



Plan de mesures pour la protection des sols 2015-2018



REPUBLIQUE
ET CANTON
DE GENEVE

POST TENEBRAS LUX

Département de l'environnement, des transports et de l'agriculture (DETA)

Direction générale de l'environnement (DGE)

Service de géologie, sols et déchets (GESDEC)

Quai du Rhône 12 - 1205 Genève

Tél. +41 (0) 22 546 70 87 - Fax +41 (0) 22 546 70 90

Remerciements

Nous remercions le service de l'environnement du canton de Fribourg ainsi que l'office fédéral de l'environnement qui ont gracieusement mis à disposition des illustrations et des tableaux permettant ainsi d'étayer le document.

Photographies : Bastien Guex

Couverture : Front d'extraction de graviers à Grands Champs, Soral

Page 6 : photo n°1, Anthroposol, Les Cherpines, Plan-les-Ouates

photo n°2, Moor sol tourbeux dégradé, Seeland bernois

photo n°3, Sol brun pseudogleyifié, Wädenswil

photo n°4, Sol brun acide, Wädenswil

Pour obtenir ce document :

Contactez le GESDEC

www.ge.ch/gesdec

Table des matières

Préambule	4
1 Introduction	5
1.1 Qu'est-ce que le sol ?	5
1.2 Les fonctions du sol	8
1.3 La fertilité du sol	9
1.4 La situation actuelle	9
1.5 Historique de la protection du sol	15
2 La protection du sol	16
2.1 Buts et principes généraux	16
2.2 Protection quantitative	17
2.3 Protection qualitative	19
2.4 Stratégie de la protection du sol	20
3 Plan de mesures	24
3.1 Thèmes et priorités	24
3.2 Les 11 mesures	24
Annexes	38
Glossaire	38
Travaux cités	39
Bibliographie	39
Bases légales	41
Table des illustrations	
Figure 1 : Profils de sols	6
Figure 2 : Profil de sol et définition selon LPE	7
Figure 3 : Etat de dégradation des sols au plan mondial	10
Figure 4 : Les Cherpines, un exemple d'arbitrage pour l'utilisation du sol entre les fonctions de support et de production	12
Figure 5 : Les atteintes aux sols	13
Figure 6 : Stratégie suisse pour la protection des sols	22
Tableau 1 : Fonctions et services du sol	8
Tableau 2 : Utilisation du territoire du canton de Genève, de 1980 à 2012	11
Tableau 3 : Atteintes, sources et effets	14
Tableau 4 : Tableau de synthèse des mesures	25

Préambule

La prise de conscience, au sein de la population, de la nécessité de préserver les sols s'accroît en lien avec, d'une part, le souci de produire des aliments en quantité et en qualité suffisantes à proximité des consommateurs et, d'autre part, de préserver des espaces verts en milieu urbain ainsi que des paysages naturels en milieu rural, de manière à améliorer la qualité de vie. Des efforts sont néanmoins encore nécessaires pour que la conservation de la fertilité du sol entre dans les mœurs au même titre que la protection de l'air ou de l'eau. En effet, le sol est encore aujourd'hui un thème méconnu de la plupart des acteurs de l'aménagement du territoire et de la construction.

« Le sol est une ressource naturelle limitée, dont la perte ou la destruction est irréversible (du moins dans un laps de temps envisageable par rapport à la durée de vie de l'homme) » (Schwick *et al.*, 2012, p.96). De même, la régénération d'un sol endommagé - pollué ou compacté - nécessite plusieurs dizaines, voire centaines d'années. De surcroît, son assainissement est un processus coûteux et la qualité initiale du sol ne peut jamais être totalement retrouvée. La protection du sol vise donc à conserver et exploiter durablement cette ressource, tout en la préservant des atteintes.

La protection des sols est un domaine complexe pour plusieurs raisons : premièrement, la diversité des acteurs concernés; deuxièmement, les atteintes aux sols ont des effets progressifs et cumulatifs peu visibles à court terme, au contraire d'une pollution de l'air ou de l'eau qui s'étend rapidement et a un impact immédiat; et troisièmement, le sol est un composant privatisé de l'environnement. Ce dernier point implique que l'action de l'autorité est bien souvent perçue comme intrusive dans les affaires privées des propriétaires fonciers.

Le secteur sols et sous-sol, rattaché au service de géologie, sols et déchets (GESDEC) qui existe depuis 2008, est chargé de la protection qualitative des sols, mais son activité est encore peu connue à ce jour. La publication de ce document permettra autant de faire connaître la thématique de la protection des sols que cette activité du GESDEC. Ce document montre l'état de la situation et les objectifs à atteindre. Il définit et priorise les mesures pour la protection des sols. A ce titre, il constitue le plan de mesures de la protection des sols pour la période allant de 2015 à 2018 et s'inscrit dans la ligne du concept cantonal de la protection de l'environnement 2030. Il sera revu à chaque législature.

Le document est organisé en trois parties. La première présente les connaissances de base nécessaires à la compréhension du sujet ainsi que le contexte général de la thématique de la conservation du sol. La seconde partie explique les tenants et aboutissants de la protection du sol en Suisse. Le rôle de chaque acteur et les principes fondamentaux de la protection aussi bien quantitative que qualitative y sont développés, de même que la stratégie adoptée pour atteindre les objectifs. La troisième partie, quant à elle, expose les mesures à mettre en œuvre pour protéger les sols à Genève.

Des précisions sur un sujet, des explications supplémentaires (cadres verts), ou des définitions de termes techniques (cadres bleus) parsèment le texte pour en améliorer la compréhension.

1 Introduction

Le sens du mot sol n'est pas le même que l'on s'adresse à un pédologue, un jardinier ou un architecte. Pour s'entendre, il s'agit donc au préalable de définir le vocabulaire utilisé.

1.1 Qu'est-ce que le sol ?

Communément, le sol est considéré à la fois comme une surface, un support et une matière meuble où poussent les plantes. Plus précisément, la matière sol est un système complexe et hétérogène, car le sol est non seulement constitué de minéraux issus de l'altération des roches et de matières organiques, mais aussi d'eau, d'air et de milliers d'organismes vivants.

Pédologie : science de l'étude des sols

L'assemblage des éléments solides laisse des vides dans lesquels circulent l'eau et l'air. C'est la porosité du sol. Cette propriété fondamentale définit la perméabilité d'un sol et sa capacité à retenir l'eau.

La définition scientifique du sol évolue selon l'époque et les auteurs. Cependant, la définition ci-après de la société suisse de pédologie (SSP) résume de manière synthétique les différentes visions scientifiques actuelles du sol.

« Le sol est la couche externe de la croûte terrestre caractérisée par la présence de nombreux êtres vivants. Il est le siège d'un échange intense de matière et d'énergie entre l'air, l'eau et les roches. Le sol, en tant que partie de l'écosystème terrestre, occupe une position clé dans les cycles globaux des matières. » (SSP, 1998)

La formation d'un sol, appelée pédogénèse, est un processus généralement long et lent. Un sol se développe à partir de l'altération d'un matériel minéral parental sous l'influence de nombreux facteurs. Ces principaux facteurs de formation sont :

- la **roche mère**, soit le matériel minéral à partir duquel le sol se forme (sa composition agit par exemple sur le pH du sol);
- le **climat**, c'est-à-dire le régime hydrique et la température;
- la **topographie**, le relief conditionne les mouvements gravitaires;
- les **organismes vivants**, dont l'activité modifie la chimie et la physique du sol;
- le **temps**.

La combinaison de ces facteurs produit de nombreux processus qui peuvent, à leur tour, engendrer un nombre quasi illimité de types de sols. En Suisse, « la grande variété de roches et les différences climatiques ont donné naissance à des terres très diversifiées » (Wenger, OFEV 2011, p.4). A Genève, la pédogénèse des sols du canton a débuté avec la fin de la dernière ère glaciaire et le retrait du glacier du Rhône, il y a environ 10 000 ans. Il résulte de ces 10 000 années de formation, des sols d'une épaisseur généralement comprise entre 50 et 150 cm.

Humus : ensemble des constituants organiques transformés du sol

La séquence type des horizons d'un sol peut être décrite de manière simplifiée de la façon suivante :

- une couche supérieure le plus souvent de couleur foncée : humifère, riche en organismes et densément colonisée par les racines et de structure généralement meuble. Elle est dite « horizon de terre végétale » ou dans le langage technique « horizon A » (cf. figure ci-contre);
- une couche sous-jacente : de couleur plus claire, moins humifère, contenant moins de racines et dont l'activité biologique est réduite, dont la structure diffère de la couche supérieure. C'est la « sous-couche arable » aussi appelée « horizon inférieur » ou « horizon B »;
- enfin en-dessous de cet « horizon B » : les couches minérales plus profondes constituées de roches ou de matériaux peu ou pas altérés, désignées sous la terminologie de « roche mère », « sous-sol », ou « horizon C ».

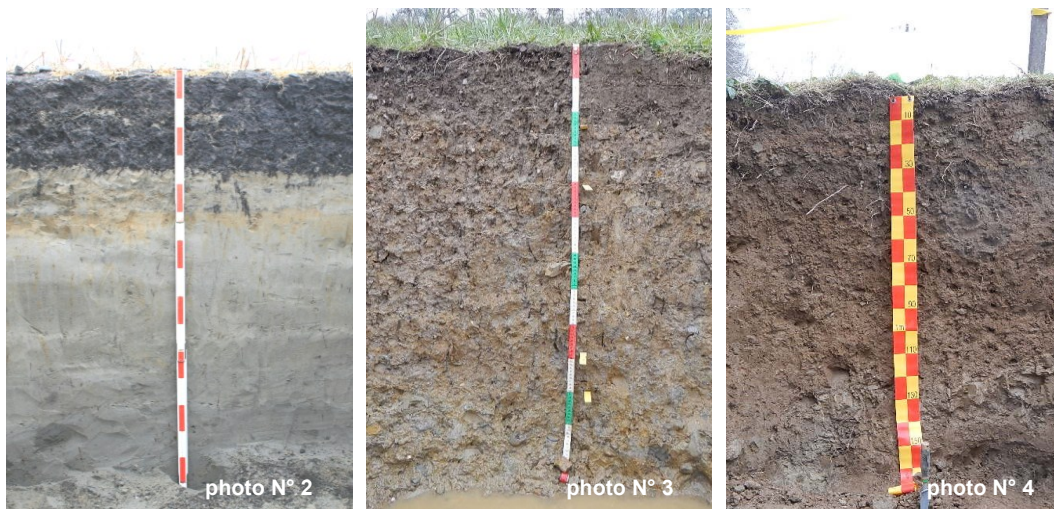
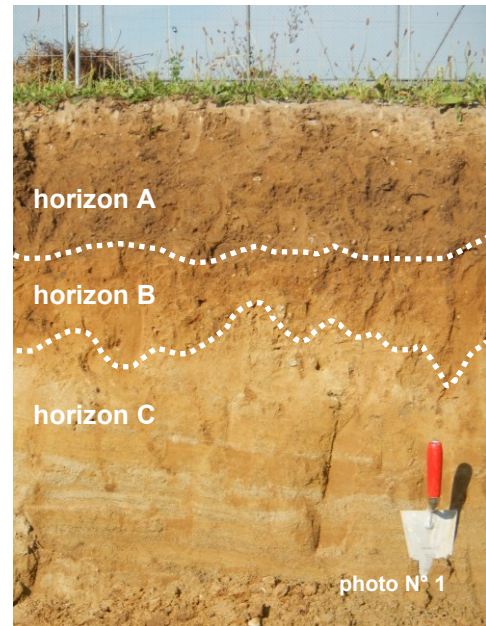


Figure 1 : Profils de sols

La terminologie utilisée pour dénommer les couches du sol n'est malheureusement pas encore uniformisée au niveau suisse. Il y a, par exemple, confusion avec le terme sous-sol qui peut soit définir l'horizon B, soit l'horizon C. Il est donc préférable d'éviter d'utiliser ce terme.

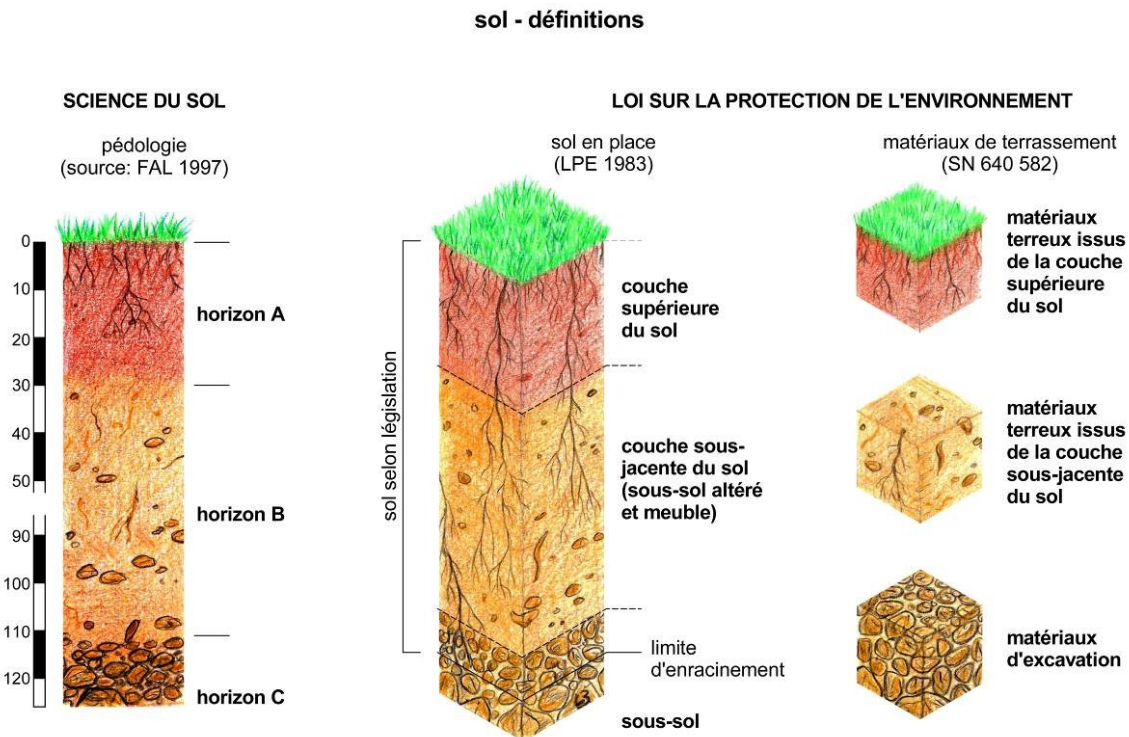
Le sol est protégé en Suisse, au premier chef, par la loi sur la protection de l'environnement (LPE¹). La définition du sol de la LPE se distingue des différentes définitions scientifiques. En effet, la LPE entend par sol, « la couche de terre meuble de l'écorce terrestre où peuvent pousser les plantes » (art. 7, al. 4bis). Cette définition simple combine vision scientifique et commune.

¹ Loi fédérale sur la protection de l'environnement, RS 814.01, LPE

Conséquence de cette définition, les roches où ne poussent pas les racines et les sols imperméabilisés en sont exclus. En revanche, les sols anthropiques sont inclus. Cette distinction découle de l'article sur les buts de la LPE lequel prévoit de conserver durablement la fertilité des sols. Dans la pratique, c'est cette finalité qui est visée.

Sol anthropique : sol reconstitué ou fortement influencé par l'action de l'homme, appelé aussi sol technogène ou technosol. Une grande partie des sols urbains sont des sols reconstitués.

Figure 2 : Profil de sol et définition selon LPE



Source : OFEV / eia-fr, © Figure: Lucien Bourban

Comme le montre la figure ci-dessus, les dispositions relatives à la protection des sols de la LPE concernent la couche supérieure, la couche sous-jacente et la partie supérieure du sous-sol.

Toutefois, lors de manipulations du sol, l'horizon C ne fait généralement l'objet d'aucune mesure de protection particulière en raison de son peu de sensibilité aux atteintes.

Matériaux terreux : matériaux provenant de la couche supérieure et sous-jacente (A+B) du sol.
Matériaux d'excavation : matériaux provenant des couches minérales (C) en dessous du sol.

1.2 Les fonctions du sol

Partie essentielle de l'écosystème terrestre, le sol au sens large assure des fonctions très variées. L'on distingue six fonctions majeures :

- La **fonction de production** qui comprend aussi bien la production alimentaire (grandes cultures, herbage, arboriculture fruitière ou maraîchage) que la production de bois d'œuvre et de chauffage ou de biomasse végétale, par exemple pour les agro-carburants.
- Le sol « *occupe une position clé dans les cycles globaux de la matière* » (Gobat *et al.*, 2010, p.10). Par exemple, il absorbe et transforme le carbone, l'azote, le phosphore et le soufre. Il fixe et dégrade les polluants. Il épure et retient l'eau. C'est la **fonction régulatrice** du sol.
- Les plantes s'enracinent dans le sol et ce dernier abrite des organismes sans lesquels les cycles naturels ne pourraient s'accomplir. En outre, cette **fonction d'habitat** est particulièrement importante pour la biodiversité, en particulier dans les réserves naturelles et les zones protégées.
- Le sol est également une **source de matières premières** dont les nombreuses gravières du canton de Genève sont le parfait exemple. C'est également, avec le développement de la géothermie, une source d'énergie d'avenir.
- Lorsqu'on bâtit, on utilise la **fonction de support** du sol. Que ce soit pour les infrastructures ou pour l'habitat, des surfaces sont nécessaires aux activités humaines.
- Les horizons d'un sol constituent à eux seuls une mémoire des climats et des écosystèmes passés. Le sol renferme également toutes sortes de vestiges archéologiques et d'indices (pollen, charbon, débris végétaux, etc.) qui permettent de découvrir l'histoire d'une région. C'est la **fonction d'archivage** du sol.

Les différentes fonctions écologiques (en vert dans le Tableau 1 ci-dessous) d'un sol peuvent être considérées au regard de leur utilité pour les populations humaines. On parle alors de services écosystémiques, auxquels s'ajoutent les fonctions économiques et sociales.

Services écosystémiques : bénéfices que les humains tirent du fonctionnement des écosystèmes.

Tableau 1 : Fonctions et services du sol

Fonction	Service
Production	Production alimentaire, bois, biomasse, etc.
Régulatrice	Cycle naturel du carbone, de l'azote, du phosphore, du soufre et autres éléments nutritifs, fixation et décomposition de polluants, stockage et transformation de la matière organique, épuration et rétention de l'eau, influence climatique
Habitat	Base des habitats terrestres, biotope
Source de matière première	Gisements minéraux, énergie
Support	Fondation des constructions, installations diverses et infrastructures de communication
Archivage	Trace du climat et des écosystèmes passés, vestiges archéologiques

1.3 La fertilité du sol

Comme pour le sol, la définition de la fertilité du sol varie selon l'époque et l'utilisateur. De même, le législateur s'est assuré de définir ce qu'est un sol fertile. Ainsi, l'ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol²) fixe les propriétés que doit posséder un sol fertile :

- une biocénose diversifiée et biologiquement active;
- une structure typique;
- une capacité de décomposition intacte;
- un développement des plantes non perturbé;
- une production végétale de bonne qualité;
- une absence de menace pour l'homme et les animaux.

Cette définition de la fertilité du sol ne se limite donc pas aux notions de productivité ou de capacité de production au sens agronomique. Elle tient aussi compte des différentes fonctions du sol, des utilisations agricoles et sylvicoles et considère le sol comme une source de danger potentiel.

Cette définition de la fertilité, très complète au demeurant, cible la qualité du sol et, par conséquent, ses fonctions.

« La qualité du sol représente la capacité du sol à fonctionner, au sein de son écosystème ou à l'extérieur de celui-ci, de manière à soutenir la production et la diversité biologique, à maintenir un environnement de qualité (notamment en eau) et à promouvoir la santé des plantes et des animaux » (Gobat *et al.*, 2010, p.85)

Biocénose : ensemble des êtres vivants qui occupent un milieu donné (le biotope), en interaction les uns avec les autres et avec ce milieu.

Biotope : milieu défini par des caractéristiques physico-chimiques stables et abritant une communauté d'êtres vivants (ou biocénose).

Le biotope et sa biocénose constituent un écosystème. (source Larousse)

1.4 La situation actuelle

1.4.1 L'utilisation du sol

Le monde³

A la surface du globe, les terres émergées s'étendent sur près de 13 milliards d'hectares (non compris l'Antarctique et les superficies couvertes par les eaux intérieures), soit moins du tiers de la surface terrestre totale. De la végétation, ou biomasse, se développe sur près de 9 milliards d'hectares; le reste de la surface est couvert par des infrastructures, comme des installations ou des constructions, ou est improductif, comme les déserts ou les montagnes. Sur ces 9 milliards d'hectares, 4 milliards sont recouverts de forêts et 5 milliards sont exploités à des fins agricoles. En 2005, 1.56 milliard d'hectares ont été utilisés pour la culture des champs et les cultures pérennes et les 3.4 milliards d'hectares restants ont été utilisés, à des degrés d'intensité variés, comme surface herbagère.

Les surfaces se prêtant à l'exploitation agricole ne cessent de régresser en raison de l'augmentation des surfaces construites. La FAO⁴ estime que tout être humain sollicite, en moyenne, une surface bâtie (habitat et infrastructure) de 0,04 ha, soit 400 m². Si l'on se base sur le scénario moyen des autorités onusiennes concernant la croissance démographique mondiale, le besoin total en surfaces construites augmentera de

² Ordonnance sur les atteintes portées au sol, RS 814.12, OSol

³ Source : Rapport du Conseil fédéral du 19 août 2009, "Crise alimentaire et pénurie de matières premières et de ressources"

⁴ en anglais Food and Agriculture Organization of the United Nations

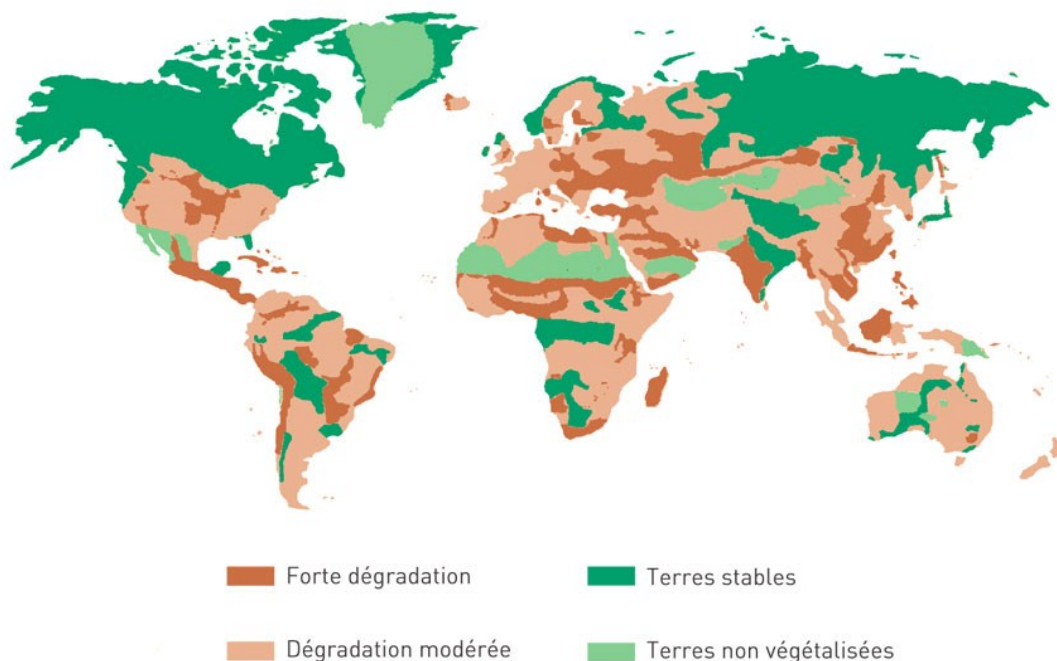
107 millions d'hectares de 2005 à 2050. La plupart des villes étant situées dans des régions fertiles (régions côtières et riveraines, ou estuaires par exemple), cette extension se fera probablement au détriment des bonnes terres arables.

Compte tenu de la croissance démographique mondiale, les terres cultivables n'étant pas extensibles infiniment, il faut s'attendre à une augmentation des tensions sur les marchés alimentaires et énergétiques.

Au surplus, alors que la demande en terres arables augmente, divers facteurs naturels et anthropiques causent une baisse importante de la fertilité des sols. Selon la Banque mondiale, 5 à 10 millions d'hectares par an sont perdus en raison de la forte dégradation des sols.

Figure 3 : Etat de dégradation des sols au plan mondial

Régions subissant une dégradation des sols



Source : WRI/UNEP

Source : périodique Tunza Vol. 9.2: Le sol : élément oublié, United Nations Environment Programme (UNEP), 2011

Genève⁵ et la Suisse⁶

L'utilisation du sol en Suisse, et donc aussi à Genève, est analysée tous les 12 ans par l'Office fédéral de la statistique. Les premières données concernant le canton de Genève datent de 1980, les suivantes de 1992, puis de 2004 et 2012. La méthode du relevé est celle de l'interprétation de photographies aériennes. Ces données statistiques représentent la répartition visible du territoire et diffèrent quelque peu de celles obtenues par les recensements fédéraux, de l'agriculture ou des forêts par exemple, qui se basent sur les zones selon l'aménagement du territoire.

De 1980 à 2012 la surface d'habitat et d'infrastructure du canton de Genève a gagné 1 672 ha principalement aux dépens de la zone agricole. En effet, la forêt étant strictement protégée en Suisse, l'extension des surfaces d'habitat et d'infrastructure se fait donc à Genève comme dans le reste de la Suisse surtout au détriment des terres arables.

Tableau 2 : Utilisation du territoire du canton de Genève, de 1980 à 2012

Surfaces	1980		1992		2004		2012*	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
d'habitat et d'infrastructure	8 202	29.0	8 966	31.8	9 415	33.3	9 874	35.0
agricoles	12 340	43.7	11 596	41.0	11 162	39.5	10 670	37.8
boisées	3 557	12.6	3 537	12.5	3 506	12.4	3 474	12.3
improductives	4 145	14.7	4 145	14.7	4 161	14.8	4 214	14.9
Total	28 244		28 244		28 244		28 232	

Source : office fédéral de la statistique (OFS), date de mise à jour 16.01.2015

*Résultats des mensurations exécutées en 1980, 1992 et 2004, selon la méthode dite de l'interprétation par échantillonnage de photographies aériennes. La méthode de traitement des données a été améliorée lors du dernier relevé de 2012, d'où la différence de la surface totale par rapport aux précédents relevés.

La surface agricole diminue ainsi de quelque 50 ha par année. Cette perte quantitative de sols agricoles s'accompagne d'une perte qualitative, car les sols des aires urbanisées subissent des transformations qui généralement en diminuent la fertilité.

Les nouvelles extensions urbaines sur la zone agricole, planifiées par le plan directeur cantonal d'ici 2023 et validées par la Confédération, représentent une emprise d'environ 168 ha sur la zone agricole.

Cette diminution des surfaces agricoles liée principalement à l'augmentation des surfaces d'habitat et d'infrastructure n'est pas propre au canton de Genève. A l'échelle de la Suisse, les résultats de la statistique de l'utilisation du sol en Suisse indiquent une augmentation de 584 km² des surfaces d'habitat et d'infrastructure entre 1985 et 2009, représentant ainsi une augmentation de 23.4 % en 24 ans, soit d'environ 0,9 % par an. En contrepartie, de 1985 à 2009, les surfaces agricoles ont diminué de 5.4 %, représentant 1.1 m² par seconde en moyenne nationale. Neuf dixièmes (89.3 %) des nouvelles surfaces d'habitat et d'infrastructure ont été créées sur des surfaces agricoles, principalement des terres arables et des prairies naturelles.

En 2009, 7.5 % du territoire national étaient utilisés à des fins d'habitat et d'infrastructure, alors que ce pourcentage n'était encore que de 6.8 % en 1997 et de 6 % en 1985. De plus,

⁵ Source : Office cantonal de la statistique (OCSTAT), Publication Coup d'œil n°30, juin 2007 et site internet www.ge.ch/statistique

⁶ Sources : Office fédéral de la statistique (OFS), L'utilisation du sol en Suisse, Résultats de la statistique de la superficie 2013 et Exploitation et analyse 2015

le degré d'imperméabilisation de ces surfaces d'habitat et d'infrastructure qui correspond aux bâtiments et aux surfaces compactées, atteignait 61.8 % en 2006 contre 59.0 % en 1982, indiquant une diminution des surfaces d'espace vert en zone urbaine. Ainsi, pour la Suisse, la part des surfaces imperméabilisées est passée de 4.8 % en 1983 à 5.5 %, en 2007.

Le Conseil fédéral a choisi la surface d'habitat et d'infrastructure par habitant comme indicateur d'un développement durable. Il s'élevait à 407 m²/hab. en 2009, soit 5.25 % de plus que 24 ans auparavant, et l'objectif est de le stabiliser à 400 m²/hab.

Il ressort des observations statistiques que la Suisse s'urbanise rapidement et que cette urbanisation est fortement consommatrice de surface de sol.

Comme à l'échelle de la Suisse et du monde, la croissance démographique du canton augmente le besoin en surface à bâtir. Les sols des régions de plaine, qui sont pour la plupart des sols agricoles, sont au cœur de ce conflit pour leur utilisation.

Figure 4 : Les Cherpines, un exemple d'arbitrage pour l'utilisation du sol entre les fonctions de support et de production



Source : Grand Projet Les Cherpines

1.4.2 La qualité du sol⁷

Depuis la révolution industrielle au 19^e siècle, la pollution des sols n'a cessé d'augmenter. Ces derniers doivent faire l'objet d'une observation permanente, car les polluants y restent très longtemps présents. Les résultats de cette surveillance sont en outre importants pour pouvoir prendre des décisions relatives à la protection de l'environnement. Il faut savoir qu'un sol contaminé par des substances difficilement dégradables n'a pratiquement aucune chance de retrouver sa fertilité initiale.

Afin d'effectuer cette tâche de surveillance, il existe en Suisse, depuis 1984, un observatoire national des sols (NABO). Cet observatoire permet l'identification précoce de tendances négatives et l'appréciation de l'efficacité des mesures de protection des sols. Il est géré conjointement par la Confédération et l'agroscope ART Reckenholz-Tänikon. Le canton de Genève abrite deux sites du réseau de mesure national.

Avec ses 102 sites répartis sur tout le territoire genevois, le réseau cantonal d'observation des sols GEOS a pour objectif la surveillance de l'évolution de la charge des sols en polluants et plus généralement de leur qualité. Il couvre l'ensemble des couvertures du sol du canton hors zone bâtie (grandes cultures, prairies, forêts, viticulture, arboriculture, culture maraîchère et sites naturels). La répartition des sites sur le territoire cantonal est approximativement proportionnelle à la surface occupée par chaque type de couverture du

⁷ Source: site internet de l'office fédéral de l'environnement, thème sols, <http://www.bafu.admin.ch/bodenschutz>

sol. La haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture (HEPIA) de Lullier est mandatée par le GESDEC pour l'exécution de la surveillance et l'analyse des paramètres issus du réseau.

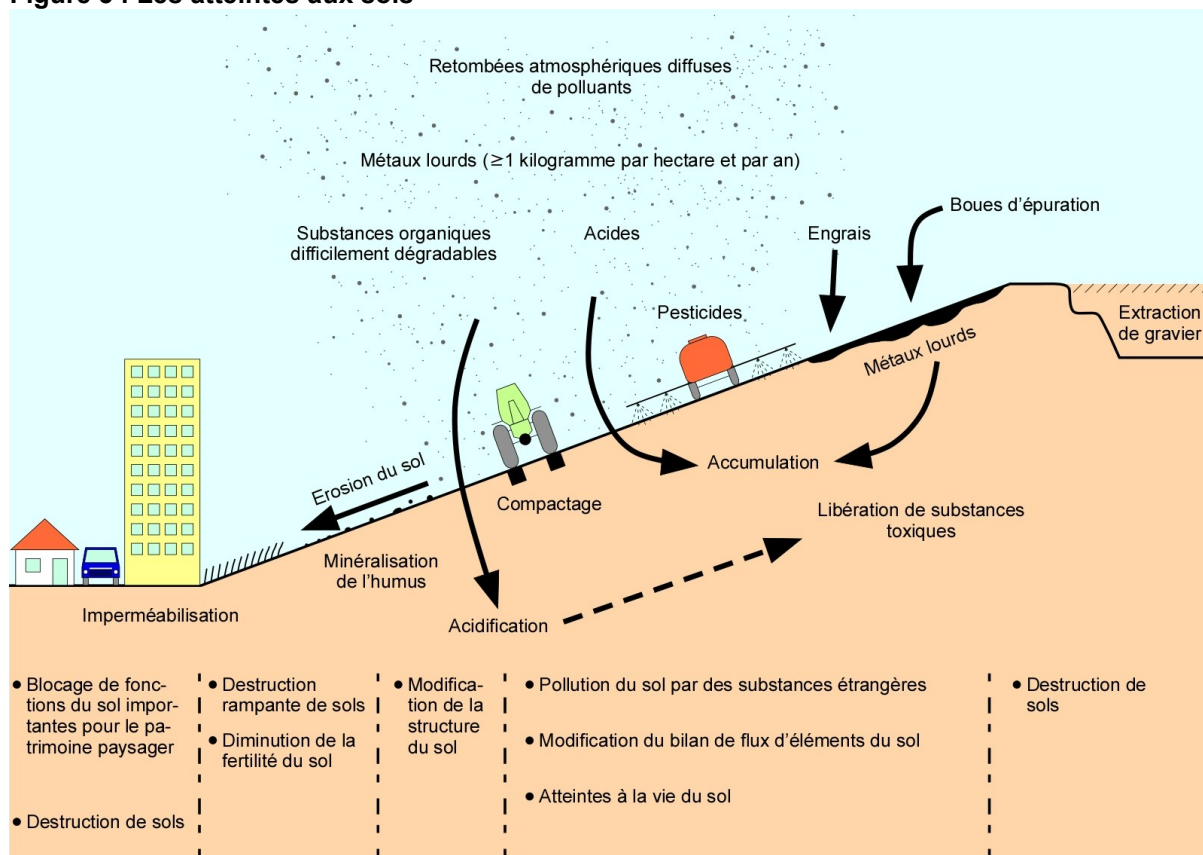
Les principales conclusions des différentes campagnes de mesure effectuées tant sur le plan national que sur le plan cantonal sont les suivantes :

- Il n'existe plus aucun sol qui soit totalement épargné par la pollution.
- Les polluants inorganiques qui génèrent les plus fortes pollutions anthropiques sont le plomb, le cuivre, le cadmium et le zinc.
- La fertilité des sols semble menacée sur plus de 40 % des sites NABO en raison du dépassement, pour un polluant, d'une valeur indicative spécifiée par l'ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol).
- A Genève, entre 1990 et 2000, une concentration d'éléments-traces métalliques supérieure à la valeur indicative a été enregistrée par 28 % des sites de mesure.
- La fertilité des sols n'est pas seulement menacée par la pollution chimique, mais aussi par des mécanismes physiques comme l'érosion ou le compactage.

En vertu du principe de précaution (LPE, art. 1 al. 2, et art. 11) le dépassement d'une valeur indicative spécifiée par l'OSol signifie que la fertilité du sol n'est pas garantie à long terme.

Comme cela a déjà été mentionné, les atteintes aux sols peuvent être d'ordre chimique, physique ou biologique. La Figure 5 et le Tableau 3 ci-dessous résument les principaux processus des atteintes portées aux sols.

Figure 5 : Les atteintes aux sols



Source : OFEV 1997 (légèrement modifiée)

Tableau 3 : Atteintes, sources et effets

	Sources principales	Effets
Atteintes chimiques Métaux lourds Substances organiques difficilement dégradables	Retombées atmosphériques diffuses de polluants provenant : <ul style="list-style-type: none"> ▪ d'activités industrielles ▪ du trafic ▪ des chauffages Engrais, pesticides, produits phytosanitaires Sites pollués, déchets	Diminution durable de la fertilité du sol Accumulation de polluants dans la chaîne alimentaire Perturbation de l'activité biologique Pollution des eaux de surface et souterraines
Atteintes physiques Érosion Compactage des sols	Pratiques agricoles inadaptées Manipulations inadéquates des terres sur les chantiers	Diminution de la fertilité du sol (diminution de l'épaisseur) Baisse des rendements agricoles Dégâts aux cultures, aux infrastructures (canalisation, etc.) Apports de fertilisants dans les cours d'eau et les biotopes Modification de la structure du sol Blocage de fonctions importantes du sol (p.ex. infiltration de l'eau) Augmentation des risques de crues et de la sévérité des étiages
Atteintes biologiques	Introduction d'organismes étrangers, p.ex. OGM aux effets inconnus, néophytes	Déstabilisation éventuelle de l'écosystème «sol» Diminution de la biodiversité
Perte quantitative de sol	Développement du milieu bâti Construction de routes, etc.	Destruction des sols Perte des fonctions du sol Augmentation des risques de crues

Source : Etat de l'environnement - Canton de Fribourg, Service de l'environnement 2006

1.4.3 La valeur du sol

Aujourd'hui, l'évaluation de la valeur économique d'un sol n'intègre pas sa multifonctionnalité et est, le plus souvent, limitée à la seule utilisation à laquelle on le destine (p.ex. production, support). A titre d'exemple, quelle est la valeur d'un mètre carré de sol épurant les eaux pluviales et protégeant ainsi les eaux souterraines ? Quels seraient les coûts engendrés si ce sol n'existait pas ? Une telle estimation est probablement impossible compte tenu de la complexité des processus actifs dans le sol et de leur multitude. Il est néanmoins incontestable que le sol a une valeur qui va au-delà des seules fonctions de support ou de production.

Sur le plan fédéral, ces fonctions sont, depuis plusieurs années, mieux prises en compte dans les prescriptions en matière de protection des sols. A Genève, si les plans directeurs cantonaux 2015 et 2030 prônent d'ores et déjà un usage mesuré et rationnel du sol tout en préservant les surfaces de production agricole, les fonctions écologiques du sol ne sont pas encore pleinement prises en considération dans le cadre de l'aménagement du territoire.

« Le Programme national de recherche «Utilisation durable de la ressource sol» (PNR 68) veut élaborer des bases scientifiques pour les décisions politiques à venir dans ce domaine. Il s'agit de tenir compte avec pertinence des fonctions écologiques et économiques du sol et de favoriser un usage durable de cette ressource en Suisse. » Les projets de recherche ont débuté en janvier 2013 (<http://www.nfp68.ch>).

1.5 Historique de la protection du sol

La protection des sols est une thématique relativement récente. La Confédération et les cantons s'en préoccupent pleinement depuis les années 1980. La protection des sols est véritablement née dans la foulée des réflexions liées à l'aménagement du territoire, à la fin des années 1970.

Auparavant, les premières notions de protection du sol avaient été introduites dans la législation fédérale dès 1902, dans la loi sur les forêts (LFo⁸), puis en 1951 dans la loi sur l'agriculture (LAgr⁹) et en 1979 dans la loi sur l'aménagement du territoire (LAT¹⁰). Cependant, ce n'est qu'en 1983 que la protection du sol fut définie de manière explicite dans la LPE et en 1986 dans l'ordonnance sur les polluants du sol.

Par la suite, l'OSol a remplacé, en 1998, l'ordonnance du 9 juin 1986 sur les polluants du sol, qui préconisait une protection qualitative limitée aux atteintes chimiques. Avec l'introduction de l'OSol, la protection des sols est dorénavant aussi étendue aux atteintes d'ordres biologique et physique.

Par ailleurs, la Confédération a édité en 2007 un concept¹¹ pour la protection du sol en Suisse au cours des prochaines décennies basé sur 10 principes directeurs détaillés au chapitre 2.4.

A Genève, jusqu'en 2008, le laboratoire cantonal d'agronomie, devenu depuis le groupe "Sols et substrats" rattaché à l'HEPIA de Lullier, était chargé de la protection des sols sur le canton. En 2008, lors de sa création, le GESDEC a repris la mission de l'application du droit fédéral. Son secteur sols et sous-sols est désormais responsable, notamment, de la concrétisation de la protection des sols dans le cadre des procédures d'autorisation de construire, d'aménagement du territoire et d'étude de l'impact sur l'environnement.

Il est également mentionné dans la constitution de la République et canton de Genève que l'exploitation des ressources naturelles, notamment le sol, doit être compatible avec leur durabilité et qu'un usage rationnel de ce dernier doit être assuré en optimisant la densité des zones urbanisées.

⁸ Loi fédérale sur les forêts, RS 921.0, LFo

⁹ Loi fédérale sur l'agriculture, RS 910.1, LAgr

¹⁰ Loi fédérale sur l'aménagement du territoire, RS 700, LAT

¹¹ Protection du sol en Suisse : concept directeur, OFEV 2007

2 La protection du sol

2.1 Buts et principes généraux

La protection du sol revêt une importance capitale pour les activités humaines. Le sol est, au même titre que l'eau et l'air, une ressource naturelle vitale. Cependant, la protection des sols n'est pas une fin en soi. En effet, le but défini par la LPE est de conserver durablement la fertilité du sol, c'est-à-dire les propriétés desquelles découlent ses fonctions. Pour ce faire les objectifs visés sont :

- de **garantir la multifonctionnalité des sols** : un sol est considéré fertile lorsqu'il assure ses fonctions de production, de régulation, d'habitat et qu'il ne constitue pas une menace pour la santé de l'homme ou des animaux. Un sol imperméabilisé ou compacté n'est plus à même d'assurer la totalité de ses fonctions;
- de **prévenir les atteintes** : il s'agit, d'une part, de mettre en œuvre des techniques de manipulation et d'exploitation ne perturbant que provisoirement la fertilité du sol et, d'autre part, de prévenir la contamination des sols par des substances ou des organismes;
- de **protéger la santé de l'homme, des animaux et des plantes** : lorsque la teneur en polluants d'un sol est trop élevée, il peut être nécessaire, pour gérer le risque, de restreindre ou d'en interdire son utilisation.

Pour atteindre ces objectifs, une distinction est faite entre :

- la **protection quantitative**, la protection des sols contre l'imperméabilisation et la destruction, et
- la **protection qualitative**, la protection des sols non imperméabilisés contre les modifications apportées à leur constitution naturelle (les atteintes physiques, chimiques et biologiques).

De manière générale, la politique suisse de gestion des sols s'articule autour de trois dimensions, intimement liées les unes aux autres :

1. Les **fonctions du sol**, son potentiel.

2. Les **propriétés du sol**, ses particularités biologiques et physico-chimiques.

3. Les **utilisations du sol**, les diverses manières d'exploiter le sol.



Pourquoi protéger le sol ?

- Pour **protéger les eaux** : les eaux de ruissellement provenant des sols imperméabilisés doivent être collectées pour évacuation ou infiltrées. Lorsque les sols sont imperméabilisés, l'infiltration naturelle des eaux dans le sol est impossible, ce qui a un impact sur la qualité et le régime hydrologique des cours d'eau récepteurs. Premièrement, l'augmentation du risque de pollution des eaux est corrélée avec l'augmentation des quantités d'eau à évacuer par les canalisations, le sol ne jouant plus son rôle d'épurateur. Deuxièmement, les effets de crues sont également amplifiés, le sol ne jouant plus son rôle de réservoir régulateur. Le contrôle par des moyens techniques de la qualité des eaux et du débit aux cours d'eau récepteurs nécessite de coûteuses infrastructures de gestion de celles-ci.
- Pour la **production alimentaire** : dans un pays comme la Suisse et un canton comme Genève où les surfaces de sol agricoles sont insuffisantes pour nourrir toute la population, il est essentiel de préserver les surfaces adaptées à la production alimentaire.
- Pour **maintenir la biodiversité** : « la plus grande partie de notre richesse biologique est souterraine. Les 30 premiers centimètres sous 1 m² de sol peuvent abriter plus de 200 millions d'animaux et de végétaux, dont la biomasse est 10 à 50 fois supérieure à celle des organismes vivants en surface. » (Baumgartner et Schürmann, OFEV 2004, p.31)
- Pour **lutter contre le réchauffement climatique** : « le sol joue un rôle important dans le cycle du carbone, et par conséquent dans les changements climatiques. Une partie du carbone présent dans les végétaux morts se minéralise dans la terre et retourne dans l'atmosphère sous forme de dioxyde de carbone (CO₂); une autre est stockée dans l'humus pour une durée relativement longue. » (OFEV 2011, p.20). On estime que le sol stocke trois fois plus de carbone que la végétation et deux fois plus que l'atmosphère (diverses sources). Par conséquent, les variations de teneur en carbone organique du sol sont l'une des clés de compréhension et de gestion du réchauffement climatique.

2.2 Protection quantitative

Bases légales

La protection quantitative du sol consiste prioritairement à séparer la zone à bâtir des autres zones non bâties. Son principe est inscrit à l'article 75 de la constitution fédérale, qui indique que l'aménagement du territoire incombe aux cantons et sert une utilisation judicieuse et mesurée du sol et une occupation rationnelle du territoire. A ce titre, la constitution cantonale a repris ce principe aux articles 157 et 163. La loi fédérale sur l'aménagement (LAT) ainsi que son ordonnance d'exécution (OAT) concrétisent les lignes directrices¹². Enfin, le canton a également adopté une loi et un règlement qui exécutent et précisent la législation fédérale.

Objectifs et acteurs

La protection quantitative des sols vise donc une utilisation économe du sol, au sens d'une utilisation appropriée et organisée du territoire. L'objectif cantonal est de conserver les sols fertiles aux sens de l'OSol, que leur utilisation soit agricole, forestière ou autre, tout en tenant compte des besoins de l'urbanisation et du développement économique.

¹² Ordonnance sur l'aménagement du territoire, RS 700.1, OAT

A Genève, la protection quantitative est du ressort du département chargé de l'aménagement du territoire. Néanmoins, l'exiguïté du territoire et la rareté des surfaces disponibles, quelle que soit l'utilisation visée, amplifient le besoin de coordination entre les différents acteurs ayant à faire avec le sol, de sorte que le canton se développe en bonne intelligence.

Principes

L'un des principes régissant l'aménagement du territoire est de réserver à l'agriculture suffisamment de bonnes terres cultivables (LAT, art. 3, al. 2 lettre a). A cet effet, un plan sectoriel de la Confédération a été adopté et arrêté en 1992. Il définit une surface minimale d'assolement de 438 560 ha à conserver dans toute la Suisse et répartit cette surface entre les cantons. Le quota de surface d'assolement (SDA) pour le canton de Genève a été fixé à 8 400 ha.

« Les surfaces d'assolement représentent les meilleures terres agricoles du pays et répondent à des critères définis de qualité pédologique et de situation climatique. »
« Elles comprennent des terres cultivables, en premier lieu des terres ouvertes et des prairies artificielles intercalaires, de même que les prairies naturelles arables. »
(Office fédéral du développement territorial)

Les cantons doivent garantir de façon durable leurs surfaces minimales d'assolement. Pour cela, les cantons délimitent les SDA et les inscrivent sur un plan, régulièrement mis à jour à Genève.

La protection quantitative est réglée principalement au niveau de la planification directrice territoriale, que ce soit au niveau communal ou cantonal, dans le plan directeur cantonal et les plans directeurs communaux. Les orientations prises au niveau de la planification directrice servent de cadre de référence pour la délimitation des zones d'affectation.

« Contrairement à d'autres cantons qui possèdent des zones à bâtir parfois surdimensionnées, Genève a, de longue date, fait un usage mesuré du sol, en raison de l'exiguïté du territoire cantonal et de la volonté largement partagée de préserver la zone agricole, la nature et le paysage. Cette préoccupation se retrouve dans le plan directeur cantonal 2015 (PDCn 2015, adopté en septembre 2001), qui préconise une urbanisation compacte, tout en se donnant les moyens de répondre à l'évolution démographique par la mise à disposition de terrains, prioritairement pour le logement. L'objectif d'utilisation efficace des terrains à bâtir s'est réalisé, et doit être poursuivi : entre 1994 et 2010, la densité de population dans le canton est passée de 64 à 73 habitants par hectare de zone à bâtir destinée au logement. » (Introduction au projet de schéma directeur, p.3). Aujourd'hui, le canton poursuit sa politique de promotion des solutions d'aménagement qui font un usage mesuré du sol.

Dans ce contexte, le plan directeur cantonal 2030 (PDCn 2030), approuvé par le Conseil fédéral le 29 avril 2015, prévoit que les modalités d'aménagement du territoire doivent adapter l'utilisation du sol à la qualité et à la sensibilité de ce dernier. « Pour les sols particulièrement précieux, il est nécessaire de rechercher l'utilisation la plus efficiente (densification de la construction, compensation de surfaces, démolition, création d'espaces verts sur d'anciens terrains urbanisés, etc.). » (Introduction au projet de schéma directeur, p. 44).

Le PDCn 2030 contient notamment une fiche (fiche C01) touchant indirectement la protection quantitative du sol, dont l'objectif est de « préserver strictement les espaces de production agricole en dehors des extensions urbaines sur la zone agricole identifiées dans le plan directeur cantonal et en dehors des développements mesurés des villages dans l'espace rural ». Par ailleurs, le plan directeur cantonal prévoit également quelques opérations de reclassement de zones à bâtir en zone agricole. A ce propos, l'article 30F de

la loi cantonale d'application de la LAT (LaLAT¹³), qui prévoit l'octroi d'une indemnité puisée dans un fonds de compensation alimenté par le produit de la taxe perçue sur les plus-values foncières, doit favoriser ce type d'opérations. Néanmoins, les surfaces reclassées en zone agricole sont nettement inférieures aux futures extensions urbaines inscrites dans le projet de PDCn 2030.

Par conséquent, malgré les efforts réalisés, lesdites futures extensions urbaines ne permettraient plus, initialement, au canton de Genève de garantir le quota minimal de SDA de 8 400 ha exigé par la Confédération.

C'est pourquoi la nécessité de garantir ce quota a conduit l'office de l'urbanisme à procéder, en 2014, à une mise à jour de l'inventaire des SDA. Au 24 juin 2015, date de l'arrêté du Conseil d'Etat approuvant la modification des plans des surfaces d'assolement, celui-ci présente un excédent de 127 ha par rapport au quota des 8 400 ha, soit 8 527 ha. La mise à jour de l'inventaire permet d'engager la réalisation des projets prioritaires identifiés par le PDCn à l'horizon 2023. Ces projets représentent une emprise de 126 ha sur les SDA. Sur la base de la mise à jour de cet inventaire, le PDCn 2030 a été approuvé par le Conseil fédéral le 29 avril 2015. L'approbation du Conseil fédéral est accompagnée de réserves au sujet du développement du canton au-delà de l'an 2023, réserves auxquelles le canton doit répondre afin de respecter les exigences découlant de l'article 30 de l'OAT.

2.3 Protection qualitative

Bases légales

Comme il a déjà été mentionné, la protection qualitative des sols est prioritairement inscrite dans la LPE, mais les mesures visant à conserver à long terme la fertilité des sols en les protégeant des atteintes chimiques et biologiques sont arrêtées dans les dispositions d'exécution relatives à la loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux¹⁴, à la protection contre les catastrophes, à la protection de l'air, à l'utilisation de substances et d'organismes ainsi qu'aux déchets et aux taxes d'incitation (LPE, art. 33). En outre, les législations agricole (LAgr, art. 1 lettre b et art. 70 al. 2 lettre e) et forestière (OFo¹⁵ art. 28 lettre d) contiennent également des dispositions relatives à la protection des sols. A quoi s'ajoutent encore les dispositions concernant les sites et les sols pollués.

Les dispositions de la LPE, notamment au sujet des atteintes physiques, sont concrétisées dans l'OSol. Cette ordonnance régit l'observation, la surveillance et l'évaluation des atteintes portées aux sols. Elle fixe, en outre, les dispositions à respecter pour prévenir les compactations persistantes et l'érosion, ainsi que pour la manipulation des matériaux terreux. Elle définit, enfin, les mesures à prendre pour les sols menacés ou dégradés.

Au niveau cantonal, la loi d'application de la LPE (LaLPE¹⁶) ainsi que le règlement sur la protection des sols (RSol¹⁷) fixent les compétences et les missions du département chargé de la protection de l'environnement.

Objectifs et acteurs

Comme on peut le constater, le sol est un thème transversal à de nombreux domaines de l'environnement et la coordination de la protection du sol avec les acteurs chargés de ces domaines de l'environnement est essentielle. Dans ce cadre, l'objectif général du canton est de développer la protection qualitative des sols à tous les niveaux, tant au sein de

¹³ Loi d'application de la loi fédérale sur l'aménagement du territoire, L 1 30, LaLAT

¹⁴ Loi sur la protection des eaux, RS 814.20, LEaux

¹⁵ Ordonnance sur les forêts, RS 921.01, OFo

¹⁶ Loi d'application de la loi fédérale sur la protection de l'environnement, K 1 70, LaLPE

¹⁷ Règlement sur la protection des sols, K 1 70.13, RSol

l'administration qu'avec les partenaires externes et les acteurs des branches économiques concernées, telles la construction ou l'agriculture.

Outre le GESDEC, rattaché au département responsable de la protection de l'environnement, les principaux services cantonaux et partenaires en rapport avec les tâches de la protection des sols sont les suivants :

- Service du plan directeur cantonal (protection quantitative, aménagement du territoire, plan des surfaces d'assolement)
- Service de l'espace rural (amélioration foncière)
- Service des forêts et milieux riverains (prévention des dégâts aux forêts)
- AgriGenève¹⁸ (conseil aux agriculteurs, prestation écologique requise)
- Groupe "Sols et substrats" HEPIA de Lullier (appui technique, analyses de laboratoire)

Par ailleurs, le GESDEC assure la coordination pour la protection des sols entre les services cantonaux concernés (DGEau, DGAN¹⁹), par exemple pour la planification de l'infiltration des eaux à évacuer, la renaturation de cours d'eau, l'assainissement de sites contaminés ou la lutte contre les néophytes. Comme les moyens financiers et en personnel pour la protection des sols demeurent très limités par rapport aux tâches dévolues au canton par la législation, il est primordial d'associer les compétences techniques et scientifiques des différents services concernés par le sol.

Néophytes : plantes exotiques envahissantes.

Principes

La protection qualitative des sols s'inscrit dans le contexte global de la protection des hommes, des animaux et des plantes, ainsi que de leurs biocénoses et biotopes. Elle est régie selon le principe de prévention. En conséquence, les atteintes doivent être réduites à un niveau admissible à titre préventif et assez tôt.

Cette approche exige des mesures de protection des sols prises à la source, contre les polluants, les organismes génétiquement modifiés, pathogènes ou exotiques, la compaction, l'érosion et les modifications de la structure.

C'est pourquoi, à titre d'exemple, la manipulation des sols décapés lors des opérations de construction, l'utilisation des sols selon leur teneur en polluants ou la lutte contre les plantes néophytes envahissantes, sont aussi du ressort de la protection qualitative des sols.

2.4 Stratégie de la protection du sol

Comme il a déjà été mentionné, la conservation à long terme de la fertilité du sol est basée sur la prévention de toute contamination du sol avec des polluants et de tout dommage à ses caractéristiques naturelles, par exemple sa structure.

Aussi, toutes les mesures prises pour améliorer la qualité de l'air et de l'eau, pour contrôler l'utilisation des substances dangereuses pour l'environnement ou pour limiter les émissions de polluants en général concrétisent la prévention en matière d'atteintes chimiques aux sols.

¹⁸ AgriGenève est l'association faitière de l'agriculture genevoise

¹⁹ Direction générale de l'eau, Direction générale de l'agriculture et de la nature

La LPE met en œuvre une stratégie à deux niveaux, tout d'abord l'application du principe de prévention, car les dommages aux sols sont souvent irréversibles, suivi, si nécessaire, d'interventions. Pour rappel, cela signifie que les atteintes qui pourraient devenir nuisibles ou incommodantes seront réduites à titre préventif et assez tôt (LPE art. 1). La loi définit ensuite ce que l'on entend par atteinte portée aux sols (art. 7 al. 4bis), jusqu'à quel niveau une atteinte est admissible et quelles mesures doivent être prises (art. 34). Il en résulte les tâches suivantes :

- prévention des atteintes;
- détection des atteintes (observation, surveillance et évaluation);
- mesures pour les sols menacés ou dégradés.

Concernant la détection, le canton a pour tâche de surveiller et d'évaluer les atteintes portées aux sols dans les régions où une atteinte est suspectée ou déjà établie (OSol art. 4 et 5). L'évaluation des atteintes est fondée sur des valeurs indicatives, des seuils d'investigation et des valeurs d'assainissement (cf. Figure 6 ci-après). Ces valeurs entraînent, chacune, des mesures concrètes. Par exemple, un canton peut restreindre l'utilisation du sol si les atteintes constituent une menace pour l'homme, pour les animaux ou pour les plantes. Ces valeurs limites matérialisent les tâches susmentionnées et sont déterminantes pour leur application actuelle et future. Lorsque l'on ne dispose pas de valeurs indicatives, l'évaluation des atteintes est basée sur la définition de la fertilité de l'OSol (art. 2 al.1).

Lorsque la situation l'exige, le canton prend les mesures nécessaires pour la protection qualitative des sols.

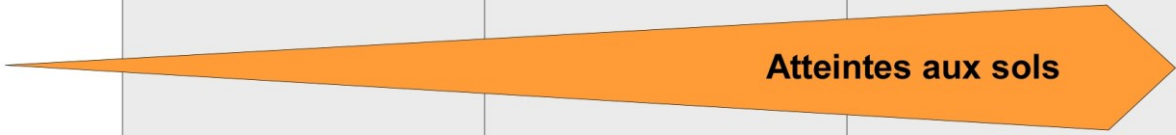
Cette stratégie est concrétisée par des outils très différents :

- **La prévention** passe par la formation des branches d'activité professionnelle ayant à faire avec le sol, la vulgarisation agricole, la sensibilisation du grand public ou encore par les prises de position du GESDEC dans le cadre des procédures d'autorisation de construire, d'aménagement du territoire et d'étude de l'impact sur l'environnement.
- **L'observation, la surveillance et l'évaluation** sont matérialisées à différentes échelles, par exemple, par des réseaux d'observation des sols, un relevé cantonal de l'érosion ou des études pédologiques spécifiques à un site.
- **Les mesures pour les sols menacés ou dégradés** sont définies, au cas par cas, sur la base des conclusions des études réalisées pour la détection des atteintes.

A Genève, la stratégie mise en œuvre à court terme consiste à augmenter la visibilité du service et la diffusion de l'information pour mieux faire connaître les principes et les mesures de base de la protection du sol, ainsi que la législation. En parallèle, les processus mis en place depuis la création du service sont pérennisés sous forme d'organigrammes et la coordination entre les services de l'Etat s'est développée. Enfin, des priorités sont fixées entre les types de sols à protéger et les acteurs ciblés.

A plus long terme, il s'agit d'améliorer l'observation et la surveillance, que ce soit au moyen du contrôle plus régulier des chantiers ou de la création d'un système de mesure automatique de l'humidité du sol. La finalité de la stratégie étant de faire entrer dans les mœurs les bonnes pratiques en matière de protection du sol.

Figure 6 : Stratégie suisse pour la protection des sols

	Valeur indicative	Seuil d'investigation	Valeur d'assainissement
	Elle sert à protéger préventivement et à long terme le sol comme biotope ainsi que son rôle dans les cycles naturels	Il correspond à une menace possible pour la santé de l'homme, des animaux ou des plantes qu'il convient d'évaluer au cas par cas	Elle indique le niveau de pollution chimique du sol à partir duquel certaines utilisations mettent forcément en péril l'homme, les animaux ou les plantes
	Pas de différenciation selon les utilisations	Différenciation selon : - cultures alimentaires - cultures fourragères - risque par ingestion	Différenciation selon : - agriculture et horticulture - jardins privés et familiaux - places de jeux
			
Fertilité du sol garantie à long terme	Fertilité du sol non garantie à long terme, mais pas de risque concernant l'utilisation	Risque possible concernant l'utilisation	Risque avéré concernant l'utilisation
Limitation préventive des émissions selon la législation fédérale			
Limitation renforcée des émissions par les cantons			
Restriction d'utilisation, assainissement éventuel			
			Interdiction d'utilisation et assainissement

Source : Etat de l'environnement - Canton de Fribourg, Service de l'environnement 2006 (légèrement modifiée)

Dix principes directeurs pour la protection du sol (OFEV, 2007)

Ces dix principes issus du concept directeur pour la protection du sol en Suisse guident, au quotidien, l'activité du GESDEC :

1. La condition préalable à une utilisation responsable du sol est une connaissance de sa position centrale dans l'équilibre naturel ainsi que de sa vulnérabilité.
2. Le sol fertile doit – indépendamment de son utilisation – être protégé à titre préventif contre les pollutions chimiques et biologiques, ainsi que les atteintes physiques.
3. Une protection efficace et peu coûteuse du sol nécessite une observation et une surveillance coordonnées, parfois mises en œuvre sur le long terme.
4. Dans le sol s'accomplissent des processus d'une importance vitale pour l'équilibre naturel. C'est pourquoi, en termes de superficie, de quantité et de qualité, le sol doit uniquement être utilisé de manière durable, parcimonieuse et avec ménagement.
5. Les sols pollués présentant des dangers pour l'homme, les animaux de rente et les plantes utiles ne peuvent pas être laissés à la postérité en l'état. Ils doivent tout au moins être assainis de manière à éliminer les dangers.
6. Le sol ouvert est un bien commun tout comme l'eau, l'air et la forêt ; il peut certes être utilisé par son propriétaire, mais ne doit pas être détruit. Quiconque utilise le sol est donc aussi responsable de sa protection.
7. L'intégrité du sol doit être garantie par des normes juridiques.
8. La protection du sol est une mission incombant à l'ensemble de la société. Afin qu'elle puisse être remplie efficacement et en temps opportun, les conditions institutionnelles nécessaires à une protection du sol indépendante doivent être améliorées et ses ressources financières et en personnel augmentées.
9. La protection du sol doit être appliquée conjointement et de manière consensuelle par tous les acteurs. Un travail en réseau étroit est indispensable. Les doublons devront être évités par une attribution des responsabilités au cas par cas.
10. L'aménagement du territoire, l'agriculture et l'exploitation forestière sont des partenaires particulièrement importants de la protection du sol. La collaboration avec ces secteurs doit être intensifiée et entretenue.

3 Plan de mesures

La planification pour la protection des sols constitue l'outil opérationnel pour la protection qualitative des sols. La planification se décline en thèmes et mesures, précisant chaque objectif qui leur est associé. Les mesures sont décrites en détail dans des fiches spécifiques.

3.1 Thèmes et priorités

Le plan de mesures pour la protection des sols genevois se décline selon les 3 thèmes suivants :

- A. communication auprès des autorités, des professionnels et du public;
- B. observation, surveillance et évaluation des atteintes;
- C. prévention et protection des sols genevois.

Ces thèmes se déclinent en 11 mesures qui font l'objet d'une priorisation à deux niveaux, sur la base de leur importance environnementale et de l'urgence d'agir sur la situation actuelle. Ainsi, sur les 11 actions prévues, 7 ont une priorité 1.

Une priorité 1 correspond à la stratégie à court terme, alors qu'une priorité 2 correspond, quant à elle, à la stratégie à moyen terme.

L'ordre de priorité pour la protection des sols est fondé sur l'intérêt fonctionnel combiné à la surface totale occupée par chaque catégorie. Ainsi la priorité est fixée selon l'ordre suivant :

Sols agricoles > sols forestiers > sols urbains

Dans le même ordre d'idée, les acteurs sont ciblés selon l'impact potentiel de leur activité sur le sol, associé à leur rôle dans l'élaboration d'un projet.

Ingénieurs, architectes > entreprises de génie civil > agriculteurs, bûcherons > particuliers

Les pilotes de projets ont une fonction prédominante, car la planification des mesures de protection des sols durant la phase d'étude du projet est indispensable pour leur mise en pratique.

3.2 Les 11 mesures

Chaque mesure est décrite par une fiche spécifique (p.26 et ss). Celle-ci précise, outre le ou les objectifs spécifiques de chaque mesure, la méthode pour les atteindre. Le contexte général y est également résumé et les actions que le service souhaite développer sont succinctement exposées.

Il est ici nécessaire d'apporter quelques indications à propos de l'ordre de priorité des mesures.

- L'élaboration d'une nouvelle directive pour les modifications de terrain en zone agricole présente un caractère d'urgence car de nombreux cas de remblayage sauvage avec des matériaux inappropriés ont été constatés ces derniers mois.
- Pareillement, la refonte du site internet du GESDEC permettra de diffuser rapidement et plus efficacement qu'à l'heure actuelle la documentation utile aux planificateurs de travaux et aux entreprises.
- La création d'un réseau de mesure en continu de l'humidité du sol, idéalement en association avec d'autres cantons, est une démarche qui doit être mûrement réfléchie et qui, par conséquent, est fortement chronophage. C'est pourquoi, il s'agit d'une mesure à long terme pour le service.

- La mesure C4 "Amélioration de la qualité des sols de la zone bâtie" est prioritaire sur la mesure C6 "Exploiter durablement les sols forestiers" pour deux raisons et ce malgré un intérêt fonctionnel inférieur des sols urbains : premièrement, car un effort important doit être entrepris pour sensibiliser la population à l'intérêt des sols multifonctionnels en ville (infiltration des eaux, régulation climatique, beauté des espaces verts, etc.) et, deuxièmement, car les sols forestiers sont considérés comme suffisamment protégés par les mesures mises en place par la DGAN.
- Le calendrier de rédaction du présent document est la raison pour laquelle l'intégration de la qualité du sol comme critère d'aménagement du territoire est classée parmi les mesures à long terme. En effet, les grandes extensions urbaines sur la zone agricole ont d'ores et déjà été définies par le plan directeur cantonal 2030. Dès lors, la protection quantitative du sol dans le cadre de l'étalement urbain porte désormais davantage sur la limitation des emprises bâties, notamment en lien avec la gestion des eaux pluviales et la qualité de l'environnement bâti, que sur le dimensionnement de la zone à bâtir.

L'ordre de priorité des mesures est susceptible de changer à la lumière de nouvelles observations et de l'évolution de l'activité du secteur. Le tableau synoptique ci-après permet une vue d'ensemble des mesures.

Tableau 4 : Tableau de synthèse des mesures

Communication auprès des autorités, des professionnels et du public		Priorité
A1	Établir une nouvelle directive pour les modifications de terrain en zone agricole en collaboration avec la DGAN	1
A2	Améliorer le site internet du GESDEC	1
A3	Élaborer une documentation cantonale d'aide à l'application des dispositions légales de la protection des sols	2
Observation, surveillance et évaluation des atteintes		
B1	Valoriser le réseau cantonal d'observation des sols GEOS	1
B2	Créer un réseau de mesures en continu de l'humidité du sol	2
Prévention et protection des sols genevois		
C1	Protéger les sols sur les chantiers	1
C2	Protéger les sols sur les gravières et exploitations assimilées	1
C3	Exploiter durablement les sols agricoles	1
C4	Améliorer la qualité des sols de la zone bâtie - reconstituer des sols à deux couches (A+B)	1
C5	Intégrer la qualité du sol comme critère d'aménagement du territoire	2
C6	Exploiter durablement les sols forestiers	2

	Action en cours
	Action à développer

A1. ÉTABLIR UNE NOUVELLE DIRECTIVE POUR L'AMENAGEMENT DE PARCELLES HORS DES ZONES A BATIR AINSI QU'UNE NOTICE POUR LES AMELIORATIONS DE SOLS DANS UN BUT AGRICOLE EN COLLABORATION AVEC LA DGAN		Priorité 1
Objectif	<ul style="list-style-type: none"> Améliorer la qualité des travaux réalisés et la gestion administrative de ce type de projet. 	
Indicateur	<ul style="list-style-type: none"> Directive et Notice disponibles en ligne en décembre 2015. 	
Contexte	<p>La diminution des volumes de décharge disponibles augmente la tentation d'utiliser la zone agricole pour l'élimination des matériaux d'excavation.</p> <p>En raison de modifications de la législation cantonale relative à la gestion des déchets en date du 07.11.2012, la Directive transitoire - Remblayage en zone agricole du 03.09.2007, établie conjointement par le Domaine de l'agriculture, les services cantonaux de géologie et de gestion des déchets, est désormais obsolète et doit être entièrement révisée.</p> <p>Il est nécessaire de mettre à jour le cadre administratif et technique pour les modifications de terrain en zone agricole, afin de traiter uniformément tous les projets et de protéger les sols agricoles.</p>	
Horizon temporel	<p>Elaboration : en cours</p> <p>Application de mesures transitoires : en cours</p> <p>Diffusion : janvier 2016.</p>	
Responsables	GESDEC, DGAN.	
Partenaire	AgriGenève (information des agriculteurs genevois).	
Autres acteurs / Public cible	Document à l'attention des personnes impliquées dans ces projets, des exploitants, des propriétaires, des entreprises de terrassement et des bureaux d'ingénieurs.	
Description / Méthode	<ol style="list-style-type: none"> 1. Identification des éléments à conserver, à supprimer dans la directive transitoire; 2. Identification des nouveaux éléments à ajouter; 3. Rédaction d'un projet de directive, relecture et commentaire; 4. Corrections et mise en page du projet; 5. Relecture finale et validation → état d'avancement au 30.10.2015; 6. Mise en ligne de la nouvelle directive; 7. Diffusion auprès du public cible. 	
Coûts	Frais d'édition, ressources internes.	
État de réalisation	Rédaction et corrections terminées. Relecture finale et validation en cours.	
Calendrier / Échéances	<p>Validation prévue pour octobre 2015.</p> <p>Diffusion prévue pour janvier 2016.</p>	
Action à développer	Évaluation de la mise en œuvre de la directive, ainsi que la notice en 2017.	

A2. AMELIORER LE SITE INTERNET DU GESDEC		Priorité 1
Objectifs	<ul style="list-style-type: none"> • Sensibiliser le public sur la protection de la ressource sol; • Informer sur l'organisation du GESDEC et sur la mise en œuvre de la législation; • Améliorer la diffusion des documents pour la protection des sols. 	
Indicateur	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Audience du site Web et plus spécifiquement des pages "Sols". 	
Contexte	<p>Les pages concernant le sol de l'actuel site du GESDEC contiennent peu de liens et d'informations utiles. A l'heure d'internet, aussi bien les références à la législation applicable que les documents d'aide à l'exécution et de sensibilisation édités par la Confédération, les directives cantonales d'application de la législation, les actions de communication existantes, les liens utiles et les prestations du service, doivent être directement accessibles sur un site Web, simple d'emploi.</p>	
Horizon temporel	Réalisation du nouveau site, puis mise à jour régulière.	
Responsable	Le GESDEC définit et élabore le contenu du site.	
Partenaire	Le service de l'information et de la communication (SIC), pour la réalisation du site Web.	
Autres acteurs / Public cible	Public cible : tous les acteurs ayant un lien avec le sol.	
Description / Méthode	<ol style="list-style-type: none"> 1. Définition des éléments importants à faire apparaître; 2. Définition de la structure du site (visuel et dynamique); 3. Rassembler la documentation et les liens utiles en lien avec le sol; 4. Élaboration du contenu; 5. Réalisation des pages du site. 	
Coûts	Ressources internes.	
État de réalisation	<p>Etapes 1 à 4 réalisées.</p> <p>Réalisation des pages suspendue en septembre 2015 par un projet de refonte de site internet à l'échelle de l'Etat de Genève.</p>	
Calendrier / Échéances	En attente du nouveau projet de site internet.	
Action à développer	Mise à jour annuelle du site internet du service.	

A3. ÉLABORER UNE DOCUMENTATION CANTONALE D'AIDE A L'APPLICATION DES DISPOSITIONS LEGALES DE LA PROTECTION DES SOLS		Priorité 2
Objectifs	<ul style="list-style-type: none"> • Renforcer la prise de conscience concernant la nécessité de protéger les sols; • Améliorer le niveau de connaissance des services partenaires de l'Etat, des professionnels et du public, au sujet des sols. 	
Indicateurs	<p>Documentation en ligne :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fiche 01 - Mesures de protection du sol, matelas protecteurs et pistes; ▪ Fiche 02 - Utilisation de machines équipées de pneus sur les chantiers linéaires; ▪ Fiche 03 - Concept pour la réalisation d'une fouille large; ▪ Fiche 04 - Concept pour la réalisation d'une fouille étroite; ▪ Directive - Application du règlement cantonal sur la protection des sols <p>Documentation en production + échéance de mise en ligne;</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Brochure - Aide à la conception d'un plan de gestion des sols, 01/2016; ▪ Formulaire - Remodelage de terrain pour la réhabilitation du sol, 01/2016. 	
Contexte	<p>Il existe déjà une documentation (p.ex. manuel, guide, fiches techniques, magazine, poster, cf. bibliographie), élaborée par l'OFEV, concernant les différents aspects de la protection du sol, ainsi que pour la sensibilisation du public. Une directive cantonale précise, par ailleurs, les documents reconnus par le GESDEC comme étant appropriés pour l'exécution de la législation.</p> <p>Malheureusement, ces documents sont pour la plupart méconnus et d'un format inadapté à la pratique. Dès lors, pour diffuser plus facilement les principes fondamentaux et les mesures de base de la protection du sol, de nombreux cantons ont élaboré des documents de synthèse ciblés par branche d'activité (p.ex. construction, foresterie, agriculture, jardinage).</p> <p>Pour sa part, le GESDEC a traduit durant le premier semestre 2013 des fiches techniques du canton de Zurich pour les chantiers linéaires (p.ex. conduite d'eau) et l'aménagement de plateformes de chantier qui sont des travaux qui peuvent endommager irréversiblement les sols.</p>	
Horizon temporel	Action ponctuelle, mais démarche continue.	
Responsable	GESDEC.	
Partenaire	Commission romande pour la protection des sols (ROSOL).	
Autres acteurs / Public cible	Public cible : toutes les personnes ayant à faire avec le sol.	
Description / Méthode	<p>Identification des besoins des branches d'activité professionnelle ayant à faire avec le sol par observation et discussion.</p> <p>Identification des besoins de support du GESDEC pour la communication.</p> <p>Recensement des documents des autres cantons.</p> <p>Élaboration, traduction ou reprise de documents selon les besoins identifiés.</p>	
Coûts	Frais d'édition, ressources internes.	
État de réalisation	Quatre fiches techniques et une directive mises en ligne en 2014.	
Calendrier / Échéances	<p>Finalisation et diffusion d'une brochure d'aide à la conception d'un plan de gestion des sols ainsi que d'un formulaire concernant le remodelage de terrain pour la réhabilitation du sol, au mois de décembre 2015.</p> <p>Evaluation en 2016 de l'opportunité d'adapter au canton de Genève les directives vaudoises DMP 861, 863, 864 et 864a.</p>	
Action à développer	Enquêtes de satisfaction au sujet de la documentation.	

B1. VALORISER LE RESEAU CANTONAL D'OBSERVATION DES SOLS GEOS		Priorité 1
Objectifs	<ul style="list-style-type: none"> • Récolter des informations sur les sols du canton; • Observer l'évolution de la fertilité des sols à long terme; • Surveiller et évaluer les atteintes conformément à l'OSol. 	
Indicateur	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Publication d'un rapport d'étude et d'une note de synthèse à la fin de chaque cycle de 6 ans, prochaine publication prévue pour mars 2016. 	
Contexte	<p>Le réseau GEOS a été créé en 1990 par le laboratoire cantonal d'agronomie aujourd'hui rattaché à l'école d'ingénieurs de Lullier, actuellement HEPIA²⁰. En 2010, le réseau a été redimensionné pour mieux refléter la situation des sols du canton et pour se coordonner avec le suivi de la qualité des eaux (SPAGE²¹). Il couvre aujourd'hui non seulement les zones agricole et forestière, mais aussi la zone urbaine. Il est le pendant cantonal du réseau national d'observation des sols NABO.</p> <p>Il est constitué de 102 sites. Le nombre de sites pour chaque type de couverture du sol (grandes cultures, prairie, forêt, viticulture, arboriculture, culture maraîchère et site naturel) est approximativement proportionnel à la situation actuelle du couvert végétal cantonal.</p> <p>Le mandat de suivi du réseau GEOS fait l'objet d'une convention, entre le GESDEC et l'HEPIA de Lullier, qui porte sur la période de sept ans s'étendant de 2009 à 2015.</p>	
Horizon temporel	Action cyclique (6 ans).	
Responsable	GESDEC.	
Partenaire	HEPIA de Lullier.	
Autres acteurs / Public cible	-	
Description / Méthode	<ol style="list-style-type: none"> 1. Prélèvement d'échantillons de sols sur 102 sites à 4 niveaux de profondeur (tous les 20 cm jusqu'à 80 cm), paramètres biologiques relevés sur 4 sites, 17 sites sont étudiés par année. 2. Analyses des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques : <ol style="list-style-type: none"> a. les descripteurs principaux du sol (granulométrie, pH, carbone organique, calcaire, CEC;²² b. les teneurs en éléments nutritifs (P, K, Mg, Ca); c. les teneurs en éléments traces métalliques (métaux lourds); d. les paramètres d'activité biologique et de biomasse totale des micro-organismes, ainsi que l'activité lombricienne; e. les polluants organiques (depuis 2010). 3. Stockage et mise à disposition des résultats sur le système d'information du territoire genevois (SITG). 4. Mise en valeur des résultats (traitement statistique) et publication de rapports. 	
Coûts	Honoraires et analyses 70 000 F HT / année, ressources internes.	
État de réalisation	Exploitation du réseau en cours.	
Calendrier / Échéances	2015 : fin du cycle, convention à renouveler en décembre 2015 pour un nouveau cycle de 6 ans.	
Action à développer	Observation d'autres caractéristiques telles que les descripteurs physiques (structure, érosion, compaction) ou les aspects biologiques (micro-organismes, champignons, mycorhizes, algues, insectes et mammifères, etc.), selon les moyens financiers disponibles.	

²⁰ Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture

²¹ Schéma de protection, d'aménagement et de gestion des eaux

²² Capacité d'échange cationique

B2. CREER UN RESEAU DE MESURES EN CONTINU DE L'HUMIDITE DU SOL		Priorité 2
Objectif	<ul style="list-style-type: none"> • Prévenir les atteintes physiques aux sols lors de conditions trop humides. 	
Indicateur	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Installation de stations de mesure en 2017, minimum 1 station. 	
Contexte	<p>Connaitre l'humidité du sol est primordiale pour une exploitation durable du sol tant en sylviculture qu'en agriculture ou encore lors de travaux de terrassement.</p> <p>Les travaux du sol peuvent se faire sans dommage uniquement lorsque celui-ci est ressuyé, c'est-à-dire suffisamment sec pour supporter le poids des machines et les manipulations (p.ex. décapages, transports, stockage). Un sol mouillé est beaucoup plus sensible aux atteintes, notamment à travers le compactage. Pour mesurer l'état d'humidité d'un sol, on mesure sa saturation, à l'aide de sondes appelées tensiomètres. Actuellement, seuls certains chantiers sont équipés de telles sondes.</p> <p>A l'exemple de nombreux cantons suisses allemands (Lucerne, Zurich, Schaffhouse, Aarau, St-Gall, Glaris, Grison, Appenzell, Thurgovie, Berne, Zoug, Bâle, Soleure, Uri) et bientôt romands (Vaud, Fribourg), la mise en place d'un réseau de mesure automatique de l'humidité des sols permettrait de fournir, en temps réel, de précieuses informations pour la protection du sol, pour tout type de travaux. Ce réseau pourrait être créé sur la base des stations météorologiques existantes.</p> <p>En plus de l'installation de sondes, il s'agit également de créer une plateforme de présentation des données modélisées selon les exigences techniques de l'OFEV.</p> <p>En plus de son rôle technique, ledit réseau constitue un outil de communication supplémentaire pour la sensibilisation du grand public.</p>	
Horizon temporel	Une fois réalisée, action continue.	
Responsable	GESDEC.	
Partenaires	A définir : cantons de Vaud, Fribourg, groupe ROSOL, Confédération, HEPIA de Lullier, école d'ingénieur de Changins.	
Autres acteurs / Public cible	Bureaux d'ingénieurs, responsables du suivi environnemental de réalisation (SER), entreprises de construction, grand public.	
Description / Méthode	<ol style="list-style-type: none"> 1. Analyses des systèmes existants en Suisse; 2. Analyse et planification financières (réalisation et maintenance); 3. Recherche de partenaires; 4. Identification des sites d'implantation des stations de mesures; 5. Réalisation du réseau (l'achat, l'installation, la mise en service); 6. Création de la plateforme Web; 7. Diffusion de l'information auprès du public cible; 8. Utilisation quotidienne pour la protection des sols sur les chantiers. 	
Coûts	Evaluation basée sur le projet des cantons de Vaud et Fribourg : <ul style="list-style-type: none"> • Installation de 1 station METEOTEST (tensiomètres, pluviomètre, support et électronique) 16 500 F ; Entretien de 1 station 3 500 F / année; • Site web création 4 000 F + 750 F / année pour la transmission des données. 	
État de réalisation	Conception initiée.	
Calendrier / Échéances	Objectif : développer le projet en 2016 pour l'installation de 1 à 3 stations de mesure en 2017.	
Action à développer	Mise en valeur des données obtenues par les stations de mesures.	

C1. PROTÉGER LES SOLS SUR LES CHANTIERS		Priorité 1
Objectifs	<ul style="list-style-type: none"> • Assurer la protection des sols (p.ex. circulation, stockage, manipulation des matériaux terreux, lutte contre les néophytes); • Détecter les atteintes telles que compaction, mélange et pollution des sols; • Prévenir les pollutions secondaires par la réutilisation de sols pollués. 	
Indicateur	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nombre de contrôles de chantier par année. 	
Contexte	<p>Les projets de construction sont une cause courante d'atteinte physique aux sols. Lorsqu'aucune mesure de protection n'est mise en œuvre, ces atteintes peuvent se révéler irréversibles.</p> <p>De ce fait, il est essentiel de contrôler l'application des bonnes pratiques en matière de protection du sol sur les chantiers. De surcroît, le respect des charges liées aux autorisations de construire doit également être vérifié.</p> <p>Des documents de contrôle multi-thème pour le suivi environnemental de réalisation (SER) sont en cours d'élaboration par la DGEau en collaboration avec le service de l'environnement et des risques majeurs (SERMA), et avec l'appui des autres services de l'environnement.</p>	
Horizon temporel	Action continue.	
Responsable	GESDEC.	
Partenaires	HEPIA de Lullier, DGEau, DGAN, SERMA.	
Autres acteurs / Public cible	Bureaux d'ingénieurs, directions des travaux, maîtres d'ouvrages, entreprises.	
Description / Méthode	<p>Chaque service est responsable du contrôle de ses thématiques. A cette fin, le GESDEC a développé son propre outil d'alerte par email via smartphone en cas d'infraction sur un chantier.</p> <p>Application des mesures pour la protection des sols :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Guide de l'environnement n°10 : Construire en préservant les sols (OFEFP), 2001 ; • Directives pour la protection des sols (OFEN), 1997; • Normes suisses SN 640 581a, SN 640 582, SN 640 583; • Directives ASG²³ pour la remise en état des sites, 2001. <p>Exigence du service pour les chantiers importants (au cas par cas) : mandat de suivi pédologique.</p> <p>Lorsqu'il suspecte une atteinte, le GESDEC réalise ou mandate une expertise pédologique.</p>	
Coûts	Ressources internes.	
État de réalisation	Action épisodique.	
Calendrier / Échéances	Elaboration d'une planification du contrôle des chantiers en février 2016.	
Actions à développer	<ul style="list-style-type: none"> • Créer une structure cantonale spécialisée pour le SER afin de : <ul style="list-style-type: none"> - développer la collaboration interservices pour le contrôle des charges des autorisations de construire, et - améliorer la coordination entre les services pour les visites de chantiers. • Promouvoir le suivi des travaux sur les sols par des spécialistes de la protection des sols sur les chantiers (SPSC²⁴). 	

²³ Association Suisse de l'industrie des Gravieres et du Béton

²⁴ Titre décerné par la société suisse de pédologie, www.soil.ch

C2. PROTÉGER LES SOLS SUR LES GRAVIÈRES ET EXPLOITATIONS ASSIMILÉES		Priorité 1
Objectifs	<ul style="list-style-type: none"> • Assurer la protection des sols (p.ex. circulation, stockage, manipulation des matériaux terreux); • Détecter les atteintes; • Prévenir les pollutions secondaires par la réutilisation de sols pollués; • Conserver durablement la fonction de production du sol 	
Indicateur	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Constat de la bienfaisance de la remise en état : amélioration de la qualité des sols reconstitués au regard des indices d'aptitude culturale et du niveau de fertilité. 	
Contexte	<p>De manière générale, la protection du sol dans un projet de gravière commence, avant l'ouverture, par la préparation du terrain au décapage, et prend fin à la restitution définitive pour une utilisation normale à l'agriculture après plusieurs années d'une culture spéciale pour la remise en état du sol. Le sol reconstitué doit être exploité avec beaucoup de ménagement afin que sa structure se stabilise naturellement et que l'activité biologique redémarre.</p> <p>L'ASG a élaboré, en 2001, de sa propre initiative, avec le concours de spécialistes des services cantonaux, d'entrepreneurs et de conseillers privés, un catalogue de mesures pour l'exécution de l'OSol dans le cadre des exploitations de gravières.</p> <p>Ces directives transposent les connaissances actuelles en matière de protection du sol en instructions applicables dans la pratique. Elles sont, à ce titre, reconnues par le GESDEC comme document de référence pour la protection du sol dans le cadre d'exploitation de gravières.</p>	
Horizon temporel	Action continue.	
Responsable	GESDEC.	
Partenaire	DGAN.	
Autres acteurs / Public cible	Bureaux d'ingénieurs, exploitants de gravier, agriculteurs, propriétaires fonciers.	
Description / Méthode	<p>Le GESDEC est l'autorité compétente chargée de l'application de la législation cantonale sur les gravières et exploitations assimilées, soit :</p> <ul style="list-style-type: none"> • l'instruction des dossiers, pilotage de la procédure administrative; • Le contrôle des rapports pédologiques de l'état initial et de fin de travaux, exigé par la législation cantonale; • Le suivi de l'exploitation par un inspecteur, le contrôle de la conformité des décapages, des manipulations et de la reconstitution du sol agricole par rapport aux recommandations du rapport pédologique; • Une séance annuelle de sensibilisation des exploitants de gravières sur une thématique environnementale, p.ex. sol, néophytes. <p>Les exigences systématiques du service sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'application des Directives de l'ASG pour la remise en état des sites / Directives pour une manipulation appropriée des sols; • Le mandat de suivi pédologique. <p>Lorsqu'il suspecte une atteinte, le GESDEC réalise ou mandate une expertise pédologique.</p>	
Coûts	Ressources internes.	
État de réalisation	Déploiement de la mesure en cours.	
Calendrier / Échéances	Pas de calendrier ; un contrôle systématique en fonction des projets et des conditions météorologiques.	
Action à développer	Organisation d'une journée d'échange annuelle avec les bureaux d'ingénieurs en environnement et/ou les exploitants de gravières pour favoriser la communication et la collaboration entre les parties.	

C3. EXPLOITER DURABLEMENT LES SOLS AGRICOLES		Priorité 1
Objectifs	<ul style="list-style-type: none"> • Garantir à long terme la fertilité des sols. • Prévenir et lutter contre l'érosion et le compactage. • Prévenir l'augmentation des teneurs en polluants. 	
Indicateur	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Etude pédologique réalisée selon les situations, p.ex. réparation de sols endommagés par des travaux 	
Contexte	<p>La conservation à long terme de la fertilité des sols agricoles est primordiale, compte tenu de la fonction de production du sol.</p> <p>Les pratiques agricoles inadaptées sont la principale cause d'atteintes aux sols agricoles.</p> <p>Par conséquent, il convient, en particulier, d'encourager les méthodes d'exploitation ménageant les sols.</p> <p>Considérant les atteintes chimiques, le monitoring (mesure B1) est indispensable pour examiner si les mesures mises en œuvre en vertu des prescriptions dans les domaines de la protection des eaux et de l'air, ainsi que de l'utilisation de substances (p.ex. engrais, pesticides) sont efficaces.</p>	
Horizon temporel	Action continue.	
Responsables	GESDEC, DGAN.	
Partenaire	AgriGenève.	
Autres acteurs / Public cible	Exploitants agricoles.	
Description / Méthode	<p>Élaboration et application de la directive pour les modifications de terrain en zone agricole.</p> <p>Contrôle des modifications de terrain en zone agricole (responsabilité à définir entre DGAN et GESDEC).</p> <p>Paiements directs aux exploitations agricoles respectant les prestations écologiques requises (PER) qui prévoient une protection appropriée du sol.</p> <p>Une première campagne de contrôle et d'évaluation de l'érosion a été menée à l'automne 2012 sur les terres ouvertes et les prairies du canton de Genève. Celle-ci sera renouvelée régulièrement et doublée d'interventions ponctuelles lors d'événements météorologiques extraordinaires. Les résultats sont consignés dans un rapport de synthèse.</p> <p>Mise en œuvre d'aménagements antiérosifs et information des milieux agricoles par le GESDEC en collaboration avec AgriGenève. En cas d'érosion dépassant les valeurs admissibles, imposition de mesures correctives.</p> <p>La vulgarisation agricole est assurée par AgriGenève sur mandat de la DGAN. Elle sensibilise notamment les agriculteurs à la lutte contre la compaction, l'érosion et encourage les techniques ménageant les sols.</p> <p>Études comparatives, pilotées par AgriGenève, sur l'impact des méthodes dites sans labour et des méthodes conventionnelles.</p>	
Coûts	Ressources internes.	
État de réalisation	Initialisation de la mesure.	
Calendrier / Échéances	Mesure réalisée au cas par cas au gré des différentes situations possibles. Pas de calendrier ni de diagnostic systématique à l'échelle du canton.	
Actions à développer	<ul style="list-style-type: none"> • Soutien technique et/ou financier à AgriGenève pour la diffusion et la valorisation des résultats des études sur l'impact des techniques agricoles sur le sol; • Actualiser les cartes de risques d'érosion des sols cultivés du système d'information du territoire genevois (SITG); 	

	<ul style="list-style-type: none">• Surveillance de la compaction des sols agricoles. Les services cantonaux sont dans l'attente de valeurs limites légales pour la compaction des sols;• Recensement de la totalité des sols agricoles dégradés nécessitant des mesures pour retrouver une qualité minimale et permettre une exploitation agricole normale.
--	---

C4. AMELIORER LA QUALITE DES SOLS DE LA ZONE BATIE - RECONSTITUER DES SOLS A DEUX COUCHES (A+B)		Priorité 1
Objectifs	<ul style="list-style-type: none"> • Augmenter la part réutilisée de matériaux terreux excédentaires; • Améliorer la qualité des sols reconstitués lors de chantiers; • Conserver ou rétablir les services écosystémiques des sols de la zone bâtie; • Améliorer la biodiversité de la zone bâtie. 	
Indicateur	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Etude pédologique réalisée selon les projets. 	
Contexte	<p>« La majorité des sols en milieu urbain présente des propriétés défavorables à la croissance et au développement des plantes et de la faune. Les organismes se développent dans des matériaux anthropiques hétérogènes, compactés, sans réserve nutritionnelle et hydrique, parfois pauvres en oxygène. » (Amossé <i>et al.</i>, 2013).</p> <p>Hormis la loi, il y a donc trois raisons principales à reconstituer des sols anthropiques à deux couches :</p> <ul style="list-style-type: none"> • recréer des sols proches de leur état naturel de sorte qu'ils soient à même d'assurer leurs fonctions, par exemple l'infiltration des eaux pluviales; • le sol est une ressource précieuse qu'il s'agit de valoriser autant que possible; • il s'agit aussi de réserver les volumes disponibles pour le stockage définitif en décharge pour des matériaux non valorisables. <p>La norme SIA 568 318 sur les aménagements extérieurs utilisée par les praticiens est insuffisante en matière de reconstitution du sol.</p>	
Horizon temporel	Action continue.	
Responsable	GESDEC.	
Partenaire	-	
Autres acteurs / Public cible	Architectes, paysagistes, services des espaces verts communaux.	
Description / Méthode	<ol style="list-style-type: none"> 1. Diffusion du site internet www.respectons-notre-sol.ch pour sensibiliser les architectes et les maîtres d'ouvrage à l'intérêt de reconstituer des sols à deux couches (A+B). 2. Exigence de reconstituer des sols à deux couches, dans le cadre des procédures d'autorisation de construire. 3. Promotion des sols vivants, c'est-à-dire qui assurent des fonctions écosystémiques, intégrée aux démarches de planification des grands projets au moyen d'objectifs à l'attention des mandataires. 	
Coûts	Ressources internes.	
État de réalisation	Déploiement de la mesure en cours.	
Calendrier / Échéances	Intégration de la mesure à tous les grands projets d'aménagement du territoire à fin 2016.	
Actions à développer	<p>Intégration de la valorisation des matériaux terreux au projet ECOMAT^{GE 25} qui pour l'heure ne traite pas de cette catégorie de matériaux minéraux.</p> <p>Promouvoir des méthodes d'entretien des espaces verts qui favorisent les fonctions du sol (p.ex. l'apport de matière organique à un sol permet d'améliorer sa capacité à retenir les polluants). Créer un partenariat avec les principaux services d'entretien des espaces verts du canton.</p> <p>Création d'un observatoire des sols urbains. Une réflexion pilotée par l'HEPIA de Lullier, entre les services de l'Etat concernés par le sol et la nature est actuellement en cours.</p>	

²⁵ Le projet ECOMAT^{GE} consiste en la promotion d'une utilisation efficace des matériaux de construction. Il apporte des solutions durables aussi bien à la pénurie annoncée de graviers qu'à l'engorgement des lieux de stockage.

C5. INTEGRER LA QUALITE DU SOL COMME CRITERE D'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE		Priorité 2
Objectif	<ul style="list-style-type: none"> • Affecter les sols à l'usage pour lequel ils sont le mieux adaptés. 	
Indicateur	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pas d'indicateur actuellement. Cette mesure sera à intégrer aux prochains plans d'aménagement du territoire, tant locaux que régionaux. 	
Contexte	<p>La qualité des sols n'a pas constitué, à ce jour, un critère déterminant pour l'implantation des grands projets d'aménagement du territoire genevois. Néanmoins, « pour préserver la multifonctionnalité des sols, ils devraient toujours être affectés en priorité à l'usage pour lequel ils sont le mieux adaptés. »(Wenger, OFEV 2011, p.7).</p> <p>Il s'agit de :</p> <ul style="list-style-type: none"> • développer la ville, tout d'abord, par une densification des surfaces déjà construites ou par l'aménagement des zones dépourvues de sol; • déterminer la qualité des sols, de manière à planifier les bons usages aux bons endroits, à l'exemple des jardins potagers urbains qui nécessitent des sols non pollués. 	
Horizon temporel	Action continue.	
Responsable	GESDEC.	
Partenaires	Les départements ainsi que leurs services chargés de l'aménagement du territoire, de l'urbanisme, de l'environnement, de l'agriculture et des transports.	
Autres acteurs / Public cible	Architectes, bureaux d'ingénieurs.	
Description / Méthode	<p>Le GESDEC a élaboré, en collaboration avec le SERMA, une série d'objectifs pour les équipes de mandataires chargées de la planification directrice du territoire. On peut notamment citer :</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ l'identification et l'intégration des principales caractéristiques du sol dans l'aménagement du territoire; ▪ la limitation de l'étalement urbain sur les sols naturels; ▪ le développement d'une structure urbaine minimisant l'occupation du sol de sorte à maximiser la surface de sol naturel. <p>Le GESDEC collabore aux projets d'aménagement du territoire, mais il ne peut pas, actuellement, engager des moyens financiers pour des études concrètes. Il examine les propositions des mandataires et fournit les informations disponibles aux bureaux d'ingénieurs.</p>	
Coûts	Coûts estimés pour une étude cartographique à l'échelle 1:5000 ou 1:1000 de l'ordre de 300 F / ha.	
État de réalisation	Conception initiée.	
Calendrier / Échéances	Elaboration d'un programme d'actions en 2017, en coordination avec les services chargés de l'aménagement du territoire, de l'agriculture et de la forêt, en vue des prochains plans directeurs cantonaux et communaux.	
Actions à développer	<ul style="list-style-type: none"> • Commander des études pédologiques pour la 1^{ère} phase des projets d'urbanisation, qui est celle de l'étude d'opportunité; • Cartographier les sols modifiés lors de travaux de construction ou de remblayage; • Préciser la cartographie existante des sols agricoles genevois dans les régions clefs. 	

C6. EXPLOITER DURABLEMENT LES SOLS FORESTIERS		Priorité 2
Objectifs	<ul style="list-style-type: none"> • Prévenir les dégâts aux sols forestiers, en particulier le compactage et la pollution; • Garantir à long terme la fertilité des sols. 	
Indicateur	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Etude pédologique réalisée selon la situation, p.ex. compaction des layons de débardage. 	
Contexte	<p>Compte tenu de la multitude de fonctions assurées par les sols en forêt, la conservation à long terme de la fertilité du sol dans le cadre des travaux forestiers est primordiale.</p> <p>« Lors de l'utilisation d'engins de débardage, des perturbations à long terme de la fertilité des sols peuvent survenir » (Lüscher et al., 2009) (p.ex. compaction et ornières). L'institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL²⁶, a établi une notice pour le praticien concernant la protection physique des sols en forêt, spécialement pour la protection des sols lors de l'utilisation d'engins forestiers.</p> <p>Il s'agit d'exiger des méthodes d'exploitation réduisant les charges physiques au sol et minimisant les risques de pollution des sols par des hydrocarbures (diesel, huiles minérales, etc.).</p>	
Horizon temporel	Action continue.	
Responsable	DGAN.	
Partenaire	GESDEC, Entreprises forestières.	
Autres acteurs / Public cible	Entreprises forestières, propriétaires fonciers.	
Description / Méthode	<p>Un réseau de layons de débardage est systématiquement mis en place au sein des peuplements forestiers afin de réduire la surface affectée par le passage des engins. Ces layons sont réutilisés lors de chaque intervention.</p> <p>Exigences du service chargé des forêts pour les entreprises forestières :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Engins forestiers et tronçonneuses utilisant des huiles biodégradables; • Systèmes de rétention pour l'entreposage des hydrocarbures; • Produits d'absorption des hydrocarbures immédiatement engageables. <p>Application systématique des mesures pour la protection physique des sols en forêt établies par le WSL pour tous travaux dans les forêts propriétés de l'Etat (50 % de la surface de forêt du canton).</p> <p>Diffusion de la notice pour le praticien du WSL auprès des forestiers-bûcherons.</p> <p>Exigences minimales lors de requêtes en autorisation pour des travaux forestiers réalisés par un privé auprès du service des forêts et milieux riverains : application de la notice du WSL.</p>	
Coûts	Ressources internes.	
État de réalisation	Initialisation de la mesure.	
Calendrier / Échéances	Elaboration d'un schéma de coordination pour le contrôle de l'exploitation forestière avec la DGAN en 2018.	
Actions à développer	<ul style="list-style-type: none"> • Échange d'informations et d'expériences entre le GESDEC et la DGAN; • Observation des atteintes aux sols forestiers. Évaluation de l'efficacité des mesures de protection des sols; • Étude cartographique des sols forestiers, portant non seulement sur les types de sols, mais aussi sur la valeur forestière, et les services éco-systémiques et patrimoniaux. 	

²⁶ en allemand Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft

Annexes

Glossaire

arable

Qui peut être labouré ou cultivé.

biomasse

En écologie, masse totale des organismes vivants à un endroit et un temps donnés. Dans le domaine de l'énergie, le terme désigne la quantité de matière organique pouvant servir de source d'énergie.

carbone organique

Carbone présent dans les molécules organiques, qu'elles soient d'origine animale ou végétale, par opposition avec le carbone présent sous forme minérale (p.ex. calcaire CaCO_3) ou gazeuse (p.ex. CO_2).

compactage

Tassement du sol impliquant l'obstruction mécanique des cavités du sol et la destruction des unités structurales qui composent le sol (p.ex. les grumeaux). Le compactage engendre la diminution, voire la suppression, de la porosité du sol.

débardage

Opération de transport des arbres abattus hors de la zone de coupe.

érosion

Enlèvement et transport de particules de sol par l'eau et le vent.

étiage

Baisse saisonnière des eaux d'un cours d'eau. L'étiage correspond au plus bas niveau du cours d'eau.

géothermie

Science qui étudie la chaleur du sous-sol et par extension la technologie qui vise à l'exploiter.

horizon ou horizon pédologique

Couche grossièrement parallèle à la surface reconnaissable, c'est-à-dire que l'observateur peut délimiter. Les horizons sont différenciés par leurs constituants, leur organisation, leur fonctionnement, leur couleur et résultent des processus de formation du sol (d'après Gobat *et al.*, 2010, p.184).

humus

Ensemble des constituants organiques transformés du sol. Un sol riche en humus est un sol humifère.

layons de débardage

Cheminement en forêt utilisé par les engins chargés du transport du bois.

matière organique (MO)

Matière issue du vivant.

polluants inorganiques

Polluants dépourvus de carbone comme les métaux lourds (p.ex. le plomb, le cadmium, le cuivre), à l'exception des cyanures (CN).

polluants organiques

Polluants contenant du carbone comme les dioxines, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (PAH) ou les polychlorobenzènes (PCB).

remblayage

Opération de terrassement consistant à apporter des matériaux pour combler une dépression ou créer une bosse, c'est-à-dire effectuer une modification de la configuration du terrain.

sols imperméabilisés

Revêtements de sol qui ne permettent plus l'infiltration naturelle de l'eau dans le sol comme les routes goudronnées et les dalles en béton.

sylvicole

Relatif à la forêt.

Travaux cités

Office fédéral de l'environnement (OFEV). Protection du sol en Suisse : *Concept directeur*. s.l. : Confédération suisse, 2007.

Christian Schwick, Jochen Jaeger, René Bertiller, Felix Kienast. *L'étalement urbain en Suisse - Impossible à freiner ?* Berne : Haupt, 2012. ISBN 978-3-2580-7721-5.

Gobat, Aragno, Matthey. *Le sol vivant*. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2010. ISBN 978-2-8807-4718-3.

Société Suisse de Pédologie. Définition du sol de la Société Suisse de Pédologie. [En ligne] octobre 1998. www.soil.ch.

Conseil fédéral. *Crise alimentaire et pénurie de matières premières et de ressources*. Berne : Confédération suisse, 2009.

Amt für Umwelt Thurgau. *Vollzugskonzept Qualitiver Bodenschutz* 2012. 06204.

OFEV. Irremplaçable sol. *Environnement*. Confédération suisse, 4/2011.

OFEV. Le sol, trésor vivant. *Environnement*. Confédération suisse, 2/2004.

ASGB - Association Suisse de l'Industrie des Gravieres et du Béton. Directives ASG pour la remise en état des sites. *Directives pour une manipulation appropriée des sols*. Berne : ASG - Association Suisse des Sables et Gravieres, 2001.

P. Lüscher, F. Frutig, S. Sciacca, S. Spjevak, O. Thees. Notice pour le praticien. *Protection physique des sols en forêt*. Birmensdorf : Institut fédéral de recherches WSL., 2009. ISSN 1012-6554.

J. Amossé, L. Chabbey, E. Havlicek. Le sol urbain. *Sol de l'année 2013*. Lucerne : Société suisse de pédologie, 2013.

Fonds national suisse de la recherche scientifique. Ressource sol. *Programme national de recherche PNR 68*. [En ligne] Fonds national suisse de la recherche scientifique, 2012. www.nfp68.ch.

Bibliographie

Publications de l'office fédéral de l'environnement

- Commentaires concernant l'ordonnance du 1er juillet 1998 sur les atteintes portées aux sols (OSol). Berne : OFEV, 2001. VU-4809-F.
- Guide de l'environnement n°10 : Construire en préservant les sols, Berne, 2001.
- L'environnement pratique : Instructions, Évaluation et utilisation de matériaux terreux (Instructions matériaux terreux), Berne, 2001.
- L'environnement pratique : Directives pour la valorisation, le traitement et le stockage des matériaux d'excavation et déblais (Directive sur les matériaux d'excavation), Berne, 1999.
- L'environnement pratique : Manuel, Prélèvement et préparation d'échantillons de sols pour l'analyse de substances polluantes, Berne, 2003.
- L'environnement pratique : Manuel, Sols pollués - Évaluation de la menace et mesures de protection, Berne, 2005.
- Environnement 2/2004, "Le sol, trésor vivant", OFEV, 2004.
- Environnement 4/2011, "Irremplaçable sol", OFEV, 2011.

Publication de l'office fédéral de l'énergie

- Directives pour la protection des sols lors de la création de conduites souterraines de transport (Directives pour la protection des sols), OFEN, Berne, 1997.

Normes

- Terrassement, sol : Bases, SN 640 581a, Union des professionnels suisses de la route (VSS), Zurich, 1998.
- Terrassement, sol : Inventaire de l'état initial, tri des matériaux terreux manipulés, SN 640 582, Union des professionnels suisses de la route (VSS) Zurich, 1999.
- Terrassement, sol : Emprises et terrassements, entreposage, mesures de protection, remise en place et restitution, SN 640 583, Union des professionnels suisses de la route (VSS), Zurich, 1999.

Notices

- Recommandation - Protection des sols sur les chantiers, Coordination des services fédéraux de la construction et de l'immobilier, KBOB, Berne, 2000.
- Fiche ECO-CFC : Fouille en pleine masse / terrassement, Eco-bau 2011.
- Recommandations de l'AGIN : Utilisation de matériaux d'excavation contaminés (biologiquement) par des néophytes envahissantes, Arbeits Gruppe Invasive Neobiota, 2012.
- Protection des sols lors de la construction de terrains de golf, Aide-mémoire (avec check-list) publié par les cantons d'AG, AI, BE, BL, BS, FR, GR, JU, LU, SG, SO, TG, VD, ZG, ZH et la Principauté du Liechtenstein avec le soutien de la section Sol et biologie de l'office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP, aujourd'hui OFEV).
- Protection des sols et des eaux : Manifestations en plein air, Aide-mémoire publié par des cantons (AG, AI, BE, BL, FR, GE, GR, JU, LU, NE, SG, SO, SZ, TG, UR, VD, VS, ZG, ZH) et la Principauté du Liechtenstein avec le soutien de la section Sol et biologie de l'OFEFP, 2004.
- Notice pour le praticien : Protection physique des sols en forêt - Protection des sols lors de l'utilisation d'engins forestiers. P. Lüscher, F. Frutig, S. Sciacca, S. Spjevak, O. Thees. Institut fédéral de recherches WSL, Birmensdorf, 2009.
- L'environnement pratique : Fiche technique, Archéologie et protection des sols, E. Havlicek, OFEV, 2004.

Sites internet

- www.respectons-notre-sol.ch - Pour une protection efficace du sol dans le domaine du bâtiment - Conseils et normes pour la planification, action de la Confédération et des cantons.
- www.ge.ch/geologie - Service de géologie, sols et déchets.
- www.bafu.admin.ch/bodenschutz - Office fédéral de l'environnement OFEV - Thème Sols.
- www.soil.ch - Société suisse de pédologie.

Bases légales

Les principales bases légales fédérales et cantonales relatives à la protection du sol sont les suivantes :

- la Constitution fédérale de la Confédération suisse, du 18 avril 1999 (RS 101; Cst.), art. 73, 74 et 75;
- la loi fédérale sur la protection de l'environnement, du 7 octobre 1983 (RS 814.01; LPE);
- l'ordonnance sur les atteintes portées aux sols, du 1er juillet 1998 (RS 814.12; OSol);
- la Constitution de la République et canton de Genève, du 14 octobre 2012 (A 2 00; Cst-GE), articles 157 et 163;
- la loi d'application de la loi fédérale sur la protection de l'environnement, du 2 octobre 1997 (K 1 70; LaLPE);
- le règlement sur la protection des sols, du 16 janvier 2008 (K 1 70.13; RSol).

Les bases légales fédérales et cantonales relatives aux thématiques indiquées ci-après contiennent également des dispositions concernant la protection du sol :

- Sites pollués
- Gestion des déchets et matériaux d'excavation
- Études de l'impact sur l'environnement
- Eau
- Agriculture
- Forêts
- Nature et paysage
- Aménagement du territoire
- Gravières et remblais
- Air
- Substances et organismes
- Catastrophes