de vers de terre en fonction du pH [149]

Analyse de 753 relevés effectués dans 188 surfaces. Les vers de terre jouent un rôle important dans la dégradation de la litière et la formation de structures stables dans le sol. Selon leur fonction écologique, on distingue trois groupes : vers de terre habitant dans la litière (épigés) et vers de terre creusant des galeries horizontales (endogés) ou des galeries verticales (anéciques).



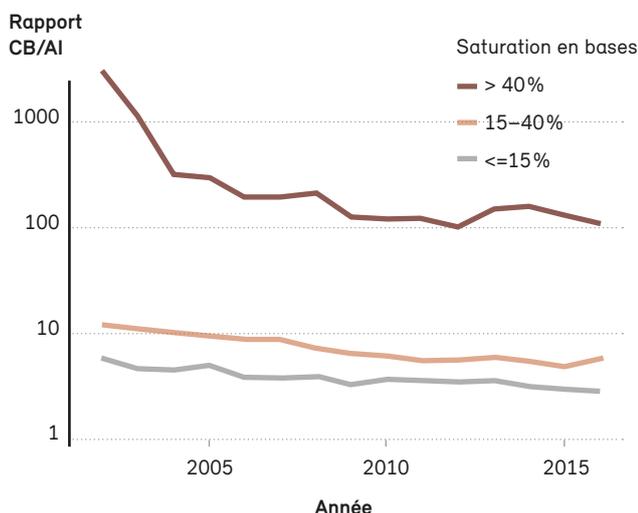
En plus de l'eutrophisation des sols et du recul de la biodiversité qui en résulte sur et dans les sols, les dépôts d'azote dans l'ensemble du territoire ont encore d'autres effets négatifs sur les écosystèmes et le sol. Ces effets s'observent en particulier en forêt [142, 143]. Ainsi, l'apport d'azote y perturbe l'équilibre nutritionnel et l'approvisionnement avec d'autres macronutriments (phosphore principalement, mais aussi magnésium et potassium selon les conditions du sol) est déstabilisé. En outre, il porte atteinte à la symbiose entre les racines et les champignons dans le sol (mycorhizes). L'azote réduit en effet la diversité spécifique et la biomasse des champignons à mycorhizes (figure 29). Grâce à leurs filaments fins, les mycorhizes peuvent atteindre de minuscules pores où se trouvent des éléments nutritifs inaccessibles aux racines des plantes, et les restituer en partie à ces dernières. L'apport excessif d'azote diminue par ailleurs la stabilité des forêts, car la croissance des racelles est réduite et les arbres deviennent plus vulnérables aux ravageurs, au vent et à la sécheresse.

Influence de l'acidification sur les fonctions du sol

Les dépôts d'azote entraînent également une acidification du sol. Ce phénomène apparaît à la suite d'apports de composés acidifiants, de la mobilisation de cations acides (comme l'aluminium ou le manganèse) ou du lessivage de cations basiques avec l'eau d'infiltration. Aujourd'hui, l'azote est la principale cause de l'acidification ; le soufre émis par la combustion d'énergies fossiles n'est plus responsable que de 15 % environ des apports acidifiants [145]. L'acidification porte atteinte aux propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol et perturbe ainsi ses fonctions naturelles [146] : elle diminue la disponibilité de certains éléments nutritifs, libère des ions d'aluminium toxiques pour les racines des plantes et détériore les conditions de vie des organismes du sol, comme les vers de terre (figure 30). Par conséquent, elle affecte également l'agrégation des particules du sol et le régime de l'eau et de l'air dans le sol. À un stade avancé, des ions d'aluminium et de manganèse ainsi que des métaux lourds sont mobilisés. D'une manière générale, il s'ensuit que le sol est moins apte à remplir sa fonction de filtre à polluants, entraînant ainsi un risque de pollution des eaux souterraines.

Figure 31
Acidification de différents sols avec différentes saturations en bases dans 25 stations forestières en Suisse [150]

Le rapport entre les éléments nutritifs calcium, magnésium et potassium (cations basiques [CB]) et l'aluminium (BC/AI) a été choisi comme indicateur de l'acidification des sols. Une diminution indique une acidification.



Depuis les années 1950, l'acidification du sol en forêt s'est considérablement accélérée en raison des dépôts excessifs de substances. Dans de nombreux sols forestiers d'Europe centrale et septentrionale, le pH a diminué de jusqu'à une unité de pH [147]. Des analyses chimiques de la solution du sol confirment l'acidification persistante des sols forestiers de Suisse (figure 31). Rien qu'entre 1996 et 2005, on a observé une diminution de 5 % de la saturation en bases et de 0,11 unité de pH [146]. Dans les sols pauvres en bases, un « ralentissement » de l'acidification a été constaté peu après l'an 2000 [146]. Dans la plupart des cas, celui-ci s'explique par le fait qu'un nouvel équilibre tampon a été atteint dans le sol. Les mesures de protection de l'air appliquées depuis les années 1980 ont permis de réduire les dépôts de soufre et d'azote, mais les apports restent en général nettement supérieurs au pouvoir tampon des sols, raison pour laquelle il faut s'attendre à une poursuite de l'acidification [148].



2.7 Perte de biodiversité du sol

La plupart des fonctions du sol sont directement ou indirectement contrôlées par les organismes du sol (cf. point 1.2). Le maintien de la biodiversité du sol permet notamment le développement d'une biodiversité élevée au-dessus du sol, une meilleure décomposition des résidus végétaux, une disponibilité accrue des éléments nutritifs et une diminution des émissions de protoxyde d'azote [151]. Les organismes du sol jouent donc un rôle essentiel dans la production de denrées alimentaires et de bois [152].

En plus de facteurs naturels comme le climat, la roche-mère et le type de sol, la quantité et la diversité des organismes du sol dépend surtout de l'intensité de l'utilisation humaine [153]. Le travail du sol a une influence particulièrement négative sur la biodiversité du sol [154, 155, 156]. Dans les terres arables, les organismes du sol sont affectés par les produits phytosanitaires, les engrais, les médicaments vétérinaires, l'érosion et les assolements ne prévoyant pas de temps de repos (prairie artificielle). C'est ce qu'indique également la présence inférieure à la moyenne de microorganismes dans ces sols : des études sur la biologie du sol menées par l'Observatoire national des sols NABO ont en effet montré que les terres assolées présentaient une biomasse microbienne et une diversité d'espèces nettement plus basses que les sols d'herbages ou les forêts [157].

Outre l'exploitation agricole, les apports d'azote et de métaux lourds sur l'ensemble du territoire (cf. points 2.6 et 2.4) portent également atteinte aux organismes du sol. Ils peuvent modifier aussi bien la biomasse microbienne que la composition des espèces. Les teneurs en biomasse microbienne semblent être basses dans les sols pollués (au plomb, au cuivre ou au nickel) [158].

Agriculture biologique et vie du sol

Vu le rôle fondamental joué par les organismes du sol dans les écosystèmes agricoles, une protection ciblée du sol devrait être un objectif important d'une agriculture durable. Il existe déjà des systèmes d'exploitation axés sur une utilisation durable de la ressource sol qui ont une influence bénéfique sur la vie du sol. Les sols de cultures biologiques présentent une biomasse microbienne jusqu'à 40 % supérieure à ceux de cultures conventionnelles

[159, 160, 161]. Les deux systèmes agricoles montrent aussi une nette différence dans la composition des communautés de microorganismes [162]. L'utilisation d'engrais de ferme (lisier et fumier) dans les cultures biologiques génère notamment une biomasse microbienne et une biodiversité nettement plus élevées que l'épandage d'engrais minéraux, à laquelle s'ajoute la suppression des produits phytosanitaires chimiques de synthèse [163].

Influence des prestations écologiques requises

L'interdiction en 1992 de certains pesticides, et l'introduction des prestations écologiques requises (bilans de fumure équilibrés, part appropriée de surface de promotion de la biodiversité, assolement régulier, protection appropriée du sol, sélection et utilisation ciblée de produits phytosanitaires) comme conditions d'octroi des paiements directs ont probablement contribué à ce que de nombreuses populations d'organismes du sol (en particulier de vers de terre) se soient partiellement rétablies dans les terres assolées [164, 165]. Il faut néanmoins partir du principe que l'exploitation agricole toujours très intensive en comparaison internationale telle qu'elle est pratiquée en Suisse, avec ses apports élevés d'engrais et de produits phytosanitaires et un travail du sol intense, porte en de nombreux endroits atteinte à la vie du sol [166].

D'une manière générale, la biodiversité du sol et les processus écologiques dans le sol sont mal connus. Les progrès réalisés dans le domaine du séquençage de l'ADN (décodage du patrimoine génétique) permettent depuis peu de recenser les différentes communautés microbiennes [167]. Les influences des activités humaines sur la composition des communautés microbiennes dans le sol pourront ainsi être mieux démontrées à l'avenir. L'Observatoire national des sols NABO a déjà intégré ces nouvelles technologies dans son programme [168].



2.8 Modifications de terrain

Chaque année, plusieurs millions de mètres cubes de matériaux terreux sont excavés lors de la construction de bâtiments résidentiels et administratifs, de routes, de voies ferrées, d'installations industrielles, d'étables, d'espaces de rétention des crues, de la revitalisation de ruisseaux, de décapages pour l'aménagement de nouvelles surfaces de compensation écologique, ou encore lors de l'agrandissement de surfaces de décharges et de gravières. Jusqu'à dans les années 1990, les matériaux terreux excédentaires ont en général été mis en décharge ou « éliminés » sur des surfaces agricoles, soit pour « améliorer » le sol, soit pour combler des inégalités du terrain. De nombreuses modifications de terrain ont été réalisées de façon inappropriée en laissant des sols dégradés. Les conséquences se manifestent à divers niveaux :

- modification de la succession des horizons du sol ;
- perturbation du bilan des éléments nutritifs et des échanges gazeux ainsi que de la fonction de filtre ;
- atteintes à la structure (agrégation) du sol (en particulier compaction) [169] ;
- augmentation de la charge en polluants ;
- apport de matériaux exogènes ;
- diminution de la productivité [170].

Anciennes modifications de terrain

Le terme « modification de terrain » désigne des modifications partielles ou totales de la succession des horizons du sol par l'excavation ou l'apport de matériaux terreux (p.ex. apports ou décapages de terre végétale, modifications de la configuration du terrain, comblements, nivellements ainsi que réhabilitations du sol) [171]. Des études consacrées à d'anciennes modifications de terrain ont montré que, dans la plupart des cas, l'état des « nouveaux » sols ne s'était généralement pas amélioré, bien au contraire [172]. Selon certaines estimations, les petites modifications de terrain effectuées avant l'année 2000 auraient même causé dans deux cas sur trois des dégâts persistants aux sols [173] ; souvent, l'aptitude agricole de ces terrains avait diminué parce que la structure des matériaux terreux apportés avait été dégradée par l'entreposage, le transport et les passages des véhicules ou que les remblais avaient été exécutés

dans des conditions humides, ou encore parce que des machines ou des matériaux terreux inadaptés avaient été utilisés. En outre, il est souvent arrivé que la stabilité des sols fraîchement reconstitués soit sous-estimée et que l'on ne pratique pas de remise en culture prudente visant à favoriser la régénération du sol. La proportion de sols ayant subi ce type de dégradation n'est pas connue, mais représente probablement plusieurs pourcents de la surface agricole utile.

Modifications de terrain actuelles

L'activité toujours intense du secteur de la construction en Suisse génère des quantités importantes de matériaux décapés de la couche supérieure et de la couche sous-jacente du sol. Chaque année, 4 millions de mètres cubes de matériaux terreux non contaminés issus de la couche supérieure et 4 millions provenant de la couche sous-jacente du sol pourraient être réutilisés [174]. On ne sait pas exactement où ni comment la plus grande partie de ces matériaux terreux décapés sont valorisés ou éliminés, et ce pas plus au niveau national que cantonal.

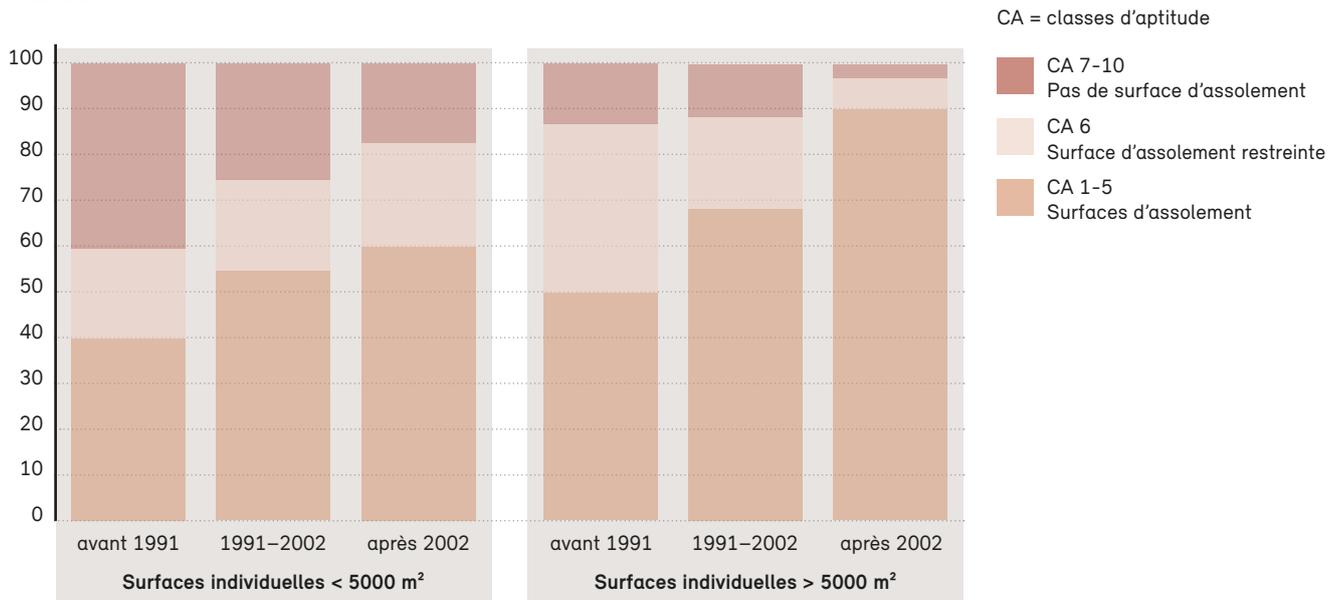
En revanche, les prescriptions régissant la valorisation du sol et les exigences relatives à la qualité du matériau ont été renforcées. Au plus tard depuis janvier 2016, date de l'entrée en vigueur de l'ordonnance sur les déchets (OLED), les matériaux terreux issus du décapage de la couche supérieure et de la couche sous-jacente du sol doivent autant que possible être valorisés intégralement s'ils ne contiennent pas de polluants, de substances étrangères et d'organismes exotiques envahissants et qu'ils se prêtent à la valorisation prévue de par leurs propriétés (physiques). L'épandage sur des surfaces agricoles à des seules fins d'élimination est interdit. Les modifications de terrain ne sont autorisées que lorsqu'elles se révèlent réellement nécessaires pour faciliter l'exploitation ou améliorer le sol et que les chances de réussite sont bonnes. Ces projets sont soumis à autorisation au niveau national en vertu de la loi sur l'aménagement du territoire. Dans la plupart des cantons, une demande de permis de construire cantonal est requise à partir d'une certaine surface.

La modification des sols naturels avec des matériaux terreux provenant de l'extérieur n'est pas autorisée. Hors zone à bâtir, les remodelages de terrain ne sont en géné-

Figure 32

Qualité des sols remis en culture dans le canton de Zurich en pourcent de la surface remise en culture [176]. La qualité des surfaces remises en culture s'est améliorée. C'est particulièrement vrai pour les surfaces de plus de 5000 m².

Pourcent



ral autorisés que sur les sols dont la structure a déjà été notablement dégradée ou modifiée par l'être humain (p.ex. lors de remises en état ou de modifications de terrain antérieures non satisfaisantes, sols organiques dégradés, sols ayant subi des atteintes consécutives à des crues, des laves torrentielles ou des glissements de terrain, sols pollués). Dans le canton de Zurich par exemple, les sols entrant en ligne de compte représentent environ 15 % de la surface agricole [173]. Sur ces surfaces, les modifications de terrain peuvent élargir les possibilités d'exploitation agricole conformes à la zone et même contribuer à créer de nouvelles surfaces d'assolement [175]. En revanche, ne sont pas autorisés les réhabilitations de sols dont la succession des horizons est naturelle, non perturbée et qui présentent un niveau de fertilité typique pour le site, de même que les projets affectant des surfaces concernées par des intérêts prioritaires de nature environnementale (protection de la nature, protection des eaux, forêt, etc.) ou par la protection du paysage.

Il existe toutefois de grandes différences entre les cantons en matière d'autorisations de modifications de ter-

rain, et très souvent la réalisation des objectifs fixés n'est pas vérifiée. L'une des rares études dans ce domaine montre que la qualité des modifications de terrain s'est améliorée au cours des dernières années (figure 32). Ce constat vaut surtout pour les projets exigeant un suivi par un spécialiste de la protection des sols sur les chantiers. De bons résultats sont obtenus lorsque les modifications de terrain sont correctement planifiées, qu'elles sont exécutées au moyen d'une technique appropriée et que la surface est ensuite exploitée avec ménagement [173]. En revanche, les petits projets sont encore beaucoup trop souvent réalisés de manière inadéquate, même si la tendance montre là aussi une amélioration [176].

En raison, d'une part, de l'exigence du Plan sectoriel des surfaces d'assolement de prévoir un contingent suffisant de terres cultivables, et, d'autre part de l'obligation de valoriser les matériaux terreux issus du décapage de la couche supérieure et de la couche sous-jacente du sol conformément à l'OLED, les cantons sont de plus en plus poussés à valoriser des sols pour en faire des surfaces d'assolement [177]. Ces valorisations peuvent en outre être soutenues par des mesures de l'ordonnance sur les

améliorations structurelles (OAS) destinées à maintenir et à améliorer la structure et le régime hydrique du sol. Dans ce contexte, il faut donc s'attendre à une augmentation de ce genre de projets.

Manque de responsabilité individuelle

Les valorisations non autorisées et donc illégales de sols décapés restent encore problématiques. De nombreux agriculteurs agissant de leur propre chef autorisent des entreprises de construction à épandre sur leurs champs des matériaux terreux, notamment dans le Grand-Marais, où la fertilité des sols organiques asséchés est menacée en de nombreux endroits. Souvent, ces modifications illégales du sol ne donnent pas les résultats souhaités.

Les nouvelles constructions réalisées en zone agricole (p.ex. agrandissements, étables à stabulation libre, fosses à lisier, emplacements de stockage) génèrent des quantités parfois importantes de matériaux terreux réutilisés sur la surface de l'exploitation. Ils servent à constituer de grands talus le long des nouveaux bâtiments; parfois, les matériaux excédentaires sont épandus sur le sol en place au lieu d'être valorisés dans le cadre d'une utilisation respectueuse et mesurée de la ressource sol. Il est indispensable que les propriétaires fonciers et les exploitants assument leur responsabilité personnelle si l'on veut pouvoir maintenir durablement des sols intacts qui puissent servir de base de production pour l'agriculture [173].



3 Protection du sol

3.1 Bases légales

Depuis l'entrée en vigueur le 1^{er} janvier 1985 de la loi sur la protection de l'environnement (LPE; RS 814.01), une base juridique existe pour la protection qualitative du sol. La loi a notamment pour but de conserver durablement la diversité biologique et la fertilité du sol. Les fonctions du sol ne sont pas explicitement mentionnées, mais elles sont indissociablement liées à la «fertilité du sol». Un chapitre spécifique est consacré à la protection des sols contre les atteintes chimiques (apports de polluants) et physiques (p. ex. érosion, compaction) (art. 33 à 35).

Conformément à l'art. 33 LPE, la protection de la fertilité des sols contre les atteintes chimiques et biologiques doit être assurée par des mesures arrêtées dans les dispositions d'exécution relatives à d'autres secteurs de la protection de l'environnement (protection des eaux, législation sur les accidents majeurs, protection de l'air, utilisation de substances et d'organismes, déchets et taxes d'incitation). Il s'ensuit que tous ces domaines juridiques sont chargés de tenir compte des impératifs de la protection des sols en plus de leur tâche principale [178]. Si les mesures préventives ne suffisent pas à garantir durablement la fertilité du sol, l'art. 34 LPE prévoit un renforcement des mesures. Si les atteintes constituent une menace pour l'homme, pour les animaux ou pour les plantes, les cantons restreignent autant que nécessaire l'utilisation du sol. Pour certaines utilisations, les atteintes portées au sol doivent être réduites de manière à permettre au moins une exploitation inoffensive. L'art. 35 introduit les valeurs indicatives et les valeurs d'assainissement (figure 33).

L'ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol; RS 814.12), entrée en vigueur le 1^{er} octobre 1998, règle l'observation, la surveillance et l'évaluation des atteintes portées aux sols. Elle détermine en outre les mesures destinées à prévenir les compactations et l'érosion, et indique les mesures à prendre pour le maniement des matériaux terreux issus du décapage du sol. Enfin, elle précise ce qui doit être entrepris au niveau cantonal si les valeurs indicatives, les seuils d'investigation ou

les valeurs d'assainissement sont dépassés dans des régions données (figure 33).

La loi fédérale sur la protection des eaux et la loi sur l'agriculture contiennent également des prescriptions relatives à la protection qualitative du sol. La loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux; RS 814.20) exige par exemple à l'art. 27 que les sols soient exploités de manière à éviter que les engrais ou les produits pour le traitement des plantes ne soient emportés par ruissellement. Ce qui implique aussi des mesures contre l'érosion du sol. La loi sur l'agriculture (LAgr; RS 910.1) exige de la part des exploitations souhaitant bénéficier des paiements directs qu'elles fournissent des prestations écologiques. Parmi celles-ci figure une «protection appropriée du sol» (art. 70a, al. 2, let. f). La LAgr réglemente également l'utilisation de moyens de production (art. 158 ss); ceux-ci désignent les substances et les organismes qui servent à la production agricole. Il s'agit notamment des engrais, des produits phytosanitaires, des aliments pour animaux et du matériel végétal de multiplication (art. 158, al. 1, LAgr).

La protection du sol en tant qu'objectif de développement durable

Les objectifs de développement durable doivent être atteints par tous les États membres de l'ONU d'ici à 2030. Tous les pays sont appelés à relever conjointement les défis urgents de la planète. La Suisse doit elle aussi réaliser ces objectifs sur le plan national et mettre en place des mesures incitatives pour que les acteurs non étatiques contribuent davantage au développement durable. Le sol est directement ou indirectement pris en considération dans plusieurs des 17 objectifs de l'Agenda 2030. Toutes les formes de dégradation du sol doivent être limitées et stoppées, et les sols dégradés doivent être restaurés dans la mesure du possible. Pour garantir la sécurité alimentaire, la qualité des sols agricoles doit être améliorée ou du moins conservée. Il s'agit notamment de promouvoir des systèmes de production durables qui ont aussi une influence positive sur d'autres fonctions que la production alimentaire.

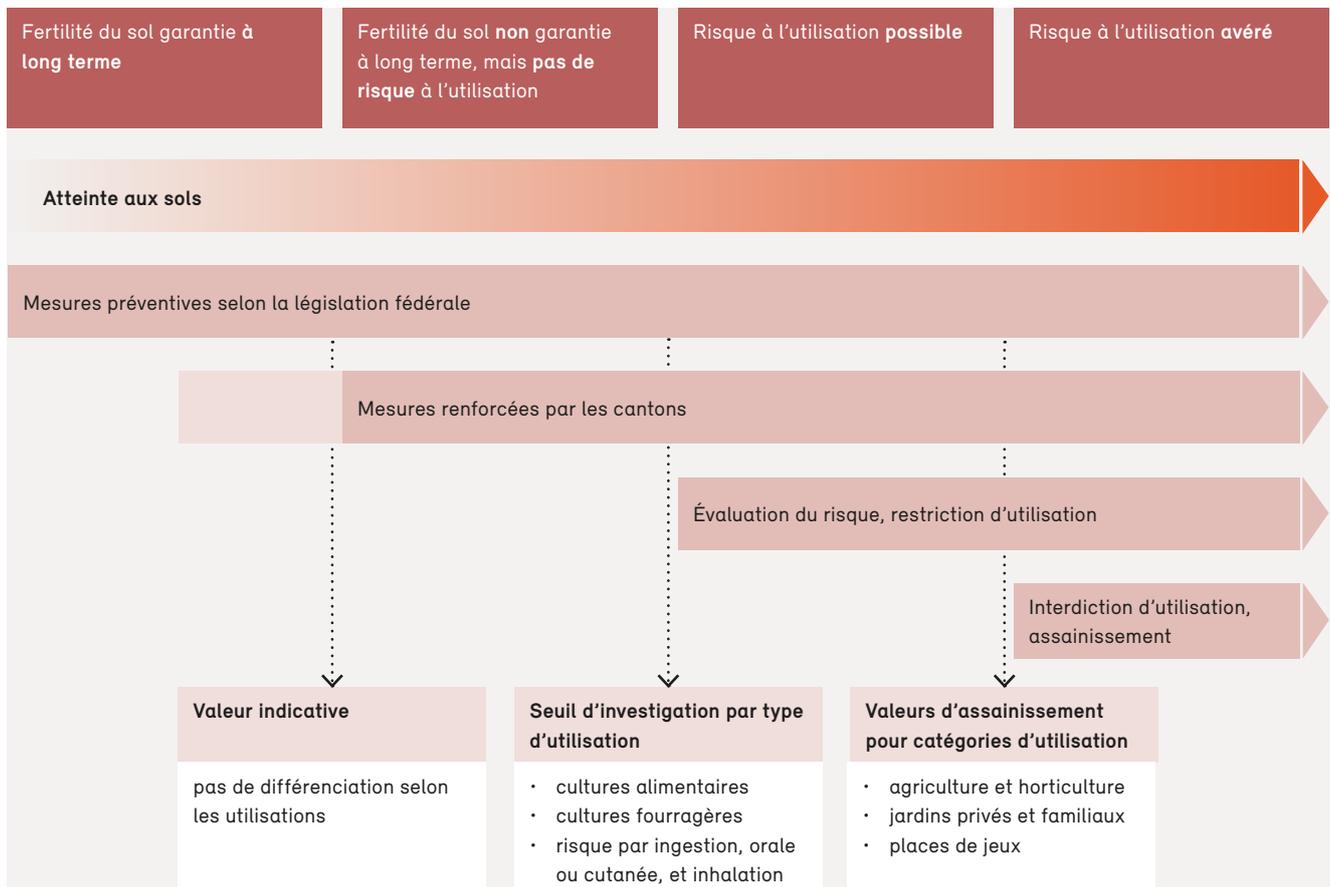
L'ordonnance sur les sites contaminés (OSites; RS 814.680) vise à garantir que les sites pollués seront assainis s'ils causent des atteintes nuisibles ou incommodantes à l'environnement, ou s'il existe un danger concret que de telles atteintes apparaissent.

La protection quantitative du sol relève surtout de l'aménagement du territoire. L'article sur les buts de la loi sur l'aménagement du territoire (LAT; RS 700) précise que la Confédération, les cantons et les communes «veillent à une utilisation mesurée du sol». Ce mandat vise à limiter la consommation de surfaces.

Si une solide base en faveur d'une utilisation respectueuse du sol est donnée au niveau législatif, les conséquences de conflits avec la mise en œuvre d'autres prescriptions légales et des lacunes d'exécution apparaissent souvent au niveau de l'application. Lors d'une enquête sur les déficits d'exécution menée auprès des cantons, le domaine qui a été le plus souvent mentionné est le sol [179].

Figure 33
Stratégie de protection du sol de la Confédération selon la LPE et l'OSol [180]

Les sites sont évalués sur la base de niveaux de pollution définis au plan légal. Si, dans une région donnée, une valeur indicative est dépassée ou les concentrations augmentent fortement, la fertilité de ce sol n'est plus durablement assurée. Dans ce cas, une attention accrue est demandée; les causes de l'atteinte au sol doivent être clarifiées. Si la teneur en polluants dépasse le seuil d'investigation, il faut examiner si l'utilisation du sol pollué est encore possible sans menacer la santé de l'homme, des animaux ou des plantes. Si la valeur d'assainissement est dépassée, le canton prend des mesures allant de l'interdiction de certaines utilisations à l'assainissement des sols concernés.



3.2 Objectifs, mesures et déficits

La Confédération et les cantons s'engagent dans de nombreux domaines en faveur de la protection des sols et ont développé des instruments et pris de mesures appropriées en collaboration avec les secteurs de la construction, de l'agriculture et de la sylviculture. C'est ainsi qu'au cours des dernières années et décennies, l'influence négative de certaines atteintes aux sols en Suisse a pu être atténuée (p. ex. en matière de protection des sols sur les chantiers).

Imperméabilisation du sol

Objectifs : En vertu de la LAT, la Confédération, les cantons et les communes doivent veiller à une utilisation mesurée du sol. Ils sont tenus de soutenir la protection des bases naturelles de la vie, comme le sol.

Mesures : Pour limiter la perte de sol, la LAT a été révisée (en vigueur depuis mai 2014). Les cantons ont été chargés d'adapter leur plan directeur afin de réduire les zones à bâtir et de mieux utiliser les réserves de terrain à bâtir.

Déficits : Une stratégie globale pour l'utilisation durable du sol fait encore défaut en Suisse. Seuls quelques cantons possèdent notamment des informations précises sur la qualité du sol (p. ex. cartes des sols). Or ces données sont importantes pour les décisions en matière d'aménagement du territoire et pour l'élaboration des plans d'affectation.

Érosion du sol

Objectifs : Les objectifs environnementaux pour l'agriculture découlant des bases légales existantes sont les suivants [182] : « 1. Éviter les dépassements des valeurs indicatives pour l'érosion ainsi que l'érosion par les eaux de ruissellement concentrées sur les terres assolées. 2. Éviter les atteintes à la fertilité du sol liées à l'érosion sur les surfaces agricoles. 3. Éviter les atteintes aux eaux et aux habitats proches de l'état naturel dues à l'entraînement par ruissellement des terres fines provenant de surfaces agricoles. »

Mesures : La Politique agricole 2014–2017 a introduit d'importantes nouveautés et précisé des dispositions existantes. Ainsi, depuis 2017, le contrôle des événe-

ments érosifs doit se faire de manière ciblée en se fondant sur les risques. En outre, des contributions à l'efficacité des ressources en faveur de pratiques culturales respectueuses du sol ont été introduites en 2017. Le programme d'utilisation durable des ressources de l'OFAG mène également vers une utilisation plus durable du sol [64]. Avec la carte du risque d'érosion et l'aide à l'exécution pour la protection de l'environnement dans l'agriculture (module protection des sols) [32], de bonnes bases sont désormais disponibles pour l'exécution.

Déficits : Les réglementations en vigueur dans le domaine des prestations écologiques requises ne sont pas encore toujours systématiquement appliquées et mises en œuvre. Et l'effet des nouvelles réglementations n'est pas encore connu.

Compaction du sol

Objectifs : L'objectif environnemental général déduit des bases légales existantes est le suivant [182] : « Éviter les atteintes à la fertilité du sol résultant de la compaction. » L'objectif environnemental pour l'agriculture précise qu'il faut : « Éviter les compactations persistantes des sols agricoles. »

Mesures : Conformément à l'OSol, les cantons sont tenus de surveiller les régions dans lesquelles la fertilité est menacée. L'ordonnance ne renferme toutefois pas de valeur indicative ou de valeur limite pour évaluer l'intensité des compactations (contrairement aux atteintes chimiques ou à l'érosion). Des propositions concrètes pour les valeurs indicatives et les seuils d'intervention ainsi que des recommandations concernant les méthodes de mesure sont disponibles dans un document technique relatif à la mesure et à l'évaluation de la compaction persistante des sols (Arbeitshilfe zur Erfassung und Beurteilung von Bodenschadverdichtungen) [183].

Différentes aides à l'exécution ainsi que des projets de recherche fournissent aux acteurs et aux autorités des informations importantes sur la prévention des compactations et sur la régénération de la structure du sol [32, 61, 184, 185]. Le modèle de simulation « Terranimo® » permet de calculer le risque de compaction du sol lors de l'utilisation de véhicules agricoles [32].

La Politique forestière 2020 demande que les conventions-programmes conclues entre la Confédération et les cantons tiennent compte de la gestion respectueuse du sol. L'évaluation de l'atteinte repose sur une simple observation du type d'ornières et des mesures techniques et organisationnelles sont proposées pour améliorer la protection du sol.

Il existe aujourd'hui des dispositions juridiquement contraignantes précisant comment le sol doit être traité dans les zones de construction pour éviter en particulier la compaction. En outre, pour les chantiers soumis étude d'impact sur l'environnement (EIE), un suivi par un spécialiste de la protection des sols sur les chantiers est désormais généralement exigé.

Déficits : Bien que la compaction du sol causée par l'exploitation agricole soit directement ou indirectement mentionnée en rapport avec les prestations écologiques requises dans l'ordonnance sur les paiements directs (OPD) et dans l'OAS, il n'existe pas de système applicable au niveau de l'exécution. Il manque notamment des valeurs indicatives légales pour l'évaluation des compactions du sol. Il convient encore de contrôler jusqu'à quel point les mesures et instruments mentionnés précédemment permettront de réduire le risque de compaction en Suisse.

La mise en œuvre de la protection du sol en forêt relève de la compétence cantonale et est plus pour moins avancée selon les cantons. Il faut continuer de soutenir intensivement la sensibilisation de tous les acteurs concernés.

Les petits chantiers ne font généralement pas l'objet d'étude formalisée de l'impact sur l'environnement, et les mesures en faveur de la protection des sols y sont souvent négligées.

Apports de polluants

Objectifs : Les apports de polluants dans le sol sont régis par de nombreuses réglementations figurant dans diverses ordonnances. L'objectif environnemental général découlant des bases légales existantes est le suivant [182] : « Éviter les atteintes à la fertilité du sol et à la santé liées à des polluants inorganiques ou organiques. » Cet objectif est aussi explicitement valable pour l'agriculture. L'objectif environnemental pour l'agriculture précise

en outre qu'il faut « maintenir les apports des différents polluants d'origine agricole dans les sols à un niveau inférieur à la capacité d'exportation par les plantes et de dégradation du sol. »

Dans le cadre du Protocole sur les métaux lourds de la Commission économique des Nations Unies pour l'Europe (CEE-ONU) révisé en 2016, la Suisse s'est engagée à réduire davantage ses émissions de métaux lourds et de poussières fines dans l'air, ce qui aura des effets positifs sur la qualité du sol.

Mesures : Des efforts sont déployés afin de limiter autant que possible l'utilisation d'engrais minéraux phosphatés aux besoins effectifs et de boucler le cycle de phosphore à l'aide de mesures de recyclage [64]. Par ailleurs, le Conseil fédéral a décidé d'élaborer un plan d'action visant à la réduction des risques et à l'utilisation durable des produits phytosanitaires. Des objectifs mesurables et des mesures concrètes y sont définis.

S'agissant des jardins familiaux, les cantons recommandent de privilégier le plus possible les méthodes de jardinage biologiques et de ne pas épandre de cendres.

Les mesures en rapport avec la problématique des sites contaminés sont bien avancées. D'ici environ 2040, tous les sites contaminés devraient avoir été décontaminés ou sécurisés.

Déficits : Les nombreuses réglementations régissant les apports de polluants sont peu claires et compliquent ainsi l'exécution. Des déficits d'exécution subsistent pour le cuivre, le zinc, les antibiotiques dans les engrais de ferme, les dépôts de polluants le long des routes, et la pollution des sols par les produits phytosanitaires.

Perte d'humus

Objectifs : Aucun objectif n'a été explicitement formulé pour la teneur en humus des sols.

Mesures : L'OPD exige que la matière organique soit déterminée lors des analyses de sol obligatoires pour les terres ouvertes, afin que les changements de la teneur en humus puissent être observés. Une aide à l'évaluation et à la décision visant à prévenir les pertes de matière orga-

nique liées à l'utilisation agricole est mise à la disposition des exploitants (www.humusbilanz.ch).

Les moyens financiers octroyés en 2016 par le Conseil fédéral pour les mesures urgentes en faveur de l'assainissement des biotopes d'importance nationale ont notamment pour but d'éliminer les anciens drains et fossés de drainage encore fonctionnels dans les marais protégés d'importance nationale. Cette mesure favorise la conservation et l'accroissement de matière organique dans les marais.

À l'heure actuelle, aucune mesure concernant la teneur en humus des sols n'a été décidée dans le cadre de la politique climatique. Le projet de loi sur le CO₂ en consultation pour la période après 2020 prévoit toutefois que ce genre de mesures visant à atteindre les objectifs climatiques pourra être défini dans d'autres législations (art. 4).

Déficits : Les objectifs climatiques de la Confédération n'ont pas encore été transposés au secteur de l'utilisation des terres. Le rôle de ce secteur dans la politique climatique n'est pas clairement établi.

La politique agricole n'a pas encore procédé à un examen des incitations financières (p. ex. paiements directs, exigences relatives aux prestations écologiques requises) sous l'angle de la conservation de la matière organique.

Bien que les sols marécageux drainés exploités de façon intensive subissent une perte de qualité, ne fournissent pas de contribution à la conservation de la biodiversité et sont d'importantes sources d'émission de CO₂, il n'existe aucune directive spécifique concernant l'exploitation de ce type de sols. Il serait important de combler cette lacune, car une grande partie des drainages en Suisse ont atteint la fin de leur durée de vie [186]. Dans ce contexte, il serait nécessaire de reconsidérer l'exploitation future de ces sols. La question qui se pose est de savoir quelle forme pourrait prendre une utilisation durable des sols marécageux et s'il serait possible d'abandonner une partie des drainages pour privilégier d'autres fonctions du sol.

Eutrophisation et acidification

Objectifs : L'objectif environnemental général découlant des bases légales existantes fixe les objectifs suivants

[182]: « 1. Limiter les émissions à titre préventif dans la mesure où cela est réalisable sur le plan de la technique et de l'exploitation et économiquement supportable. 2. Éviter les immissions excessives, à savoir les dépassements de limites de charge telles que les valeurs limites d'immission, les charges critiques, les niveaux critiques et lignes directrices de l'OMS relatives à la qualité de l'air. Limiter plus sévèrement les émissions si les limitations préventives ne suffisent pas pour éviter des immissions excessives. »

L'objectif environnemental pour l'agriculture est déterminé comme suit: « Limiter les émissions d'ammoniac de l'agriculture à 25 000 t d'azote par an au maximum. »

Mesures : La réalisation de l'objectif environnemental général dépend surtout de l'agriculture. Différentes mesures définies dans la Politique agricole 2014–2017 ont un effet positif sur l'atteinte de cet objectif [64]. C'est le cas en particulier de la suppression des contributions générales pour animaux et de l'introduction de contributions à l'utilisation efficace des ressources pour les techniques d'épandage générant peu d'émissions.

Déficits : Depuis 2005, les émissions d'ammoniac n'ont plus diminué [64]. L'efficacité de l'azote présente toujours un potentiel d'amélioration [187]. Parmi les éléments déterminants, on compte le contrôle du flux entrant d'éléments nutritifs, les progrès de l'élevage, l'optimisation de l'affouragement et de la valorisation du fourrage des animaux de rente ainsi que la gestion des engrais.

Biodiversité du sol

Objectifs : La Stratégie Biodiversité Suisse du Conseil fédéral fixe le but principal suivant [188]: « La biodiversité est riche et en mesure de réagir aux changements. La biodiversité et ses écosystèmes sont conservés à long terme. »

Mesures : Les systèmes de production respectueux de l'environnement sont encouragés au moyen de contributions. La sensibilisation à la biodiversité est améliorée à l'aide de programmes de formation continue pour les utilisateurs du sol et de stratégies de communication.

Déficits : Les effets des différentes formes d'utilisation du sol sur sa biodiversité sont encore largement méconnus. En même temps, les expériences manquent s'agissant des méthodes d'utilisation alternatives. Dans l'élevage, la consommation d'antibiotiques est encore trop élevée. L'emploi de produits phytosanitaires est aussi excessif. On connaît toutefois encore mal les atteintes que portent les organismes exotiques envahissants aux biocénoses du sol, même si l'on sait que la dissémination de ces organismes est favorisée par le jardinage (importation de plantes en pot) et par les déplacements de matériaux terreux.

Modifications de terrain

Objectifs : L'obligation de valoriser les matériaux terreux décapés est inscrite depuis 2016 dans l'OLED. Pour que cette obligation ne provoque pas de conflits d'intérêts, la « valorisation » ou l'« amélioration » doit se faire en premier lieu sur des sols ayant subi des dégradations anthropogènes. Les sols naturels non perturbés présentant une fertilité typique pour la station doivent être protégés des modifications de terrain.

Mesures : Pour les chantiers soumis à l'EIE, un suivi par un spécialiste de la protection des sols sur les chantiers est généralement exigé. Celui-ci est responsable du respect des prescriptions légales relatives à la protection des sols et des exigences spécifiques au projet découlant de la procédure d'autorisation de construire. En conséquence, les objectifs de protection du sol sur les grands chantiers et donc aussi sur les sites de valorisation sont en général bien réalisés.

Déficits : L'expression « amélioration du sol » est parfois encore employée abusivement pour justifier l'élimination à moindre coût de matériaux terreux non pollués en les épandant sur des sols naturellement superficiels. En outre, les modifications de terrain et les améliorations de sols sont souvent autorisées dans le cadre de procédures ne comprenant pas d'étude formalisée de l'impact sur l'environnement. Bien que les informations et aides à l'exécution correspondantes existent, des mesures efficaces de protection des sols sont souvent négligées, car les acteurs concernés ne sont pas assez sensibilisés aux conséquences négatives des modifications de terrain sur les fonctions écologiques du sol. La situation est encore

compliquée par le fait que les informations sur l'emplacement et l'étendue des sites appropriés pour la valorisation de sols ayant subi des dégradations anthropogènes font en de nombreux endroits encore défaut.

3.3 Informations nécessaires sur les sols

Un besoin d'informations pédologiques détaillées et uniformisées couvrant l'ensemble du territoire se fait grandement ressentir dans différents domaines en Suisse. Les milieux spécialisés s'accordent à dire que les bases et instruments existants sont insuffisants pour relever les défis et les exigences liées à l'utilisation durable de la ressource sol [189]. Les données ponctuelles et les données pédologiques modélisées ne suffisent pas pour répondre aux exigences de la plupart des groupes d'utilisateurs.

La Confédération a déjà adopté de premières mesures pour combler les énormes lacunes en matière d'informations pédologiques: le Conseil national et le Conseil des États ont donné mandat, respectivement en 2014 et en 2015, de créer un centre national de compétences pédologiques. Il sera chargé de gérer des informations sur les sols au plan tant quantitatif que qualitatif, et devra en outre définir des normes contraignantes pour le relevé des données et leur interprétation, et actualiser lesdites normes. On ne sait toutefois pas encore quand ce centre pourra être opérationnel.

Par ailleurs, une stratégie sur la faisabilité et le financement d'un système d'informations pédologiques pour l'ensemble du territoire est disponible depuis 2017 [190]. La création de ce système devrait en principe améliorer les bases de planification et de décision et fournir une base de données adaptée aux exigences actuelles pour de nombreuses applications (cf. encadré).

Cependant, la collecte de données sur l'ensemble du territoire occasionne beaucoup de travail et nécessite des spécialistes du sol bien formés et expérimentés. Or ce besoin évident de pédologues spécialisés entre en conflit avec une évolution récente qui se traduit ou se traduira par des lacunes structurelles et des pénuries de personnel [189]. D'importants efforts se révèlent nécessaires pour lutter contre cette perte de savoir, et il faudra prévoir à cet effet des investissements accrus dans la formation initiale et continue.

L'utilité des informations pédologiques et des cartes des sols [190]

- Des données pédologiques collectées de manière uniformisée sur l'ensemble du territoire permettraient d'évaluer de façon vérifiable à l'échelle des parcelles quels sols remplissent les exigences posées aux surfaces d'assolement et comment leur productivité évoluera à l'avenir. Grâce à ces informations, il serait possible de limiter les classements en zone à bâtir de sols particulièrement fertiles et de prendre le cas échéant des mesures de compensation en s'appuyant sur une base de données bien étayée.
- Un relevé des fonctions du sol dans l'ensemble du territoire permettrait de connaître les prestations fournies par les sols (p. ex. purification de l'eau potable) et d'en tenir compte explicitement lors des procédures de planification (changements d'affectation, EIE) et dans le cadre de la prévention des dangers (protection contre les crues, contre les glissements de terrain, protection du climat).
- Si des informations sur les propriétés du sol étaient disponibles, il serait possible de cibler les efforts de conservation de la fertilité du sol dans le secteur de la construction, de l'agriculture et de la sylviculture. Des connaissances détaillées sur les sols contribueraient par exemple à limiter au maximum le risque d'érosion par des cultures, une fumure et un travail du sol adaptés aux conditions locales. Étant donné que les sols sensibles à la compaction seraient ainsi recensés, il serait possible d'éviter des compactations du sol et, partant, des baisses de rendement grâce à des cartes des sols.
- Des mesures ciblées pourraient être prises au besoin afin de garantir la conservation à long terme de la fertilité du sol dans des conditions climatiques modifiées (choix des plantes, travail du sol, augmentation du taux d'humus).
- Des données pédologiques pour l'ensemble du territoire permettraient d'établir et de publier des cartes thématiques sur des aspects spécifiques du sol, ce qui contribuerait à sensibiliser la population à la problématique de la protection du sol.



4 Conclusions

Le sol est une ressource non renouvelable. Les limites de sa disponibilité en Suisse se font de plus en plus ressentir. Et pourtant il manque toujours des informations collectées de manière systématique à l'échelle du territoire sur son état et sur l'importance et l'évolution des menaces auxquelles il est exposé. C'est la raison pour laquelle le présent rapport a dû s'appuyer sur des informations fragmentaires.

Au vu de la présente analyse des menaces pesant sur le sol, il faut partir du principe que malgré les différentes mesures prises pour le protéger (p. ex. protection de l'air, méthode de travail ménageant le sol dans l'agriculture, la sylviculture et la construction), ses fonctions ne sont pas toutes durablement garanties. En de nombreux endroits, le sol ne pourrait fournir plus qu'une partie de ses prestations.

Si la protection du sol n'est pas renforcée, la situation risque encore de s'aggraver en raison du changement climatique. Il est en effet admis que celui-ci portera aussi atteinte à des fonctions importantes du sol [191], bien que les connaissances quant au type et à l'ampleur de cette problématique soient encore lacunaires. Il faut s'attendre par exemple à ce que la recrudescence de fortes précipitations augmente le risque d'érosion. Par ailleurs, l'humidité accrue des sols en hiver [192] laisse prévoir que la menace de la compaction se maintiendra au moins au niveau actuel à l'avenir.

Les évolutions sociales et politiques pourraient aussi accroître la pression sur le sol, car elles ont une grande influence sur la production alimentaire en Suisse et sur les techniques de production. Ce qui se répercute sur l'ampleur de la consommation de terres et des atteintes portées aux sols. Par rapport à la protection du sol, les principaux défis à relever concernent les points suivants :

- collecte et mise à disposition systématiques d'informations pédologiques et de données sur les sols pour l'ensemble du territoire ;
- renforcement de la mise en œuvre des lois existantes ;

- prise en considération des fonctions du sol dans les décisions ayant une incidence sur les sols (approche intégrale du sol) ;
- harmonisation des instruments et des processus politiques et juridiques importants pour le sol dans le cadre de la protection du sol, de l'agriculture, de la sylviculture ainsi que de l'aménagement du territoire ;
- sensibilisation, formation et conseil des acteurs ;
- encouragement d'une utilisation durable du sol adaptée aux conditions locales ;
- renforcement des mesures préventives ;
- adaptation de l'utilisation en fonction du changement climatique.

Une protection absolue des sols et de leurs fonctions n'est ni possible ni judicieuse. Cependant, vu le rôle essentiel du sol, il faut au moins se donner comme objectif de l'utiliser et de le protéger d'une manière qui soit compatible à long terme avec sa fonction de base de la vie.

Les ressources doivent être gérées de manière judicieuse. C'est pourquoi l'OFEV, en collaboration avec des partenaires de la Confédération et des cantons, est en train d'élaborer un projet de stratégie pour le sol. Celle-ci entend proposer des pistes sur la façon d'aborder les défis posés dans le domaine de l'aménagement du territoire, de l'agriculture et de la protection de l'environnement et sur les possibilités d'intégrer au mieux la conservation ou la restauration des fonctions du sol dans ses différentes utilisations.

La mise en œuvre de la stratégie nécessite une gestion intégrale de la ressource sol. Pour respecter l'exigence d'une utilisation adéquate et mesurée du sol et préserver ses nombreux services, toutes les fonctions du sol doivent être prises en considération dans les décisions. Cette approche multifonctionnelle permet d'intégrer les aspects qualitatifs et quantitatifs dans les décisions relatives à l'utilisation et à la consommation de sol.

Bibliographie

- [1] Nkonya E., Mirzaev A., von Braun J. (Hrsg.) (2016): Economics of Land Degradation and Improvement – A Global Assessment for Sustainable Development. Springer-Verlag, Berlin.
- [2] Montgomery D. (2010): Dreck – Warum unsere Zivilisation den Boden unter den Füßen verliert. Stoffgeschichten, Band 6. Oekom Verlag, München.
- [3] Programme national de recherche PNR 68, OFEV, OFAG, ARE (2015): Richesses du sol. Brochure publiée à l'occasion de l'Année internationale des sols 2015.
- [4] Torsvik V., Øvreås L., Thingstad T.F. (2002): Viewpoint: prokaryotic diversity – magnitude, dynamics, and controlling factors. *Science* 296, 1064 – 1066.
- [5] Abu-Hashim M. (2011): Impact of land-use and land-management on the water infiltration capacity of soils on a catchment scale. Dissertationen aus dem Julius Kühn-Institut.
- [6] Heinrich Böll Stiftung, Institute for Advanced Sustainability Studies (Hrsg.) (2015): Soil Atlas. Facts and figures about earth, land and field.
- [7] OFS (éd.) (2015): L'utilisation du sol en Suisse. Exploitations et analyses. Office fédéral de la statistique, Neuchâtel.
- [8] Borer F., Knecht M. (2014): Cartographie des sols en Suisse. Développement et perspectives. Éd.: Société suisse de pédologie.
- [9] www.nabodat.ch > Service > Catalogue des cartographies
- [10] Grob U., Ruef A., Zihlmann U., Klauser L., Keller A. (2015): Agroscope Bodendatenarchiv. Bodendaten aus Bodenkartierungen 1953–1996. Agroscope Science Nr. 14.
- [11] www.nabodat.ch
- [12] Rehbein K., Grob U., Klauser L., Keller A. (2016): Système national d'information pédologique NABODAT – modèle de données version 1.4. Agroscope, Centre de services NABODAT, Zurich.
- [13] www.bafu.admin.ch > Modèles de géodonnées
- [14] Desaulles A., Dahinden R. (2000): Réseau national d'observation des sols NABO. Variations des teneurs en polluants après 5 et 10 ans de suivi. Cahier de l'environnement n° 320, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne.
- [15] Gubler A., Schwab P., Wächter D., Meuli R. G., Keller A. (2015): Observatoire national des sols (NABO) 1985 à 2009. État et évolution des polluants inorganiques et des paramètres associés aux sols. État de l'environnement n° 1507. Office fédéral de l'environnement, Berne.
- [16] Meuli R.G., Schwab P. (2011): NABO-Bodenproben aus dem Z9-Indikator Messnetz des Biodiversitätsmonitorings der Schweiz – Ergebnisse der Pilotuntersuchung. Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station ART, Zürich.
- [17] www.nabo.ch > Monitoring
- [18] Voir www.nabodat.ch > Service > Catalogue des cartographies
- [19] Conseil fédéral suisse (2016): Maintien de la superficie des terres cultivables. Rapport de la CdG-N du 20 novembre 2015. Avis du Conseil fédéral du 6 avril 2016.
- [20] Keller A. (2013): National Soil Information Systems to Support Spatial Planning Procedures. *disP – The Planning Review* 49, 68 – 71.
- [21] Knecht M., Lüscher C., Borer F. (2017): Bedürfnisabklärungen Bodeninformationen. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt.

- [22] OFS (2016): Environnement. Statistique de poche 2016. Office fédéral de la statistique, Neuchâtel.
- [23] OFS (éd.) (2013): L'utilisation du sol en Suisse. Résultats de la statistique de la superficie. Office fédéral de la statistique, Neuchâtel.
- [24] Office fédéral de la statistique OFS, statistique de la superficie
- [25] ARE (2016): Monitoring de la construction hors zone à bâtir – rapport 2016. Office fédéral du développement territorial, Berne.
- [26] Arbeitsgruppe Bodenerosion Nordwestschweiz (undatiert): Erosion – eine schleichende Gefahr. Merkblatt Bodenerosion.
- [27] Alder S. et al. (2013): Technisch-wissenschaftlicher Bericht zur Gewässeranschlusskarte der Erosionsrisikokarte der Schweiz (ERK2) im 2x2-Meter-Raster. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) und des Bundesamtes für Landwirtschaft (BLW).
- [28] FAO, ITPS (2015): Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. Rome, Italy. www.fao.org/3/a-i5199e.pdf. Kapitel 6.1.2
- [29] Mosimann T. et al. (1990): Bodenerosion im Schweizerischen Mittelland. Ausmass und Gegenmassnahmen. Rapport 51 du Programme national de recherche «Utilisation du sol en Suisse»; Liebefeld-Bern, 262 p.
- [30] Prasuhn V., Fischler M. (non daté): Quelle quantité de terre perdue? Éd.: Agridea. Fiche technique érosion.
- [31] z.B.: Mosimann T., Rüttimann M. (1999): Bodenerosion selber abschätzen. Ein Schlüssel für Betriebsleiter und Berater. Ackerbaugebiete des zentralen Mittellandes. Aarau, Bern, Luzern und Solothurn, 36 p.
- [32] OFEV, OFAG (2013): Protection des sols dans l'agriculture. Un module de l'aide à l'exécution pour la protection de l'environnement dans l'agriculture. L'environnement pratique n° 1313, Berne.
- [33] <https://map.geo.admin.ch> > Résisque d'érosion
- [34] Prasuhn V. et al. (2011): Die hoch aufgelöste Erosionsrisikokarte ERK2 als Hilfsmittel für den Vollzug. Bulletin BGS 32, 75 – 80.
- [35] Prasuhn V. (2012): On-farm effects of tillage and crops on soil erosion measured over 10 years in Switzerland. Soil & Tillage Research 120, 137 – 146.
- [36] OFAG et OFEV (éd.) (2010): Érosion – réduire les risques. Cahier de fiches techniques.
- [37] Gisler S., Liniger H., Prasuhn V. (2010): Technisch-wissenschaftlicher Bericht zur Erosionsrisikokarte der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz im 2x2-Meter-Raster (ERK2). Hrsg.: Universität Bern und Agroscope. Im Auftrag des BLW.
- [38] Schaub D. (1989): Die Bodenerosion im Lössgebiet des Hochrheintales (Möhliner Feld/Schweiz) als Faktor des Landschaftshaushaltes und der Landwirtschaft. Physiogeographica 13, 227 p.
- [39] Ogermann P. et al. (2003): Ergebnisse langjähriger Bodenerosionskartierungen im Schweizer Tafeljura. Landnutzung und Landentwicklung 44/4, 151 – 160.
- [40] Alewell C., Egli M., Meusburger K. (2015): An attempt to estimate tolerable soil erosion rates by matching soil formation with denudation in Alpine grasslands. Journal of Soils and Sediments 15, 1383 – 1399.
- [41] Prasuhn V. (2010): Zeitliche Variabilität von Bodenerosion – Analyse von 10 Jahren Erosionsschadenskartierungen im Schweizer Mittelland. Die Bodenkultur 61 (2), 47 – 57.
- [42] Direction de l'économie publique du canton de Berne (2017): Rapport sur les sols 2017.
- [43] Schmidt S., Alewell C., Panagos P., Meusburger K. (2016): Regionalization of monthly rainfall erosivity

patterns in Switzerland. *Hydrology and Earth System Sciences* 20, 4359–4373.

[44] Mosimann T. (2015): *Erd-reich. Eine Reise durch die Böden des Kantons Basel-Landschaft und seiner Nachbargebiete*. Verlag des Kantons Basel-Landschaft, Liestal.

[45] Graf F. et al. (2014): *Soil stability and natural hazards – from knowledge to action*. NRP 68.

[46] OFEV (2015): *Glissements de terrain. Fiche Processus des dangers naturels*. Office fédéral de l'environnement, Berne.

[47] OFEV (éd.) (2016): *Protection contre les dangers dus aux mouvements de terrain. Aide à l'exécution concernant la gestion des dangers dus aux glissements de terrain, aux chutes de pierres et aux coulées de boue*. L'environnement pratique n° 1608. Office fédéral de l'environnement, Berne.

[48] Pohl M., Alig D., Körner C., Rixen C. (2009): *Higher plant diversity enhances soil stability in disturbed alpine ecosystems*. *Plant and Soil* 324, 91–102.

[49] Möschi D. (2014): *Bodenmessnetz Nordwestschweiz: das erste Messjahr*. Umwelt Aargau.

[50] Arbeitsgruppe Landwirtschaftlicher Bodenschutz Nordwestschweiz und LU (2005): *Bodenverdichtung – der Unterboden macht dicht*. Merkblatt.

[51] Agridea (2014): *Prévenir le compactage des sols*. Fiche thématique.

[52] Weisskopf P. et al. (1988): *Die Verdichtungsgefährdung schweizerischer Ackerböden*. Rapport 20 du Programme national de recherche 22 «Utilisation du sol en Suisse».

[53] Zentralschweizer Umweltdirektorenkonferenz (2013): *Gemeinsame Bodenüberwachung der Zentralschweizer Kantone (KABO-ZCH)*. Erfassung von Bodenverdichtung. Beprobungsrunde 2010.

[54] www.umweltbundesamt.de > Themen > Boden > Bodenbelastungen > Verdichtung

[55] Mosimann T. (2013): *Erosionsmonitoring im Kanton Basel-Landschaft 1982–2012*. Hrsg.: Amt für Umweltschutz und Energie (AUE), Liestal.

[56] Frey B., Lüscher P. (2008): *Mikrobiologische Untersuchungen in Rückegassen*. Bodenmikroorganismen wirken als Zeiger für stark verdichtete Fahrspuren. *LWF aktuell* 67, 5–7.

[57] Nemestothy N. (2015): *Bedeutung der Bodenverdichtung für Ertrag und Nachhaltigkeit*. BFW-Praxisinformation 39: Unser Boden. 8–13.

[58] Hartmann M., Niklaus P.A., Zimmermann S., Schmutz S., Kremer J., Abarenkov K., Lüscher P., Widmer F., Frey B. (2014): *Resistance and resilience of the forest soil microbiome to logging-associated compaction*. *The ISME Journal* 8, 226–244.

[59] Lüscher P., Frutig F., Thees O. (2016): *La protection des sols en forêt contre les atteintes physiques*. La gestion forestière entre les impératifs de rentabilité et la préservation des propriétés physiques du sol. *Connaissance de l'environnement n° 1607*. Office fédéral de l'environnement, Berne.

[60] Brändli U.-B. (éd.) (2010): *Inventaire forestier national suisse. Résultats du troisième inventaire 2004–2006*. Institut fédéral de recherches WSL, Birmensdorf, Office fédéral de l'environnement, OFEV, Berne.

[61] OFEV (éd.), Bellini E. (2015): *Sols et constructions. État de la technique et des pratiques*. *Connaissance de l'environnement n° 1508*. Office fédéral de l'environnement, Berne.

[62] Bono R., von Albertini N., Clément J.-P., Klaus G., Vogt M. (2014): *Bodenkundliche Baubegleitung: der Schweizer Weg*. In: *Bodenschutz* 01/14, 6–12.

[63] OFEV (éd.), Bellini E. (2015): *Sols et constructions. État de la technique et des pratiques*. *Connaissance de*

l'environnement n° 1508. Office fédéral de l'environnement, Berne.

[64] OFEV, OFAG: Objectifs environnementaux pour l'agriculture – Rapport d'état 2016. Connaissances de l'environnement n° 1633. Office fédéral de l'environnement, Berne.

[65] CH2011 (2011): Swiss Climate Change Scenarios CH2011. Hrsg.: C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, OcCC. Zurich.

[66] z.B. : Kanton Wallis (2007): Überwachung der Bodenqualität im Wallis. Dienststelle für Umweltschutz DUS, Sion.

[67] Gubler A., Keller A., Wächter D., Bucheli T. (2016): Organische Schadstoffe in Böden: Übersicht und Handlungsbedarf. Faktenblatt. NABO und Agroscope (Hrsg.).

[68] Keller T., Desaulles A. (2001): Böden der Schweiz. Schadstoffgehalte und Orientierungswerte (1990 – 1996). Umwelt-Materialien Nr. 139. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg.), Bern.

[69] OFEV (2016): NABEL – La pollution de l'air 2015. Résultats du Réseau national de l'observation des polluants atmosphériques (NABEL). État de l'environnement n° 1624. Office fédéral de l'environnement, Berne.

[70] Thöni L., Seitler E., Schnyder E., Ehrenmann J. (2013): Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz. Moosanalysen 1990 – 2010. Umwelt-Zustand Nr. 1328. Bundesamt für Umwelt, Bern.

[71] Gubler A., Wächter D., Blum F., Bucheli T.D. (2015): Remarkably constant PAH concentrations in Swiss soils over the last 30 years. *Environmental Science : Processes Impacts* 17, 1816 – 1828.

[72] Bogdal C., Niggeler N., Glüge J., Diefenbacher P., Wächter D., Hungerbühler K. (2017): Temporal trends of chlorinated paraffins and polychlorinated biphenyls in Swiss soils. *Environmental Pollution* 220, 891 – 899.

[73] Bundesamt für Gesundheit (2006): 20 Jahre seit dem Reaktorunfall von Tschernobyl. Die Auswirkungen auf die Schweiz.

[74] www.bag.admin.ch/themen/strahlung/12267/12274/?lang=de

[75] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg.) (1992): Bodenverschmutzung durch den Strassen- und Schienenverkehr in der Schweiz. Schriftenreihe Umwelt Nr. 185.

[76] Kanton Zürich (1997): PAK und Schwermetalle in Böden entlang stark befahrener Strassen. *Umweltpraxis* 11, 27 – 29.

[77] Hitz C. (1994): Schwermetallbelastung an Eisenbahnlagen und Strassen im zürcherischen Furttal. Diplomarbeit durchgeführt am Geographischen Institut der Universität Zürich und bei der Fachstelle für Bodenschutz des Kantons Zürich.

[78] Colenco-Holinger AG (2000): Schadstoffe in Böden aus dem Strassenrandbereich (Strassenabrand). Kantone Basel-Landschaft und Aargau. Synthesebericht.

[79] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg.) (1992): Bodenverschmutzung durch den Strassen- und Schienenverkehr in der Schweiz. Schriftenreihe Umwelt Nr. 185.

[80] Kanton Aargau (2009): KABO AG. Bodenbeobachtungsnetz des Kantons Aargau. Hrsg.: Departement Bau, Verkehr und Umwelt.

[81] Kanton St. Gallen (2014): Kantonale Bodenüberwachung – ein zuverlässiges Frühwarnsystem. *UmweltFacts* 1/2014.

[82] Reutimann J. (2006): Kupfer- und Zink-Einträge durch Rindvieh- und Schweinefutter in landwirtschaftliche Systeme. Semesterarbeit. ETH Zürich.

[83] Hammesfahr U., Heuer H., Manzke B., Smalla K., Thiele-Bruhn S. (2008): Impact of the antibiotic sulfadiazine and pig manure on the microbial community struc-

- ture in agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry* 40, 1583 – 1591.
- [84] Jechalke S. et al. (2014): Fate and effects of veterinary antibiotics in soil. *Trends in Microbiology* 22(9), 536 – 45.
- [85] Binh C.T., Heuer H., Kaupenjohann M., Smalla K. (2008): Piggery manure used for soil fertilization is a reservoir for transferable antibiotic resistance plasmids. *FEMS Microbiology Ecology* 66, 25 – 37.
- [86] Bigalke M., Rehmus A., Keller A. (2016): Belastung mineralisch gedüngter Böden mit Schadelementen (Arsen, Blei, Cadmium, Uran). Studie im Auftrag des Bundesamtes für Landwirtschaft, Bern.
- [87] Utermann J., Fuchs M. (2008): Uranium in German soils. In: De Kok L., Schnug E. (Hrsg.): *Load and Fate of fertilizerderived Uranium*. Backhuys Publishers, Leiden. 33 – 47.
- [88] Gisler A., Schwab L. (2015): Marktkampagne Dünger 2011/2012. Kennzeichnung und Schwermetalle. Hrsg.: Bundesamt für Landwirtschaft, Bern.
- [89] BFS (2014): Die Stickstoff- und Phosphorbilanz der Schweizer Landwirtschaft. BFS aktuelle, Land- und Forstwirtschaft. Bundesamt für Statistik, Neuchâtel.
- [90] BLW (2014). Agrarbericht. Bundesamt für Landwirtschaft, Bern.
- [91] Doppler T. et al. (2017): Hohe PSM-Belastung in Schweizer Bächen. *Aqua & Gas* Nr. 4, 46 – 56.
- [92] Schmutz D. (2010): Statusbericht zur Belastung der Baselbieter Böden mit Organochlorpestiziden. Amt für Umweltschutz und Energie AUE, Liestal.
- [93] Kanton Aargau (2009): KABO AG. Bodenbeobachtungsnetz des Kantons Aargau. Hrsg.: Departement Bau, Verkehr und Umwelt.
- [94] Kanton St.Gallen (2009): Schadstoffe in Böden – eine unendliche Geschichte. *Umwelt Facts* 1/2009.
- [95] Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz (2014): *Der Rebbergboden*. Boden des Jahres 2014. Faktenblatt.
- [96] Schudel P. (2009): Langfristige Überwachung der Schadstoffanreicherung in Landwirtschafts-, Siedlungs- und Waldböden. *Bodenüberwachung im Kanton Basel-Landschaft*. Dritt- und Viertbeprobung (1995 – 2008).
- [97] BABU GmbH Büro für Altlasten, Boden und Umwelt (2008): Vermutlich belastete Siedlungsgebiete. Kontrolluntersuchungen ausgewählter Standorte. Bericht. Umwelt und Energie Kanton Luzern.
- [98] Kanton Freiburg (2012): Freiburgisches Bodenbeobachtungsnetz FRIBO. Bericht 2004 – 2011. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen der Resultate der städtischen Böden. Koordinationsgruppe für den Bodenschutz KGBö.
- [99] Pfenninger N. (2011): Schadstoffuntersuchung in ausgewählten Familiengartenarealen im Kanton Schaffhausen. Interkantonales Labor Schaffhausen.
- [100] Direktion der öffentlichen Bauten Zürich, Fachstelle Bodenschutz (1992): *Der Einsatz von Hilfsstoffen in Winterthurer Pünten und Hausgärten*.
- [101] Muntwyler T. (2012): Bodenbelastung in Familiengärten hält sich in Grenzen. *Umwelt Aargau* 56, 9 – 11.
- [102] Zentralschweizer Umweltdirektionen (2013): Den Blattsalat lieber ohne Blei. Bodenbelastung in Familiengärten wurde vertieft untersucht. *news umwelt-zentralschweiz.ch* 3, 4.
- [103] Kanton Zürich (undatiert): Belasteter Gartenboden – was nun. Fachstelle Bodenschutz, Zürich.
- [104] Kanton Zürich (2011): Klärschlammasbringflächen im Kanton Zürich. 10-Jahres-Bilanz der Bodenüberwachung. Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich.
- [105] Jordi B. (2015): Altlastenbearbeitung auf Kurs. Stand der Untersuchung, Überwachung und Sanierung. *Umwelt-Zustand* Nr. 1516. Bundesamt für Umwelt, Bern.

-
- [106] Lepke T., Dillon S., Wermeille C. (2016): Indemnités en vertu de l'OTAS pour les installations de tir. Communication de l'OFEV en tant qu'autorité d'exécution. L'environnement pratique n° 0634. Office fédéral de l'environnement, Berne.
- [107] Parish F., Sirin A., Charman D., Joosten H., Minayeva T., Silvius M., Stringer L. (Hrsg.) (2008): Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report. Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen.
- [108] Lal R. (2004): Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science* 304, 1623 – 1627.
- [109] Kanton Zürich (2007): Bedeutung und Entwicklung des Humusgehaltes in Böden: Einfluss von Standort, Bewirtschaftung und Klimawandel. Amt für Landschaft und Natur, Zürich.
- [110] Oberholzer H.-R., Leifeld J., Mayer J. (2014): Changes in soil carbon and crop yield over 60 years in the Zurich Organic Fertilization Experiment, following land-use change from grassland to cropland. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 177, 696 – 704.
- [111] Leifeld J., Reiser R., Oberholzer H.-R. (2009): Consequences of Conventional versus Organic farming on Soil Carbon: Results from a 27-Year Field Experiment. *Agronomy Journal* 101, 1204 – 1218.
- [112] Canton de Vaud (2014): Indicateurs de développement durable. Matière organique et activité biologique dans les sols agricoles. bureau pEaudSol.
- [113] Kanton Freiburg (2012): Freiburgerisches Bodenbeobachtungsnetz FRIBO. Bericht 2004 – 2011. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen der Resultate der landwirtschaftlichen Böden. Koordinationsgruppe für den Bodenschutz KGBö.
- [114] Schudel P. (2009): Langfristige Überwachung der Schadstoffanreicherung in Landwirtschafts-, Siedlungs- und Waldböden. Bodenüberwachung im Kanton Basel-Landschaft. Dritt- und Viertbeobachtung (1995 – 2008).
- [115] BLW (2014): Agrarbericht. Bundesamt für Landwirtschaft, Bern.
- [116] Lachat T. et al. (2010): Wandel der Biodiversität in der Schweiz seit 1900 – Ist die Talsohle erreicht? Bristol-Stiftung, Zurich. Haupt Verlag, Bern.
- [117] Wüst-Galley C., Leifeld J. (2017): Entwicklung der Kohlenstoffvorräte und Treibhausgasemissionen der Moorböden. In: Stuber M., Müller M., Bürgi M. (Eds.): Vom «eroberten Land» zum Renaturierungsprojekt – Geschichte der Feuchtgebiete in der Schweiz seit 1700. Haupt Verlag, Bern.
- [118] BUWAL (Hrsg.) (2002): Moore und Moorschutz in der Schweiz. Bern.
- [119] Leifeld J., Müller M., Fuhrer J. (2011): Peatland subsidence and carbon loss from drained temperate fens. *Soil Use and Management* 27, 170 – 176.
- [120] Paul S., Alewell Ch., Leifeld J. (2017): Greenhouse gas emissions from organic soils of different land use. Endbericht zum Projekt «Klimarelevanz von Mooren». Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Bern.
- [121] Tiemeyer B. et al. (2016): High emissions of greenhouse gases from grasslands on peat and other organic soils. *Global Change Biology*, 22, 4134 – 4149
- [122] Robledo Abad C., Bretscher D., Leifeld J. (2016): Land- und Forstwirtschaft und andere Landnutzung. *Swiss Academies Reports* 11, 181 – 185.
- [123] FOEN (2017): Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2015. Submission of April 2017 under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. Federal Office for the Environment, Bern. www.climatereporting.ch.
- [124] www.nfp68.ch > Newsletter vom 5. April 2017: Projekt «Moorböden» abgeschlossen.
- [125] Paul S., Schellenberger A. (2015): Organische Böden, Klima und der Kohlenstoffmarkt. *Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz Bulletin* 36, 57 – 69.

- [126] Béguin J., Smola S. (2010): Stand der Drainagen in der Schweiz. Bilanz der Umfrage 2008. Bundesamt für Landwirtschaft, Bern.
- [127] Klaus G. (Red.) (2007): Zustand und Entwicklung der Moore in der Schweiz. Ergebnisse der Erfolgskontrolle Moorschutz. Umwelt-Zustand Nr. 0730. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [128] Krause H.-M., Studer M., Schellenberger A., Gattlinger A., Hagedorn F. (in prep.): NFP68 Teilsynthese «Boden und Umwelt». Organische Bodensubstanz, Treibhausgasemissionen und physikalische Belastung von Schweizer Böden.
- [129] Manusch C., Bugmann H., Wolf A. (2014): The impact of climate change and its uncertainty on carbon storage in Switzerland. *Regional Environmental Change* 14, 1437.
- [130] Hagedorn F., Moeri A., Walthert L., Zimmermann S. (2010): Kohlenstoff in Schweizer Waldböden – bei Klimaerwärmung eine potenzielle CO₂-Quelle. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 161, 530 – 535.
- [131] Streit K., Hagedorn F., Hiltbrunner D., Portmann M., Saurer M., Buchmann N., Wild B., Richter A., Wipf S., Siegwolf R.T.W. (2014): Soil warming alters microbial substrate use in alpine soils. *Global Change Biology* 20, 1327 – 1338.
- [132] Kanton Zürich (2007): Bedeutung und Entwicklung des Humusgehaltes in Böden: Einfluss von Standort, Bewirtschaftung und Klimawandel. Amt für Landschaft und Natur, Zürich.
- [133] Gosheva S., Walthert L., Niklaus P.A., Zimmermann S., Gimmi U., Hagedorn F. (2017): Reconstruction of Historic Forest Cover Changes Indicates Minor Effects on Carbon Stocks in Swiss Forest Soils. *Ecosystems*. doi:10.1007/s10021-017-0129-9
- [134] Prietzel J., Zimmermann L., Schubert A., Christophel D. (2016): Organic matter losses in German Alps forest soils since the 1970s most likely caused by warming. *Nature Geoscience* 13, 543 – 548.
- [135] OFEV (2014): Pourquoi tant d'azote? Magazine «environnement» 2/2014. Office fédéral de l'environnement, Berne.
- [136] Hautier Y., Niklaus P. A., Hector A. (2009): Competition for light causes plant biodiversity loss after eutrophication. *Science* 324, 636 – 638.
- [137] Roth T. et al. (2013): Nitrogen deposition is negatively related to species richness and species composition of vascular plants and bryophytes in Swiss mountain grassland. *Agriculture, Ecosystem and Environment* 178, 121 – 126.
- [138] Kohli L. (2011): Stickstoffeintrag aus der Luft verändert Vielfalt. BDM-Facts Nr. 3. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [139] Rihm B., Achermann B. (2016): Critical Loads of Nitrogen and their Exceedances. Swiss contribution to the effects-oriented work under the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (UNECE). Federal Office for the Environment, Bern. *Environmental studies* no. 1642. 78 p.
- [140] Bornand C., Gyax A., Juillerat P., Jutzi M., Möhl A., Rometsch S., Sager L., Santiago H., Eggenberg S. (2016): Rote Liste Gefässpflanzen. Gefährdete Arten der Schweiz. Umwelt-Vollzug Nr. 1621. Bundesamt für Umwelt, Bern, und Info Flora, Genf.
- [141] Fischer M. et al. (2015): Zustand der Biodiversität in der Schweiz 2014. Hrsg.: Forum Biodiversität Schweiz et al., Bern.
- [142] Braun S., Rihm B., Flückiger W. (2012): Stickstoffeinträge in den Schweizer Wald: Ausmass und Auswirkungen. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 163 (9), 355 – 362.
- [143] Flückiger W., Braun S. et al. (2011): Auswirkung erhöhter Stickstoffbelastung auf die Stabilität des Waldes. Synthesebericht im Auftrag des BAFU. Institut Angewandte Pflanzenbiologie, Schönenbuch.

- [144] De Witte L., Rosenstock N. P., van der Linde S., Braun S. (2017): Nitrogen deposition changes ectomy-corrhizal communities in Swiss beech forests and thereby hampers nutrient uptake. Manuskript
- [145] Augustin S., Achermann B. (2012): Deposition von Luftschadstoffen in der Schweiz: Entwicklung, aktueller Stand und Bewertung. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 163 (9), 323 – 330.
- [146] Braun S., Flückiger W. (2012): Bodenversauerung in den Flächen des Interkantonalen Walddauerbeobachtungsprogramms. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 163 (9), 374 – 382.
- [147] Blume H.-P. et al. (2010): Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde. Springer Spektrum.
- [148] Rigling A., Schaffer H.P. (Eds.) (2015): Waldbericht 2015. Zustand und Nutzung des Schweizer Waldes. Bundesamt für Umwelt, Bern; Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- [149] Braun S., Flückiger W. (2013): Wie geht es unserem Wald? 29 Jahre Walddauerbeobachtung. Interkantonales Walddauerbeobachtungsprogramm der Kantone AG, BE, BL, BS, FR, SO, TG, ZG, ZH und des BAFU. Ergebnisse von 1984 bis 2012. Bericht 4. Institut für Angewandte Pflanzenbiologie, Schönenbuch.
- [150] Braun S. (2017): Bodenlösungsbericht. In Bearbeitung.
- [151] Wagg C., Bender F., Widmer F., van der Heijden M. (2014): Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. Proceedings of the National Academy of Sciences 111 (14), 5266 – 5270
- [152] Bender S.F., van der Heijden, M.G.A. (2015): Soil biota enhance agricultural sustainability by improving crop yield, nutrient uptake and reducing nitrogen leaching losses. Journal of Applied Ecology 52, 228 – 239.
- [153] Oehl F., Laczko E., Bogenrieder A., Stahr K., Bösch R., van der Heijden M., Sieverding E. (2010): Soil type and land use intensity determine the composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities. Soil Biology and Biochemistry 42, 724 – 738.
- [154] Gadermaier F., Berner A., Fliessbach A., Friedel J. K., Mäder P. (2012): Impact of reduced tillage on soil organic carbon and nutrient budgets under organic farming. Renewable Agriculture and Food Systems 27, 1 – 13.
- [155] Säle V., Aguilera P., Laczko E., Mäder P., Berner A., Zihlmann U., van der Heijden M. G. A., Oehl F. (2015): Impact of conservation tillage and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. Soil Biology and Biochemistry 84, 38 – 52.
- [156] Kuntz M., Berner A., Gattinger A., Scholberg J. M., Mäder P., Pfiffner L. (2013): Influence of reduced tillage on earthworm and microbial communities under organic arable farming. Pedobiologia 56, 251 – 260.
- [157] Hug A.-S., Gubler A., Widmer F., Frey B., Oberholzer H., Meuli R.G. (2015): NABObio12_13. Ergebnisse der Pilotphase 2012 und 2013. Agroscope Science Nr. 22, Mai 2015.
- [158] Oberholzer H.-R., Scheid S. (2007): Bodenmikrobiologische Kennwerte. Erfassung des Zustands landwirtschaftlicher Böden im NABO-Referenzmessnetz anhand biologischer Parameter (NABObio). Umwelt-Wissen Nr. 0723. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- [159] Esperschütz J., Gattinger A., Mäder P., Schloter M., Fliessbach A. (2007): Response of soil microbial biomass and community structures to conventional and organic farming systems under identical crop rotations. FEMS Microbiology Ecology 61, 26 – 37.
- [160] Widmer F., Rasche F., Hartmann M., Fliessbach A. (2006): Community structures and substrate utilization of bacteria in soils from organic and conventional farming systems of the DOK long-term field experiment. Applied Soil Ecology 33, 294 – 307.

-
- [161] Fliessbach A., Oberholzer H.-R., Gunst L., Mäder P. (2007): Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 118, 273 – 284.
- [162] Hartmann M., Frey B., Mayer J., Mader P., Widmer F. (2015): Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming. *The ISME Journal* 9, 1177 – 1194.
- [163] Mäder P., Peng S., Fliessbach A. (2002): Auswirkungen von Pflanzenschutzmitteln auf Bodenmikroorganismen. *VBB-Bulletin* 6, 6 – 7.
- [164] Fliessbach A., Mäder P., Mayer J., Oehl F., Pfiffner L., Hartmann M., Widmer F. (2015): Welche landwirtschaftlichen Anbausysteme fördern das Bodenleben? *Hotspot* 32, 8 – 9.
- [165] Jossi W., Zihlmann U., Dubois D., Pfiffner L. (2007): DOK-Versuch: Anbausystem-Effekte auf die Regenwürmer. *Agrarforschung* 14, 66 – 71.
- [166] Bundesamt für Landwirtschaft BLW (2016): Faktenblatt zur Ernährungssicherheit. Nr. 3: Produktionsintensität und -potenzial.
- [167] Frey B., Widmer F., Hartmann M. (2015): Grossflächige Untersuchungen der Bodenbiodiversität sind endlich realisierbar. *Hotspot* 32, 16 – 17.
- [168] Hug A.-S., Widmer F., Frey B., Oberholzer H., Campos-Herrera R., Meuli R.G. (2015): Wie geht es den Böden in der Schweiz? Biologische Untersuchungen der Nationalen Bodenbeobachtung NABO. *Hotspot* 32, 18 – 19.
- [169] Schreiber P. (1997): Geländeauffüllungen: Probleme mit der Qualität der geschütteten Böden. *Zürcher UmweltPraxis* Nr. 13, 67 – 70.
- [170] Okopnik F. (2005): Terrainveränderungen mit Aushubmaterial – mehr Natur oder Schaden? *Umwelt Aargau* 30, 11 – 14.
- [171] Kanton Bern (2017): Merkblatt Terrainveränderungen zur Bodenaufwertung ausserhalb Bauzonen.
- [172] Kanton Zürich (2003): Qualität von Geländeauffüllungen. Fachstelle Bodenschutz, Zürich.
- [173] Kanton Zürich (Hrsg.) (undatiert): Terrainveränderungen in der Landwirtschaftszone. Merkblatt. Fachstelle Bodenschutz, Zürich.
- [174] Fry P., Liechti K. (2009): Wiederverwendung von abgetragenem, sauberem Boden in der Landwirtschaft. Erarbeitung der Grundlagen für die Entwicklung eines akteurorientierten Lösungsansatzes. Abschlussbericht. Wissensmanagement Umwelt GmbH.
- [175] Kanton Bern (2017): Merkblatt Terrainveränderungen zur Bodenaufwertung ausserhalb Bauzonen.
- [176] Etterlin F., Gsponer R. (2015): Rekultivierte Böden nützen der Landwirtschaft. *Zürcher UmweltPraxis* Nr. 82, 13 – 16.
- [177] Bundesamt für Raumentwicklung ARE (2006): Sachplan Fruchtfolgeflächen FFF: Vollzugshilfe.
- [178] Hepperle E., Stoll T. (2006): Ressourcenplan Boden. Ein Konzept zum planerisch-nachhaltigen Umgang mit Bodenqualität. *Umwelt-Wissen* Nr. 0633. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- [179] Interface (2013): Stärkung des Vollzugs im Umweltbereich. Schlussbericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Abteilung Recht.
- [180] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (2001): Erläuterungen zur Verordnung vom 1. Juli 1998 über Belastungen des Bodens (VBBo).
- [181] www.eda.admin.ch/post2015/de/home.html
- [182] OFEV, OFAG (2008): Objectifs environnementaux pour l'agriculture. À partir de bases légales existantes. *Connaissance de l'environnement* n° 0820. Office fédéral de l'environnement, Berne.

[183] Buchter B., Häusler S. (2009): Arbeitshilfe zur Erfassung und Beurteilung von Bodenschadverdichtungen. Kantonale Bodenschutzfachstellen (Hrsg.).

[184] Kantone AG, AI, BE, BL, FR, GE, GR, JU, LU, NE, SG, SO, SZ, TG, UR, VD, VS, ZG, ZH und Fürstentum Liechtenstein (2004): Freizeitveranstaltungen auf der «Grünen Wiese». Merkblatt.

[185] Arbeitsgruppe Landwirtschaftlicher Bodenschutz Nordwestschweiz und LU (2005): Bodenverdichtung – der Unterboden macht dicht. Merkblatt.

[186] Béguin J., Smola S. (2010): Stand der Drainagen in der Schweiz. Bilanz der Umfrage 2008. Bundesamt für Landwirtschaft, Bern.

[187] Conseil fédéral (2016): Bases naturelles de la vie et efficacité des ressources dans la production agricole. Actualisation des objectifs – Rapport en réponse au postulat 13.4284 du 13 décembre 2013.

[188] Schweizerischer Bundesrat 2012: Strategie Biodiversität Schweiz vom 25. April 2012 des Bundesrates, am 24. Juli 2012 im Bundesblatt publiziert.

[189] Knecht M., Lüscher C., Borer F. (2017): Bedürfnisabklärungen Bodeninformationen. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).

[190] BHP – Brugger und Partner AG (2017): Konzept für ein flächendeckendes Bodeninformationssystem. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).

[191] Schweizerische Eidgenossenschaft (2014): Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz. Aktionsplan 2014 – 2019. Bundesamt für Umwelt (Hrsg.), Bern.

[192] CH2011 (2011): Swiss Climate Change Scenarios CH2011. Hrsg.: C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, OcCC. Zurich.

Liens

Office fédéral de l'environnement OFEV

www.bafu.admin.ch > Sols

Office fédéral de l'agriculture OFAG

www.blw.admin.ch > Production durable > Sol

Office fédéral du développement territorial ARE

www.are.admin.ch > Thèmes > Agriculture

Office fédéral de la statistique OFS

www.bfs.admin.ch > Trouver des statistiques > Espace, environnement > Utilisation et couverture du sol

Services cantonaux de la protection des sols

www.kvu.ch > Adresses > Sols

Agroscope

www.agroscope.admin.ch > Thèmes > Sol

L'observatoire national des sols NABO

www.nabo.ch

Système national d'information pédologique NABODAT

www.nabodat.ch

Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68)

www.nfp68.ch

Brochure grand public « Richesses du sol » sur les fonctions du sol

www.nfp68.ch > Publications

Société suisse de pédologie

www.soil.ch