

SYNTHÈSE THÉMATIQUE ST2

2

# Sol et environnement

Matière organique du sol, émissions de gaz à effet de serre  
et atteintes physiques aux sols suisses

Frank Hagedorn Hans-Martin Krause Mirjam Studer Andreas Schellenberger Andreas Gattinger







**Sol et environnement**

Matière organique du sol, émissions de gaz à effet de serre  
et atteintes physiques aux sols suisses

---

Synthèse thématique ST2 du Programme national de recherche  
« Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68)



# Avant-propos

Depuis les premiers voyages de l'homme dans l'espace, la Terre est considérée comme la planète bleue et perçue comme telle essentiellement du fait de son hydrosphère et de son atmosphère. On oublie alors facilement que le sol est également une caractéristique distinctive de la planète Terre. Cette mince couche à la surface de la Terre, avec sa multitude d'êtres vivants, joue un rôle central dans l'échange de matières entre les différentes écosphères et donc pour la vie sur Terre. Les auteurs de la synthèse thématique ST2 «Sol et environnement» du Programme national de recherche «Utilisation durable de la ressource sol» (PNR 68) mettent en lumière certains de ces cycles de matières en se concentrant avant tout sur la matière organique du sol – l'humus – à laquelle différents projets du PNR 68 se sont consacrés de manière intensive. Celle-ci est essentielle pour de nombreuses fonctions biologiques, chimiques et physiques du sol. En tant qu'important réservoir de carbone, la matière organique du sol joue aussi un rôle important dans le système climatique. Selon le type et l'intensité de son utilisation, le sol agit comme puits ou source de CO<sub>2</sub>. C'est également le cas pour les autres gaz à effet de serre, qui ont été étudiés dans le PNR 68 et dans les projets liés de l'initiative Joint Programming «Agriculture, Food Security and Climate Change» (FACCE-JPI). Une exploitation prudente du sol est donc d'une grande importance non seulement pour la production alimentaire, mais aussi pour d'autres prestations fournies par le sol, que nous, humains, utilisons – outre le stockage de gaz à effet de serre, la stabilité du sol ou la filtration de l'eau par exemple. Les dommages physiques au sol dus à l'exploitation constituent un autre thème central auquel se consacrent les auteurs. L'accent est mis sur le tassement du sol, une des plus grandes menaces qui pèsent actuellement sur le sol. Afin de savoir si les sols tassés peuvent être régénérés, un essai à long terme a été lancé dans le cadre du PNR 68, qui livrera des résultats au-delà de la durée de ce dernier. Pour d'autres études, les projets du PNR 68 ont pu s'appuyer sur des essais à long terme en cours, tels que l'essai dok à Therwil BL. Il s'avère que ces essais de longue durée représentent une infrastructure de base importante pour la recherche sur les sols qu'il convient d'assurer à l'avenir.

*Prof. Dr. Emmanuel Frossard*

*Président du Comité de direction du Programme national de recherche  
«Utilisation durable de la ressource sol» (PNR 68)*

# Table des matières

---

**Avant-propos** → 5

---

**Table des matières** → 6

---

**Résumé** → 8

---

**1 Introduction** → 11

1.1 Le sol, ressource non renouvelable → 11

---

**2 La matière organique dans les sols suisses** → 14

2.1 Importance de la matière organique du sol → 14

2.2 Matière organique du sol et fonctions du sol → 16

2.3 Matière organique des sols et biodiversité → 17

2.4 Quelle quantité de carbone les sols suisses stockent-ils? → 18

2.5 Réaction de la matière organique du sol aux changements d'utilisation des terres → 21

2.6 Changement climatique et matière organique du sol → 23

2.7 Hotspot sols marécageux → 28

2.8 Bilan intermédiaire: Conservation de la matière organique du sol → 29

---

**3 Gaz à effet de serre** → 35

3.1 Les gaz à effet de serre et leur production → 35

3.2 Émissions de gaz à effet de serre provenant des sols suisses → 37

3.3 Bilan intermédiaire: Mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre provenant du sol → 40

---

**4 Protection physique du sol** → 45

4.1 Les atteintes physiques au sol → 45

4.2 Facteurs d'atteinte physique au sol → 47

4.3 Risque d'érosion des sols et de tassement → 50

4.4 Bilan intermédiaire: Mesures de lutte contre l'érosion et le tassement du sol → 54

---

**5 Nouvelles atteintes portées au sol** → 61

---



---

**6 Conclusion : sol et environnement en Suisse → 63**

---

**Annexes → 68**

---

A 1 Le Programme national de recherche « Utilisation durable  
de la ressource sol » (PNR 68) → 68

Les projets de recherche du PNR 68 → 70

---

A 2 Liste des illustrations → 74

Liste des tableaux → 75

Glossaire → 76

Liste des abréviations → 80

Bibliographie → 81

---

**Impressum → 90**

---

# Résumé

**La synthèse thématique 2 (ST2) « Sol et environnement » du PNR 68 porte essentiellement sur la matière organique du sol, les émissions de gaz à effet de serre provenant du sol et les atteintes physiques portées au sol. Elle étudie, en particulier, les incidences du changement climatique et de l'utilisation du territoire sur le sol et ses fonctions et, inversement, le rôle des sols dans le changement climatique et l'utilisation du territoire. Enfin, elle esquisse des mesures possibles de protection des sols.**

Le sol constitue une interface essentielle dans les écosystèmes terrestres. Il remplit des fonctions importantes en tant que milieu de vie et réservoir de carbone et d'éléments nutritifs. Il régule les cycles de l'eau et des matières et offre une protection contre la pollution par des substances étrangères. Le sol apporte ainsi les éléments fondamentaux de la croissance des plantes, fournit une eau potable et contribue à la protection contre les crues et les glissements de terrain. Les processus du sol agissent sur le climat, car les sols constituent à la fois une source et un puits pour les trois principaux gaz à effet de serre: dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), méthane (CH<sub>4</sub>) et protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O).

En Suisse le sol est soumis à des contraintes. Il est utilisé et imperméabilisé pour satisfaire les besoins croissants en terrains constructibles. La synthèse thématique 2 « Sol et environnement » du PNR 68 met l'accent sur le rôle des sols dans l'environnement avec les thèmes centraux « matière organique du sol », « émissions de gaz à effet de serre » et « atteintes physiques portées au sol ».

Les résultats montrent que :

- 1 Les sols suisses contiennent de grandes quantités de carbone dans leur matière organique, mais ils en perdent une quantité considérable suite à l'utilisation pour les grandes cultures et notamment au drainage des sols marécageux. Cela indique que les sols ne sont pas utilisés de manière durable et sont menacés à long terme. Les principales émissions de CO<sub>2</sub> dans l'agriculture suisse résultent de la perte de matière organique des sols marécageux. On peut s'attendre à des pertes en carbone des sols dues au changement climatique – augmentation des températures et intensification de la sécheresse. Les sols rejetteront donc plus de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.
- 2 La forte fertilisation dans certains secteurs de l'agriculture suisse n'entraîne pas seulement le lessivage de grandes quantités de nitrate et de phosphore, mais aussi des émissions élevées de gaz hilarant, qui agit sur le climat, en provenance du sol.
- 3 Le passage inadapté de machines agricoles lourdes sur les sols provoque un tassement irréversible des sols. Il faut s'attendre à des dommages à long terme comparables pour l'exploitation forestière et les travaux de construction. Des mesures ciblées telles que la création de macropores artificiels peuvent contribuer à la régénération des sols – avec un impact toutefois limité.

Les mesures de protection des sols doivent (i) viser en premier lieu la conservation de la matière organique du sol, qui est fondamentale pour les fonctions du sol. Cela vaut en particulier pour la protection des sols marécageux qui sont menacés à cause du drainage. La fertilisation organique augmente le stock de matière organique du sol, mais ne peut empêcher

totalemment les pertes de carbone dues à l'exploitation dans les sols cultivés. (ii) Une meilleure efficacité de l'azote par la réduction de la fertilisation azotée et l'intégration de légumineuses dans l'assolement améliorent l'impact climatique des sols suisses et diminuent la pollution des eaux souterraines et de surface. (iii) Les atteintes au sol, que ce soit par des substances étrangères ou par tassement suite au passage inadapté d'engins, doivent être évitées par des mesures préventives. À cet effet les directives de protection du sol, ressource limitée, doivent être systématiquement respectées et appliquées même à l'encontre d'autres intérêts, principalement économiques.

Contrairement à l'Union Européenne (UE), la Suisse ne dispose pas jusqu'ici d'une stratégie juridique et politique intégrale pour l'utilisation durable des sols. Puisque sa genèse dure des milliers d'années, le sol n'est pas une ressource renouvelable. Il doit de ce fait être protégé d'un point de vue tant qualitatif que quantitatif.

### Points essentiels de la synthèse

Le Programme national de recherche «Utilisation du sol en Suisse» (PNR 22), achevé en 1991, a formulé des propositions pour une utilisation mesurée du sol en Suisse<sup>1</sup>. Ses trois problématiques principales étaient: le maintien à long terme de la fertilité du sol, la réduction des pertes en sol et une meilleure répartition du sol. Le PNR 68 reprend 26 ans après ces thèmes. Dans le domaine «Sol et environnement», sont concernés la protection physique du sol et de nouveaux thèmes centraux tels que la mos et les émissions de gaz à effet de serre du sol. La présente synthèse partielle, basée sur les différents projets du PNR 68, se concentre sur les trois points suivants:

- 1 La mos et les dangers qui la menacent. Puisque la mos joue un rôle essentiel dans la plupart des fonctions biologiques, chimiques et physiques du sol, son état est déterminant aussi pour les fonctions de régulation du sol.
- 2 Les émissions de gaz à effet de serre, qui ne sont pas provoquées uniquement par la perte de mos, mais ont aussi d'autres causes (par ex. des émissions de N<sub>2</sub>O) et sont particulièrement importantes pour la lutte contre le changement climatique.
- 3 Les atteintes physiques au sol par tassement ou érosion. L'accent est mis sur les mesures permettant de réduire et de corriger ces atteintes.

En outre, la synthèse thématique donne un aperçu de nouvelles atteintes au sol, par exemple liées aux gènes de résistance aux antimicrobiens.

Le présent rapport synthétise les résultats des projets du PNR 68 pertinents pour les thèmes traités et les met en relation avec d'autres résultats de recherches et avec l'état actuel des connaissances relatives aux sols suisses. Il est notamment discuté de la manière dont le changement climatique et l'utilisation des terres modifient le sol et ses fonctions, du rôle des sols dans le changement climatique et l'utilisation des terres et des mesures permettant de protéger le sol.

*«Essentially, all life depends upon the soil [...] There can be no life without soil and no soil without life; they have evolved together.»*

Charles E. Kellogg

### 1.1 Le sol, ressource non renouvelable

**Le sol est à la base de nombreux services écosystémiques : il filtre l'eau, produit des aliments, stocke du carbone (C) dans la matière organique du sol (mos), constitue des habitats et possède un énorme patrimoine génétique. L'être humain et son environnement ont une influence directe sur de nombreuses propriétés du sol. Une utilisation non adaptée au site nuit aux fonctions essentielles d'habitat, de production et de régulation du sol. En Suisse, les principaux dommages subis par le sol sont l'imperméabilisation, le tassement, l'érosion, les glissements de terrain et la perte de matière organique. Alors que la dégradation peut intervenir en quelques secondes – comme pour le tassement – des dizaines voire des centaines d'années sont nécessaires pour la régénération du sol. Le sol est donc une ressource non renouvelable, à utiliser de manière durable.**

Le sol est à l'interface entre atmosphère, hydrosphère, biosphère et géosphère. La roche mère, le climat, le relief, la nappe phréatique, mais aussi la végétation, les organismes du sol et l'activité humaine contribuent à la pédogénèse. Les propriétés du sol sont donc influencées par des facteurs tant abiotiques que biotiques. Les sols de leur côté sont en interaction étroite avec les autres composantes de l'écosystème de par leurs fonctions de stockage, de régulation et de production.

La Suisse est caractérisée par une très grande variabilité des conditions environnementales dans un espace restreint. La diversité des facteurs environnementaux et des propriétés du sol y est presque aussi grande que dans l'ensemble du continent européen. Les températures moyennes annuelles s'étendent de moins de 0 °C à

12 °C – la même fourchette qu'entre le bassin méditerranéen et le cercle polaire. Les pH varient aussi de valeurs inférieures à 3, dans les horizons superficiels des sols du Tessin et les sols des moraines et molasses fortement acidifiés, à plus de 8 sur les roches calcaires du Jura. L'évolution des sols, dépendant de la durée d'altération, va de sols rocheux superficiels, pierreux et pauvres en argile des marges proglaciaires, par exemple des leptosols<sup>2,3</sup>, à des sols de sept mètres de profondeur dans le Jura, qui n'ont pas été couverts par la glace lors de la dernière glaciation<sup>4</sup>. La réaction des fonctions du sol et de l'écosystème aux changements environnementaux dépend souvent des propriétés du sol. La variabilité des sols à petite échelle rend difficile l'extrapolation des résultats de mesure à plus grande échelle<sup>5</sup> (projet INDICATEURS DE VULNÉRABILITÉ du PNR 68); elle doit cependant être prise en compte pour les études de processus (Synthèse thématique ST4 du PNR 68 « Plateforme d'information des sols suisse [PIS-CH] »).

On ne peut agir par le mode d'exploitation sur certaines caractéristiques du sol – profondeur, teneur en matériau pierreux, minéraux argileux, texture, propriétés du sous-sol (humidité du sol) – qu'au prix d'un très grand investissement, voire pas du tout<sup>6</sup>. D'autres propriétés, telles que la disponibilité des éléments nutritifs, la matière organique, le pH, la végétation, la macroporosité, la densité, les caractéristiques de la couche superficielle (taille des agrégats), sont modifiées par des facteurs externes, tels que le climat, les risques naturels et l'exploitation humaine<sup>6</sup>.

L'utilisation intensive du sol par l'homme et le changement climatique mettent le sol et ses fonctions en péril. En Suisse l'imperméabilisation, le tassement, l'érosion, les glissements de terrain et la perte de mos re-

présentent les plus grandes menaces pour les fonctions d'habitat, de régulation et de production du sol<sup>7</sup>.

La formation et la dégradation du sol se déroulent sur des échelles de temps très différentes. Alors que son taux de formation est d'environ 0,1 millimètre par an<sup>8</sup>, le sol peut être dégradé par tassement ou érosion en l'espace de quelques secondes à quelques heures<sup>9</sup>. La régénération écologique des sols compactés demande au minimum des décennies (projet TASSEMENT DES SOLS du PNR 68).

Dans les sols marécageux, la tourbe se forme à un rythme d'environ un millimètre par année, soit un mètre en mille ans. Suite au drainage, la tourbe est aérée et rapidement décomposée par minéralisation. L'épaisseur moyenne des sols marécageux a diminué d'environ un mètre en Suisse au cours des cent dernières années<sup>10</sup> (projet SOLS MARÉCAGEUX du PNR 68).

Le sol assure des services écosystémiques importants. À savoir, d'après le projet de stratégie nationale des sols<sup>7</sup>:

- Fonction d'habitat: capacité du sol à servir de base d'existence aux organismes et à contribuer au maintien de la diversité des écosystèmes, des espèces et de leur diversité génétique
- Fonction de régulation: capacité du sol à réguler les cycles de matière et d'énergie, à assurer les fonctions de filtre, de tampon et de stockage, et à transformer les substances
- Fonction de production: capacité du sol à produire de la biomasse, c'est-à-dire des denrées alimentaires, des fourrages, du bois et des fibres

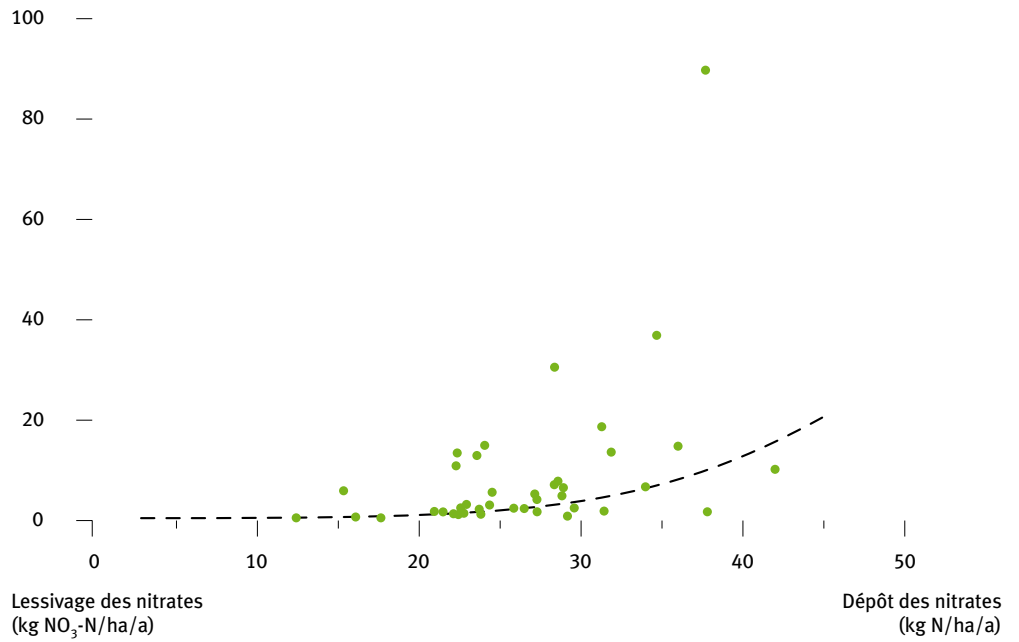
Le sol protège les êtres humains de la pollution, mais seulement de manière limitée.

Les métaux lourds sont liés à la matière organique et aux minéraux du sol et de ce fait ne s'infiltrent pas dans la nappe phréatique. La pollution au cadmium, au cuivre et au zinc par les industries métallurgiques à Dornach SO<sup>11</sup> en est un exemple connu. Les métaux lourds restent toutefois dans le sol et affectent les grandes cultures pendant plusieurs décennies<sup>12</sup> (projet CHARGE EN MÉTAUX du PNR 69). Les produits phytosanitaires sont également liés à la matière organique et décomposés par les microorganismes dans le sol. Mais s'ils sont appliqués en trop grande quantité et au mauvais moment, ils se retrouvent dans les eaux souterraines et de surface. Une campagne de mesure de l'EAWAG montre que dans les bassins versants de Suisse soumis à une exploitation agricole intensive, les produits phytosanitaires mesurés dépassent les critères de qualité écotoxicologique aiguë ou chronique<sup>13</sup>.

Le sol forestier peut dans une large mesure (60–80%) fixer les entrées continuellement élevées d'azote issu de l'atmosphère<sup>14</sup> (ill. 1, p. 13), cette capacité est cependant limitée. Jusqu'à des entrées faibles de 20 kilogrammes par hectare et par an (kg N/ha/a), dits « critical loads », charges critiques, le lessivage d'azote est inférieur à 2 kg N/ha/a<sup>15</sup> (ill. 1, p. 13). Pour des entrées plus élevées cependant, jusqu'à 40 kg N/ha/a sur le Plateau suisse et au Tessin, environ la moitié est lessivée. Dans l'ensemble, la nappe phréatique des forêts, avec 5 à 10 mg de nitrate/l en moyenne, présente des valeurs nettement plus faibles que celle des sols agricoles, avec plus de 25 mg nitrate/l.

**Illustration 1**

Lessivage de nitrates des sols forestiers en Suisse. Si les retombées de N dépassent la valeur critique de 15 à 20 kg N/ha/a, du nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) est lessivé du sol forestier<sup>14,15</sup>.



### 2.1 Importance de la matière organique du sol

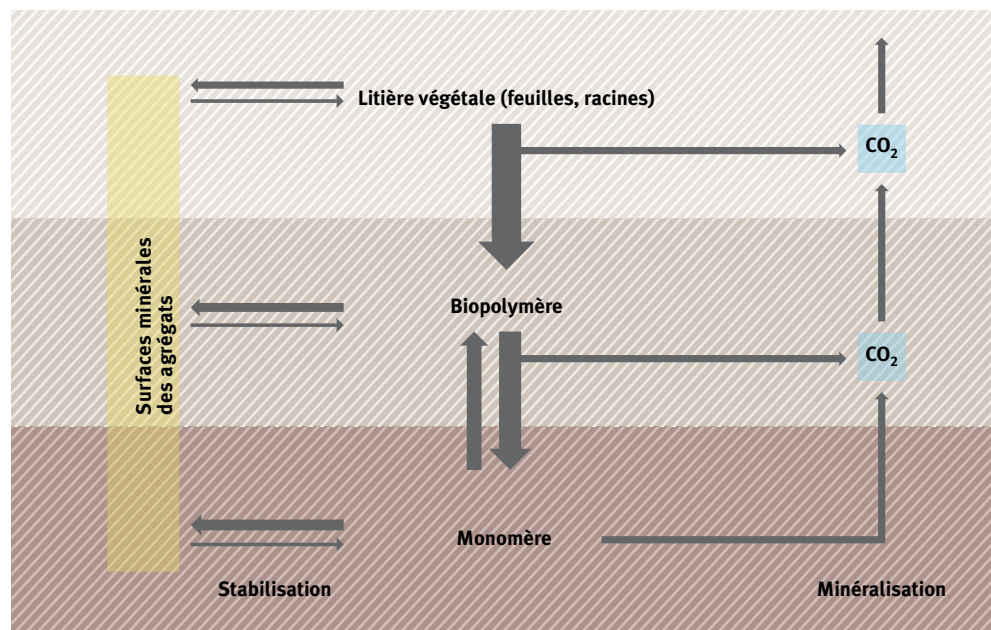
La matière organique du sol (mos), ensemble des composés carbonés d'origine biologique du sol, est le plus grand réservoir de carbone de l'écosystème terrestre. En Suisse, les sols contiennent trois à quatre fois plus de carbone (C) organique que la biomasse aérienne et souterraine réunies et sept fois plus que l'atmosphère, sous forme de CO<sub>2</sub>. De faibles diminutions ou augmentations de la réserve de mos ont donc un impact sur le climat. De plus la mos joue un rôle clé dans la plupart des propriétés et fonctions du sol. Elle contrôle entre autres la disponibilité des éléments nutritifs, le stockage de l'eau, le pouvoir tampon et l'effet de filtre des polluants, la stabilité du sol ainsi que la fréquence et la diversité des organismes du sol. Une meilleure compréhension de la matière organique

du sol permet donc de mieux évaluer les multiples fonctions des sols.

Il y a deux décennies encore, on supposait que la mos, appelée « humus », était composée de « substances humiques », de grosses molécules organiques qui se forment lors de la transformation de la biomasse végétale en humus (« humification ») dans le sol, et sont difficiles à décomposer pour les microorganismes. Selon les résultats de recherches récentes, la matière organique morte du sol se compose à la fois de composés organiques progressivement décomposés provenant de restes végétaux et animaux aériens et souterrains et de monomères et de biopolymères relativement simples nouvellement constitués<sup>16-18</sup> (projet INDICATEURS DE VULNÉRABILITÉ du PNR 68). Les êtres vivants du sol sont la force motrice des flux de C et de la formation de la mos<sup>16</sup> (ill. 2, p. 14). La biomasse microbienne morte et les produits de sa décomposition

#### Illustration 2

Représentation schématique de la transformation, de la décomposition et de la stabilisation de la mos<sup>d'après 18</sup>. La mos est un continuum qui va des résidus végétaux aux monomères simples, qui sont décomposés par la faune du sol et les communautés microbiennes. Leurs restes morts (nécromasse) contribuent aussi à la mos. La mos est stabilisée à long terme par adsorption à la surface des minéraux et incorporation dans les agrégats.





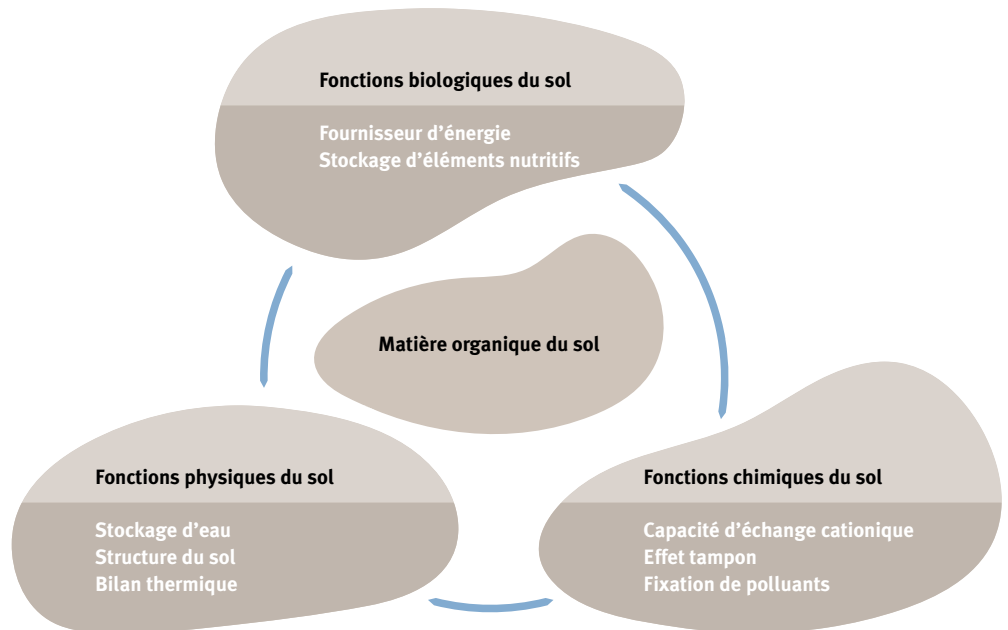
sont les principaux constituants de la MOS<sup>19</sup>. Les animaux du sol décomposent les résidus végétaux, les communautés microbiennes transforment la MOS et libèrent du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère par minéralisation de la MOS.

Les conditions physiques et chimiques de l'environnement du sol sont déterminantes pour la stabilité de la MOS (projet SOLS FORESTIERS du PNR 68, ill. 2, p. 14)<sup>16,18,20</sup>. Dans les sols, on distingue le C «particulaire», issu en majeure partie de résidus végétaux en décomposition, et le C lié aux minéraux, qui est protégé de la dégradation par les interactions avec la surface des minéraux et transformé beaucoup plus lentement. Selon le projet SOLS FORESTIERS du PNR 68, la part liée aux minéraux dans les 20 premiers centimètres des sols forestiers suisses est d'environ un tiers, alors qu'elle est de 80 % dans les sols de prairie<sup>21</sup>. La part liée aux minéraux augmente avec la profondeur

jusqu'à des valeurs supérieures à 95 %. Dans le projet INDICATEURS DE VULNÉRABILITÉ du PNR 68, l'âge de la MOS a été déterminé par datation au carbone 14 (14C). Alors que le C particulaire n'est la plupart du temps âgé que de quelques années et se transforme donc rapidement, le carbone du sous-sol peut atteindre 10 000 ans<sup>5</sup>. Il est fixé à long terme par interaction avec les minéraux.

Le C du sol est apporté par la litière végétale aérienne, les résidus de racines et les exsudats racinaires. Les organismes du sol décomposent la majeure partie de ces entrées de C en CO<sub>2</sub>, seule une petite partie reste dans le sol à long terme<sup>16</sup>. Les mesures de flux de carbone montrent que dans une prairie suisse près d'Oensingen SO, environ 10 tonnes de carbone par hectare et par an (C/ha/a) sont absorbées, mais que des quantités comparables sont de nouveau «expirées» et exportées avec la récolte.

**Illustration 3**  
Fonctions de la MOS.  
La MOS remplit des fonctions biologiques, physiques et chimiques essentielles dans les sols.



La quantité restante dans le sol se situe, selon l'année et l'intensité d'exploitation, entre -0,5 et 1 tonne C/ha/a, une variation qui n'est décelable que sur plusieurs années<sup>22</sup>.

En raison des faibles taux d'accumulation, la formation de la mos dure des milliers d'années. Dans les marges proglaciaires des glaciers Damma et Morteratsch, 20 à 30 tonnes de C/ha se sont accumulées en 150 ans<sup>2,23</sup>. Dans les sols forestiers suisses formés depuis l'ère glaciaire, la réserve moyenne s'élève à 143 tonnes C/ha (projets SOLS FORESTIERS et INDICATEURS DE VULNÉRABILITÉ du PNR 68). Au contraire de la lente accumulation, des quantités considérables de carbone peuvent être perdues suite à des perturbations du sol. Dans les sols forestiers, la réserve de mos a diminué d'environ 25 tonnes C/ha pendant deux décennies après la tempête «Vivian»<sup>24</sup>.

## 2.2 Matière organique du sol et fonctions du sol

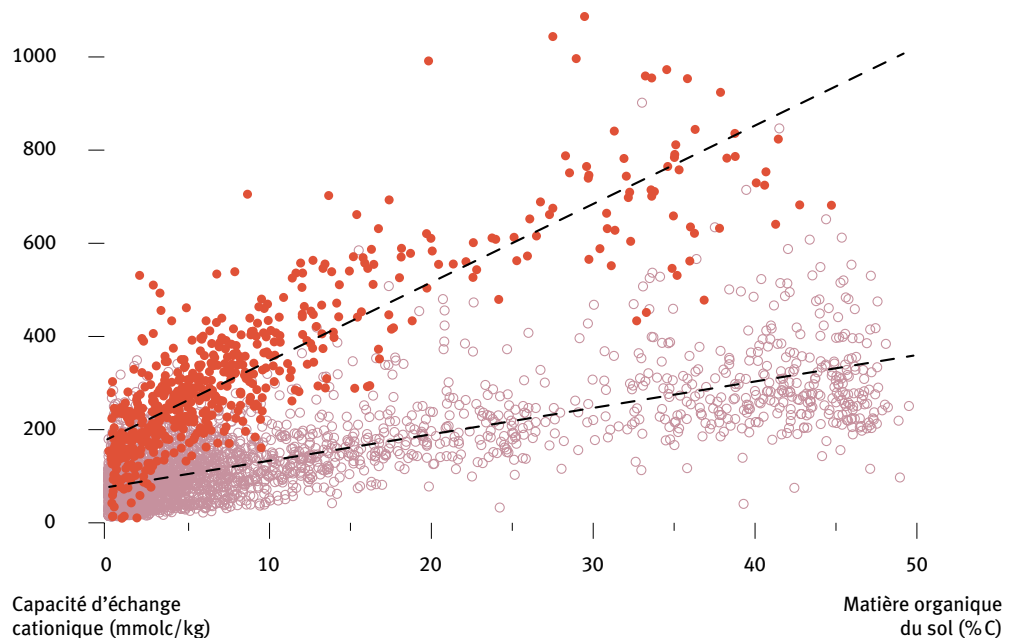
**La mos ne joue pas un rôle clé uniquement dans le stockage de CO<sub>2</sub> sous forme de carbone organique, mais aussi dans la plupart des autres fonctions du sol (ill. 3, p. 15). C'est le plus grand réservoir d'azote, élément nutritif essentiel. Elle augmente la porosité du sol et donc sa capacité à stocker l'eau et l'air. Elle est de plus capable de fixer des cations et des anions.**

Plus de 90% de l'azote (N) du sol et plus de 50% du phosphore (P) des sols forestiers sont stockés dans la mos. Par la minéralisation de la mos, ils deviennent assimilables par les plantes. Dans le sol, la mos contribue de manière déterminante à la capacité d'échange cationique (ill. 4), ce qui permet le stockage d'éléments nutritifs cationiques – tels qu'ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), calcium (Ca), magnésium (Mg), potas-

**Illustration 4**  
mos et capacité d'échange cationique.  
La mos contrôle le stockage de cations sous une forme échangeable et assimilable par les végétaux, primordial pour la fertilité du sol. La capacité d'échange cationique dépend, outre de la mos, de la teneur en argile et du pH du sol.

Banque de données pédologiques, WSL; projet SOLS FORESTIERS du PNR 68.

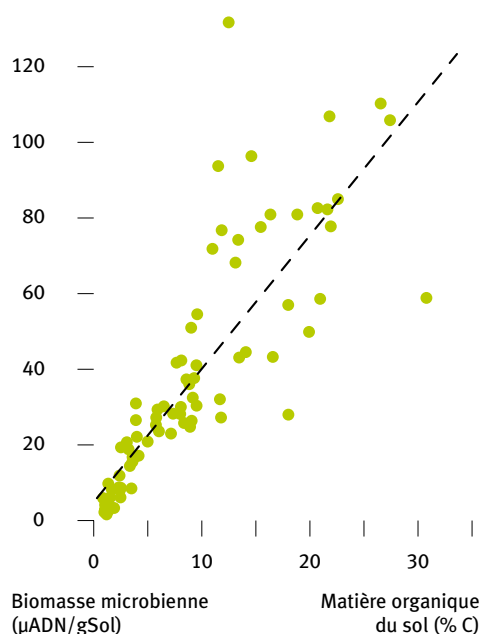
■ pH > 5  
□ pH < 5



### Illustration 5

Relation entre MOS et biomasse microbienne. La MOS est étroitement liée à la biomasse microbienne (exemple des sols alpins sur les sommets du Parc national suisse). La MOS est le fournisseur d'énergie des organismes du sol, dont l'activité règle la transformation de la MOS. B. Frey, F. Hagedorn, S. Wipf, données non publiées.

■ Sols alpins, parc national  
n = 82, r<sup>2</sup> = 0,69



sium (K), fer (Fe) – sous une forme assimilable par les plantes, mais non lessivable. Il s'agit là d'une fonction fondamentale des sols, qui permet la nutrition des plantes sur le long terme. De plus la MOS forme des complexes avec des cations d'aluminium et des métaux lourds, ce qui réduit nettement leur toxicité et leur disponibilité pour les végétaux.

### 2.3 Matière organique des sols et biodiversité

**La vie dans le sol est étroitement liée à la matière organique du sol (MOS). La macrofaune et la microfaune se nourrissent de la MOS. Leur activité détermine comment la MOS est transformée et en quelle quantité. La quantité et la qualité de la MOS influencent à leur tour la composition en organismes du sol. L'exploitation et le climat agissent sur les organismes du sol.**

Dans un gramme de sol vivent entre 2 000 et 18 000 espèces différentes d'organismes, dont la principale source d'énergie est la MOS<sup>25</sup>. Les organismes du sol font eux-mêmes partie de la MOS. Leur part quantitative est inférieure à 2%, mais les microorganismes morts (nécromasse) constituent une grande partie de la MOS<sup>19</sup>. Dans le profil du sol, la diminution du rapport C/N avec la profondeur – de 30 à 10 dans un sol forestier – s'explique par une contribution croissante de la nécromasse microbienne, qui présente des rapports C/N très étroits de 6 à 12, dus à une forte proportion de protéines microbiennes. Dans la chaîne alimentaire, la macrofaune (> 2 mm; par ex. vers de terre) et la mésofaune (100 µm à 2 mm; par ex. collemboles) décomposent les résidus végétaux, alors que les microorganismes (champignons et bactéries) se nourrissent de nombreux éléments, entre autres aussi d'organismes morts. Les organismes du sol assurent nombre de fonctions essentielles du sol. Ils minéralisent des éléments nutritifs, les rendant assimilables par les plantes, ils dégradent les polluants organiques et ils produisent et consomment des gaz à effet de serre. Les méthodes de génétique moléculaire donnent un nouvel aperçu de la diversité microbienne des biocénoses<sup>26</sup>. Toutefois la signification fonctionnelle des microorganismes n'est connue que pour moins d'un dixième d'entre eux<sup>25</sup>.

Il existe une étroite relation entre la biomasse microbienne et la teneur en MOS, comme le montre l'exemple des sols alpins du Parc national suisse (ill. 5). La diversité des organismes dépend aussi de la quantité et de la qualité de la MOS. Le pH et la texture du sol jouent également un rôle important. L'exploitation du sol modifie les communautés microbiennes, en grande partie par le biais de la composition de la MOS, qui dépend de la quantité et du mode

de fertilisation et du travail du sol. Dans l'essai de longue durée nox (étude comparative des systèmes de cultures biodynamiques, organo-biologiques et conventionnels) à Therwil BL, la composition en microorganismes diffère selon les différents systèmes d'exploitation agricoles<sup>26</sup>. Le projet **RÉSISTANCE AUX ANTIBIOTIQUES** du PNR 68 a montré que l'épandage d'engrais de ferme favorise les bactéries potentiellement impliquées dans le cycle de l'azote. Le changement climatique agit aussi sur les organismes du sol. Un essai de terrain de douze ans dans une pinède valaisanne a démontré que les microorganismes ayant une stratégie de vie conservatrice (oligotrophes) sont plus nombreux en conditions de sécheresse<sup>27</sup>. De plus la densité des vers de terre diminue fortement (ill. 6). Ces changements dans la vie du sol agissent aussi sur la transformation de la matière organique.

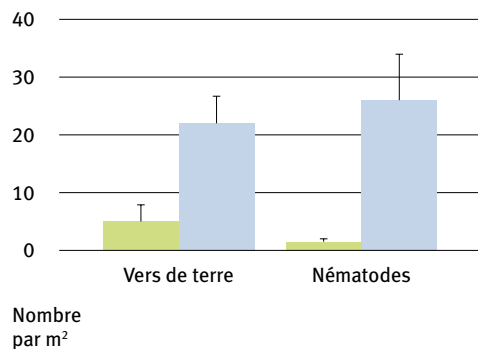
#### Illustration 6

Densité des vers de terre dans la forêt de Finges (VS) en fonction de l'humidité du sol.

Les conditions estivales sèches dans la forêt de Finges (Valais; photo du haut) freinent la croissance des végétaux en comparaison avec une expérience d'irrigation d'une durée de douze ans (photo du bas). Dans les sols secs vivent cinq à huit fois moins de vers de terre et de nématodes<sup>28</sup>.

Photos : M. Schaub, wsl.

- Pinède sèche
- Pinède irriguée



## 2.4 Quelle quantité de carbone les sols suisses stockent-ils ?

**Les sols suisses disposent des stocks de carbone les plus élevés parmi les pays européens. Cela est dû à la faible part de surfaces utilisées pour les grandes cultures, à la croissance végétale relativement élevée grâce à des conditions climatiques favorables et aux sols modérément érodés et riches en argile. La majeure partie des sols saturés en eau y contribue également.**

Les sols forestiers suisses stockent 143 tonnes de carbone (C) par hectare, environ 20% plus que la quantité contenue dans la biomasse vivante des forêts (ill. 8, et ill. 9, p. 20; projet **SOLS FORESTIERS** du PNR 68). Dans les sols allemands par exemple, la réserve n'est que de 117 tonnes C/ha. Le stock de C le plus élevé se trouve dans les sols du versant sud des Alpes (ill. 8 et 9, p. 20).

Du fait que la litière des forêts de conifères est plus difficilement dégradable que celle des forêts de feuillus, elle stocke plus de C dans la couche organique ( $38,0 \pm 2,4$  contre  $10,1 \pm 0,7$  t C/ha). Dans le sol minéral, les deux types de forêt ont des réserves comparables (ill. 15, p. 29).

Les sols agricoles ont des teneurs en C dans l'horizon superficiel significativement plus faibles que les sols forestiers, les sols cultivés présentent les stocks de C les plus bas (ill. 10, p. 21). Dans ces derniers, l'apport de litière sur et dans la terre est faible et le travail intensif du sol stimule la décomposition de la mos. On ne peut pas comparer les stocks totaux des différents types de cultures en Suisse, parce qu'il n'existe pas suffisamment de mesures jusqu'à la roche mère pour les sols agricoles. De plus les paramètres nécessaires au calcul, tels que la densité du sol, ne sont pas systématiquement recensés.

En Suisse, les sols marécageux présentent les stocks de C par unité de surface les plus élevés. Ils contiennent actuellement 1070 tonnes C/ha en moyenne (projet SOLS MARÉCAGEUX du PNR 68)<sup>53</sup>. Ils sont très sensibles aux changements de régime hydrique dus au drainage. En 1850, le réservoir était encore d'environ 1500 tonnes C/ha.

### Modifications des stocks de carbone

Par la formation de mos les sols fixent du CO<sub>2</sub>, soit du C. Par contre la décomposition de la mos libère du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Cet échange de CO<sub>2</sub> entre les sols et l'atmosphère est global et environ dix fois plus important que le rejet de CO<sub>2</sub> issu des combustibles fossiles. Une compilation des flux de CO<sub>2</sub> issus du sol mesurés en Suisse montre que chaque année 20 à 30 millions de tonnes de C sont rejetées dans l'atmosphère sous forme de CO<sub>2</sub><sup>22,23,32,42,46</sup>. Cela représente à peu près le double des émissions de CO<sub>2</sub> venant des combustibles et carburants fossiles<sup>74</sup>. Les mesures des stocks de C dans des sols jeunes à âgés le long de « chronoséquences » indiquent cependant un équilibre entre la fixation et la libération de CO<sub>2</sub> dans les sols plus vieux<sup>31</sup>. Cet équilibre est vraisemblablement de nature dynamique et le bilan net, appelé « séquestration du C », dans les sols est faible par rapport aux entrées et sorties de C. Dans les deux sites forestiers suisses de Lägeren ZH et de la forêt du Seehorn à Davos GR, les puits de C (modélisés) du sol représentaient moins de 5% de la quantité de CO<sub>2</sub> absorbé par les arbres et rejeté par la respiration du sol<sup>32</sup>.

Bien que les modifications du stockage de C dans le sol puissent avoir des effets importants sur le bilan du CO<sub>2</sub>, ils sont difficiles à mettre en évidence. La modification est très faible par rapport aux stocks totaux de C et se déroule souvent lentement. L'inventaire pédologique NABO des années

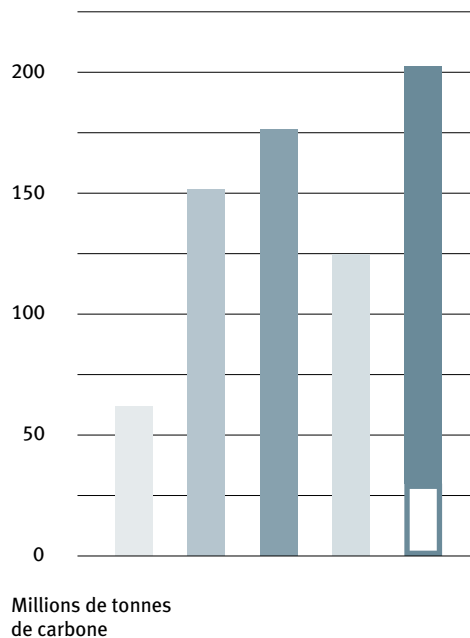
### Illustration 7

Sols suisses réservoirs de carbone.

En Suisse, les sols stockent sept fois plus de C que l'atmosphère. Malgré leur faible surface, les sols marécageux détiennent une part importante du stock de C en Suisse. Ils ont cependant perdu 80% de leurs réserves en C depuis 1850, suite au drainage et à l'extraction de la tourbe.

Projet SOLS FORESTIERS du PNR 68<sup>20,38,53,165</sup>.

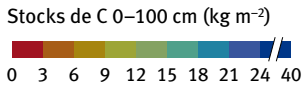
- Atmosphère
- Biomasse forêt
- Sol forêt
- Sol agriculture
- Sol tourbière 1850
- Sol tourbière aujourd'hui



**Illustration 8**

Carte du carbone des sols forestiers suisses.

Stocks de C des sols forestiers suisses, déterminés à partir de la relation significative entre précipitations, topographie et stock de C par des méthodes géostatistiques<sup>29</sup>.

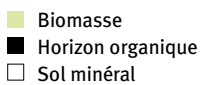


**Illustration 9**

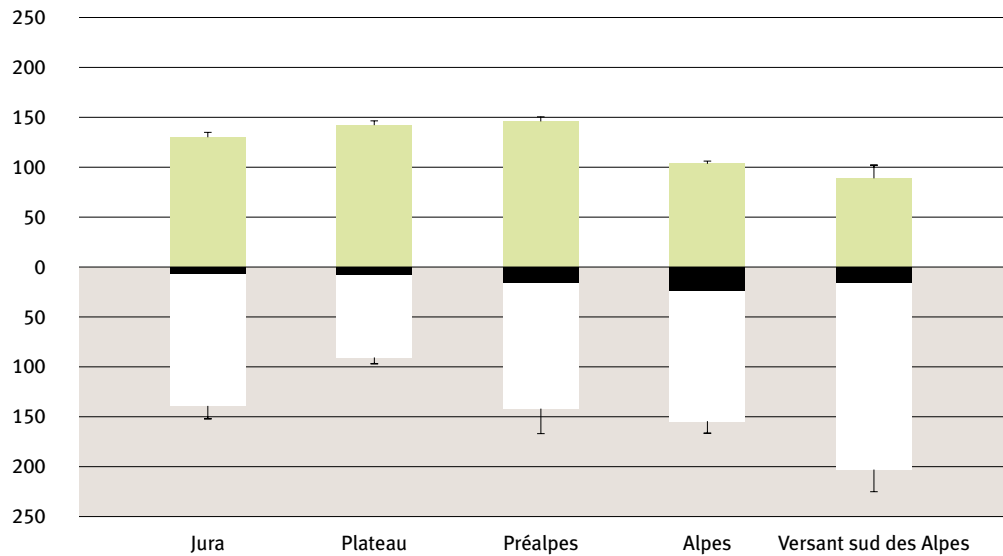
Biomasse forestière et stock de mos dans les forêts suisses.

L'horizon organique stocke environ 10% du réservoir de mos de l'ensemble du sol. Bien que les Alpes du Sud aient les réserves de C les plus faibles sous forme de biomasse, elles contiennent les plus gros stocks de mos du fait de leur haute teneur en minéraux stabilisants et en « black carbon » résistant à la décomposition.

Projet SOLS FORESTIERS du PNR 68<sup>20</sup>.



C biomasse (t C/ha)



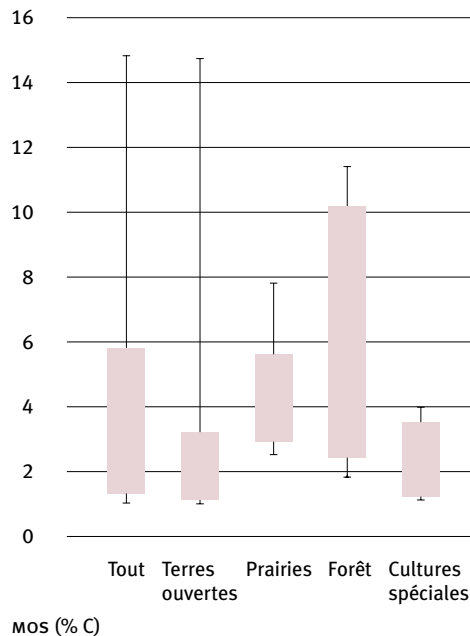
mos (t C/ha)

1985–1989 et 2005–2009 sur 29 sites forestiers et 26 sites de prairies n’a constaté aucune modification globale du stock de C dans l’horizon superficiel<sup>30</sup>.

## 2.5 Réaction de la matière organique du sol aux changements d’utilisation des terres

**L’utilisation des terres a une influence non seulement sur les entrées de C, mais aussi sur les processus de transformation dans le sol. L’utilisation pour les grandes cultures entraîne une diminution des stocks de mos, qui est décomposée lors du travail du sol. Les entrées de C sont inférieures à celles des prairies et des forêts. L’extension de la forêt, qui représente le changement d’utilisation des terres le plus important en surface en Suisse, mais n’a probablement qu’un impact mineur sur les stocks de mos, modifie la composition de la mos.**

**Illustration 10**  
Teneurs en MOS mesurées en C organique dans les 20 centimètres supérieurs des sites NABO<sup>30</sup>.



## Stocks de carbone en diminution dans les sols agricoles en Suisse

Des essais à long terme montrent que les stocks de C diminuent dans les terres ouvertes auparavant utilisées en prairies. Ces sols constituent donc une source de CO<sub>2</sub>. Dans l’essai ZOFE (Zürcher Organisches Düngungsexperiment) à Reckenholz ZH, 0,10 à 0,25 tonnes de C/ha/a ont été perdues, ce qui correspond à une perte de 15 à 40% de la mos sur 60 ans<sup>33</sup>. L’apport d’engrais organiques a réduit cette diminution suivant le changement d’utilisation des terres, en augmentant la production de biomasse et ainsi les entrées de C dans le sol. Dans l’essai DOX de Therwil BL, les teneurs en C ont également diminué pendant 30 ans (ill. 12, p. 25). Une fertilisation organique par apport de compost dans l’agriculture biologique a pu cependant ralentir la perte de mos. Cela concorde avec une méta-analyse globale qui montre qu’une fertilisation organique a un effet positif sur la teneur en mos<sup>34</sup>. Le bilan C des différents procédés dépend de la quantité et de la stabilité de la matière organique apportée<sup>35</sup>. Dans l’inventaire pédologique NABO, les stocks de C ont aussi diminué sur les 29 terres arables étudiées, moins toutefois que dans les essais à long terme<sup>30</sup>. Il est probable que l’utilisation antérieure joue un rôle déterminant (projet SOLS FORESTIERS du PNR 6)<sup>20,36</sup>.

Dans les prairies, l’intensité d’utilisation a un impact sur les stocks de C. Des mesures à haute résolution de l’échange de CO<sub>2</sub> dans une prairie près d’Oensingen SO ont montré une augmentation de l’absorption de CO<sub>2</sub> pour l’utilisation intensive avec fertilisation par rapport à l’utilisation extensive. Comme les émissions de CO<sub>2</sub> n’ont pas augmenté dans la même mesure, le stock de C du sol a augmenté d’environ 2 tonnes ha/a<sup>22</sup>. Il faut cependant s’attendre à un équilibre à long terme, du fait

## Projet SOLS FORESTIERS du PNR 68 :

### Quels facteurs contrôlent le stock de C dans le sol – le climat ou les propriétés chimiques ?

L'équipe du projet a effectué l'analyse statistique des données de mille profils de sol de sites forestiers. Il s'est avéré que les propriétés physiques et chimiques du sol ont une influence prépondérante sur le stockage de C dans les sols forestiers suisses. Les stocks augmentent en général avec la teneur en argile et en fer échangeable. Le deuxième facteur déterminant est le volume de précipitations : les stocks augmentent avec les précipitations<sup>20</sup>. Par contre l'influence des températures moyennes annuelles sur le réservoir total de C est minime ; il est possible qu'elle soit masquée par le signal des précipitations. Toutefois les stocks de l'horizon organique augmentent quand les températures diminuent. Il se forme vraisemblablement moins de litière dans le sol minéral quand la proportion de conifères est plus élevée et les conditions climatiques sont plus fraîches, conséquence éventuelle d'une activité réduite des vers de terre (ill. 6, p. 18). Il est intéressant de noter que la biomasse forestière et son taux de croissance n'ont pas d'impact direct sur les stocks de C dans les sols. Ainsi ce ne sont pas les régions les plus productives à forte biomasse comme le Plateau suisse qui présentent les stocks de C les plus élevés, mais les moins productives – les Alpes et le versant sud des Alpes (ill. 9, p. 20). Cela semble impliquer que les facteurs qui favorisent la croissance forestière, tels qu'un climat plus chaud, agissent aussi sur la décomposition du C dans le sol. De plus certains éléments du sol, tels que la teneur en argile ou les oxydes de fer à effet stabilisateur de l'humus, sont plus importants pour le stockage de C que la quantité de litière apportée. La relation négative entre température et stockage de C dans l'horizon organique, partie la plus sensible de la MOS, suggère qu'il faut s'attendre à une perte de MOS suite au changement du climat et des essences. La diminution du stockage global de C avec la baisse des précipitations laisse aussi prévoir des pertes de C avec l'accentuation probable de la sécheresse estivale.

## Projet INDICATEURS DE VULNÉRABILITÉ DU PNR 68 :

### Quel est l'âge de la MOS ? Comment le carbone du sol est-il transformé et quels facteurs ali- mentent ces processus ?

La nature complexe de la MOS et la multiplicité des facteurs qui influencent sa stabilité rendent la quantification de la transformation du C dans le sol difficile. Dans le projet, l'âge du carbone d'échantillons de sol a été mesuré le long de gradients géologiques et climatiques par datation au <sup>14</sup>C. Cela permet de mieux comprendre la transformation de la MOS sous différentes conditions environnementales.

Les résultats montrent qu'au niveau du profil l'âge <sup>14</sup>C va de quelques dizaines d'années dans l'horizon superficiel à des milliers d'années dans le sous-sol. Mais à l'intérieur d'un même horizon, certains composants tels que les lipides à chaîne courte ont un âge <sup>14</sup>C de quelques dizaines d'années, alors que ceux à longue chaîne peuvent atteindre l'âge de 8000 ans<sup>5</sup>. La transformation du C varie à différentes échelles, ce qui montre que les sources sont diverses et que la composition de la MOS est hétérogène. Les teneurs en <sup>14</sup>C sont très variables dans l'espace également. Il est intéressant de noter que la variation des teneurs en <sup>14</sup>C dans l'horizon superficiel sur une surface de mesure de quelques mètres carrés est similaire à la variation au niveau du paysage le long de gradients climatiques et géologiques importants (ill. 11, p. 24)<sup>5</sup>. Une mesure suffisamment répétée dans l'espace donne cependant une valeur assez précise permettant de comparer les sites entre eux.

Le carbone organique dissous (COD) est la forme mobile de la MOS, sous laquelle du carbone, mais aussi des éléments nutritifs tels que l'azote et le phosphore, sont transportés avec l'eau du sol à une plus grande profondeur. Des mesures de la teneur en <sup>14</sup>C sur les sites de « recherche à long terme sur les écosystèmes forestiers » montrent que le COD est plus jeune que la MOS de la phase solide. Pendant la sécheresse estivale de 2015, l'âge <sup>14</sup>C du COD a augmenté alors que sa quantité est restée la même. Cela indique que le carbone ancien est mobilisé et transporté quand les conditions sont plus chaudes et plus sèches. Cela pourrait être dû à un éclatement de la biomasse microbienne ou à une perturbation de l'agrégation du sol lors de la réhumidification.



que seule une petite partie du C entré est liée de façon stable. Le mode d'exploitation a par conséquent une influence sur les stocks de C, mais peut seulement diminuer la perte de C dans les sols agricoles en Suisse. Cette diminution s'amenuise quand la quantité et la stabilité de la matière organique apportée augmentent (ill. 12, p. 25)<sup>33,37</sup>.

#### Importance de la reforestation pour le stockage du carbone

On assiste actuellement en Suisse à des changements marquants de l'utilisation des terres. Suite à la diminution de l'utilisation agricole, la surface forestière a augmenté de plus d'un cinquième au cours du siècle dernier, de 6 à 8% par décennie au cours des vingt dernières années. L'augmentation est même de 15% dans le massif alpin<sup>38</sup>. Le reboisement n'agit pas seulement sur la quantité et le mode d'entrée du C dans le sol, il inhibe aussi la décomposition du C en raison d'un microclimat plus frais<sup>39</sup>.

À l'aide de cartes historiques numérisées, l'équipe du projet SOLS FORESTIERS du PNR 68 a reconstitué l'histoire de la couverture forestière des 150 dernières années sur 850 sites dont les données pédologiques sont disponibles. L'analyse a montré un faible effet négatif de l'âge de la forêt sur le stockage de C dans le sol (-10%) (ill. 15, p. 29). D'autres facteurs – notamment les précipitations et la chimie du sol – ont une influence plus forte sur les stocks de C<sup>20</sup> (ill. 16, p. 30). Cette faible influence inattendue de l'âge de la forêt sur le stockage de C pourrait être due à l'utilisation précédente de la plupart des sites en prairies, dans lesquelles les entrées de C dans le sol par les racines sont plus élevées que dans la forêt et les terres arables. De plus l'assemblage naturel des composants du sol dans une prairie n'est pas perturbé par le travail du sol comme dans les

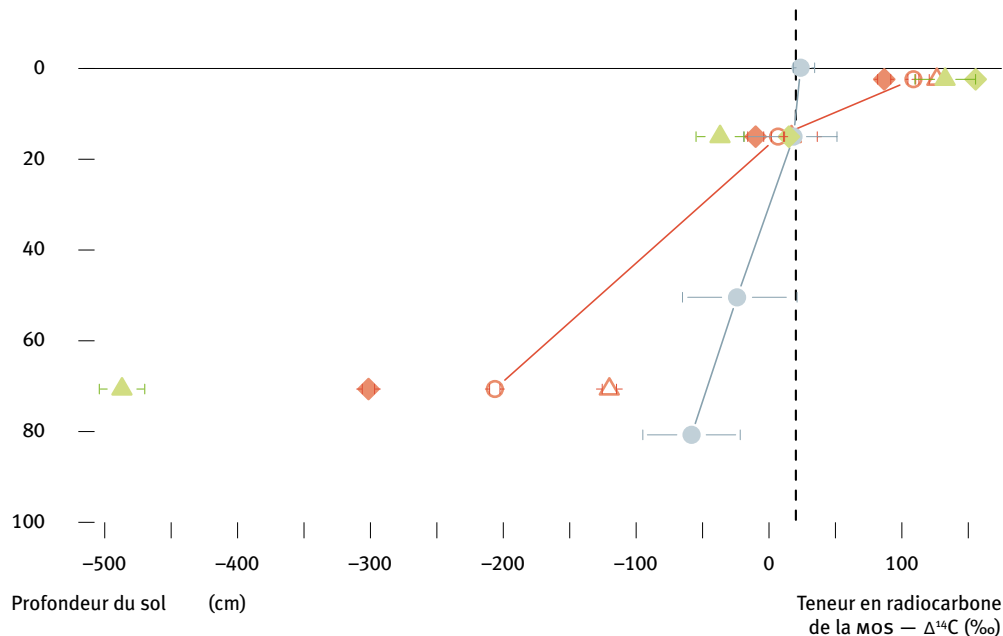
grandes cultures<sup>36</sup>. Un essai de reboisement d'alpages au Col du Jaun (FR) montre une image similaire à l'ensemble des données de la Suisse<sup>39</sup>. Malgré la forte augmentation de la quantité de C dans la biomasse végétale due au reboisement, les stocks de C du sol ont baissé d'un quart pendant les 40 premières années. Du fait qu'une couche organique s'est formée, les stocks ont légèrement augmenté ensuite. Dans une forêt âgée de 120 ans, le stock de C se situait au même niveau que dans la prairie voisine<sup>39</sup>. Les résultats de ce travail historique et de l'étude de cas du Col du Jaun concordent avec les résultats d'études sur le reboisement à l'échelle mondiale<sup>36</sup>. La reforestation après utilisation en prairie, comme dans la plupart des cas en Suisse, n'a cependant qu'un faible impact sur les réserves de C dans le sol. Par contre, en cas d'utilisation précédente pour les grandes cultures, le stock de C augmente lentement<sup>36</sup>. Cependant la déforestation provoque de fortes pertes en C dans le sol.

#### 2.6 Changement climatique et matière organique du sol

**Le changement climatique – températures plus élevées et sécheresse plus fréquente – modifie différents éléments du cycle du carbone. De nombreux processus ont un effet compensateur sur la séquestration du CO<sub>2</sub>. Les entrées de C dans le sol, mais aussi la libération de CO<sub>2</sub>, augmentent avec la hausse des températures. L'effet global est donc plutôt faible, mais le taux de transformation est plus élevé. Ceci est lié à un renforcement de la libération d'éléments nutritifs de la mos. La sécheresse provoque une baisse des stocks de C par diminution de la productivité végétale. Des expériences et relevés le long de gradients climatiques naturels et des modèles laissent prévoir des pertes de C dans les conditions climatiques futures.**

### Illustration 11

Distribution des teneurs en  $^{14}\text{C}$  en fonction de la profondeur dans différents composants de la mos d'un sol forestier près de Lausanne VD. Les valeurs  $\Delta^{14}\text{C}$  supérieures à celles de l'atmosphère actuelle résultent des essais nucléaires des années 1950 et 1960, qui ont libéré du  $^{14}\text{C}$ , absorbé ensuite par les plantes et intégré dans la mos. Dans le sol superficiel, la mos est constituée de C âgé de dizaines d'années. L'âge  $^{14}\text{C}$  augmente avec la profondeur, mais on trouve de grandes variations à une profondeur donnée. Les composés carbonés les plus vieux ont environ 8000 ans. La mos associée aux minéraux est nettement plus âgée que la mos particulaire, ce qui est dû à une stabilisation par les minéraux ou les agrégats.



Projet INDICATEURS DE VULNÉRABILITÉ du PNR 68<sup>5</sup>.

- ◆ MOS associée aux minéraux
- △ MOS particulaire
- Carbon organique dissous (DOC)
- ◆ Acides gras C16-C22
- ▲ n-alcanes C27
- $^{14}\text{C}$  dans l'atmosphère

La température moyenne annuelle a augmenté de  $0,37\text{ }^{\circ}\text{C}$  par décennie depuis 1961 en Suisse. Compte tenu de la concentration en  $\text{CO}_2$  croissante dans l'atmosphère, on prévoit une hausse supplémentaire de  $1,5$  à  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  pendant ce siècle<sup>40</sup>. On peut en outre s'attendre à une augmentation de la fréquence des épisodes de sécheresse et de fortes pluies. Ce changement a aussi une influence sur la mos. Dans les climats froids et tempérés, une température plus élevée – si le climat ne devient pas en même temps plus sec – entraînera une hausse de la croissance végétale et donc de l'apport de litière au sol (projet DYNAMIQUE DU CARBONE du PNR 68). Mais un réchauffement stimule aussi la décomposition de l'humus et la libération de  $\text{CO}_2$  des sols<sup>41,42</sup>. La question de savoir lequel de ces deux processus antagonistes profite le plus d'un réchauffement et dans quelle direction le bilan net de  $\text{CO}_2$  est déplacé, est controversée dans le milieu scientifique<sup>43</sup>. À long terme, les communautés

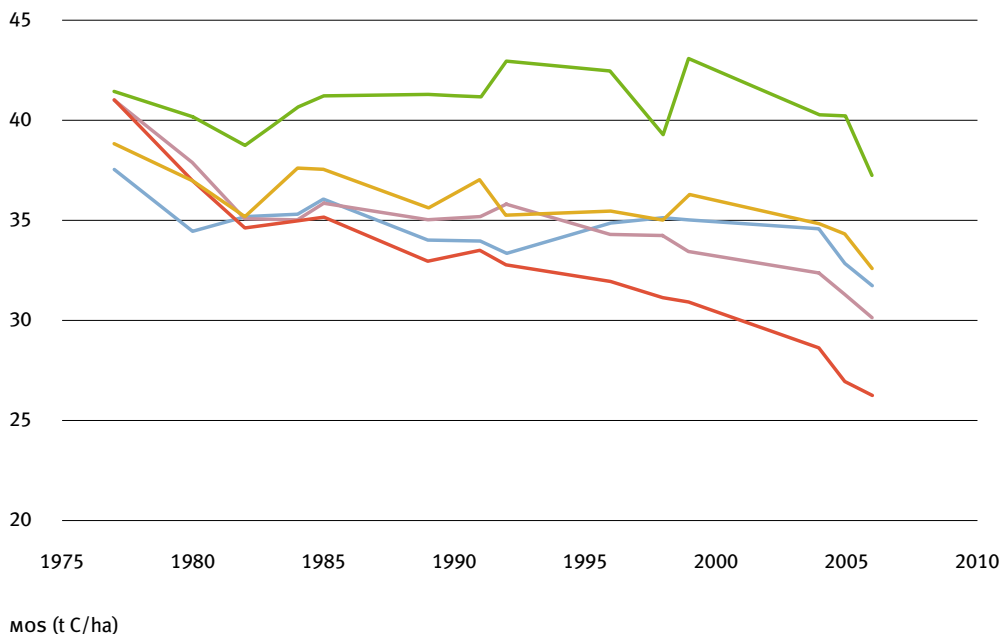
microbiennes et la disponibilité du substrat s'adaptent aux nouvelles conditions climatiques (ill. 16, p. 30). Des travaux de modélisation laissent prévoir des pertes globales de C, notamment en cas de réchauffement sous un climat frais et humide<sup>44,45</sup>. Ces pertes sont probablement temporaires<sup>41</sup>, mais une augmentation de la libération de  $\text{CO}_2$  des sols renforce le réchauffement climatique.

Outre la température, la disponibilité de l'eau est le principal facteur abiotique de contrôle de la dynamique du C dans le sol. Si la teneur en eau est inférieure à 15% en volume, l'activité des microorganismes diminue fortement. Les animaux du sol sont en général plus sensibles que les bactéries et les champignons<sup>47</sup>. La sécheresse estivale réduit déjà la transformation du C dans les sols suisses. Dans la vallée intra-alpine du Rhône en Valais, où la sécheresse estivale est marquée, les limitations dues à la sécheresse ont été compensées

### Illustration 12

Modification du stock de carbone dans l'essai dok de Therwil BL. Les essais à long terme comme l'essai dok de Therwil BL montrent que dans les sols cultivés utilisés auparavant en prairie, les stocks de C diminuent pendant plusieurs décennies. Les systèmes d'exploitation biologiques avec fertilisation organique ne peuvent qu'affaiblir cette baisse, mais ils augmentent les stocks de C par rapport aux contrôles non fertilisés (BIODYN : biodynamique avec compost de fumier, BIOORG : bio-organique avec purin et fumier, CONFYM : conventionnel avec purin et fumier, CONMIN : conventionnel avec engrais minéral, NOFERT : sans engrais)<sup>35,37</sup>.

— BIODYN  
— BIOORG  
— CONFYM  
— CONMIN  
— NOFERT



par irrigation dans un essai de terrain de plusieurs années dans une pinède. Le rejet de CO<sub>2</sub> des sols secs est 60% plus faible que celui des sols irrigués<sup>27</sup>. Dans les hêtraies du Plateau suisse, l'activité respiratoire microbienne est réduite pendant les étés chauds<sup>48</sup>.

On ne sait pas dans quelle mesure la baisse du rejet de CO<sub>2</sub> par le sol est équilibrée par une diminution des entrées de C dans la plante (projet DYNAMIQUE DU CARBONE du PNR 68). Les effets semblent dépendre notamment de la durée et de l'intensité de la sécheresse. Pendant les phases sèches, l'absorption et la libération de CO<sub>2</sub> sont réduites, mais elles sont compensées en grande partie par une augmentation de l'activité après la réhumidification<sup>49</sup>. En cas de sécheresse répétée cependant, la productivité végétale diminue et la composition en espèces est modifiée, ce qui a aussi un impact sur les entrées de C dans le sol.

Une sécheresse expérimentale de trois ans le long d'un gradient d'altitude dans une prairie a réduit la croissance végétale et les flux de CO<sub>2</sub> provenant du sol<sup>46,50</sup>. Mais les effets nets dans le sol n'ont pas pu être déterminés après cet essai de courte durée. Dans l'essai d'irrigation de dix ans dans la pinède valaisanne, l'impact sur les réserves totales en mos était faible, mais la distribution de la mos a été modifiée<sup>27</sup>. L'irrigation a entraîné une perte de la couche organique, probablement suite à une activité accrue des vers de terres<sup>28</sup>. En revanche, les teneurs en mos du sol minéral superficiel ont augmenté. Ces résultats laissent donc supposer qu'en cas de sécheresse sur une longue période, la baisse des entrées de C dans le sol minéral réduit le stockage global de C dans le sol. La communauté microbienne a elle aussi réagi aux conditions sèches naturelles et à l'irrigation dans la pinède sèche. Ces constatations signifient que la sécheresse répétée

dans la vallée du Rhône ralentit chaque année le cycle du C dans le sol.

Les mesures de C à l'échelle de la Suisse dans le projet SOLS FORESTIERS du PNR 68 étayent les conclusions de l'essai d'irrigation sur plusieurs années. Dans le modèle statistique, qui analyse les facteurs contrôlant les stocks de C du sol, les précipitations sont un facteur important, bien que la chimie du sol exerce une influence dominante<sup>20</sup>. Les réserves de MOS du sol forestier diminuent avec l'augmentation des précipitations annuelles. Des régressions linéaires effectuées à partir des données de quelques mille profils de sol montrent que le stock de C augmente de 6 tonnes/ha pour 100 millimètres de précipitations. Rapporté à l'augmentation prévue des phases sèches, cela signifie que l'on doit s'attendre à une diminution du stockage du C.

Pertes de MOS en conséquence du changement climatique ?

Un réchauffement expérimental du sol, des travaux de modélisation et des mesures le long d'un gradient climatique suggèrent que le stock de C va diminuer avec l'augmentation des températures et la diminution des précipitations (tab. 1, p. 32). Selon une étude dans les Alpes bavaroises avec inventaire des réserves des stocks de C répété dans les années 1980 et en 2011, du C a déjà été perdu au cours des dernières décennies<sup>51</sup>. Dans les 30 centimètres supérieurs de sols forestiers, la réserve de C a diminué de 0,4 à 0,9 tonnes C/ha/a soit de 1,4% – des taux de l'ordre des puits de C calculés dans les forêts suisses. Des modélisations du bilan C de forêts suisses dans le climat futur, qui prennent en compte les changements de production végétale et de taux de décomposition suite au réchauffement et

**Projet DYNAMIQUE DU CARBONE du PNR 68: Quelle est l'influence de la sélection végétale et de la forme d'exploitation sur les entrées de C dans le sol ?**

Les racines des plantes cultivées ont un rôle essentiel dans la formation de la MOS. L'équipe du projet a analysé la quantité de C qui parvient dans le sol via les racines dans différentes grandes cultures suisses. Parallèlement le projet a étudié l'influence de différents systèmes d'exploitation (forme et intensité d'exploitation, différentes espèces et variétés).

Dans un essai en serre, l'équipe a cultivé dans les mêmes conditions des variétés de blé qui ont été sélectionnées au cours des cent dernières années. Le phénotype des plantes cultivées s'est nettement modifié au cours de la sélection. Les variétés utilisées récemment ont des rendements plus élevés, mais leur enracinement est nettement plus superficiel (ill. 13, p. 27). Les racines des variétés âgées de cent ans peuvent atteindre une profondeur de 120 centimètres, celles des variétés sélectionnées récemment ne vont que jusqu'à 40 centimètres. Les nouvelles variétés de blé possèdent toutefois la capacité de former un système racinaire plus profond en cas de stress dû à la sécheresse. Malgré la tendance générale négative en termes de profondeur racinaire, la sélection n'a pas d'impact négatif sur la biomasse racinaire dans l'horizon de surface. Par rapport à la biomasse des parties aériennes, leur part relative a même augmenté.

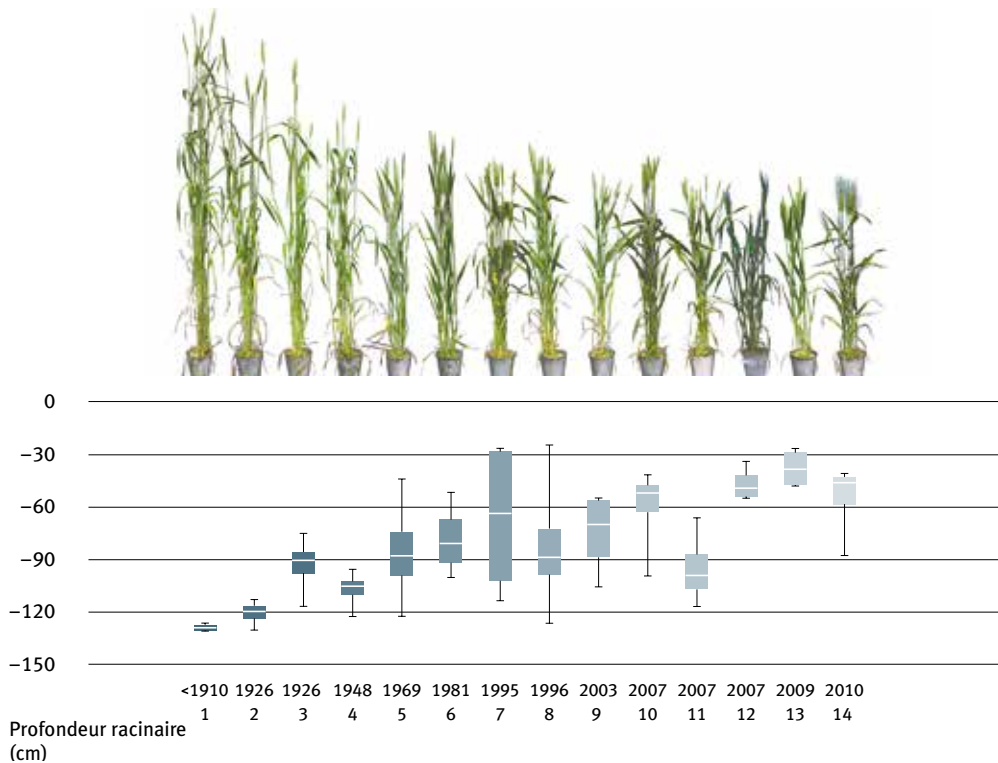
Dans un autre essai, des plants de maïs ont été cultivés dans des chambres en plastique transparent, et le CO<sub>2</sub> absorbé a été suivi dans le système « plante/sol ». L'intensité d'exploitation n'a pas eu d'effet sur la quantité de C entré dans le sol. Toutefois le rapport C souterrain/C aérien a diminué de 35 à 20% avec l'augmentation de la fertilisation (ill. 14, p. 28). Malgré une productivité croissante, la quantité de C entrée dans le sol n'a pas augmenté.

### Illustration 13

Changement de la profondeur racinaire de variétés de blé pendant le siècle dernier. Suite à la sélection, la profondeur des racines des variétés de blé a diminué au cours du dernier siècle.

Projet ENTRÉES DE CARBONE du PNR 68;  
photo : Andreas Hund, ETH Zurich.

- 1 Plantahof
- 2 Mont-Calme 245
- 3 Mont-Calme 268
- 4 Probus
- 5 Zenith
- 6 Arina
- 7 Runal
- 8 Titlis
- 9 Zinal
- 10 Forel
- 11 CH Claro
- 12 CH Combin
- 13 Suretta
- 14 Simano



à la diminution des précipitations<sup>52</sup>, laissent prévoir une baisse des stocks de C. Toutefois, comme dans la plupart des modèles carbone, les processus de stabilisation dans le sol ne sont pas pris en compte.

La mos va aussi vraisemblablement changer en qualité et non seulement en quantité. Dans le sol forestier, la réserve de l'horizon organique baisse plus fortement avec l'altitude que celle du sol minéral sous-jacent (ill. 17, p. 31). Dans les sols de prairies suisses également, la part de C particulière diminue avec le réchauffement climatique. Il en est de même pour les taux de transformation<sup>21</sup>.

En conséquence du changement climatique, on s'attend à davantage de tempêtes et d'incendies de forêt<sup>40</sup>, qui provoquent des per-

tes de mos, en premier lieu dans l'horizon organique. Des inventaires de sol comparatifs ont montré que 25 ans après la tempête «Vivian» environ 25 tonnes C/ha ont été perdues dans les sols forestiers intra-alpins à horizon organique épais<sup>24</sup>. Par contre les pertes en C après la tempête «Lothar» dans les sols du Plateau suisse à horizon de mull mince ont été nettement inférieures (-4 t C/ha en 10 ans).

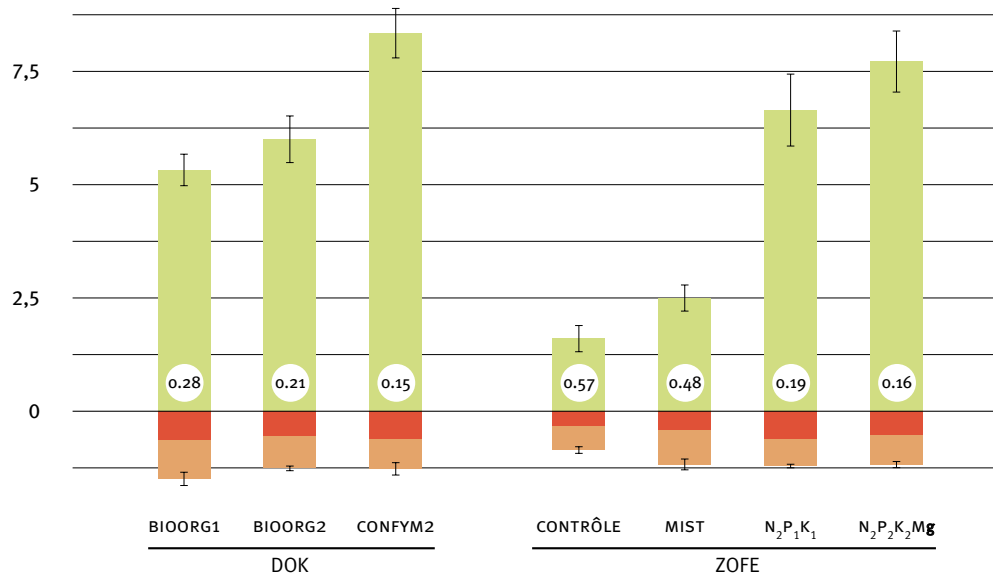
En résumé, on peut dire que le climat modifie de nombreux facteurs qui interagissent entre eux. La plupart des études, avec différentes approches – expériences, gradients naturels et modèles – prévoient cependant des pertes de C dans un climat plus chaud et plus sec. Ces pertes dépendent des conditions du site et de la nature du sol.

#### Illustration 14

Influence de l'intensité d'exploitation sur les entrées de C dans le système racinaire. Dans les essais à long terme DOK et ZOFE, l'intensité d'exploitation n'a pas eu d'impact quantitatif sur les entrées de C dans le système racinaire du maïs. La fertilisation réduit cependant la part de C souterrain par rapport au C aérien (valeurs de l'illustration). La répartition du C entre les compartiments de biomasse a été déterminée avec un test de marquage par pulsations (pulse labelling) au  $^{13}\text{C}$ . Elle reflète le séjour des assimilats frais dans les plants de maïs (BIOORG1 : fertilisation organique correspondant à 0,7 unité de gros bétail/ha ; BIOORG2 : fertilisation organique correspondant à 1,4 unités de gros bétail/ha ; CONFYM2 : fertilisation organique et minérale correspondant à 1,4 unités de gros bétail/ha ; CONTRÔLE : non fertilisé ; MIST : fertilisation organique ;  $\text{N}_2\text{P}_1\text{K}_1$  : faible fertilisation P et K ;  $\text{N}_2\text{P}_2\text{K}_2\text{Mg}$  : fertilisation N, P et K élevée avec Mg).

Projet ENTRÉES DE CARBONE du PNR 68.

- Biomasse aérienne
- Racine
- Exsudats racinaires



Distribution du carbone (t C/ha)

## 2.7 Hotspot sols marécageux

Les sols marécageux se caractérisent par une haute teneur en mos sous forme de tourbe, qui se forme dans des conditions de saturation en eau et s'enrichit pendant des milliers d'années. L'assèchement par drainage de ces sols organiques pour l'extraction de la tourbe, l'agriculture ou la sylviculture a provoqué une oxydation et une diminution de la mos et ainsi une perte de tourbe. De grandes quantités de  $\text{CO}_2$  et de gaz hilarant ( $\text{N}_2\text{O}$ ) sont alors rejetées dans l'atmosphère. En Suisse, la surface des tourbières a diminué de 80% depuis 1850. Les taux annuels d'émission des sols tourbeux (766 000 tonnes d'équivalents  $\text{CO}_2$ /a) représentent environ 14% des émissions de gaz à effet de serre du domaine agricole en Suisse (secteur agriculture de l'inventaire suisse des émissions de gaz à effet de serre). Cesser le drainage permettrait d'éviter de grandes

pertes de  $\text{CO}_2$  de ces sols. Toutefois, les surfaces drainées sont les sites les plus productifs, ce qui provoque un conflit d'utilisation avec l'agriculture. Des utilisations de substitution pour la remise en eau intéressantes sur le plan économique n'existent pas actuellement. Le projet SOLS MARÉCAGEUX du PNR 68 montre qu'une exploitation intensive durable – et donc intéressante aussi sur le plan économique – des sols marécageux, préservant en même temps leur capacité de stockage du carbone, n'est pas possible dans l'état actuel des connaissances.

Les tourbières se sont formées depuis la dernière glaciation. Les sphaignes s'y transforment en tourbe en absence d'oxygène. Les tourbières hautes sont alimentées par l'eau de pluie alors que les tourbières basses (tourbières plates) se forment après accumulation d'eau souterraine. Le drainage des marécages pour l'utilisation agricole et syl-

vicole ou l'extraction de la tourbe comme combustible a commencé au 18<sup>e</sup> siècle dans beaucoup de pays européens. On peut reconstituer la réduction des surfaces à l'aide de cartes historiques (cartes Dufour et Siegfried), des noms de lieux-dits anciens et de divers inventaires (cartes pédologiques, inventaires des tourbières)<sup>53</sup>. Depuis 1850, la surface des tourbières a ainsi diminué de 107 000 hectares, soit 80%<sup>54</sup>. La diminution dans le même temps de l'épaisseur de tourbe engendre une modification de la réserve de C (ill. 7, p. 19), qui est passée de 203 millions de tonnes de C en 1850 à 30 millions de tonnes de C aujourd'hui<sup>54</sup>. Non seulement cette perte contribue fortement au mauvais bilan CO<sub>2</sub> de l'agriculture, mais elle entraîne aussi une eutrophisation des eaux, des affaissements de terrain et une érosion du sol (tab. 2, p. 34).

Le changement climatique, avec des températures plus élevées et probablement des

phases de sécheresse plus longues, va aussi augmenter la décomposition de la matière organique<sup>55</sup>. Dans les tourbières suisses, la disparition de la tourbe due à la propagation de plantes vasculaires, telles que les éricacées, au détriment des sphaignes<sup>56</sup> s'accélère. Les arbustes nains consomment plus d'eau, ce qui fait que les sols marécageux s'assèchent encore davantage. De plus ils libèrent dans le sol des enzymes qui décomposent la matière organique.

## 2.8 Bilan intermédiaire : Conservation de la matière organique du sol

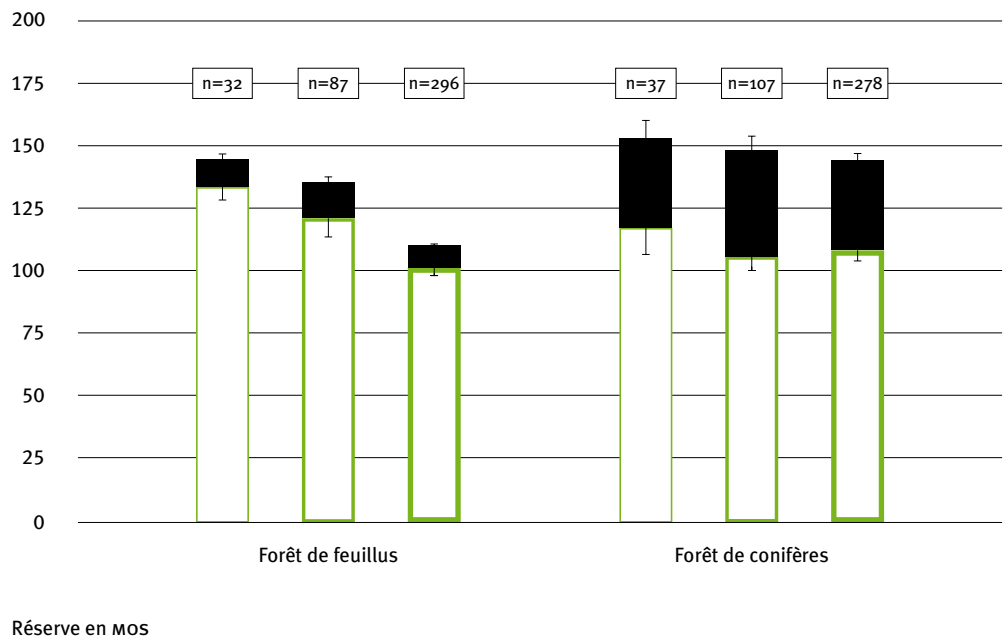
La mos joue un rôle clé pour beaucoup de fonctions du sol. Elle constitue donc un indicateur intégratif de la qualité du sol. Pour les sols agricoles suisses, aucun seuil de teneur en mos adéquate ne peut être fixé sur la base des données actuelles. Ces seuils doivent être spécifiques au site, car la teneur en C moyenne augmente avec

### Illustration 15

Influence du type et de l'âge de la forêt sur le stock de C dans les sols forestiers suisses. Le stock de mos est plus élevé dans les forêts de conifères que dans les forêts de feuillus, car les forêts de conifères stockent plus de mos dans l'horizon organique. La mos diminue légèrement avec l'âge de la forêt. Cela est dû en grande partie au fait que les jeunes forêts sont situées en moyenne 200 mètres plus haut que les forêts anciennes, le stock de mos étant plus important en raison du climat plus frais et plus humide qui y règne<sup>20</sup>.

Projet SOLS FORESTIERS du PNR 68.

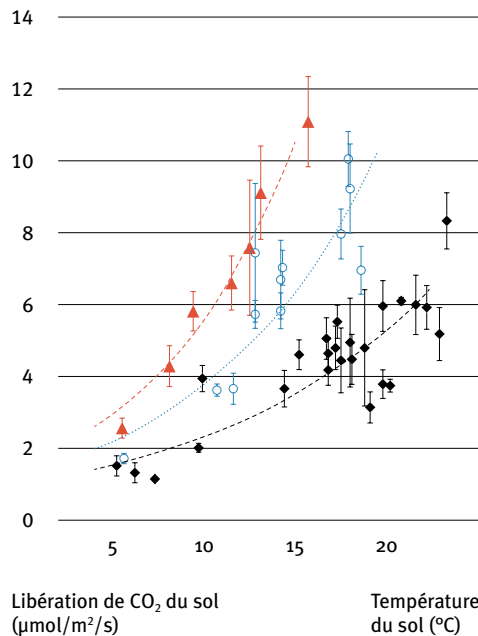
Horizon organique  
 ■  
 Sol minéral  
 Âge de la forêt (années)  
 □ < 60  
 □ 60–120  
 □ > 120



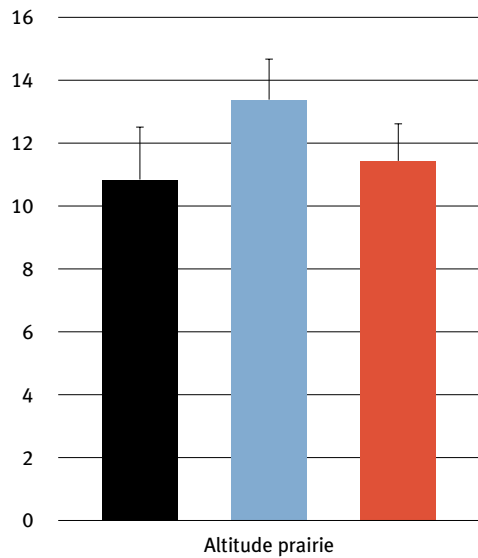
**Illustration 16**

Libération de CO<sub>2</sub> provenant des sols en fonction de l'altitude. La température contrôle la libération de CO<sub>2</sub> par les sols quand les précipitations sont suffisantes («respiration du sol»). La mesure de la respiration du sol dans les sols de prairies suisses le long d'un gradient d'altitude montre cependant que les sites situés à plus basse altitude, dans lesquels règne un climat relativement plus chaud, rejettent moins de CO<sub>2</sub>, à températures du sol égales, que les sites situés plus haut au climat plus frais<sup>46</sup>. Ce phénomène peut être interprété comme une adaptation climatique. Si les températures sont plus élevées à long terme, les teneurs en mos sont plus faibles. Les microorganismes disposent de ce fait de moins de substrat (graphique ci-dessous)<sup>47</sup>.

Altitude  
 ■ 400 m  
 ■ 1000 m  
 ■ 2000 m



Libération de CO<sub>2</sub> du sol (µmol/m<sup>2</sup>/s)      Température du sol (°C)



Flux annuel de CO<sub>2</sub> du sol (t CO<sub>2</sub>-C/ha/a)

l'altitude et la teneur en argile<sup>59</sup>. Mais des mesures répétées de la mos permettent d'évaluer la durabilité de l'exploitation. La détermination de teneurs en mos spécifiques au site dans le cadre d'un inventaire pédologique exhaustif pourrait être utilisée à long terme pour l'orientation pratique et comme instrument de conseil dans l'agriculture<sup>59</sup>.

Les essais de longue durée montrent que le stock de C des sols cultivés suisses diminue, entre autre parce que les terres arables étaient auparavant utilisées en prairies. En outre, le drainage des sols cultivés peut jouer un rôle dans les pertes. La perte de mos est particulièrement drastique dans les sols marécageux, qui ont perdu 80% de leur stock de C au cours des 150 dernières années. Par contre l'extension progressive des forêts n'a qu'un impact mineur sur le stockage du C, mais modifie la composition de la mos. L'impact de l'extension des zones construites sur la mos, qui est altérée et déplacée, est largement méconnu. On peut cependant s'attendre à des pertes considérables (tab. 2, p. 34). Le changement climatique conduit très vraisemblablement à une diminution du stockage du C, les températures et la sécheresse croissantes sont accompagnées d'une baisse des stocks de C et d'une modification de la qualité de la mos. L'importance quantitative et les taux de perte de C sont cependant spécifiques au site et empreints d'une grande incertitude.

Quelles mesures permettent de réduire les pertes de C ? En règle générale, la mos, notamment la partie stable, appelée humus, se forme sur une très longue période – des milliers d'années –, mais est très rapidement perdue en cas de changement drastique des conditions environnementales, par exemple suite au drainage des sols marécageux. La mesure la plus appropriée





Tableau 1

Effets potentiels du climat et du changement d'utilisation sur la réserve de C. Des expériences contrôlées, des études le long de gradients climatiques naturels et des travaux de modélisation laissent prévoir des pertes de matière organique avec l'augmentation des températures et la diminution des précipitations.

	Changement par unité de surface	Extrapolation à la Suisse	Commentaire	Références
1 Gradient d'altitude sol forestier, 1000 sites ; +4 °C, -33% précipitations	-27,7 t C/ha	-35 400 kt C	Période inconnue ; équilibre avec le climat s'est installé sur des centaines d'années	Projet SOLS FORESTIERS du PNR 68, <sup>42</sup>
2 Gradient d'altitude agriculture, 1800 sites ; terres ouvertes + prairies en Bavière ; +4 °C, -33% précipitations	-38,8 t C/ha	-57 400 kt C	Période inconnue ; équilibre avec le climat s'est installé sur des centaines d'années	<sup>59</sup>
3 Réchauffement expérimental +4 °C	par an : -1 t C/ha/a		Résistance du sol inconnue ; études de cas	<sup>167,168</sup>
4 Modélisation pour les sols forestiers ; +6,1 °C, -30% précipitations	en 100 ans : -45,5 t C/ha	en 100 ans : -57 600 kt C	Recul attendu de la croissance forestière à basse altitude, mais augmentation vers la limite de la forêt	<sup>52</sup>
<b>Changements potentiel fertilisation organique</b>				
Essais à long terme fertilisation organique (DOK, Reckenholz)	par an : 0,2 à 0,3 t C/ha/a	par an : 90 à 130 kt C/a	Diminution potentielle des pertes seulement pour les grandes cultures	<sup>33,37</sup>

### Projet DYNAMIQUE DU CARBONE du PNR 68 : Quels sont les sols les plus sensibles au changement climatique ?

L'équipe du projet a échantillonné dans l'ensemble de la Suisse 54 stations forestières aux propriétés chimiques du sol diverses, le long d'un gradient systématique de température et de sécheresse. La mesure du rejet de CO<sub>2</sub> à des températures et âges radiocarbone différents (projet INDICATEURS DE VULNÉRABILITÉ du PNR 68) montre une grande susceptibilité aux pertes de CO<sub>2</sub> des sols en climat humide et des sols du sud des Alpes et du Jura. Dans l'ensemble, les propriétés du sol avaient une influence plus grande sur la dégradabilité de la MOS que les conditions climatiques des sites. Les propriétés chimiques et physiques du sol devraient donc être intégrées dans les travaux de modélisation à grande échelle.

L'équipe a aussi étudié des modèles d'écosystème avec de jeunes peupliers sur deux sols différents qui ont été soumis aux conditions climatiques prévues en 2070 – teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère de 570 ppm, hausse des températures de 4 °C et des précipitations de 18%. L'utilisation d'isotopes stables a permis de suivre la distribution du carbone absorbé dans le système « plante/sol ». Dans les conditions climatiques futures, les plantes ont absorbé plus de CO<sub>2</sub> (+65%) et incorporé plus de CO<sub>2</sub> dans la biomasse (+28%), mais le sol a rejeté plus de CO<sub>2</sub> (+39%). Cette augmentation du rejet est due pour moitié à une respiration racinaire accrue (ill. 18, p. 33).

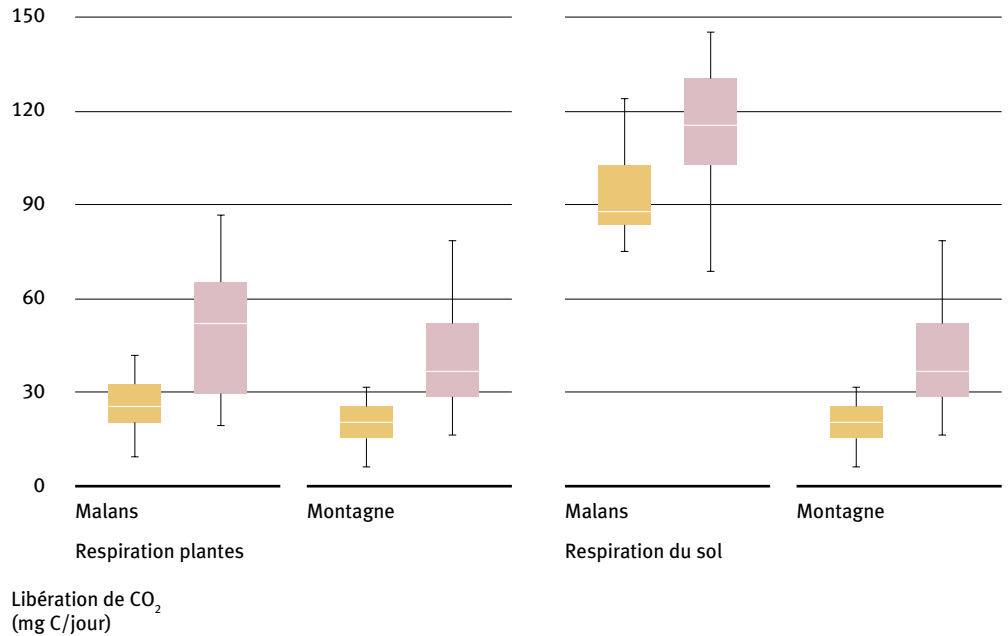
Par conséquent le climat futur stimule particulièrement l'activité des plantes. Cela renforce l'activité microbienne dans le sol et les émissions de CO<sub>2</sub>, ce qui peut potentiellement compenser l'effet positif du changement climatique sur l'absorption de CO<sub>2</sub> par les végétaux.

### Illustration 18

Libération de C d'écosystèmes modèles soumis aux conditions climatiques futures. Modèles d'écosystèmes dans lesquels de jeunes peupliers sur deux sols différents – situés dans une vallée (Malans) et en montagne (Berg) – sont soumis aux conditions climatiques futures. La transformation du C a augmenté avec les températures, mais la réaction dépend du type de sol.

Projet DYNAMIQUE DU CARBONE du PNR 68.

- Actuel
- Futur



### Illustration 19

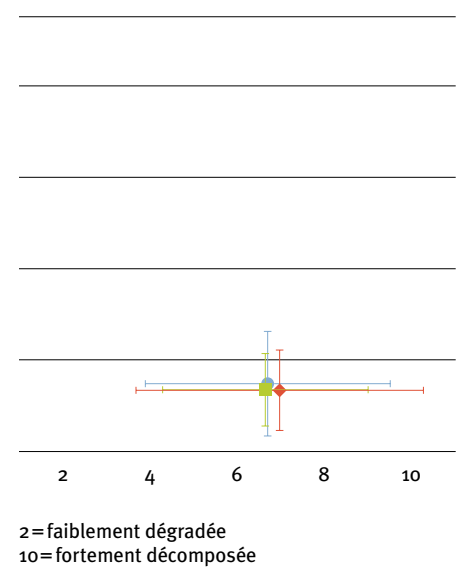
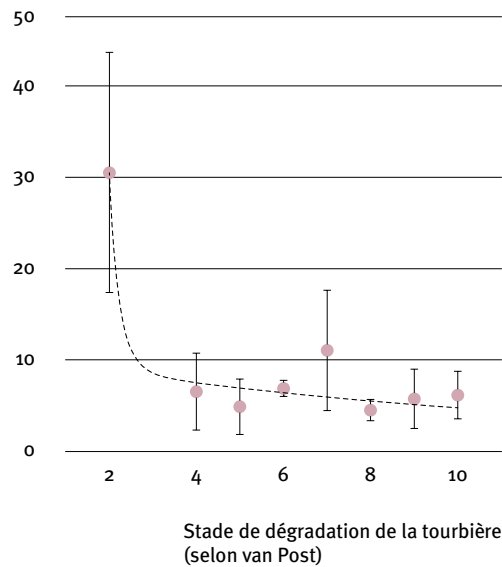
Dégradabilité de la MOS des sols marécageux en fonction de l'utilisation des terres. La dégradabilité de la MOS montre combien la MOS est facilement décomposée en CO<sub>2</sub>. Une étude en laboratoire avec des échantillons de sols organiques (0–100 cm) de 247 sites a montré que le stade de décomposition due au drainage détermine la facilité avec laquelle la MOS est décomposée dans les sols marécageux (à gauche). Par contre le mode d'utilisation des sols marécageux n'a qu'un effet minime sur la dégradabilité de la MOS (à droite).

Projet SOLS MARÉCAGEUX du PNR 68<sup>57</sup>.

- Tous types d'utilisation des terres (n = 247)

- Prairies (n = 125)
- Champ (n = 74)
- Forêt (n = 57)

Dégradabilité de la matière organique par an (% du C total/a)



## Projet SOLS MARÉCAGEUX du PNR 68 :

### Quelle utilisation agricole ou forestière peut permettre de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> des sols marécageux ?

Les rejets de CO<sub>2</sub> des sols marécageux montrent que le stade de décomposition de la tourbe est le facteur qui a le plus fort impact sur la dégradabilité de la mos. Le type d'utilisation des terres n'a qu'un effet secondaire (ill. 19, p. 33) : la dégradabilité de la tourbe sous les forêts et les prairies est légèrement plus élevée que sous les sols cultivés<sup>57</sup>. Les sols organiques exploités extensivement contiennent des quantités de C labile encore plus grandes et disposent d'un potentiel d'émission de gaz à effet de serre élevé dès qu'ils sont exploités intensivement.

Le C facilement disponible n'a aucun effet sur la décomposition de la mos des sols marécageux anciens. En revanche la mos plus récente, qui provient de la période suivant le drainage, est plus fortement décomposée<sup>57</sup>. Dans les sols marécageux fortement dégradés, l'apport de résidus végétaux peut toutefois freiner la décomposition de la mos ancienne<sup>169</sup>.

Dans un essai de terrain sur un sol marécageux où du miscanthus a été cultivé pendant 20 ans, on a montré que cette exploitation ne pouvait compenser que 30% de la perte de C ancien du sol marécageux causée par le drainage. Le CO<sub>2</sub> libéré par le sol marécageux était toujours dominé par la mos ancienne et le marécage restait une source de CO<sub>2</sub><sup>58</sup>. Une exploitation intensive durable des sols marécageux, préservant parallèlement leur capacité de puits de carbone ne semble pas possible dans l'état actuel des connaissances.

Tableau 2

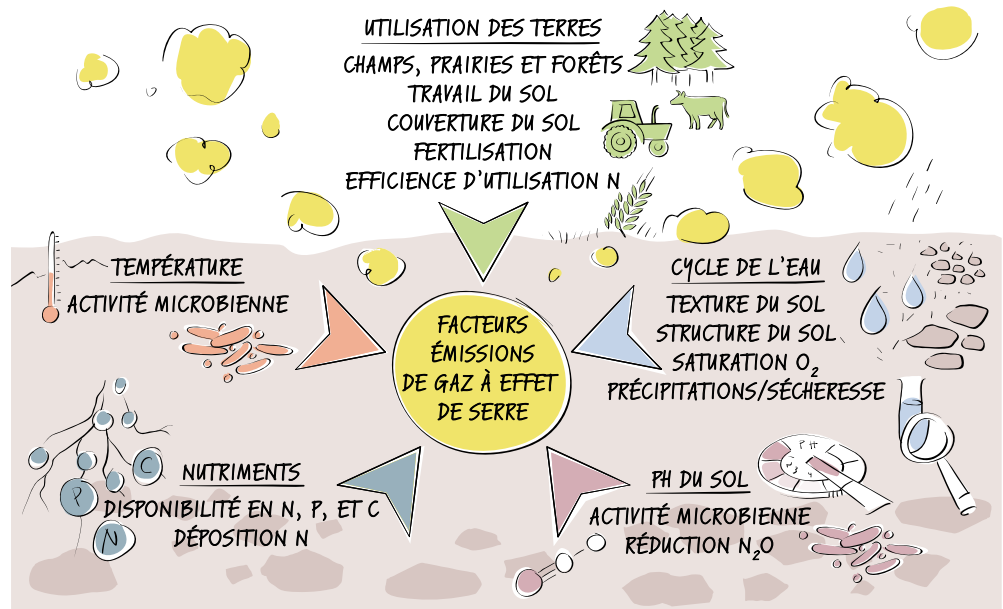
Estimation du bilan C des sols suisses. Une diminution des stocks de C sur les terres arables fait face à une légère augmentation dans les forêts. Même si les sols marécageux ne représentent que 1% du territoire, ils sont responsables des pertes les plus importantes.

	Séquestration du C dans le sol		Commentaire	Références
	Changement par unité de surface	Extrapolation à la Suisse		
1 NABO (sites : 17 prairies, 29 champs, 23 forêts)	non significatif	non significatif	peu de sites, sol superficiel seulement	<sup>30</sup>
2 Essai à long terme grandes cultures Terres ouvertes + prairies	-0,22 à -0,34 t C/ha/a	-101 à -156 kt C/a	Extrapolé aux terres arables, peu de sites, représentativité du travail du sol douteuse	<sup>33,37</sup>
3 Sols marécageux drainés	-9,5 t C/ha/a	-209 kt C/a	Estimation solide de la perte de surface et d'humus	<sup>53,57</sup> Projet PNR 68 SOLS MARÉCAGEUX
4 Inventaire des sols forestiers allemands 1990 et 2007 sur 1800 surfaces	+0,41 t C/ha/a	+525 kt C/a	Transposition à la forêt suisse incertaine	<sup>166</sup>
5 Modélisation en forêt avec YASSO	+0,001 t C/ha/a	+1,3 kt C/a	Le modèle ne tient pas compte des processus de stabilisation	<sup>74</sup>
6 Extension des zones d'habitation		-45 à -90 kt C/a	Hypothèse : pertes de mos de 25-50% sur les nouvelles zones d'habitation	Zones d'habitation : statistique de la superficie Pertes C estimation propre
<b>En comparaison</b>				
Émissions de gaz à effet de serre en Suisse (CO <sub>2</sub> eq; 2014)		-13 256 kt C/a		<sup>74</sup>

**Illustration 20**

Principaux facteurs de formation de gaz à effet de serre dans le sol. La disponibilité des éléments nutritifs et la forme d'utilisation des terres ont une importance particulière.

Illustration: Nadja Stadelmann



Dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), méthane ( $\text{CH}_4$ ) et gaz hilarant ( $\text{N}_2\text{O}$ ) constituent les principaux gaz à effet de serre émis par les sols. Ils résultent des processus de transformation microbienne des composés carbonés et azotés dans le sol. Les principaux facteurs d'influence sont la disponibilité du substrat, le régime hydrique et les propriétés du sol. La régulation du régime hydrique du sol et la fertilisation notamment peuvent influencer l'absorption et les émissions de gaz à effet de serre. Une exploitation adaptée de la ressource sol fait partie des principaux instruments de réduction des émissions de gaz à effet de serre provenant des sols (ill. 20).

### 3.1 Les gaz à effet de serre et leur production

#### 3.1.1 Influence de l'utilisation des terres sur les émissions de gaz à effet de serre du sol

La forme d'utilisation des terres – forêt, pâturage ou terres ouvertes – influe sur la fonction de source ou de puits de gaz à effet de serre du sol. Alors que les sols utilisés de façon intensive pour les grandes cultures, et en particulier les sols marécageux drainés, présentent un bilan C négatif, les sols de pâturage ou de forêt constituent un faible puits de C (tab. 2, p. 34). Comme les stocks de C des sols de forêt et de pâturage sont similaires, l'augmentation des surfaces forestières au détriment des prairies n'a probablement qu'un faible impact sur le bilan C des sols. Toutefois après la conversion de pâturages en forêt au col du Jaun (FR), on a observé une multiplication par deux à trois de l'absorption de  $\text{CH}_4$ <sup>39</sup>.

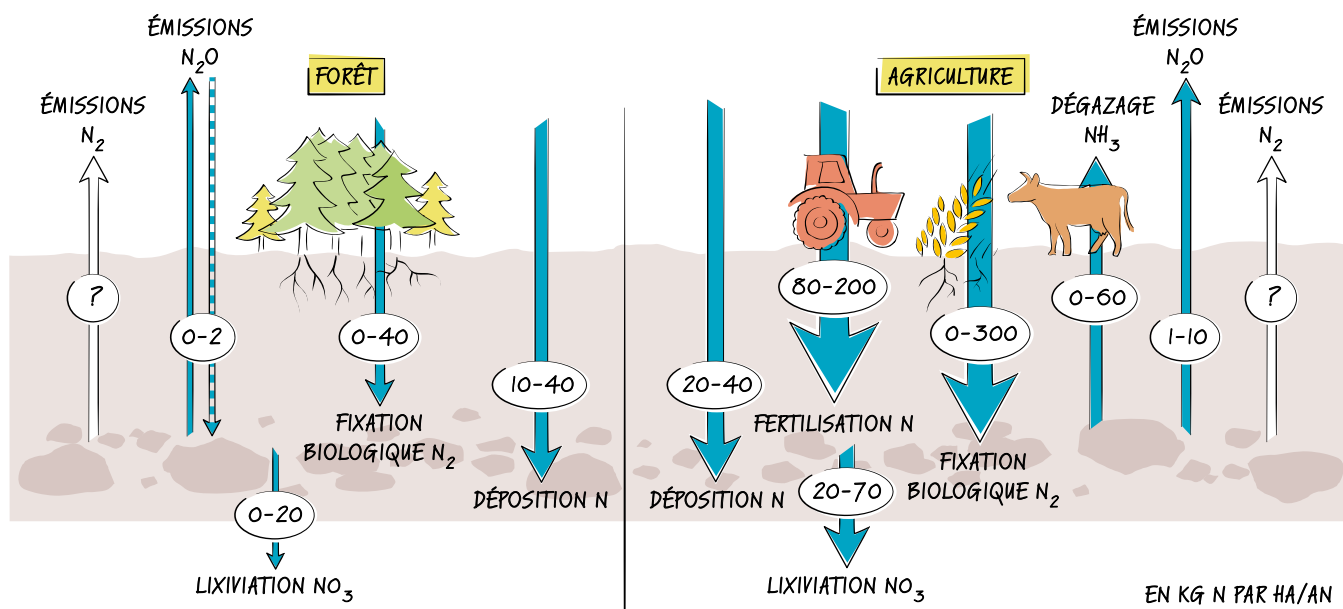


Illustration 21

Flux d'azote dans la forêt et l'agriculture suisses. Ordre de grandeur des flux d'azote dans la sylviculture et l'agriculture suisses, en kilogrammes d'azote (N) par hectare et par an. Les émissions de  $N_2$  ne sont pas connues. La fixation biologique de l'azote dépend de la part de légumineuses, alors que la volatilisation d'ammoniac ( $NH_3$ ) est déterminée par la quantité et la méthode d'épandage des engrais. Lors de l'épandage de purin, 30 à 70% de l'ammonium ( $NH_4^+$ ) s'échappe dans l'atmosphère sous forme de  $NH_3$ . Dans le sol, du  $NH_4^+$  est formé à partir de l'azote organique et produit à son tour du nitrate ( $NO_3^-$ ) par nitrification. Cela conduit à une acidification du sol, un lessivage de nitrate et une eutrophisation<sup>62-67</sup>.

Illustration : Nadja Stadelmann

Cela pourrait s'expliquer par une amélioration de l'aération dans les sols forestiers, ce qui augmente la disponibilité du  $CH_4$ . L'intensité d'exploitation agit aussi sur les émissions de  $N_2O$ . Les pâturages intensifs émettaient huit fois plus de  $N_2O$  que les pâturages extensifs. Sur les trois sols de pâturages exploités à différents degrés d'intensité, les émissions de  $CH_4$  mesurées étaient minimales<sup>69</sup>. La réaffectation d'une prairie permanente en terre ouverte ou le retournement d'une prairie artificielle au cours d'une rotation peuvent aussi entraîner des émissions de gaz à effet de serre considérables. À Chamau ZG, une prairie intensive est passée de puits de C à source de C suite à son retournement et à son rétablissement (projet FACCE MODELS4PASTURE)<sup>70</sup>. Le bilan des gaz à effet de serre était dominé par les émissions de  $N_2O$  et de  $CO_2$  (48% resp. 44%), alors que les émissions de  $CH_4$  ne représentaient qu'une faible part (8%).

### 3.1.2 Émissions directes et indirectes de gaz hilarant

Les émissions directes de  $N_2O$  se produisent sur les surfaces agricoles elles-mêmes. Une méta-analyse globale<sup>71</sup> a constaté une hausse disproportionnée des émissions de  $N_2O$  avec l'apport croissant d'engrais N. Les émissions directes sont très variables dans le temps et dans l'espace et surviennent dans le courant de l'année principalement quand les conditions du sol changent, par exemple après de fortes pluies, l'apport d'engrais ou le travail du sol. Les émissions indirectes de  $N_2O$  sont causées par le transport de composés azotés réactifs dans les milieux naturels environnants (ill. 21). Cela inclut le lessivage de nitrate ( $NO_3^-$ ) provenant des surfaces agricoles ainsi que la volatilisation et le dépôt consécutif d'ammoniac ( $NH_3$ ). L'émission du gaz à effet de serre  $N_2O$  et le lessivage de  $NO_3^-$  dans la nappe phréatique sont étroitement liés. Tous deux sont les symptômes d'un déséquilibre du cycle

de l'azote. Les mesures visant à réduire le lessivage de  $\text{NO}_3^-$  ont aussi un effet positif sur les émissions de  $\text{N}_2\text{O}$ . Pour pouvoir diminuer les émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  provenant du sol il faut prendre en compte l'ensemble des facteurs influençant le cycle de l'azote. Une analyse globale montre que la capacité naturelle de régénération des écosystèmes a déjà été dépassée suite aux entrées d'azote minéral d'origine humaine dans les systèmes agricoles<sup>72</sup>.

### 3.2 Émissions de gaz à effet de serre provenant des sols suisses

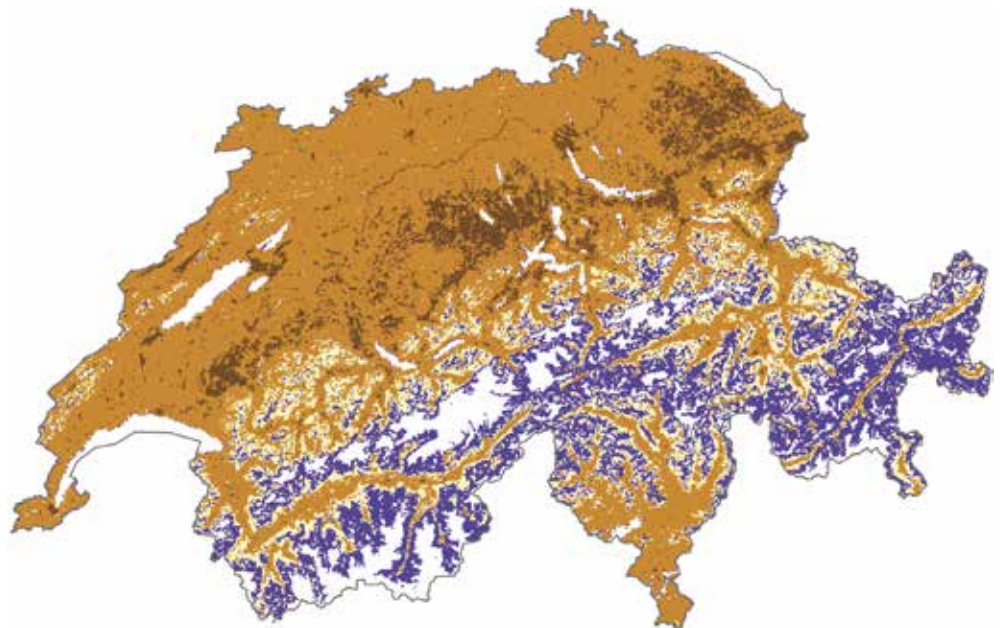
En tant que signataire de la Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, la Suisse est tenue de documenter le rejet de gaz à effet de serre dans un inventaire national. Les émissions de gaz à effet de serre y sont réparties selon les différents secteurs économiques. Pour les gaz à effet de serre du

sol, sont concernées surtout les émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  résultant de l'utilisation agricole des sols, classées dans le secteur « agriculture » (ill. 25, p. 40). S'y ajoutent la fixation et la libération de C des surfaces agricoles et forestières, enregistrées dans le secteur « utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie » (LULUCF). Alors que les travaux de modélisation laissent supposer une fixation de  $\text{CO}_2$  faible dans les sols forestiers, les sols agricoles perdent du  $\text{CO}_2$ . La perte de C indiquée dans l'inventaire des gaz à effet de serre en Suisse s'élève à 209 000 tonnes de C sous forme de  $\text{CO}_2$  pour l'année 2014 (tab. 2, p. 34)<sup>74</sup>. Elle résulte du drainage et de l'utilisation agricole des sols organiques (projet sols MARÉCAGEUX du PNR 68; point 2.7). Une remise en eau permettrait de rééquilibrer le bilan C des sols marécageux drainés, tout en diminuant les émissions de  $\text{N}_2\text{O}$ . Toutefois les sols organiques semi-naturels

**Illustration 22**  
Modélisation de la répartition spatiale des émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  en Suisse en 2014. Sur le Plateau suisse surtout, la fertilisation azotée provoque des émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  considérables<sup>68</sup>.

Émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  (kg/ha)

- 0–0,02
- 0,02–0,5
- 0,5–1
- 1–5
- >5



**Tableau 3**  
Propriétés des principaux gaz  
à effet de serre.

Gaz à effet de serre	concentration atm	durée de séjour atm (Années)	Impact climatique (eq CO <sub>2</sub> )	Émissions globales		Émissions suisses		Émissions de GES du sol (Mt CO <sub>2</sub> eq/a)
				total (Gt CO <sub>2</sub> eq/2010)	(%)	total (Mt CO <sub>2</sub> eq/2014)	(%)	
CO <sub>2</sub>	402 ppm	variable	1	38	76	39,3	80,8	0,2
CH <sub>4</sub>	1852 ppb	12,4	28	7,8	16	5,1	10,5	–
N <sub>2</sub> O	328 ppb	121	310	3,1	6,2	2,4	5	1,5
Références	<sup>79</sup>					<sup>74</sup>		

perdent leur fonction de puits de CH<sub>4</sub> et le risque d'eutrophisation par libération de composés phosphorés issus de la fertilisation P augmente. L'importance quantitative des sols organiques semi-naturels en tant que puits de CH<sub>4</sub> est cependant faible (ill. 23 et 24, p. 39). Des expériences pilotes montrent qu'un niveau de la nappe phréatique situé à une profondeur de 20 à 30 centimètres a une influence positive sur le bilan C des sols marécageux agricoles et qu'une utilisation agricole spécialisée, la paludiculture par exemple, est encore possible<sup>75,76</sup>. C'est avant tout la fixation de C dans la biomasse des forêts qui assure le bilan CO<sub>2</sub> globalement positif de l'utilisation des terres en Suisse.

Un recensement à l'échelle de la Suisse indique que les sols agricoles constituent de faibles puits de CH<sub>4</sub> (–1500 à 0 t CH<sub>4</sub>/a)<sup>73</sup>. Les sols forestiers ont aussi un bilan négatif de 2800 tonnes de CH<sub>4</sub>/a. L'effet de puits est cependant extrêmement faible comparé aux émissions de 150 000 tonnes de CH<sub>4</sub>/a issues de l'élevage.

La source la plus importante de gaz à effet de serre provenant du sol est constituée par les émissions de N<sub>2</sub>O de l'agriculture, qui, converties en équivalents CO<sub>2</sub>,

représentent environ un quart des émissions de gaz à effet de serre du secteur agricole en Suisse. Les émissions sont particulièrement élevées sur le Plateau suisse (ill. 22, p. 37). Selon des calculs issus de modèles utilisés dans le cadre de l'inventaire national des gaz à effet de serre, les émissions de N<sub>2</sub>O ont pu être diminuées en Suisse depuis 1990 grâce à une réduction de 15% de l'apport d'engrais (ill. 25, p. 40)<sup>74</sup>. Toutefois les incertitudes sont grandes en ce qui concerne le bilan des émissions de N<sub>2</sub>O du sol. Selon les valeurs de référence du Conseil mondial du climat (facteurs d'émission du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, GIEC), utilisées pour l'estimation des émissions à l'échelle du pays, on peut supposer que 1% des quantités d'azote apportées par les engrais est rejeté sous forme de N<sub>2</sub>O. Mais il n'existe probablement pas de relation linéaire entre les quantités d'engrais et les émissions de N<sub>2</sub>O<sup>71</sup>. L'utilisation d'engrais organiques ou un assolement avec légumineuses et engrais verts peuvent provoquer un retard de la minéralisation de N et donc des émissions de N<sub>2</sub>O qui y sont liées<sup>78</sup>. Par conséquent le facteur d'émission correspondant du GIEC ne peut pas fournir de prévisions précises concernant les émissions de N<sub>2</sub>O.

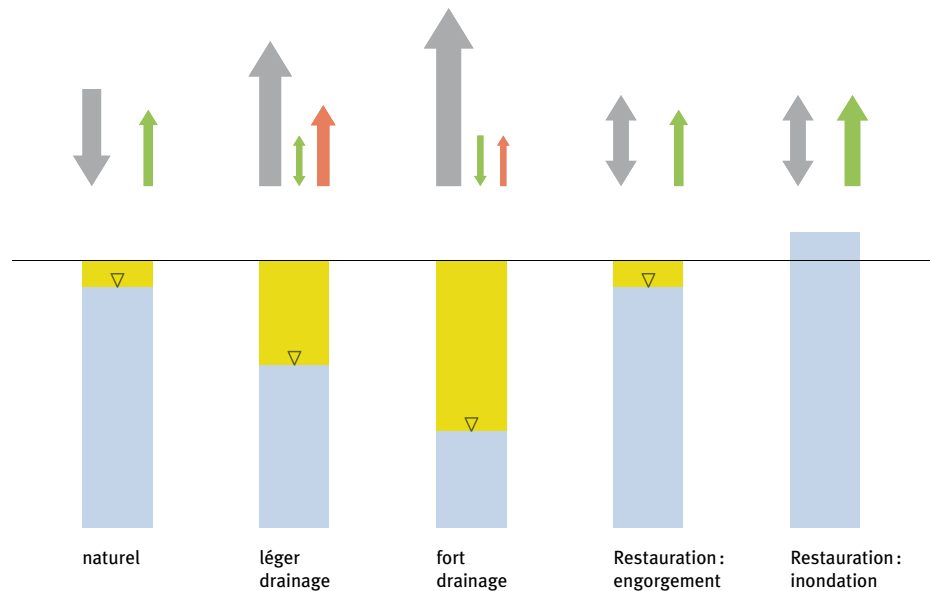


### Illustration 23

Influence du niveau de l'eau sur les émissions de gaz à effet de serre dans les sols organiques. En cas de drainage intense, les émissions de CO<sub>2</sub> dominent. Une submersion consécutive à une remise en eau peut entraîner des émissions de CH<sub>4</sub>. En dehors des conditions naturelles, les émissions de CH<sub>4</sub> sont les plus faibles dans le cas d'une remise en eau permettant à l'horizon supérieur du sol de rester bien aéré<sup>77</sup>.

■ CO<sub>2</sub>  
■ CH<sub>4</sub>  
■ N<sub>2</sub>O

■ Niveau de l'eau

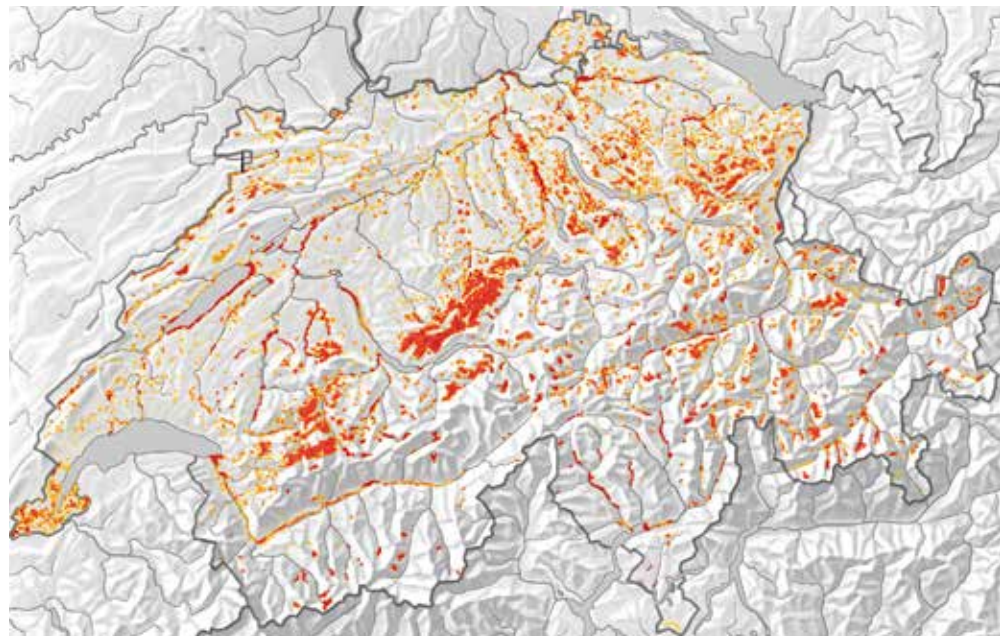


### Illustration 24

Émissions de CH<sub>4</sub> provenant des sols marécageux suisses. Les sols marécageux sont une source d'émission de CH<sub>4</sub> surtout sur le versant nord des Alpes<sup>73</sup>.

Zones humides (mg CH<sub>4</sub>/m<sup>2</sup>/jour)

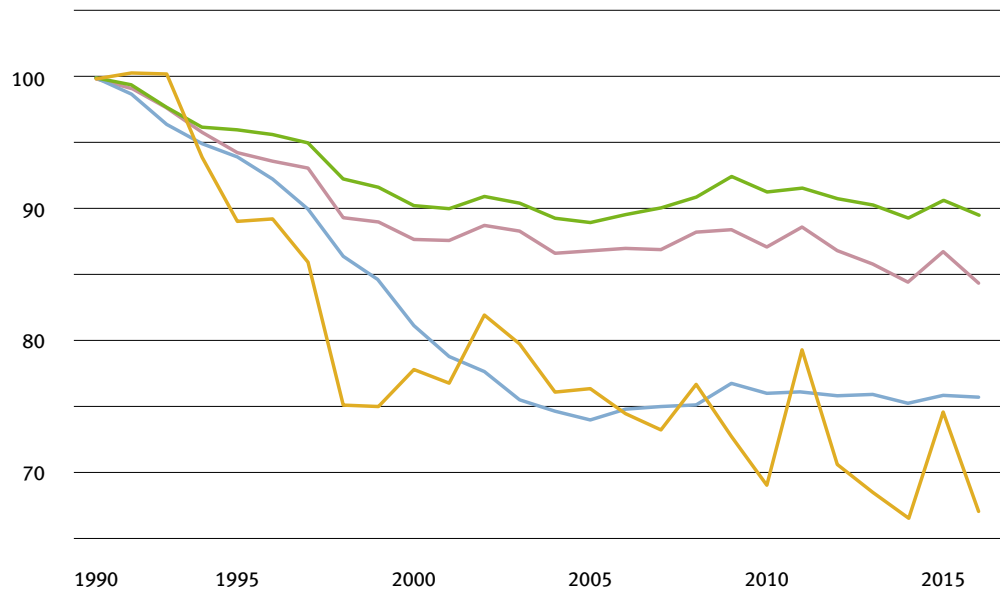
■ 0-0,05  
■ 0,05-0,2  
■ 0,2-0,5  
■ 0,5-1



### Illustration 25

Évolution des émissions de gaz à effet de serre du secteur agricole en Suisse. Depuis 1990, les émissions de  $N_2O$  provenant de l'agriculture ont pu être réduites de 15% environ. Cette diminution est liée avant tout à une réduction de l'apport d'engrais commerciaux et de ferme<sup>74</sup>.

- Émissions de GES agriculture
- Émissions  $N_2O$  agriculture
- Émissions  $N_2O$  engrais de ferme
- Émissions  $N_2O$  engrais commerciaux



Année de référence 1990 = 100 %

### 3.3 Bilan intermédiaire : mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre provenant du sol

En plus de la disponibilité du C et du N, le niveau des émissions de gaz à effet de serre dépend de nombreux facteurs spécifiques au site, climatiques et liés à l'exploitation. Les mesures visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre provenant des sols agricoles devraient s'orienter avant tout sur une utilisation efficace de N.

#### 3.3.1 Gestion de l'azote

L'apport d'engrais azotés est une des sources principales d'émission de  $N_2O$  provenant du sol. Une comparaison entre sites de prairie fortement et modérément fertilisés à Chamau et Frübüel (Hünenberg ZG) a montré une multiplication par huit du taux d'émission de  $N_2O$  pour un

apport de N supérieur de 30%<sup>69</sup>. La diminution de la teneur en N disponible dans le sol, tout en maintenant un niveau de rendement élevé, est donc un élément important d'une agriculture respectueuse du climat<sup>82</sup>. Une fertilisation azotée modérée diminue les pertes de N par lessivage de  $NO_3^-$  et les émissions de  $N_2O$ , augmentant ainsi l'efficacité de N. Dans un essai au champ près de Scheyern en Bavière (DE), une augmentation de l'efficacité de N de 20 à 33 a entraîné une baisse des émissions de  $N_2O$  de 28 à 42%<sup>83</sup>. La quantité d'engrais azotés apportée ainsi que le mode et le moment de l'épandage jouent un rôle déterminant. Ainsi l'épandage fractionné d'engrais azoté sur un sol cultivé a permis de réduire les émissions de  $N_2O$  de 26% sans perte de rendement<sup>84</sup>. Une gestion de N adaptée, qui diminue la disponibilité de  $NO_3^-$ , réduit le lessivage de  $NO_3^-$  et a un effet positif sur la réduction microbienne de  $N_2O$  en  $N_2$ <sup>87</sup>. Une amélioration de l'ef-

L'étude BILAN GAZ À EFFET DE SERRE DU PNR 68 a compilé les émissions de N<sub>2</sub>O de sols cultivés et de prairie provenant de 98 mesures annuelles effectuées en Suisse et dans le sud de l'Allemagne. Les résultats montrent que le facteur d'émission moyen pour les sols minéraux cultivés, 2,06%, est supérieur à la valeur de 1 des directives du GIEC<sup>79</sup>. Le nombre relativement faible de points de mesure, les variations dans la distribution annuelle des précipitations et l'hétérogénéité des sites génèrent toutefois de grandes incertitudes quant à la quantification des émissions de N<sub>2</sub>O. Pour les sols cultivés minéraux, les facteurs permettant d'expliquer au mieux les émissions de N<sub>2</sub>O étaient le pH variable du sol et la fertilisation azotée (tab. 4). Pour les sols organiques et les sols minéraux utilisés en pâturage, le nombre de mesures annuelles était trop faible pour pouvoir établir une relation avec les paramètres géochimiques du sol. En général, les mesures standardisées et la détermination en routine des paramètres déterminants du sol manquent pour pouvoir améliorer la base des données des émissions de N<sub>2</sub>O provenant des sols agricoles. Malgré tout, sur la base des données actuelles, on peut formuler des assertions générales sur les stratégies d'exploitation du sol pour diminuer les émissions de N<sub>2</sub>O.

ficacité de N doit aussi tenir compte de la santé des plantes. Un manque de phosphore disponible, de soufre ou autre micronutriment peut entraver la croissance végétale et donc l'efficacité de l'absorption de N. Il en va de même pour la limitation de la formation du système racinaire due au tassement du sol (projet TASSEMENT DES SOLS du PNR 68). La stagnation de l'eau due au compactage du sol peut aussi favoriser la propagation de maladies raci-

naires. En outre, la fertilisation ciblée sur des surfaces partielles dans l'agriculture de précision permet de compenser l'hétérogénéité des terres arables et d'optimiser ainsi la fertilisation azotée en fonction des besoins<sup>88</sup>.

### 3.3.2 Rotation des cultures

Les besoins en N des grandes cultures peuvent être en partie couverts, outre l'apport d'engrais, par l'introduction de légumineuses et de cultures dérobées dans l'assolement. Une méta-analyse globale a montré que les émissions de N<sub>2</sub>O par unité de surface peuvent être réduites de 15% grâce à un assolement diversifié combiné à une fertilisation azotée organique<sup>78</sup>. Ces deux facteurs sont des caractéristiques essentielles de l'agriculture biologique. Une autre méta-analyse globale a établi un lien entre la prise en compte de ces principes et une augmentation de 3,5 tonnes C/ha de la teneur en mos<sup>34</sup>. Le recours à un mélange trèfle-graminées pluriannuel joue ici un rôle déterminant. La culture d'engrais verts et une couverture du sol aussi permanente que possible contribuent à compenser les pertes de N et à réduire indirectement les émissions de N<sub>2</sub>O. Il est toutefois possible que la décomposition aérienne des engrais verts sans contact suffisant avec le sol crée au printemps un milieu anaérobie et riche en N, ce qui peut augmenter nettement

**Tableau 4**  
Émissions annuelles moyennes de CH<sub>4</sub> et de N<sub>2</sub>O sur la base d'études effectuées en Suisse et en Allemagne du Sud.

Étude BILAN GAZ À EFFET DE SERRE du PNR 68.

Sol	Utilisation des terres	kg N <sub>2</sub> O-N ha <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup>	Nombre de sites	Paramètres corrélés	Facteur d'émission (%)	Mesures
Minéral	Terres ouvertes	3,88 ± 3,15	66	pH du sol Fertilisation N	2,06 ± 2,66	54
	Prairies	4,40 ± 7,95	10	Nombre de points de mesure trop faible	1,45 ± 1,07	8
Organique	Terres ouvertes	14,92 ± 20,93	6		4,37 ± 3,00	5
	Prairies	3,51 ± 5,22	12	6,51 ± 9,37	9	

## Projet GAZ HILARANT du PNR 68

### Comment diminuer les émissions de N<sub>2</sub>O par le biais de l'exploit- ation du sol ?

L'équipe du projet a étudié comment la réduction du travail du sol, l'agriculture biologique et l'apport de biochar modifient les flux de N<sub>2</sub>O et les communautés microbiennes impliquées dans les émissions de N<sub>2</sub>O. Pour ce faire, l'équipe a utilisé des méthodes de biologie moléculaire et un isotope stable (<sup>15</sup>N) dans des essais au champ et en laboratoire.

La réduction du travail du sol n'a pas eu d'impact sur les émissions globales de N<sub>2</sub>O du sol. Toutefois un essai d'incubation a montré une hausse du potentiel de formation de N<sub>2</sub>O par nitrification dans le sous-sol quand le travail du sol est réduit<sup>80</sup>. Mais cette augmentation était contrebalancée par une consommation accrue de N<sub>2</sub>O dans l'horizon superficiel riche en C. Sur le terrain globalement, la réduction du travail n'a pas eu d'impact en ce qui concerne les émissions de N<sub>2</sub>O<sup>85</sup>.

La comparaison en laboratoire entre agriculture conventionnelle et biologique a montré un potentiel accru de formation de N<sub>2</sub>O par dénitrification dans les systèmes biologiques<sup>86</sup>. Il est toutefois compensé par des apports de N plus faibles et une efficacité accrue de N dans l'agriculture biologique<sup>78</sup>. La gestion de l'azote joue donc un rôle particulier dans la réduction des émissions de N<sub>2</sub>O dans les sols contenant beaucoup de matière organique.

En utilisant des méthodes de biologie moléculaire, l'équipe de projet a pu prouver dans des essais au champ que le biochar favorise les microorganismes réducteurs de N<sub>2</sub>O hautement spécialisés. Mais on ne connaît pas encore le mécanisme exact. Le biochar augmente probablement la durée de séjour, et ainsi la disponibilité, du N<sub>2</sub>O dans le sol<sup>81</sup>.

De toutes les stratégies d'exploitation du sol étudiées, l'apport de biochar présentait le plus fort potentiel de réduction des émissions de N<sub>2</sub>O. L'activité, l'abondance ou la structure de la communauté des bactéries réductrices de N<sub>2</sub>O ont pu être reliées aux émissions de N<sub>2</sub>O dans toutes les expériences. La stimulation des microorganismes réducteurs de N<sub>2</sub>O paraît donc être une approche prometteuse pour minimiser les émissions de N<sub>2</sub>O provenant des terres agricoles.

les émissions de N<sub>2</sub>O. L'importance quantitative de ce processus n'est pas encore connue à l'heure actuelle.

#### 3.3.3 Inhibiteurs de nitrification

L'utilisation d'inhibiteurs de nitrification chimiques a pour but de diminuer les teneurs en NO<sub>3</sub><sup>-</sup> dans le sol, ce qui réduit le lessivage de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et inhibe la formation de N<sub>2</sub>O suite à la dénitrification<sup>89</sup>. Depuis 2017, le produit ENTEC26, contenant l'inhibiteur de nitrification diméthylpyrazole phosphate (DMPP), est autorisé comme produit de compensation en Suisse. Il n'existe toutefois pas encore d'étude détaillée sur ses effets sur la microbiologie du sol.

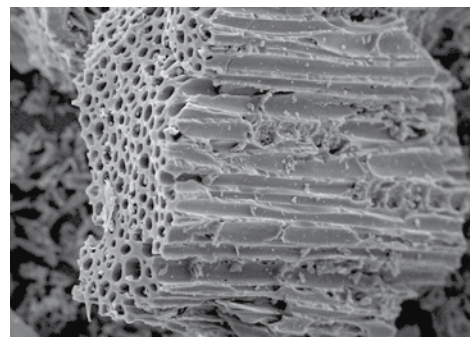
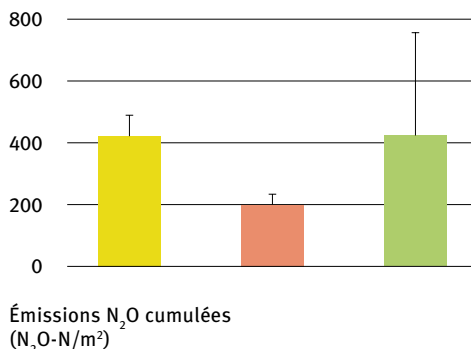
À Hohenheim en Souabe (DE), une mesure sur le terrain pendant deux ans a révélé une réduction des émissions de N<sub>2</sub>O de 40 à 45% avec une diminution simultanée de l'activité microbienne<sup>90</sup>. Un essai au champ de trois ans à Giessen (DE) a montré une réduction annuelle moyenne des émissions de N<sub>2</sub>O de 49 respectivement 26% après application d'inhibiteurs de nitrification contenant du DMPP et du DCD (dicyandiamide). Parallèlement, la respiration annuelle moyenne du sol a été réduite respectivement de 26% et de 7%. Le même essai a présenté une augmentation de 28% de l'absorption de CH<sub>4</sub> après apport de DMPP<sup>91</sup>. Une autre étude de terrain a montré que l'utilisation d'inhibiteurs de

### Illustration 26

Émissions de  $N_2O$  après apport de biochar et de chaux. Alors que le biochar a pu baisser les émissions de  $N_2O$  de 52%, on ne constate pas de tendance nette pour le chaulage en raison d'une grande variabilité spatiale (à gauche)<sup>96</sup>. Photo d'une particule de biochar prise au microscope électronique. Elle montre la structure poreuse du biochar, avec une grande surface interne (à droite).

Photo : N. Hagemann

- Contrôle
- Biochar
- Chaux



nitrification sans modification des apports d'engrais entraîne une accumulation d'azote minéral. Après la minéralisation des inhibiteurs de nitrification, des émissions de  $N_2O$  accrues ont été mesurées, qui ont compensé l'impact climatique de cette utilisation pendant la période de végétation<sup>92</sup>. L'utilisation répétée de la même substance chimique peut en outre favoriser le développement de résistances. De plus, avec l'augmentation de la teneur en argile, la sorption peut limiter l'efficacité des inhibiteurs de nitrification. Jusqu'ici il n'existe pas d'étude systématique prenant ces facteurs en compte.

#### 3.3.4 Biochar

Le biochar est un produit riche en C issu de la pyrolyse de la biomasse, destiné à l'amendement du sol. Ses caractéristiques peuvent varier fortement, la plupart des biochars présentent cependant une surface étendue, une structure carbonée aromatique stable et un pH alcalin<sup>93</sup>. Grâce à la structure stable de ses composés carbonés, le biochar dispose d'un potentiel élevé de stockage du C à long terme dans le sol<sup>94,95</sup>. La stabilité du biochar n'a jusqu'ici été testée en Suisse que dans une station forestière. En l'espace de dix mois seule une quantité négligeable a été décomposée<sup>95</sup>.

Toutefois l'apport de C sous forme de biochar pourrait faciliter la décomposition du C labile, ce qui réduirait l'effet global.

L'apport de biochar peut réduire les émissions de  $N_2O$ . Un essai au champ à Reckenholz ZH a montré une réduction des émissions de  $N_2O$  de 52% (ill. 26, p. 43)<sup>96</sup>. Une métaanalyse globale a estimé la réduction des émissions de  $N_2O$  due à l'utilisation de biochar à 50%<sup>97</sup>. On ne sait toutefois pas quelle est la durabilité de cet impact et quelles propriétés du biochar produisent cet effet. En ce qui concerne le mode d'action, les indices d'une activation de la réduction de  $N_2O$  biologique suite à l'apport de biochar sont de plus en plus nombreux<sup>81,98</sup>. Des recherches sont toutefois nécessaires pour pouvoir exploiter le potentiel du biochar pour la pratique agricole et minimiser les risques liés aux entrées de substances étrangères. Cela concerne surtout l'utilisation en cascade, dans laquelle le biochar est utilisé comme additif alimentaire pour le bétail et parvient au sol par épandage de fumier de ferme. Ce n'est qu'avec une utilisation synergétique du biochar permettant de stocker du C, de réduire les émissions de  $N_2O$  et d'améliorer le sol (par ex. hausse de la capacité de rétention en eau et en éléments nutritifs), dans laquelle le substrat de base (bois par

ex.) n'est pas en concurrence avec d'autres utilisations, que son emploi peut représenter une mesure potentielle de protection du climat. Depuis juin 2016 les biochars certifiés selon les directives du «European Biochar Certificate» sont autorisés comme agent d'amélioration du sol par l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG). Pour l'apport de biochar, les seuils de métaux lourds sont les mêmes que pour les engrais de recyclage. Pour les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP; > 4 g/t), dioxines et furanes (< 20 ng/kg) d'autres seuils ont été fixés. Cependant de grandes incertitudes existent quant à l'effet à long terme des entrées de substances étrangères suite à l'apport de biochar. Comme l'effet du biochar dépend essentiellement du processus de fabrication, du substrat de base et du lieu de l'apport, une évaluation de son utilisation ne peut être effectuée que de manière différenciée.

### 3.3.5 Travail du sol

La réduction du travail du sol en tant qu'autre mesure respectueuse du climat dans l'agriculture est discutée<sup>82</sup>. Un travail du sol réduit a généralement pour conséquence un enrichissement en MOS de l'horizon superficiel et un appauvrissement en MOS du sous-sol. Ces deux processus s'équilibrent, ce qui fait que dans la plupart des sites on ne peut prévoir aucun stockage de C<sup>99</sup>. Il peut toutefois en être autrement ailleurs. En effet un essai au champ sur la réduction du travail du sol à Frick AG a montré un enrichissement de 8,1 tonnes de C/ha par rapport au travail du sol conventionnel pour une teneur en argile de 45% après 13 ans d'exploitation et une profondeur d'échantillonnage d'un demi-mètre<sup>85</sup>. Un essai d'incubation du projet GAZ HILARANT du PNR 68 a montré que le potentiel de production de N<sub>2</sub>O par nitrification augmente dans les

couches profondes du sol suite à la réduction du travail du sol<sup>80</sup>. Pendant une campagne de mesure au champ de deux ans (prairie artificielle et blé d'hiver), la réduction du travail du sol n'a eu aucun effet sur les émissions de N<sub>2</sub>O et l'absorption de CH<sub>4</sub><sup>85</sup>. Cela concorde avec une autre méta-analyse dont la conclusion est que le travail réduit du sol doit être pratiqué sur une plus longue période pour pouvoir espérer un léger recul des émissions de N<sub>2</sub>O<sup>100</sup>. L'impact climatique de la réduction du travail du sol est imputable avant tout à la baisse de la consommation de carburant<sup>101</sup>. Pour le sol, les principaux avantages de la réduction du travail du sol sont une stabilisation de la structure du sol et la protection contre l'érosion qui en résulte.

### 3.3.6 Chaulage

Du fait que la réduction du N<sub>2</sub>O en N<sub>2</sub> moléculaire non préjudiciable pour le climat est inhibée aux valeurs de pH inférieures à 6, il faudrait viser un pH du sol supérieur à 6 du point de vue de la protection du climat<sup>102</sup>. Ce domaine d'acidité est recommandé aussi du point de vue de la production végétale. Le projet du PNR 68 GAZ HILARANT a montré qu'une acidification du sol due à l'exploitation inhibe la réduction biologique de N<sub>2</sub>O. Le chaulage des sols agricoles représente donc une possibilité de favoriser la réduction biologique de N<sub>2</sub>O. Il entraîne de plus dans la plupart des cas une augmentation de la MOS<sup>103</sup>. Cet effet positif du chaulage est imputable à une amélioration de la structure du sol et à une augmentation de la croissance végétale, dont l'impact dépasse celui de la minéralisation de MOS accentuée au départ.

La protection physique du sol concerne la protection contre les agents physiques tels que le tassement, l'érosion, les déplacements et les atteintes au régime hydrique du sol. Il s'agit de garantir la fonctionnalité du sol et de ne pas la perturber à long terme. Selon la législation, les fonctions d'habitat, de régulation et de production du sol sont, avec le maintien à long terme de la fertilité du sol, au cœur de la protection des sols (art. 1 Loi sur la protection de l'environnement, LPE; art. 1 Ordonnance sur les atteintes portées au sol, OSol). L'élément de durabilité comprend la garantie de la fertilité du sol à long terme, c'est-à-dire pour les générations à venir. Le développement de mesures visant à éviter, diminuer ou compenser les atteintes portées au sol est au cœur de la protection du sol. Du fait que les possibilités de réparer les dommages causés au sol sont limitées, l'application du principe de précaution est essentielle pour la protection du sol.

#### 4.1 Les atteintes physiques au sol

Les modifications de l'état naturel du sol dues aux impacts physiques évoqués, qui induisent une baisse de qualité du sol, sont désignées comme atteintes physiques au sol. Le site et l'état du sol déterminent la sensibilité du sol. Le PNR 22 avait pour thème la protection du sol essentiellement dans le cadre de la contamination par les polluants. Cependant les atteintes physiques au sol ont aussi été reconnues comme problème fondamental de l'utilisation agricole intensive<sup>1</sup>. Le « Guide pour la conservation des sols » élaboré dans le cadre du PNR 22 a défini des stratégies préventives pour la diminution du tassement et de l'érosion des sols sur les surfaces utilisées pour les cultures<sup>104</sup>. Elles ont été intégrées aux prestations écologiques requises (PER). Depuis, l'octroi de paiements

directs est lié au respect des mesures adéquates de protection des sols. Le PNR 68 a élaboré d'autres bases dans le domaine de la stabilité du sol dans les pentes (projet STABILITÉ DES SOLS du PNR 68) et a étudié la capacité de régénération des sols compactés (projet TASSEMENT DES SOLS du PNR 68).

##### 4.1.1 Tassement des sols

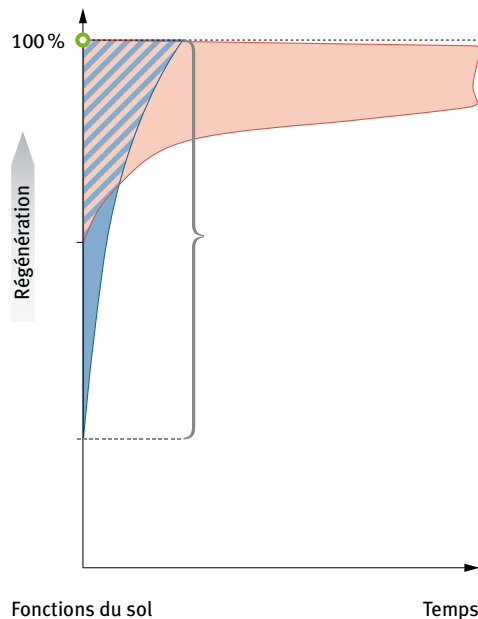
Une des atteintes au sol typiques est la modification de sa structure due à des contraintes de compression et de cisaillement élevées. La distorsion de la structure qui en résulte entraîne une diminution de la perméabilité à l'eau et à l'air du sol et ainsi un tassement du sol. Puisque les sols ont une tendance naturelle au compactage sous l'effet de leur propre poids et qu'un raffermissment, par exemple pour la préparation d'un lit de semences, peut même parfois être souhaité, toute baisse du volume des pores n'est pas à considérer comme un tassement nuisible. Les sols sont considérés comme détériorés par le tassement quand le système des pores du sol est tellement réduit suite aux atteintes physiques que les fonctions d'habitat, de production et de régulation sont affectées de manière temporaire ou permanente. Il faut faire la distinction entre tassement du sol superficiel et tassement du sous-sol. Un compactage du sol superficiel réduit surtout les taux d'infiltration et augmente les risques d'inondation et d'érosion. Un tassement du sous-sol peut causer la stagnation de l'eau (projet TASSEMENT DES SOLS du PNR 68)<sup>105</sup>. Cela favorise des conditions anoxiques dans le sol, qui à leur tour favorisent la production de gaz à effet de serre tels que CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O (point 3.1.1, p. 35)<sup>106</sup>. L'enracinement et d'autres fonctions du sol telles que le stockage d'eau et d'éléments nutritifs sont aussi perturbés à long terme par le tassement du sol superficiel et du sous-sol. Un compactage du sol superficiel peut entraîner

### Illustration 27

Représentation schématique du temps de régénération de sols fortement (par ex. tassement du sous-sol) et modérément compactés (par ex. tassement du sol superficiel). Alors que la forte perte fonctionnelle due à un tassement du sol superficiel peut être corrigée relativement rapidement, le tassement du sous-sol n'entraîne qu'une faible perte fonctionnelle, mais qui demeure pendant une longue période. La photo montre l'essai de tassement du sol à l'Agroscope, dans lequel les possibilités de régénération du sol sont étudiées.

Photo: T. Keller, Agroscope  
Projet TASSEMENT DES SOLS  
du PNR 68<sup>105</sup>.

- État initial avant tassement
- Dommages dus au tassement/coûts
- Tassement du sol superficiel
- Tassement du sous-sol
- } Impact fonctionnel immédiat du tassement



une forte perte fonctionnelle à court terme pendant les premières années suivant le tassement<sup>105</sup>. Un sous-sol compacté en revanche ne diminue que légèrement le fonctionnement du sol, mais de façon beaucoup plus durable (ill. 27). Alors qu'un tassement du sous-sol est difficilement réversible et devrait être avant tout évité par des mesures de prévention, les dommages de tassement du sol superficiel peuvent être réparés en quelques années en raison de l'activité biologique plus élevée<sup>105,107</sup>.

#### 4.1.2 Érosion du sol

On désigne par érosion du sol la perte de sol superficiel, qui provoque une détérioration durable de la qualité du sol. L'eau et le vent emportent des particules de sol et les redéposent à de courtes ou de longues distances selon leur intensité. Lors de ce processus, c'est la plupart du temps le sol superficiel fertile, riche en humus, qui est perdu. Des éléments nu-

tritifs et des polluants, liés aux particules de sol, se retrouvent alors dans les eaux ou les écosystèmes avoisinants, ce qui favorise la surfertilisation (eutrophisation) et l'émission de gaz à effet de serre<sup>108</sup>. L'érosion du sol est le plus souvent un phénomène lent, qui ne se remarque qu'après de nombreuses années par une diminution des services écosystémiques (SE)<sup>109</sup>. Dans les cas extrêmes, des glissements, notamment dans les pentes, peuvent entraîner des pertes de sol rapides et importantes<sup>110,111</sup>. De nombreux facteurs contribuent à l'érosion du sol. Dans une certaine mesure l'érosion du sol est un phénomène naturel (tab. 5, p. 47), mais l'influence humaine accélère ce processus, qui compte aujourd'hui dans le monde parmi les problèmes écologiques les plus aigus<sup>112</sup>. En Suisse, la forme d'érosion la plus fréquente est l'érosion hydrique. Elle est favorisée par le travail intensif des sols cultivés. La perte de sol moyenne actuelle sur l'ensemble des terres ouvertes suisses s'élève à 840 000 tonnes par an,



**Tableau 5**  
Facteurs naturels et dus  
à l'exploitation qui favo-  
risent l'érosion.

Facteurs d'influence	Description
Absence de végétation	Sol nu (par ex. après travail du sol) Cultures tardives (p. ex. maïs) Cultures spécialisées (p. ex. vigne)
Pentes	Érosion hydrique dans les creux et les rigoles Érosion éolienne dans les pentes exposées à l'ouest et les sommets
Propriétés du sol	Teneur en MOS faible Teneur en argile faible Sols très ameublés, secs Sols tassés
Conditions météorologiques	Fortes pluies, fonte des neiges Vents forts après longue sécheresse
Exploitation	Sols tassés Abattages importants

soit 2,1 t/ha/a<sup>112</sup>. Une perte de sol de 10 tonnes par hectare correspond à l'élimination d'un bon millimètre sur toute la surface. Compte tenu du temps de développement très long de 1 centimètre de sol en cent ans, cela représente une grande quantité. Les mesures de réduction de l'érosion sont donc importantes pour une exploitation préservant le sol, en particulier pour les sols peu profonds.

## 4.2 Facteurs d'atteinte physique au sol

### 4.2.1 Facteurs liés au site

Le risque de compactage d'un sol résulte de la portance du sol et de la pression au sol – la charge physique qui agit sur le sol. Si la pression au sol, exercée suite à une mesure d'exploitation, dépasse la portance du sol, on considère que le risque de compactage est sévère. La portance d'un sol dépend essentiellement du type, de la densité apparente, de la structure et de

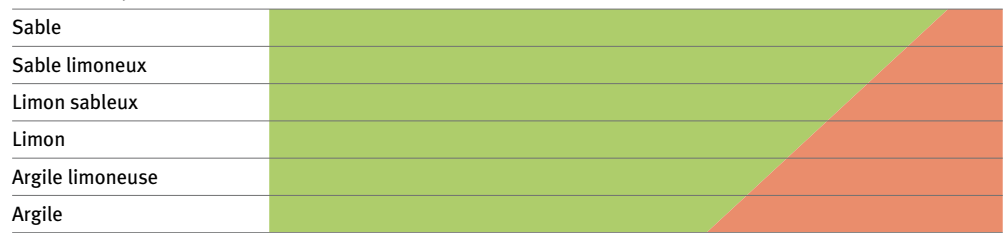
l'humidité du sol. L'humidité du sol joue un rôle central: l'eau qui se trouve dans les pores du sol agit comme un film lubrifiant qui favorise le processus de tassement (ill. 28, p. 48). Alors que les sols argileux présentent une portance élevée à l'état sec, ils peuvent être irrémédiablement compactés à l'état humide. C'est pourquoi il faut être particulièrement attentif à l'humidité du sol et à la force de succion pour le passage sur les sols argileux. L'humidité et la nature du sol déterminent, outre la praticabilité du sol, si le travail du sol a un effet néfaste sur la structure du sol. Le travail d'un sol trop sec provoque un fractionnement mécanique des agrégats du sol, alors que travail dans un état trop humide peut fermer durablement les pores. La portance du sol est déterminée aussi par d'autres facteurs tels que la pierrosité, la teneur en humus, la densité apparente, l'état d'agrégation et la structure du sol. Ces facteurs confèrent à chaque sol un certain risque potentiel de compactage.

### Illustration 28

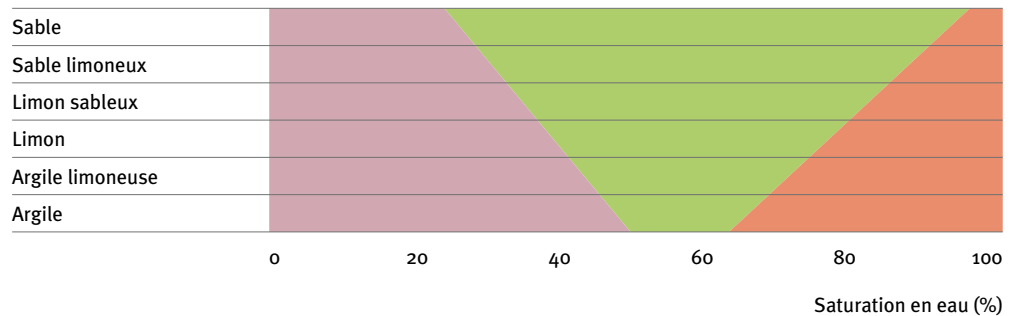
Praticabilité et domaine de travail de différents types de sol en fonction de l'humidité du sol. Avec l'augmentation de la teneur en argile, un travail préservant le sol devient plus difficile<sup>113</sup>.

- trop sec
- praticable/facile à travailler
- trop humide

#### Domaine de praticabilité



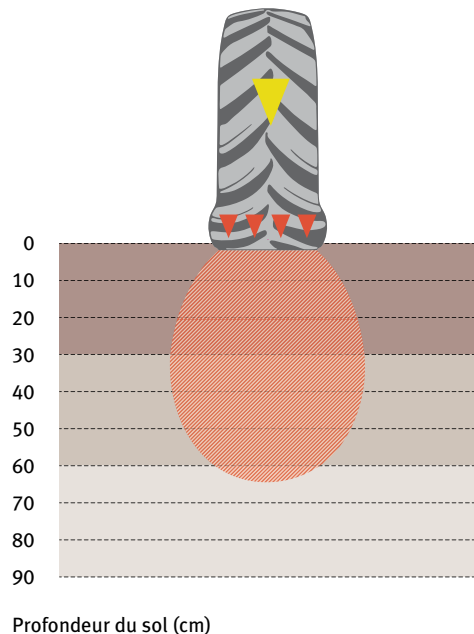
#### Domaine de travail



### Illustration 29

Pression exercée sur le sol par le passage de machines. La pression au sol résulte de la charge à la roue et de la pression de contact. Une augmentation de la surface de contact permet donc de diminuer la pression au sol<sup>119</sup>.

- Charge à la roue (t)
- Pression de contact (kPa)
- Pression sur le sol (kPa)



Le risque naturel d'érosion d'un site dépend aussi des conditions pédoclimatiques telles que l'intensité et la répartition annuelle des précipitations, le type de sol, la structure du sol et la topographie. À l'aide de l'«Équation générale de perte de sol», on peut mesurer l'érosion potentielle du sol d'un site donné<sup>114</sup>. Identifier le risque naturel de compactage et d'érosion d'un sol et appliquer les mesures d'exploitation adaptées est un premier pas essentiel pour la protection physique du sol.

#### 4.2.2 Atteinte au sol par une exploitation non adaptée au site

Bien que de nombreuses causes de tassement et d'érosion du sol soient d'origine naturelle, la majeure partie des atteintes physiques au sol sont dues à une utilisation des sols non adaptée au site. L'exploitation à un moment défavorable fait aussi partie des principales causes de tassement et d'érosion du sol dans l'agriculture, la sylviculture et la construction. Les cantons en

**Tableau 6**

Risque d'érosion de différentes cultures. Alors que la prairie artificielle réduit le potentiel d'érosion, les cultures sarclées notamment ont un potentiel d'érosion élevé<sup>104</sup>.

Risque	Culture
Risque très faible	Prairie artificielle
Risque faible	Orge d'hiver, seigle d'hiver, avoine, céréales d'hiver, colza
Risque moyen	Blé d'hiver, pois
Risque élevé	Maïs, betteraves, pommes de terre, soja, tabac, tournesol

particulier doivent s'assurer du traitement correct des sols dans les projets de construction (art. 6, 7 et 13 OSol). Dans l'exploitation forestière cela concerne surtout la récolte de bois avec des machines lourdes<sup>115,116</sup>. Une récolte de bois excessive peut aussi induire un affaiblissement de la couverture végétale, ce qui augmente le risque d'érosion, notamment dans les pentes (projet STABILITÉ DES SOLS du PNR 68). Dans l'agriculture, c'est surtout l'utilisation de machines lourdes avec une pression de contact élevée sur des sols humides qui provoque le tassement du sol superficiel et du sous-sol<sup>105</sup>. La pression de contact (ill. 29, p. 48) résulte du poids par surface de contact et est déterminée à partir de la charge à la roue, la dimension et la pression de gonflage des pneumatiques. On peut éviter les dommages de tassement dans le sous-sol en utilisant des pneus plus larges, à condition que la charge à la roue n'augmente pas. Des analyses du projet TASSEMENT DES SOLS du PNR 68 ont montré qu'à partir d'une charge à la roue supérieure à 5 tonnes, la baisse de pression des pneus crée aussi un risque de tassement du sol<sup>117</sup>. La force de cisaillement induite dans le sol par les pneus lors du passage rompt la continuité entre les pores. Le patinage des roues motrices a des conséquences particulièrement négatives. En cas de labour répété à la même profondeur, des compac-

tages apparaissent très souvent à la limite inférieure de la profondeur de labour. Les plantes ont alors plus de difficulté à former des racines profondes. Par conséquent la stagnation de l'eau les années humides et le manque d'eau les années sèches peuvent limiter la croissance des plantes. Sur les pâturages, une utilisation intensive peut provoquer un tassement du sol superficiel dû au piétinement du bétail<sup>118</sup>. Le passage fréquent pour le fauchage ou l'apport de purin sur les pâturages humides peut aussi induire un compactage en surface. Une diminution de l'infiltration et de la capacité de stockage d'eau des sols compactés en surface entraîne une augmentation du ruissèlement de surface et ainsi un renforcement de l'érosion du sol et des crues locales quand les conditions météorologiques sont défavorables<sup>110</sup>.

Le risque d'érosion lié à l'exploitation des sols cultivés dépend essentiellement du taux de couverture. La planification à long terme de l'assolement et de ses effets sur la stabilité des agrégats et la mos joue ici un rôle déterminant<sup>120</sup>. Certaines cultures agricoles, notamment de plantes sarclées, présentent un risque accru d'érosion dû à l'exploitation (tab. 6). Un travail du sol intensif augmente aussi le risque d'érosion par fractionnement mécanique des agrégats. Avec la diminution de l'intensité de travail du sol (glossaire) le risque d'érosion diminue dans l'ordre suivant: travail du sol conventionnel → travail du sol stratégique → travail du sol réduit → semis sous litière<sup>121</sup>. Le travail du sol peut être dicté par les autres mesures d'exploitation. Si l'on renonce aux produits phytosanitaires, une intensité de travail du sol plus élevée est en général nécessaire pour maîtriser des adventices.

Les changements d'affectation des pâturages alpins des dernières décennies ont

également un impact sur le risque d'érosion. Les surfaces utilisées en pâturage d'été ont augmenté d'environ un quart entre 1954 et 2005, alors que le cheptel a doublé<sup>122</sup>. Dans les régions modèles d'Urseren (UR), Obergoms (V) et Bedretto (TI), l'augmentation de 42 à 92% des glissements de terrain superficiels a été attribuée à l'intensification de l'exploitation des pâturages<sup>110</sup>. L'encouragement à un pâturage réduit sur les surfaces particulièrement sensibles pourrait permettre de diminuer nettement le risque d'érosion dans les sites alpins. C'est particulièrement important, car la modification de la dynamique de fonte des neiges suite au changement climatique accroît encore le risque d'érosion sur les sites alpins<sup>110</sup>.

### 4.3 Risque d'érosion des sols et de tassement

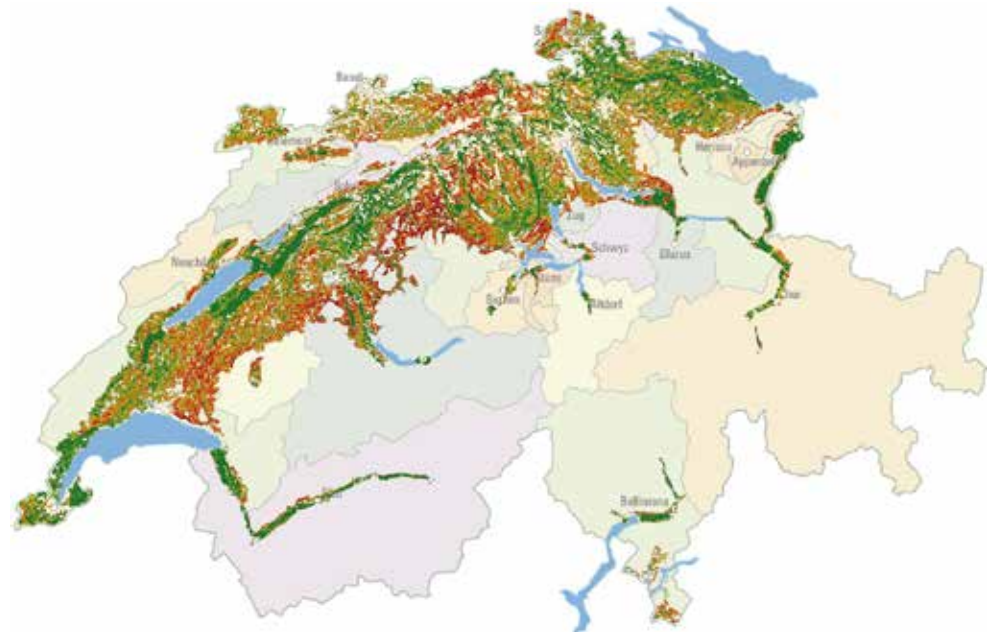
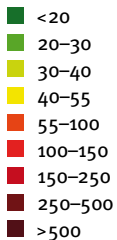
#### 4.3.1 Sensibilité à l'érosion des sols suisses

Une carte du risque d'érosion a été dressée pour l'évaluation du risque d'érosion à l'échelle de la Suisse (ill. 30). L'érosion potentielle a été déterminée à l'aide d'une forme de l'équation universelle des pertes de sol adaptée à la Suisse (point 4.2.1, p. 47) et fondée sur l'hypothèse d'un sol nu en permanence<sup>123</sup>. La répartition spatiale des sites agricoles menacés par l'érosion en Suisse donne une image très hétérogène, sans concentration sur une région particulière<sup>112</sup>. Pour le labour conventionnel et l'assolement sans cultures dérobées, une forte érosion supérieure à 4 t/ha/a est prévisible sur 17% des terres assolées. Pour 22% des surfaces, le risque d'érosion se situe dans la fourchette critique de 2 à 4 t/ha/a,

#### Illustration 30

La carte du risque d'érosion des surfaces agricoles en Suisse montre une grande influence de la topographie sur la menace d'érosion<sup>112,123</sup>.

Risque d'érosion en t/(ha×a)



et 61% de toutes les terres arables sont peu menacées par l'érosion (moins de 2 t/ha/a). Les facteurs liés à la végétation, qui influent sur la portance du sol, ne sont pas pris en compte dans l'estimation du risque potentiel d'érosion, ce qui fait que l'érosion réelle sur le site ne concorde pas forcément. L'influence de la texture du sol n'est pas non plus prise en compte en raison du manque de cartes pédologiques. La prise en considération de la teneur en argile permettrait de faire des hypothèses beaucoup plus fiables quant au risque d'érosion.

Dans le projet STABILITÉ DES SOLS du PNR 68, les facteurs à l'origine de 218 glissements de terrain superficiels en Suisse ont été étudiés. Un filtre tripartite prenant en compte des aspects de mécanique des sols (paramètres de cisaillement, inclinaison de la pente), de végétation (critères de protection optimale contre les glissements

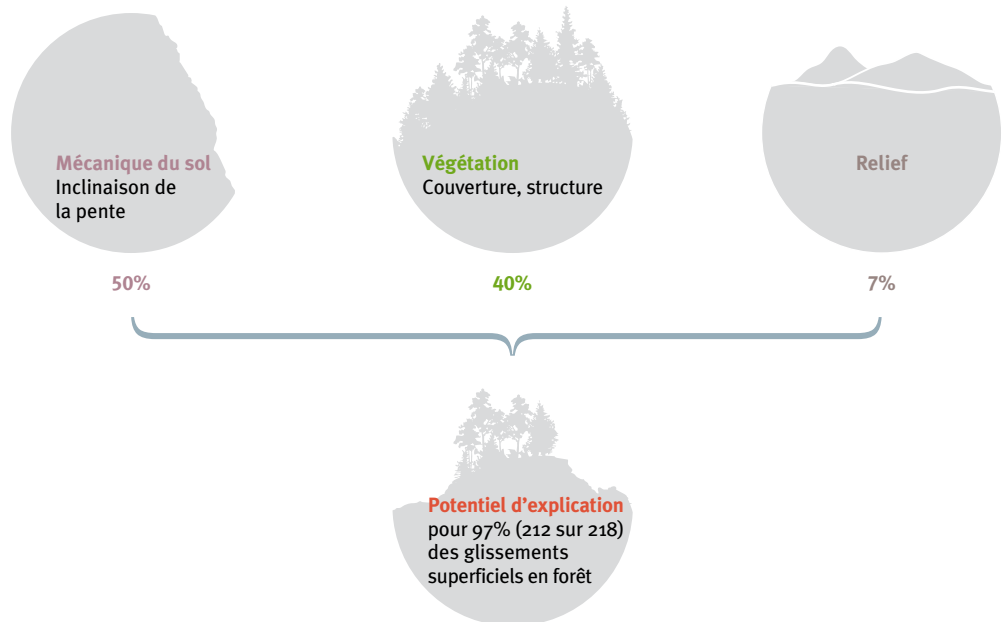
de terrain superficiels d'après les instructions pratiques «Gestion durable des forêts de protection» [NaiS]<sup>124</sup> et les résultats du projet STABILITÉ DES SOLS du PNR 68)<sup>125</sup> et de topographie (relief)<sup>126</sup>. Les critères de mécanique des sols ont permis d'expliquer presque 50% des événements, ceux de végétation 40% et la topographie 7% – au total 212 des 218 événements. Les forêts bien structurées stabilisent des pentes à déclivité jusqu'à 5° supérieure, à ce que l'on peut attendre du point de vue de la mécanique du sol pour les sols nus<sup>127,128</sup>. De telles forêts sont riches en espèces et en racines, avec un couvert supérieur à 60% (strate arborescente ≥ 40%), un bon étagement des arbres et une bonne structure des âges. En outre, la règle empirique courante dans la pratique d'une couverture végétale de deux tiers comme protection contre les glissements de terrain superficiels est confirmée (ill. 32, p. 52).

### Illustration 31

Filtre tripartite pour l'analyse des glissements de terrains superficiels.

L'utilisation du filtre tripartite pour l'analyse des glissements de terrain superficiels montre que 50% des glissements peuvent être expliqués par la mécanique du sol. La végétation a exercé une influence déterminante pour 40% des glissements, alors que le relief n'expliquait que 7% des cas.

Projet STABILITÉ DES SOLS du PNR 68<sup>125</sup>.

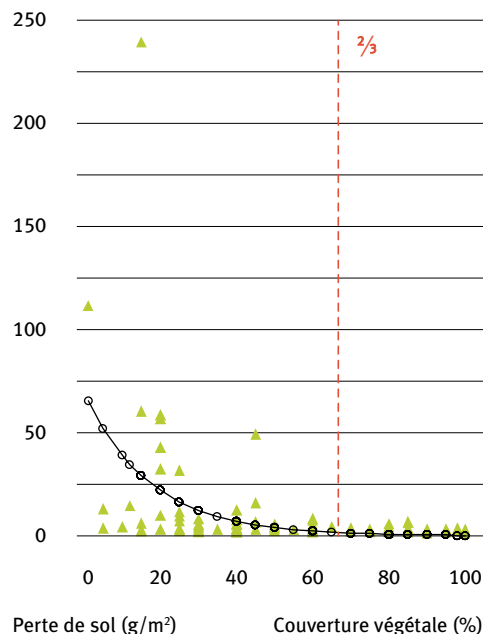


### Illustration 32

Relation entre couverture végétale et perte de sol mesurée. Il existe une relation exponentielle entre la couverture végétale et la perte de sol mesurée dans les terrains inclinés à 20°. Cela confirme la règle empirique selon laquelle une couverture végétale de deux tiers est nécessaire pour stabiliser les fortes pentes.

Projet STABILITÉ DES SOLS DU PNR<sup>125,129</sup>.

-- 2/3 Couverture végétale



#### 4.3.2 Tassement des sols suisses

La pratique agricole et l'étude de parcelles expérimentales fournissent nombre d'indices sur les atteintes à la structure de nombreux sols<sup>130</sup>. Mais l'étendue du tassement des sols en Suisse n'est pas quantifiable avec précision parce qu'on ne dispose pas de résultats de mesures à grande échelle à ce sujet. À cela s'ajoute le fait que les méthodes de mesure et d'estimation disponibles donnent des résultats très dispersés<sup>131</sup>. Enfin il n'existe pas encore de valeurs de références fixées par la loi pour l'estimation du compactage du sol. Avec l'utilisation de machines toujours plus grosses et plus lourdes, notamment pour les grandes cultures, le problème du tassement du sol va s'accroître.






Le tassement des sols concerne surtout les sols utilisés pour l'agriculture en raison de l'étendue des surfaces praticables. Mais dans la construction aussi l'utilisa-

tion de machines lourdes et des déplacements de sols inappropriés peuvent entraîner un fort tassement du sous-sol. Du fait que le sol est soumis toute l'année aux atteintes et que la pression économique est forte dans le domaine de la construction, le respect des directives fédérales y revêt une importance particulière<sup>132,133</sup>. Dans l'exploitation forestière, l'utilisation croissante de lourdes machines de récolte entraîne une aggravation du tassement du sol dans les ornières<sup>116</sup>. Pour diminuer la pression, on peut utiliser des véhicules à chenille, qui ont une surface de contact nettement plus grande sur terrain plat. Le développement des « semi-chenilles Bogie », qui simulent une sorte de chenille sur des véhicules à roues, devrait permettre une répartition équilibrée de la charge à la roue aussi sur terrain accidenté. Les études scientifiques sur l'impact des semi-chenilles Bogie sur le tassement du sol ne sont toutefois pas encore terminées<sup>116</sup>.

### Illustration 33

Types d'ornières en tant qu'indicateurs de la détérioration du sol. Les types d'ornières sont utilisés comme indicateurs de la détérioration fonctionnelle du sol en sylviculture. Une valeur limite précise entre les types 2 et 3 n'a pas encore été définie<sup>116</sup>. Alors qu'un léger tassement dans le type d'ornières 1 (photo en bas à gauche) peut être inversé, le tassement du type d'ornières 3 (photo en bas à droite) entraîne une coloration grise du sol irréversible suite à la stagnation de l'eau.

Photos : P. Lüscher, M. Walsler, wsl.

	Type d'ornières 1	Type d'ornières 2	Type d'ornières 3
Dessin de l'ornière			
Structure du sol	intacte	altérée	détériorée
Processus microbiens	aérobie	aérobie et anaérobie	anaérobie
Principal gaz à effet de serre	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>
Possibilité d'enracinement	normale	diminuée	limitée
Fonctions du sol	non altérées	altérées	détériorées
			

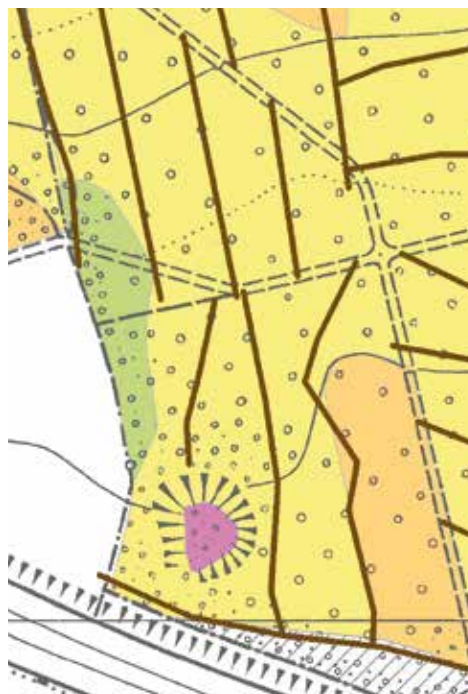
### Illustration 34

Détail de la carte du risque de tassement du canton d'Argovie. La carte peut être utilisée pour prévenir le tassement du sol en foresterie par des mesures d'exploitation adaptées<sup>116</sup>.

#### Risque de tassement

-  non classé
-  faible
-  moyen
-  élevé
-  très élevé
-  non praticable

— Desserte de détail



Pour une profondeur d'ornière de 10 centimètres, atteignant le sous-sol avec formation collatérale de renflements, on peut s'attendre à une détérioration fonctionnelle du sol. Cela signifie un enracinement limité et des émissions possibles des gaz à effet de serre CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O (ill. 33)<sup>60</sup>. Un seuil à partir duquel un compactage du sol n'est plus réparable par l'activité biologique fait cependant défaut jusqu'à présent. Selon l'inventaire forestier national suisse, la structure est détériorée sur 0,7% des surfaces forestières par le passage d'engins, principalement sur le Plateau suisse<sup>38</sup>. Trois quarts de ces surfaces concernent des layons de débardage planifiés qui servent au transport des arbres abattus vers une route forestière terrassée.

Bien qu'il n'existe pas encore de mesures uniformes à l'échelle nationale du risque de tassement du sol, le risque de compactage

a été défini au niveau régional à l'aide de cartes écologiques, géologiques et pédologiques<sup>131</sup>. Ainsi une carte du risque de tassement dans le canton d'Argovie (ill. 34, p. 53) montre où les sols peuvent être sensibles au passage de machines. Selon cette carte, un quart de la surface forestière présente un risque de tassement élevé<sup>134</sup>. En combinaison avec la force de succion actuelle, qui peut être déterminée pour certains sites à l'aide du Réseau de mesure de l'humidité des sols de Suisse du nord-ouest ([www.bodenmessnetz.ch](http://www.bodenmessnetz.ch)), et la machine utilisée, la carte permet de déterminer la praticabilité d'un sol.

#### 4.4 Bilan intermédiaire: mesures de lutte contre l'érosion et le tassement du sol

##### 4.4.1 Restauration des sols compactés

La récupération des sols compactés est un processus fastidieux qui peut durer

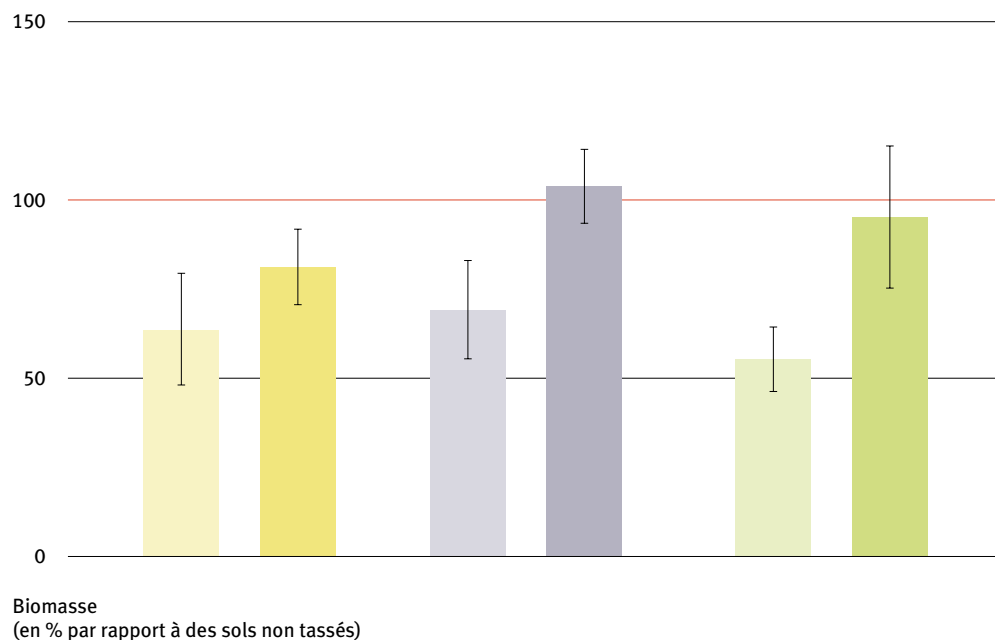
des décennies. Puisque les fonctions du sol sont réduites pendant ce temps, ce qui entraîne des pertes de rendement, il faut avant tout éviter le tassement du sol. Un des grands défis de la protection préventive du sol est d'identifier le risque de tassement en fonction du site et de la situation. On peut s'appuyer sur le modèle de simulation «Terranimo» qui permet d'évaluer le risque de tassement en indiquant la pression de gonflage, la charge à la roue, la texture du sol et la force de succion<sup>135</sup>. Une application cohérente de cet outil aide à identifier les risques de tassement et à en prévenir les dommages. De plus des mesures de construction des équipements concernant la transmission intégrale, la transmission hydraulique, une répartition du poids équilibrée et une faible pression de gonflage permettent de réduire encore le risque de tassement par le passage des machines<sup>136</sup>. Les résultats de l'essai «Soil Structure Observatory»

#### Illustration 35

La biomasse du soja, du blé et du maïs dans les sols tassés avec et sans macropores artificiels, en comparaison avec les sols non tassés, montre que la création de macropores artificiels permet de rétablir dans une large mesure la fonction de production du sol.

Projet TASSEMENT DES SOLS du PNR 68<sup>137</sup>.

- Maïs —  $p = 0,19$
- tassé
- tassé avec macropores artificiels
- Soja —  $p = 0,03$
- tassé
- tassé avec macropores artificiels
- Blé —  $p = 0,03$
- tassé
- tassé avec macropores artificiels



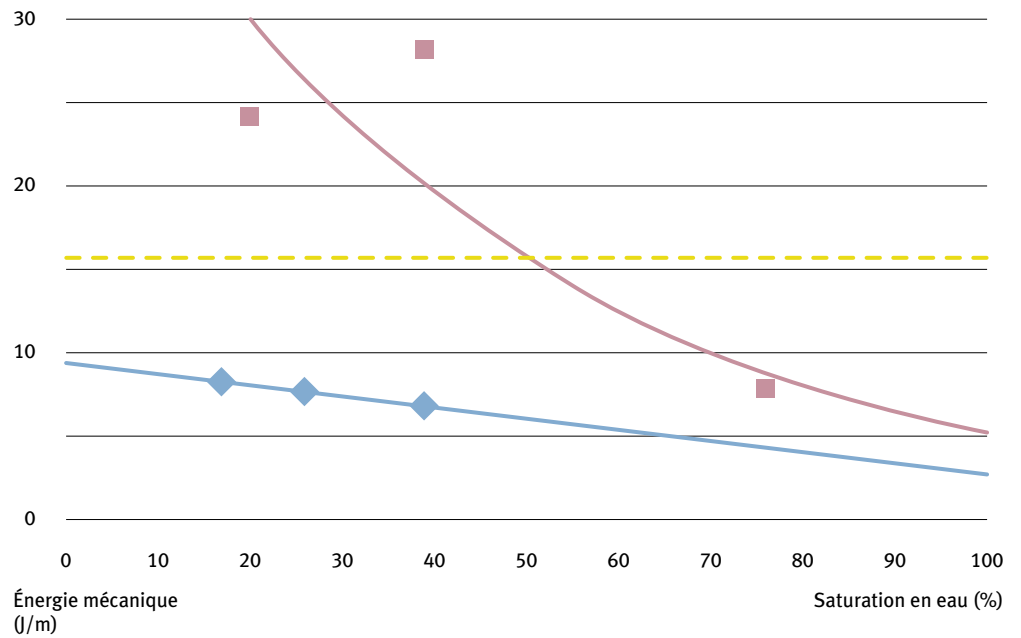


### Illustration 36

La consommation d'énergie d'un ver de terre pour l'ameublissement du sol dans un limon silteux et dans un sable limoneux dépend de l'humidité du sol.

Photo : S. Ruiz, ETH Zurich ;  
Projet TASSEMENT DES SOLS du PNR 68<sup>140</sup>.

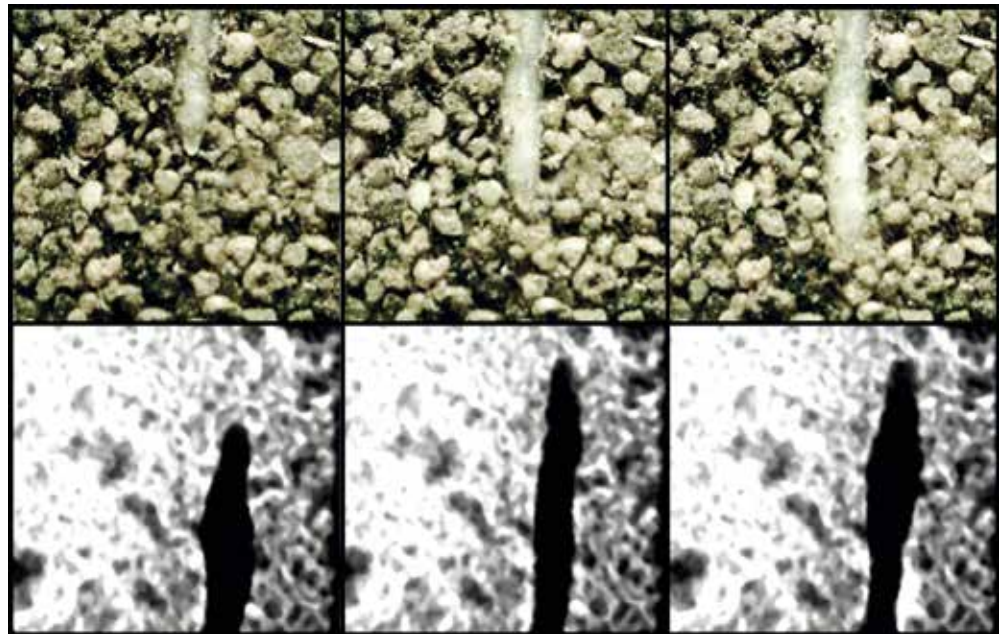
- Limite vers de terre
- Silt limoneux
- ◆ Sable limoneux



### Illustration 37

Photos en radiographie neutronique en accéléré de l'activité des racines (image du haut, après 2 heures) et des vers de terre (image du bas, après 40 secondes). La vitesse de croissance des racines des plantes est beaucoup plus faible que la vitesse de déplacement des vers de terre.

Projet TASSEMENT DES SOLS du PNR 68.



**Projet TASSEMENT DES  
SOLS du PNR 68**  
**Restauration des sols  
tassés**

L'équipe du projet a étudié la régénération de la structure du sol après un tassement et les principaux mécanismes biophysiques contribuant à la régénération de la structure des sols compactés<sup>9</sup>. À cet effet l'équipe a mis en place l'essai au champ de longue durée « Soil Structure Observatory » (SSO ; [www.sso.ethz.ch](http://www.sso.ethz.ch)) à l'Agroscope Reckenholz, qui permet d'étudier la restauration du sol après tassement<sup>105</sup>. Les résultats montrent que la détérioration de l'état physique du sol due au tassement a un impact direct sur le développement racinaire et sur le rendement. Dans un sol compacté les plantes forment moins de racines, dont l'anatomie est différente. La modification de l'état physique du sol a conduit au développement de racines aux aérénchymes, responsables de l'échange d'oxygène à l'intérieur des tissus de la plante, plus grands<sup>139</sup>.

La capacité de transport du gaz et de l'eau et la résistance mécanique du sol à la pénétration n'ont été que faiblement restaurées au cours des deux premières années suivant le tassement. Le taux de régénération du sol a diminué avec la profondeur, puisque des processus importants tels que l'activité biologique et les variations de teneur en eau se déroulent davantage dans le sol superficiel. Du fait de la courte durée de l'essai, il est encore difficile d'évaluer précisément les temps de régénération du sol, l'essai est cependant prolongé<sup>105</sup>.

Une étude en laboratoire a montré que les plantes et les racines se comportent de la même façon dans les essais en pot et au champ. Cette découverte va accélérer l'étude scientifique des effets du compactage du sol sur le développement des plantes cultivées, puisque les résultats des essais en pot dans des conditions contrôlées peuvent fournir des informations précieuses pour d'autres recherches de terrain<sup>138</sup>. Les essais ont révélé que le taux de croissance des plantes cultivées dans les sols tassés dépend fortement de la géométrie de l'extrémité racinaire. Ce résultat est important pour la sélection des plantes cultivées, car cela peut aider à régénérer activement les sols tassés en utilisant des variétés adaptées<sup>138</sup>.

Le projet a prouvé en outre que les macropores artificiels peuvent nettement favoriser la croissance des plantes dans les sols compactés<sup>137</sup>. Tant les racines des plantes que l'activité des vers de terre ont apporté une contribution précieuse au développement structurel des pores dans les sols tassés. Bien que les racines puissent exercer une pression dix fois plus grande que les vers de terre, la vitesse de croissance des racines des plantes est très inférieure à la vitesse de déplacement des vers de terre<sup>140</sup>.

(encadré relatif au projet TASSEMENT DES SOLS du PNR 68) montrent que certaines formes d'exploitation du sol, telles que prairie permanente, assolement ou jachère nue, accélèrent la régénération du sol, mais ne peuvent corriger complètement le tassement. La création de macropores artificiels notamment s'est révélée être une approche prometteuse pour rétablir à court terme la croissance végétale sur les sols compactés avec des moyens techniques<sup>137</sup>. La croissance des racines de soja, de blé et de maïs s'oriente selon les pores créés

artificiellement. Grâce à la création de ce nouveau volume de pores, la croissance faible au début est compensée dans les phases ultérieures de développement des plantes cultivées (ill. 35, p. 54). Les macropores artificiels ne peuvent toutefois rétablir la fonctionnalité du sol que de manière limitée en ce qui concerne la régulation. La stimulation de l'activité biologique est alors essentielle pour créer une structure du sol saine et fonctionnelle. Une étude dans le cadre du projet TASSEMENT DES SOLS du PNR 68 a analysé l'influence du tassement du

sol sur la structure racinaire du triticale et du soja dans des conditions de laboratoire et de terrain. Elle a montré qu'une diminution du diamètre des racines et une formation accrue d'aérenchymes ont un effet positif sur la croissance des plantes<sup>138,139</sup>. Cela ouvre de nouvelles perspectives de sélection de variétés tolérantes au tassement, qui non seulement poussent mieux dans les sols compactés, mais peuvent aussi accélérer leur restauration. La stimulation de l'activité des vers de terres constitue une autre possibilité importante de rétablir un système de pores sain dans le sol (projet TASSEMENT DES SOLS du PNR 68, ill. 36 et 37, p. 55)<sup>140</sup>. Puisque la capacité de l'activité biologique à résorber le tassement du sol diminue avec la profondeur, le sous-solage mécanique devrait aussi être envisagé comme mesure de restauration.

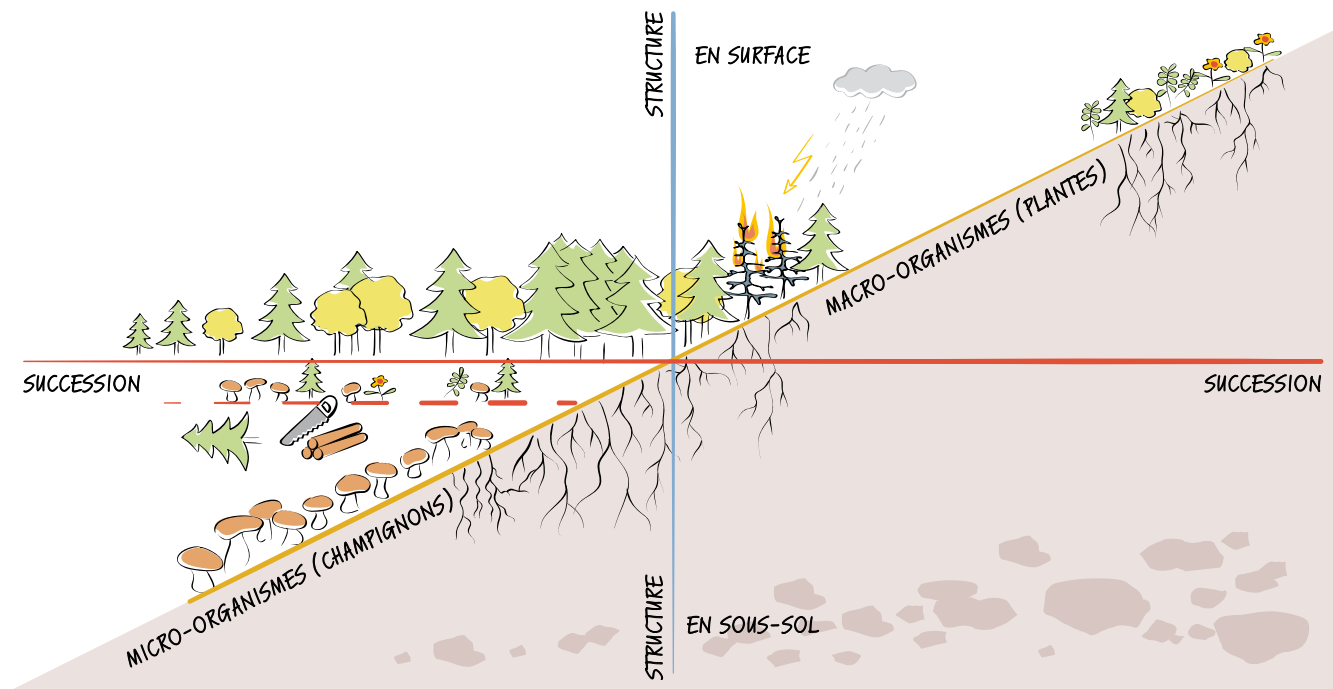
#### 4.4.2 Mesures de lutte contre l'érosion du sol

Bien que la perte de sol superficiel soit en partie un processus naturel, l'érosion peut entraîner une diminution irréversible des services écosystémiques du sol. Les mesures de prévention représentent la seule protection possible contre l'érosion du sol. L'efficacité des mesures de réduction de l'érosion dépend cependant du mode d'utilisation des terres.

##### 4.4.2.1 Sylviculture

Les résultats du projet STABILITÉ DES SOLS du PNR 68 (encadré, p. 60) montrent que pour éviter les glissements de terrain la longueur des trouées dans la ligne de pente ne devrait pas dépasser 20 mètres. La largeur des trouées de végétation joue par contre un rôle secondaire. Ces résultats concordent avec les profils d'exigences actuels en rapport avec les glissements de terrain, les avalanches et les chutes de pierres des instructions pratiques de NaiS<sup>124</sup>. Les inter-

ventions sylvicoles visant à augmenter la diversité structurelle de la forêt peuvent aussi contribuer à la stabilité du sol. Outre la diversité aérienne, la diversité souterraine, en particulier des mycorhizes, et la structure d'âge des peuplements le long de différentes phases de succession sont importants. Un large éventail d'espèces, de stades de succession, d'âge des végétaux, de stratification, de profondeur d'enracinement et d'architecture racinaire stabilise le sol de manière efficace et durable (ill. 38, p. 58). Dans les fortes pentes en particulier, où les forêts tendent à l'uniformité, les coupes de régénération constituent une mesure importante d'accroissement de la diversité en âge du peuplement. Les mesures d'entretien doivent s'orienter si possible sur les processus de succession naturels et les conditions du site, aussi au sens de la Gestion durable des forêts de protection (NaiS). Dans des conditions particulières, par exemple des sites engorgés, le maintien actif d'une phase de succession avec évapotranspiration maximale peut encore accroître la stabilité du sol. En règle générale il faudrait renoncer à une utilisation agricole intensive dans et au-dessus des pentes en danger de glissement. Une trop grande quantité d'éléments nutritifs disponibles peut conduire à une diminution de la croissance racinaire et de la mycorhization<sup>141</sup>. Le tassement du sol entrave aussi les effets stabilisants sur le sol des racines et des hyphes des champignons mycorhiziens. L'intégration de la biodiversité souterraine dans les concepts de reboisement et de plantation, par exemple par l'inoculation de champignons mycorhiziens, permet de favoriser l'effet stabilisant du sol de la végétation. Cela a pu être montré tant pour les espèces d'ectomycorhizes spécifiques<sup>142-144</sup> que pour le produit d'inoculation commercial «Forst»<sup>145,146</sup>. Toutefois on a constaté de nettes différences entre les combinaisons plante/champignon (ill. 39,



### Illustration 38

Structures de végétation aérienne et souterraine pour la stabilisation des pentes et la protection contre l'érosion.

Une diversité tridimensionnelle des structures aériennes et souterraines aide à stabiliser les pentes et à les protéger de l'érosion. La diversité des espèces de plantes et de champignons mycorhiziens peut être contrôlée, mais elle est soumise à la succession, aux interventions humaines d'entretien et aux dangers naturels tels que chablis, attaques de bostryches, incendies et avalanches.

Illustration : Nadja Stadelmann;  
Projet STABILITÉ DES SOLS du PNR 68<sup>125</sup>.

p. 59). Il reste des lacunes à combler en ce qui concerne le choix de champignons mycorhiziens adaptés pour une inoculation efficace.

#### 4.4.2.2 Sites agricoles

Pour diminuer l'érosion sur les sites agricoles, la période sans couverture doit être maintenue aussi courte possible. Des mesures comparatives exemplaires à Trenthorst (DE) ont montré que la culture pluriannuelle d'un mélange trèfle-graminées a nettement augmenté la capacité d'infiltration des sols par rapport aux surfaces environnantes à assolement déséquilibré (colza, blé, orge)<sup>147</sup>. De plus une réduction du travail du sol permet d'accroître la stabilité des agrégats du sol superficiel et ainsi de diminuer la vulnérabilité à l'érosion. Un calcul de scénario pour les sols cultivés suisses, dans lequel le labour a été remplacé en-

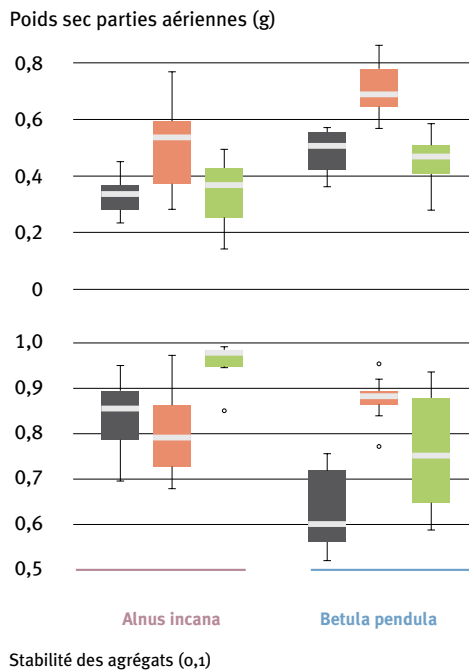
tièrement par le semis direct et la jachère d'hiver par une culture intercalaire, a montré que le risque d'érosion du sol diminue de deux tiers en moyenne<sup>111</sup>. Pour soutenir le développement d'agrégats du sol stables, l'activité biologique doit être stimulée. Un assolement simplifié et l'usage intensif de produits phytosanitaires peuvent à long terme entraîner une perte d'activité biologique<sup>148</sup> et renforcer ainsi l'érosion du sol. Un autre aspect important est d'éviter les traces de passage dirigées vers le bas de la pente lors du travail du sol. Cela permet de diminuer la formation de voies d'écoulement superficielles préférentielles et de réduire la force d'érosion du ruissellement de surface. Le tassement en surface diminue la capacité d'infiltration du sol et augmente l'érosion hydrique. Une série de techniques culturales peut permettre de réduire les facteurs favorisant l'érosion, par exemple

### Illustration 39

Impact de différents inoculums (commercial, spécifique) associés à l'aulne (*Alnus incana*) et au bouleau (*Betula pendula*) sur la stabilité des agrégats et la croissance végétale en comparaison avec des plantes témoins non traitées. L'effet des mycorhizes sur la stabilité des agrégats et la croissance végétale dépend de la plante hôte et de l'espèce de mycorhize.

Projet STABILITÉ DES SOLS du PNR 68<sup>125</sup>.

Inoculum  
■ sans  
■ commercial  
■ spécifique



la conversion de terres assolées en surfaces herbagères sur les fortes pentes, le raccourcissement de la pente par la formation de talus ou de bandes enherbées et un travail du lit de semences pas trop fin.

## Projet STABILITÉ DES SOLS du PNR 68

### Mesures relatives à la biologie du sol pour la protection contre les glissements

Dans le projet STABILITÉ DES SOLS l'équipe de recherche a étudié les mesures biologiques de protection contre les glissements superficiels. Pour quantifier de la manière la plus fiable possible l'action stabilisante des végétaux, particulièrement des forêts, et les effets concomitants des champignons symbiotiques sur la stabilité des pentes, l'équipe a pris en compte outre la mécanique du sol, la couverture végétale, notamment celle des forêts, et l'utilisation des terres. L'accent a été mis sur la mise en œuvre pratique des résultats.

Les tests de mécanique du sol (essais de cisaillement direct) ont révélé qu'en plus des paramètres habituellement pris en compte, tels que l'angle de friction et la cohésion, la dilatance est importante. La dilatance définit la propriété d'un sol d'accroître son volume sous l'effet de la force de cisaillement et ainsi de s'ameublir. Les calculs de sécurité relatifs au glissement ont montré que la stabilité de la pente est encore assurée pour les sols superficiels grâce à un bon enracinement, même quand l'inclinaison de la pente est supérieure de 5° à l'angle de friction de la matrice du sol<sup>126</sup>.

Par une analyse rétrospective de 218 glissements de terrain superficiels en zone forestière, 95% des glissements ont pu être expliqués à l'aide d'un filtre tripartite appliqué en série. La mécanique du sol (paramètres de cisaillement, déclivité) a permis d'expliquer 50% des glissements, la diversité et la structure de la végétation 40% et le relief 7%<sup>125</sup>.

Ce sont les forêts ayant une diversité aérienne et souterraine élevée, en termes d'âge, d'espèces, de structure racinaire, de mélange des essences et de structures horizontale et verticale qui conviennent le mieux pour une protection efficace des pentes contre les glissements. Grâce à l'établissement d'une couverture végétale protectrice, la stabilité des agrégats du sol est accrue, ce qui a un impact positif sur la stabilité de la pente<sup>149</sup>. Les champignons mycorhiziens peuvent alors favoriser la croissance et la survie de leur plante hôte et ainsi renforcer la résistance des agrégats du sol et la stabilité de la pente (ill. 39, p. 59). Après utilisation d'un inoculum commercial, les plantes traitées ont poussé et survécu significativement mieux après la première période de végétation. La stabilité des agrégats du sol n'était cependant significativement plus élevée qu'à partir de la troisième période de végétation<sup>145</sup>.

En raison de l'effet en partie spécifique à l'espèce des inoculums de champignons mycorhiziens, des incertitudes demeurent quant à l'application dans la pratique. Des recherches plus approfondies sont donc nécessaires pour pouvoir garantir une utilisation efficace et durable dans le cadre de mesures de reboisement. Une utilisation intensive des terres, qui provoque un tassement du sol, et des quantités élevées d'éléments nutritifs peuvent réduire la diversité aérienne et des champignons mycorhiziens et ainsi entraver l'effet stabilisant de la végétation sur les pentes<sup>143</sup>. Il faudrait donc accorder davantage d'attention à la diversité tridimensionnelle du peuplement forestier – aérienne, souterraine et en termes de succession – dans la stabilisation des pentes.

**Au cours des dernières années, des atteintes au sol par des substances dont le danger n'était pas connu auparavant, que l'on ne peut détecter analytiquement que depuis peu, ou des substances étrangères qui ont été apportées au sol récemment, ont pris le devant de la scène. Font partie de ces nouvelles substances étrangères les nanoparticules, les perturbateurs endocriniens, les produits phytosanitaires, les résidus d'antibiotiques et les produits de leur décomposition.**

Les perturbateurs endocriniens sont actifs même en quantité minime et peuvent influencer le métabolisme des êtres vivants du sol. Les substances les plus répandues, telles que l'estradiol et l'estrone, se décomposent en l'espace de quelques heures ou quelques jours<sup>150</sup> – seulement dans les sols bien aérés toutefois. Dans des conditions limitées en oxygène, comme dans des sols saturés en eau ou après un épandage de purin, elles ne sont pas décomposées et se retrouvent dans la nappe phréatique<sup>151</sup>.

**Projet RÉSISTANCE AUX ANTIBIOTIQUES du PNR 68**  
**Comment l'exploitation du sol modifie-t-elle les communautés microbiennes et les gènes de résistance aux antibiotiques ?**

Le sol est un biotope dynamique possédant une grande diversité d'organismes interagissant entre eux, qui sont essentiels pour différentes fonctions du sol, sa fertilité par exemple, mais aussi pour le bien-être humain. Les microorganismes peuvent être sensibles à l'exploitation du sol. Des résistances aux antibiotiques peuvent ainsi se développer suite à l'apport d'antibiotiques par les eaux usées et l'agriculture et se transmettre aux êtres humains par le biais de l'eau de boisson. L'ampleur de cette menace est cependant incertaine.

À l'aide de techniques de séquençage du génome, l'équipe du projet a montré qu'une fertilisation organique intensive pendant 600 ans sur un pâturage alpin au col de Glas (GR) a eu une nette influence sur les microorganismes du sol. Quand de l'engrais de ferme est utilisé, les bactéries qui valorisent les substances riches en éléments nutritifs et sont potentiellement impliquées dans le cycle de N sont nettement plus nombreuses. Sur un site comparable qui reçoit seulement une fertilisation organique modérée pendant l'estivage, d'autres bactéries dominent. Les résultats prouvent que la diversité naturelle des communautés microbiennes du sol contribue en Suisse à un cycle des éléments nutritifs sain, efficace et utile, qui est résistant et s'étend sur plusieurs systèmes agricoles.

Jusqu'à présent on ne dispose pas d'informations suffisantes sur les résistances aux antibiotiques dans le sol et dans les écosystèmes agricoles pour pouvoir tirer des conclusions scientifiques sur l'incidence de la présence de ces gènes dans le sol. L'équipe du projet a pu montrer à l'aide de la métagénomique que dans les deux sites étudiés seul un nombre négligeable de gènes de résistance cliniquement pertinents étaient détectables. D'autres méthodes de génétique moléculaire ont montré que des gènes de résistance aux antibiotiques ont bien été apportés au sol par le purin, mais que le nombre de gènes de résistance dans le sol superficiel bien aéré d'une prairie est très faiblement et très brièvement influencé – de l'ordre de quelques jours à quelques semaines. Un impact de la méthode de travail du sol n'a pas pu être démontré. Des essais supplémentaires avec différents sols et sous différentes conditions sont nécessaires, par exemple dans des sols saturés en eau. De plus le comportement environnemental des porteurs des gènes et le risque de transmission du purin à la nappe phréatique ou aux eaux de surface par ruissellement (par ex. en cas de fortes précipitations) doivent être mieux quantifiés. Ce n'est que sur la base de ces nouvelles connaissances que des directives pour la protection du personnel agricole et des autres personnes pourront être élaborées (par ex. prise en compte des conditions météorologiques pour déterminer le moment approprié pour l'épandage de purin).

Les effets à long terme des perturbateurs endocriniens sont encore méconnus. Il en est de même des nanoparticules, qui présentent un large éventail de dangers potentiels pour l'être humain et l'environnement en raison de leur petite taille. Bien que la production de nanoparticules augmente dans le monde entier et qu'elles puissent être décelées dans pratiquement tous les cours d'eau, on sait peu de choses

sur leurs effets sur les plantes cultivées et la qualité du sol<sup>152</sup>.

Les produits vétérinaires en particulier, qui sont utilisés à forte dose et se retrouvent dans les champs par épandage de purin et de fumier, sont préoccupants au regard du développement de résistances aux antibiotiques<sup>153</sup>.



Le sol constitue une interface essentielle dans les écosystèmes terrestres. Il remplit des fonctions importantes, en tant que milieu de vie et réservoir de carbone et d'éléments nutritifs, régule les cycles de l'eau et des matières et offre une protection contre la pollution par des substances étrangères. Le sol apporte ainsi les éléments fondamentaux de la croissance des plantes, fournit une eau potable et contribue à la protection contre les crues et les glissements de terrain. Les processus du sol agissent sur le climat, car les sols constituent à la fois une source et un puits pour les trois principaux gaz à effet de serre ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  et  $\text{N}_2\text{O}$ ). Les sols influent également sur le changement climatique à long terme par leur impact sur le cycle de l'eau. Alors que ces rétroactions font partie des grandes inconnues de la modélisation climatique, l'effet de renforcement sur la courte échelle temporelle de périodes de forte chaleur de plusieurs semaines est bien documenté<sup>154</sup>.

En Suisse le sol est soumis à des contraintes. Il est de plus en plus utilisé et imperméabilisé pour satisfaire les besoins croissants en surfaces d'habitation (synthèse thématique TS3 « Un agenda du sol pour l'aménagement du territoire »)<sup>109</sup>.

La présente synthèse thématique du PNR 68 montre que :

(i) Les sols suisses contiennent de grandes quantités de C organique, mais une grande partie est perdue suite à l'utilisation pour les grandes cultures et en particulier au drainage des sols marécageux (chapitre 2, p. 45 ss). Cela indique que les sols ne sont pas utilisés de manière durable et sont menacés à long terme. La perte de mos des sols marécageux prédomine dans les émissions de  $\text{CO}_2$  de l'agriculture suisse. Le changement climatique – températures plus élevées et sécheresse accentuée – s'accompagne vraisemblablement de pertes supplémentaires de C des sols, qui rejettent ainsi plus de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère.

(ii) La forte fertilisation azotée dans l'agriculture n'entraîne pas seulement le lessivage de grandes quantités de nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) et de phosphore (P), mais aussi de fortes émissions de gaz hilarant ( $\text{N}_2\text{O}$ ) provenant du sol (chapitre 3, p. 35 ss).

(iii) Le passage inadapté de machines lourdes sur les sols dans l'agriculture provoque un tassement irréversible des sols (chapitre 4, p. 45 ss). Il faut s'attendre à des dommages à long terme comparables pour l'exploitation forestière et les travaux de construction. Des mesures ciblées telles que la création de macropores artificiels ou la culture de plantes plus résistantes au tassement contribuent – de manière toutefois limitée – à la restauration des sols.

Puisque sa genèse dure des milliers d'années, le sol n'est pas une ressource renouvelable. Il doit être protégé du point de vue qualitatif et quantitatif. Une stratégie juridique et politique intégrale pour l'utilisation durable du sol fait toutefois défaut en Suisse. Au contraire, l'UE protège le sol avec la « Soil Thematic Strategy »<sup>170</sup>. L'Allemagne dispose de la « Bundes-Bodenschutzgesetz » (loi fédérale pour la protection des sols) qui fixe pour objectif de protéger durablement le sol ou de le reconstituer. En Suisse les seules bases juridiques de la protection du sol sont la loi sur la protection de l'environnement (LPE) de 1983 et l'ordonnance sur les atteintes portées au sol (OSol). Leurs effets sont cependant limités du fait qu'à l'échelle cantonale ou communale la balance des intérêts penche souvent en faveur de la fonction portante des sols (par ex. pour les logements ou l'infrastructure).

Mesures	Matière organique du sol			Gaz à effet de serre			Protection physique du sol			Conflit d'intérêt
	Impact	Bases de données	Références	Wirkung	Bases de données	Références	Wirkung	Bases de données	Références	
Assolement et couverture permanente du sol	+++	***	34	++	**	78,178	+++	**	127	
Réduction de la fertilisation azotée	±	*		+++	***	83	+	*	161	Sécurité économique
Intensité de travail du sol réduite	±	*		±	*	85	++	**	112	recours intensif aux herbicides
Chaulage	±	*	103	++	**	162				
Inhibiteurs de nitrification				±	**	89				
Biochar	++	*	95,160	+	*	96,98				Entrée possible de polluants, origine de la biomasse, loi sur les forêts
Remise en eau des sols marécageux	+++	***	57,164	+++	***	77				Conflit d'utilisation
<b>Développements futurs</b>										
Changement climatique	--	**	42,45,46,51	-	*	79	-	*	163	
Extensification de l'utilisation des terres	+	*	165	++	*	69	++	**	111	

**Tableau 7**  
Mesures combinées pour la stabilisation de la mos, la réduction des émissions de gaz à effet de serre et laprotection physique du sol.

## Mesures et recommandations pour la protection des fonctions du sol

### 1 Conserver le sol et la matière organique

La mos joue un rôle clé dans la plupart des propriétés et fonctions des sols. La conservation de la mos est donc particulièrement importante aussi bien pour l'exploitation durable des sols que pour leur impact climatique. Les impulsions politiques globales telle que l'initiative « 4 pour 1000 »<sup>155</sup> visent à favoriser le stockage de carbone (C) dans le sol. Une augmentation du stock de C de 0,4% par an suffit pour fixer les émissions globales de CO<sub>2</sub>. Les sols forestiers suisses présentent une réserve de mos plus élevée que ceux des pays voisins (projet SOLS FORESTIERS du PNR 68). Cette réserve de mos élevée recèle plutôt un risque de pertes de C qu'un fort potentiel des sols forestiers suisses à stocker davantage de C (tab. 2, 3 et 6, p. 34, 38, 49). Les sols cultivés qui ont été utilisés auparavant en prairies perdent aussi de la mos. La fertilisation organique peut diminuer ces pertes, mais ne peut pas les empêcher entièrement (tab. 7)<sup>35</sup>. À l'échelle nationale les sols suisses perdent du C essentiellement suite au drainage des sols marécageux, la mos étant décomposée en CO<sub>2</sub>. La disparition de la tourbe est liée à une libération d'azote et de phosphore qui provoque une eutrophisation des eaux. La question des pertes de C des sols organiques asséchés est

confrontée aux intérêts socioéconomiques des agriculteurs concernés. Il s'ensuit un conflit d'objectif qui ne peut être résolu que sur le plan politique. Du point de vue de la politique environnementale et climatique, il faudrait renoncer à la poursuite de l'assèchement des sols concernés et maintenir ou renforcer les mesures de protection déjà prises. Une exploitation agricole intensive durable – et donc intéressante aussi sur le plan économique – des sols marécageux, préservant en même temps leur capacité à stocker le C, n'est pas possible dans l'état actuel des connaissances. Le développement de nouvelles possibilités d'utilisation (par ex. cultures spéciales, prairies extensives, paludiculture, mise en pâture avec des buffles) garantissant la stabilité du sol à long terme doit être encouragé. Les résultats du projet SOLS MARÉCAGEUX du PNR 68 montrent que des paiements de compensation des pertes de rendement en faveur de la protection du climat, provenant par exemple d'un fonds pour le climat, seraient une approche très prometteuse pour le soutien de systèmes de production plus durables.

La mos est un indicateur intégral de la qualité du sol, car elle joue un rôle clé dans de nombreuses fonctions du sol. Des mesures répétées de la teneur en C sur les surfaces agricoles permettraient de quantifier l'exploitation des terres et ainsi de contrôler sa durabilité. Pour l'aménagement du territoire également, la teneur en C pourrait être utilisée – en plus de points d'indice de qualité du sol<sup>109</sup> – comme mesure de la mos et donc comme valeur mesurable de la qualité du sol. Toutefois les données actuellement disponibles en Suisse ne permettent pas d'indiquer des seuils et des valeurs de référence.

## 2 Agriculture respectueuse du climat et du sol

Un excédent d'azote (N) dans le sol entraîne non seulement de fortes émissions de gaz hilarant ( $N_2O$ ), mais aussi un lessivage élevé de nitrate ( $NO_3^-$ ). Une fertilisation azotée fractionnée adaptée spatialement et l'introduction de légumineuses, d'engrais verts et de prairies à trèfle et graminées pluriannuelles dans l'assolement peuvent permettre d'économiser des engrais azotés (projet COUVERTS VÉGÉTAUX du PNR 68)<sup>156,157</sup>. Une augmentation de l'efficacité de l'azote n'a donc pas seulement un impact sur le bilan écologique, mais aussi sur le bilan économique des producteurs agricoles. Le chaulage des surfaces agricoles très acidifiées réduit aussi les émissions de  $N_2O$ . Parallèlement, un pH neutre améliore l'efficacité de l'absorption des éléments nutritifs et la structure du sol. Pour l'adaptation générale au changement des conditions climatiques, il faut encourager la diversification dans le temps et dans l'espace de la production agricole, qui permet aussi de réduire le risque économique de pertes de récoltes. D'autres mesures peuvent être accompagnées d'effets secondaires négatifs. Le biochar peut contribuer au stockage de la mos à long terme et à la réduction des émissions de  $N_2O$ . Mais il peut aussi entraîner des entrées de substances étrangères telles que des métaux lourds et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Les inhibiteurs chimiques de nitrification réduisent le lessivage de  $NO_3^-$  et peuvent diminuer les émissions de  $N_2O$ . Leur effet à long terme est cependant méconnu, par exemple en ce qui concerne les atteintes à la microflore du sol par le développement de résistances. Ces mesures nécessitent donc des recherches supplémentaires. Dans l'agriculture biologique, ni les inhibiteurs de nitrification, ni le biochar ne sont autorisés comme matières auxiliaires du sol. Une utilisation des terres respectueuse du climat repose sur l'intégration spécifique au site de différentes mesures, ce qui présuppose une sensibilisation des exploitants.

### 3 Promotion de la couverture permanente du sol

Une couverture permanente du sol est un autre élément essentiel pour la protection de diverses fonctions du sol. Cela vaut tant pour les surfaces forestières que pour les surfaces agricoles. La couverture permanente du sol a un effet positif sur le bilan carbone du sol, dû aux entrées de C via les racines. La couverture du sol réduit en outre les pertes de sol par érosion et glissements de terrain superficiels. Le risque d'érosion du sol ou de glissement peut être abaissé dans les mesures de reboisement par l'utilisation ciblée de champignons mycorhiziens. Il existe toutefois un besoin considérable de recherches en ce qui concerne le choix des espèces et l'inoculation spécifique au site. Sur les surfaces agricoles, un assolement diversifié peut favoriser une couverture du sol aussi continue que possible et la culture d'engrais verts et de légumineuses peut retenir l'azote dans le système (projet COUVERTS VÉGÉTAUX du PNR 68). L'introduction de cultures dérobées représente certes un surcroît de dépenses et de travail pour les producteurs agricoles, mais elle est rentable à long terme.

### 4 Éviter le tassement du sol

Le compactage du sol par le passage inadapté de machines a un effet néfaste sur les fonctions du sol. Non seulement il réduit le taux d'infiltration et augmente ainsi le risque d'inondation et d'érosion en cas de fortes précipitations, mais il diminue aussi l'enracinement et donc la croissance des plantes. De plus le tassement du sol favorise la création de conditions anaérobies et les émissions de  $N_2O$  et de  $CH_4$ . Les résultats du projet TASSEMENT DES SOLS du PNR 68 montrent que la possibilité de restauration du sol après tassement est limitée. Il en est de même pour les sols forestiers<sup>116</sup> et en cas de tassement à la suite de travaux de construction. La restauration peut certainement être davantage favorisée par des plantations spécifiques (par ex. d'arbres résistants au tassement dans les ornières), mais aussi par la sélection de caractéristiques morphologiques des plantes cultivées. Mais un fort tassement n'est pas complètement réversible. Éviter le tassement du sol est donc sûrement la meilleure stratégie, même si à court terme les aspects techniques et financiers plaident pour le passage des machines. Ne rouler sur les sols que quand la teneur en eau et la force de succion l'autorisent (par ex. [www.bodenmessnetz.ch](http://www.bodenmessnetz.ch), réseau de mesure de l'humidité des sols) permet d'éviter un tassement dommageable du sol. Pour la protection de la ressource sol limitée, les outils à disposition doivent être utilisés de manière cohérente, par exemple l'évaluation de la praticabilité des sols pour des types de machines spécifiques à l'aide de «Terranimo»<sup>135</sup>. En outre des seuils précis sont indispensables ainsi que la création des conditions cadres juridiques nécessaires à l'exécution.

### 5 Base de données sur les sols suisses insuffisante

Pour la protection du sol et la saisie quantitative de ses fonctions (par ex. effet protecteur contre la pollution ou stockage de C), une connaissance précise de la ressource sol est nécessaire. En comparaison avec les pays voisins, la Suisse possède les plus mauvaises cartes pédologiques (synthèse thématique TS<sub>4</sub> du PNR 68 « Plateforme d'information des sols suisse [PIS-CH] »)<sup>158,159,166</sup>. La Suisse est aussi en retard en ce qui concerne l'inventaire des sols. Alors qu'en Allemagne les sols de 1800 sites forestiers sont inventoriés de façon répétée<sup>59</sup>, seuls 23 sites forestiers le sont en Suisse dans le cadre de l'observatoire national des sols (NABO). En Suisse, les profils de sol d'environ mille sites forestiers ont été répertoriés, mais un nouveau recensement n'est pas prévu. Il en est de même pour l'agriculture.

Des échantillonnages de profils complets et des mesures de la densité du sol, permettant de déterminer le stock d'éléments, font défaut. En Allemagne, 3000 sites agricoles sont échantillonnés pour de tels recensements sur la base d'une grille de 8 kilomètres sur 8. En France, un échantillonnage de profils complets et une analyse selon une grille de 16 kilomètres sur 16 sont effectués tous les 10 ans<sup>159</sup>.

**Un inventaire des sols à haute définition spatiale est indispensable dans les domaines suivants :**

(i) Établissement de cartes pédologiques thématiques précises en combinaison avec des processus géostatistiques (synthèse thématique TS4 du PNR 68 « Plateforme d'information des sols suisse [PIS-CH] »)<sup>29</sup>.

(ii) Identification des sites particulièrement sensibles (hotspots) et des sites menacés par le tassement à l'aide de la texture du sol.

(iii) Quantification en surface de l'exposition aux polluants, y compris aux nouveaux polluants du sol encore insuffisamment connus (par ex. par les hormones ou les médicaments).

(iv) Recensement précis de la modification des stocks de mos. Cela permettrait d'une part de quantifier l'exploitation des terres et de vérifier sa durabilité. Des mesures précises de la réserve de mos et de ses changements sont cependant les conditions préalables à une quantification suffisamment précise du stockage du C dans le sol, que ce soit pour le rapport climatique national<sup>74</sup> ou pour l'initiative « 4 pour 1000 »<sup>155</sup>. Par des modèles relatifs aux processus, la modification des stocks de C doit encore être liée à des données facilement mesurables (sur le climat, la production de biomasse). Cela permet une extrapolation dans l'espace et la détermination de scénarios réalistes.

# Annexes

## Annexe 1

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

Les programmes nationaux de recherche (PNR) doivent apporter une contribution à la résolution de problèmes actuels d'importance nationale. Le Fonds national suisse (FNS) veille à leur exécution sur mandat du Conseil fédéral.

Le Programme national de recherche «Utilisation durable de la ressource sol» (PNR 68) établit les bases pour une exploitation durable des sols en Suisse. À cette fin, il convient de prendre en compte les services écologiques et économiques que fournit le sol. Le concept des services écosystémiques permet de mettre en valeur les fonctions des sols et leur contribution au bien-être humain.

Le PNR 68 poursuit trois objectifs principaux: i) approfondissement de la connaissance systémique du sol; ii) mise au point d'instruments pour évaluer le sol en tant que ressource; iii) élaboration de stratégies favorisant un usage durable des sols.

#### **Sélection et durée des projets de recherche**

Le PNR 68 disposait d'une enveloppe de 13 millions de francs et les recherches réparties en deux phases ont duré de 2013 à 2017. Les projets ont été sélectionnés parmi un grand nombre de propositions selon des critères de qualité scientifique et de pertinence pour le PNR 68 dans le contexte suisse. Après une procédure de sélection en deux étapes ayant fait appel à une expertise internationale, le FNS a retenu 19 projets pour la première phase de recherche (2013–2015). Deux projets supplémentaires ont été encouragés dans le cadre d'une seconde mise au concours. Lors de la seconde phase de recherche (2016–2017), le FNS a lancé quatre projets complémentaires. Au total, ce sont donc 25 projets de recherche qui ont été menés à bien dans le cadre du PNR 68. Par ailleurs, 4 millions de francs supplémentaires ont été mis à disposition du PNR 68 et du PNR 69 «Alimentation saine et production alimentaire durable» afin d'encourager des projets s'inscrivant dans les mises aux concours des initiatives européennes de programmation conjointe (European Joint Programming Initiatives – JPI) «Agriculture, sécurité alimentaire et changement climatique» (FACCE-JPI) et «Une alimentation saine pour une vie saine» (HDHL-JPI). Ces fonds ont permis d'intégrer au PNR 68 douze projets supplémentaires d'un rayonnement international ([www.nfp68.ch/fr/](http://www.nfp68.ch/fr/) → Projets).

Faute de propositions d'une qualité suffisamment élevée, le PNR 68 ne comprend aucun projet de recherche sur les thèmes de la propriété du sol, des conditions-cadres juridiques et de la valorisation économique et sociale des services écosystémiques fournis par le sol.

#### **Un dialogue constant**

Au regard des buts poursuivis par le PNR 68, l'établissement d'un dialogue ouvert et transparent au sein du programme ainsi qu'avec les représentantes et représentants des parties prenantes revêtait une grande importance. À cette fin, les scientifiques se sont rencontrés à l'occasion de trois conférences internes. Des chercheuses et chercheurs ainsi que des membres du comité de direction ont en outre régulièrement participé à des manifestations

réunissant des partenaires de la pratique et à des symposiums publics. Le principal objectif était ce faisant de promouvoir l'échange entre les scientifiques et les acteurs de la pratique afin d'aborder les thématiques centrales du PNR 68: «environnement», «agriculture» et «aménagement du territoire».

#### **Suivi largement étayé des synthèses thématiques**

En préalable à l'élaboration des synthèses thématiques, le PNR 68 a organisé début 2016 trois ateliers destinés aux parties prenantes qui ont regroupé des spécialistes issus des administrations fédérales et cantonales, des associations économiques et environnementales et du secteur privé afin de discuter des résultats provisoires des projets. Ces ateliers ont fourni d'importantes impulsions pour la conception et la structuration des synthèses thématiques du PNR 68 dont l'objectif est de replacer les résultats scientifiques dans un contexte élargi adapté aux groupes-cibles et de développer des instruments, des concepts et des stratégies spécifiques destinés à la pratique comme à l'administration. Elles apportent ce faisant une contribution décisive à l'atteinte des buts du programme.

En s'appuyant sur les impulsions fournies par ces ateliers et en concertation avec les scientifiques, le comité de direction du PNR 68 a décidé à l'automne 2016 de lancer cinq synthèses thématiques.

Les responsables des synthèses thématiques ont respectivement présenté leurs concepts et leurs ébauches aux membres des groupes de suivi à l'occasion de deux ou trois ateliers participatifs. Ces rencontres visaient à soumettre les concepts élaborés à un examen critique et à combler d'éventuelles lacunes. Il incombait aux auteures et auteurs des synthèses thématiques d'évaluer ces suggestions et de décider quels étaient les aspects pouvant être pris en compte dans les travaux à venir. Enfin, les synthèses thématiques ont été validées par le comité de direction du PNR 68.

## Les projets de recherche du PNR 68

\* Projets ayant contribué à la présente synthèse thématique.

### Phase de recherche 1

---

- A **ACCAPAREMENT DES TERRES**: L'accaparement des terres («land grabbing») avec une participation suisse (Rist S., Cottier T., Mann S.)
- B **BACTÉRIES DU SOL**: Des sols sains grâce aux bactéries du sol (Maurhofer Bringolf M., Keel C.)
- C **CARTES DES SOLS**: Cartographie des propriétés du sol pour une évaluation des fonctions du sol à l'échelle régionale (Papritz A.J., Baltensweiler A., Keller A., Presler J., Schaepman M.E., Walthert L., Zimmermann S.)
- COMPENSATION DES PLUS-VALUES ET MOINS-VALUES FONCIÈRES**: Gestion durable des sols par la compensation des plus-values et moins-values économiques et écologiques (Nahrath S., Gmünder M., Grêt-Regamey A., Joerin F., Pflieger G.)
- COMPENSATION MULTICRITÈRE**: Prendre en compte la qualité des sols dans les mécanismes de compensation appliqués en aménagement du territoire (Joerin F., Boivin P., Ruegg J.)
- COUVERTS VÉGÉTAUX**: Préserver l'environnement par les couverts végétaux et l'agriculture de conservation du sol (Streit B., Charles R., Walter A.)
- D \* **DYNAMIQUE DU CARBONE**: Influence du changement climatique et de l'utilisation des sols sur le carbone contenu dans les sols suisses (Abiven S., Niklaus P.A.)
- E \* **ENTRÉES DE CARBONE**: Entrées de carbone dans le sol par les cultures (Mayer J., Abiven S., Hund A., Leifeld J.)
- G \* **GAZ HILARANT**: Influences de l'exploitation du sol sur les micro-organismes du sol qui émettent et décomposent le gaz hilarant (Gattinger A., Mäder P., Thonar C.)
- I \* **INDICATEURS DE VULNÉRABILITÉ**: Indicateurs de la vulnérabilité du carbone contenu dans les sols (Eglington T.)
- INSTRUMENTS POLITIQUES**: Instruments politiques pour une utilisation durable des sols (Walter F., Grêt-Regamey A., Sager F., Vatter A.)
- M **MITAGE**: Contrôler le mitage du territoire – Réduire l'utilisation du sol (Kienast F., Hersperger A.M., Schulz T., Seidl I.)
- MYCORHIZES**: Restauration des fonctions du sol à l'aide de mycorhizes arbusculaires (Van der Heijden M., Oehl F., Wagg C.)



- N NÉMATODES: Utilisation des filaires dans la lutte contre les insectes nuisibles du sol (Turlings T., Mascher F.)
- P PLATE-FORME DE DÉCISION: Plate-forme de décision pour une utilisation durable du sol (Grêt-Regamey A., Diggelmann H., Huber R., Keller A., Kübler D., Siegrist D., Zimmermann S.)
- R \* RÉSISTANCE AUX ANTIBIOTIQUES: Le rôle de l'utilisation des sols dans les résistances aux antibiotiques (Duffy B., Smits T.)
- S \* SOLS FORESTIERS: Stocks de carbone dans les sols forestiers suisses (Hagedorn F., Gimmi U., Thürig E., Walthert L.)
- SOLS MARÉCAGEUX: Gestion durable des sols organiques (Leifeld J., Engel S., Müller M.)
- \* STABILITÉ DES SOLS: Stabilité des sols et risques naturels: de la connaissance à l'action (Graf F., Bebi P., Frei M., Rickli C., Rixen C., Springman S.M.)
- SYSTÈME D'ALERTE PRÉCOCE: Outil régional de monitoring des sols pour des cycles durables des substances dans les sols agricoles (Keller A., Mann S., Schaepman M.E., Schulín R.)
- T \* TASSEMENT DES SOLS: Restauration naturelle de la structure des sols tassés (Keller T., Or D., Schymanski S., Walter A., Weisskopf P.)

#### Phase de recherche 2

---

- D DÉCISIONS QUANT À L'EXPLOITATION DES SOLS: Meilleure gestion des achats transnationaux de terrains (Rist S., Mann S., Messerli P.)
- L LUTTE BIOLOGIQUE CONTRE LES PARASITES: Des nématodes et des bactéries contre les organismes nuisibles du sol (Turlings T., Keel C., Maurhofer Bringolf M.)
- M MODÈLE D'EXPLOITATION DU SOL: Modèle d'exploitation du sol sur le Plateau suisse (Keller A., Schaepman M. E., Schulín R.)
- S SYSTÈMES DE CULTURE AMÉLIORANT LE SOL: Pôles d'innovation pour des systèmes de culture améliorant le sol (Charles R., Keller T., Mayer J., Six J., Van der Heijden M.)

## FACCE-JPI

---

Les équipes de projet des initiatives européennes de programmation conjointe « Agriculture, sécurité alimentaire et changement climatique » (FACCE-JPI) et « Une alimentation saine pour une vie saine » (HDHL-JPI) sont composées de scientifiques issus d'au moins trois pays partenaires. Par souci de simplification, seuls les chefs de projet sis en Suisse sont mentionnés.

- A AFGROLAND : Dynamique du système alimentaire en Afrique (Messerli P.)
- B BASIL : Biodiversité dans les systèmes agricoles (Olschewski R., Frey B., Gessler A., Hagedorn F., Seidl I.)
- C CLIMATE-CAFÉ : Adaptabilité des systèmes agricoles au changement climatique en Europe (Six J., Charles R.)  
  
COMET-GLOBAL : Comptabilité des gaz à effet de serre (Six J.)
- D DEVIL : Sécurité alimentaire sur des territoires limités (Buchmann N.)
- E ECO-SERVE : Pérennité des services écosystémiques multiples dans les systèmes agricoles (Mäder P., Gattinger A.)
- G GREEN RICE : Produire du riz en ménageant les ressources (Six J.)
- M MAGNET : Gaz à effet de serre issus de l'agriculture (Leifeld J.)  
  
MODELS4PASTURES : Gaz hilarant d'origine agricole (Merbold L., Buchmann N.)
- P PROMESSING : Maintien des services écosystémiques dans les vignobles d'Europe centrale (Bacher S.)
- S STACCATO : Services écosystémiques dans les paysages agricoles (Zimmermann N., Kienast F.)
- T TALE : Pour des paysages agricoles multifonctionnels en Europe (Holzkämper A., Charles R.)

## Synthèses thématiques

---

Synthèse thématique ST1 : Sol et production alimentaire (Charles R., Wendling M., Burgos S.)

Synthèse thématique ST2 : Sol et environnement (Hagedorn F., Krause H.-M., Studer M., Schellenberger A., Gattinger A.)

Synthèse thématique ST3 : Un agenda du sol pour l'aménagement du territoire  
(Grêt-Regamey A., Kool S., Bühlmann L., Kissling S.)

Synthèse thématique ST4 : Plateforme d'information des sols suisse (PIS-CH) (Keller A.,  
Franzen J., Knüsel P., Papritz A.J., Zürrer M.)

Synthèse thématique ST5 : Vers une politique durable des sols (Walter F., Hänni E.)

#### Études focalisées

---

- B \* BILAN GAZ A EFFET DE SERRE : Émissions de gaz à effet de serre des sols agricoles en Suisse (Gattinger A., Bretscher D., Schellenberger A.)
- I INDICATEURS DU SOL : Indicateurs du sol pour un aménagement durable du territoire (Grêt-Regamey A., Bühlmann L.)
- M MARCHÉ DU SOL AGRICOLE : Le marché du sol agricole pris en étau dans les régions en expansion urbaine (Giuliani G., Flury C.)
- S SYSTÈMES D'INFORMATION DU SOL : Systèmes d'information du sol et cartographie (digitale) du sol (Papritz A.J., Burgos S., Carizzoni M., Keller A., Wegmann F.)

## Annexe 2

### Liste des illustrations

Illustration 1	Lessivage de nitrates des sols forestiers en Suisse	13
Illustration 2	Représentation schématique de la transformation, de la décomposition et de la stabilisation de la mos	14
Illustration 3	Fonctions de la mos	15
Illustration 4	mos et capacité d'échange cationique	16
Illustration 5	Relation entre matière organique du sol et biomasse microbienne	17
Illustration 6	Densité des vers de terre dans la forêt de Finges (VS) en fonction de l'humidité du sol	18
Illustration 7	Sols suisses réservoirs de carbone	19
Illustration 8	Carte du carbone des sols forestiers suisses	20
Illustration 9	Biomasse forestière et stock de mos dans les forêts suisses	20
Illustration 10	Teneurs en matière organique du sol dans les 20 centimètres supérieurs des sites NABO	21
Illustration 11	Distribution des teneurs en <sup>14</sup> C dans différents composants de la mos d'un sol forestier près de Lausanne VD	24
Illustration 12	Modification du stock de carbone dans l'essai DOX de Therwil BL	25
Illustration 13	Changement de la profondeur racinaire de variétés de blé pendant le siècle dernier	27
Illustration 14	Influence de l'intensité d'exploitation sur les entrées de C dans le système racinaire	28
Illustration 15	Influence du type et de l'âge de la forêt sur le stock de C dans les sols forestiers suisses	29
Illustration 16	Libération de CO <sub>2</sub> provenant des sols en fonction de l'altitude	30
Illustration 17	Stock de mos des sols forestiers suisses en fonction de l'altitude	31
Illustration 18	Libération de C d'écosystèmes modèles soumis aux conditions climatiques futures	33
Illustration 19	Dégradabilité de la mos des sols marécageux en fonction de l'utilisation des terres	33
Illustration 20	Principaux facteurs de formation de gaz à effet de serre dans le sol	35
Illustration 21	Flux d'azote dans la forêt et l'agriculture suisses	36
Illustration 22	Modélisation de la répartition spatiale des émissions de N <sub>2</sub> O en Suisse en 2014	37
Illustration 23	Influence du niveau de l'eau sur les émissions de gaz à effet de serre dans les sols organiques	39
Illustration 24	Émissions de CH <sub>4</sub> provenant des sols marécageux suisses	39
Illustration 25	Évolution des émissions de gaz à effet de serre du secteur agricole en Suisse	40
Illustration 26	Émissions de N <sub>2</sub> O après apport de biochar et de chaux	43
Illustration 27	Représentation schématique du temps de régénération des sols compactés	46
Illustration 28	Praticabilité et domaine de travail de différents types de sol en fonction de l'humidité du sol	48
Illustration 29	Pression exercée sur le sol par le passage de machines	48
Illustration 30	Carte du risque d'érosion sur les surfaces agricoles en Suisse	50

Illustration 31	Filtre tripartite pour l'analyse des glissements de terrains superficiels	51
Illustration 32	Relation entre couverture végétale et perte de sol mesurée	52
Illustration 33	Types d'ornières en tant qu'indicateurs de la détérioration du sol	53
Illustration 34	Détail de la carte du risque de tassement du canton d'Argovie	53
Illustration 35	Biomasse du soja, du blé et du maïs dans les sols tassés avec ou sans pores artificiels en comparaison avec les sols non tassés	54
Illustration 36	Consommation d'énergie d'un ver de terre pour l'ameublissement du sol dans un limon silteux et dans un sable limoneux dépend de l'humidité du sol	55
Illustration 37	Photos en radiographie neutronique en accéléré de l'activité des racines des plantes et des vers de terre	55
Illustration 38	Structures de végétation aérienne et souterraine pour la stabilisation des pentes et la protection contre l'érosion	58
Illustration 39	Impact de différents inoculums (commercial, spécifique) associés à l'aulne ( <i>Alnus incana</i> ) et au bouleau ( <i>Betula pendula</i> ) sur la stabilité des agrégats et la croissance végétale en comparaison avec des plantes témoins non traitées	59

#### Liste des tableaux

Tableau 1	Effets potentiels du climat et du changement d'utilisation sur la réserve de C	32
Tableau 2	Estimation du bilan C des sols suisses	34
Tableau 3	Propriétés des principaux gaz à effet de serre	38
Tableau 4	Émissions annuelles moyennes de CH <sub>4</sub> et de N <sub>2</sub> O sur la base d'études effectuées en Suisse et en Allemagne du Sud	41
Tableau 5	Facteurs naturels et dus à l'exploitation qui favorisent l'érosion	47
Tableau 6	Risques d'érosion de différentes cultures	49
Tableau 7	Mesures combinées pour la stabilisation de la mos, la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la protection physique du sol	64

## Glossaire

### A **Agriculture biologique**

L'agriculture biologique est une forme d'agriculture produisant selon l'ordonnance sur l'agriculture biologique (910.18), le cahier des charges de Bio Suisse ([www.bio-suisse.ch](http://www.bio-suisse.ch)) ou de Demeter ([www.wdemeter.ch](http://www.wdemeter.ch)). Cette agriculture renonce en particulier à l'utilisation d'engrais minéraux facilement solubles, de produits de traitement des plantes de synthèse et d'organismes génétiquement modifiés. La production animale respecte les besoins naturels des espèces et son intensité est limitée.

### **Agriculture de précision**

Gestion ciblée et différenciée en fonction du site des terres agricoles visant à tenir compte de la capacité de rendement du sol afin de minimiser l'utilisation de substances.

### **Agriculture extensive**

cf. Agriculture intensive

### **Agriculture intensive**

Expression souvent utilisée pour désigner une forme d'exploitation agricole caractérisée – en opposition à l'agriculture extensive – par l'obtention des rendements les plus élevés possibles par unité de surface et/ou par animal en utilisant une technologie agricole avancée et exigeante, notamment avec apport important d'engrais et de matières auxiliaires. Il n'existe pas de limite définie entre agriculture extensive et agriculture intensive. Par conséquent l'emploi de ces termes est variable. Ce qui est considéré en Suisse comme agriculture intensive, se situe à un niveau de faible exploitation en comparaison européenne.

### **Assolement**

cf. Rotation des cultures

### C **Culture dérobée**

Culture effectuée entre deux cultures principales pour la production d'engrais vert ou de fourrage. L'utilisation de cultures dérobées permet d'assurer une couverture du sol continue et de maintenir les éléments nutritifs facilement disponibles sur le site

### D **Durabilité**

L'observation de la durabilité se fait sur la base d'un modèle de ressources, la ressource sol étant considérée comme capital d'où proviennent les services écosystémiques. En raison d'objectifs différents et en partie complémentaires, la durabilité est comprise comme processus et non comme vision.

La ressource sol est utilisée de manière durable si :

- 1) les utilisations du sol par les différents acteurs sont coordonnées de manière optimale et
- 2) les politiques publiques de protection et d'utilisation veillent à ce que la ressource ne soit pas surexploitée.

(Traduction libre d'après<sup>174,175</sup>)

## **E Exploitation du sol**

L'exploitation du sol définit l'ensemble des mesures agricoles qui agissent sur le sol. Elle comprend par exemple les actions de travail mécanique du sol, la fertilisation et la rotation des cultures ou la maîtrise des ravageurs et des adventices.

## **F Fertilité du sol**

Terme désignant tous les processus et propriétés minéralogiques, physiques, chimiques et biologiques du sol ayant une influence sur la croissance des végétaux et la production de biomasse.

*Le sol est considéré comme fertile<sup>176</sup> :*

- a. s'il présente, pour sa station, une biocénose biologiquement active, une structure, une succession et une épaisseur typiques et qu'il dispose d'une capacité de décomposition intacte;*
- b. s'il permet aux plantes et aux associations végétales naturelles ou cultivées de croître et de se développer normalement et ne nuit pas à leurs propriétés;*
- c. si les fourrages et les denrées végétales qu'il fournit sont de bonne qualité et ne menacent pas la santé de l'homme et des animaux;*
- d. si son ingestion ou inhalation ne menace pas la santé de l'homme et des animaux.*

## **Fonctions du sol**

Tâches que les sols remplissent pour l'écosystème et la société humaine. Les fonctions du sol sont, contrairement aux services écosystémiques, (†) les fonctions qu'un sol remplit pour le bien-être humain sans relation directe avec la valeur du sol.

### Fonctions naturelles

- *Moyen d'existence et espace vital pour les êtres humains, animaux, plantes et organismes du sol*
- *Elément de l'écosystème, notamment pour ses cycles de l'eau et des éléments nutritifs*
- *Milieu de décomposition, de régulation et production de substances en raison de ses propriétés de filtre, de tampon et de transformation de matière*

### Fonction d'archivage

- *Archives de l'histoire naturelle et culturelle*

### Fonctions d'utilisation

- *Gisement de matières premières*
- *Aires d'habitation et de récréation*
- *Site de l'exploitation agricole et forestière*
- *Site pour d'autres utilisations économiques et publiques, circulation, approvisionnement et élimination*

## **I Inoculum**

Substance contenant des microorganismes vivants (bactéries, champignons ou archéobactéries), qui est introduite dans le sol pour favoriser certaines fonctionnalités.

### **Intensité de travail du sol**

Niveau de travail mécanique ; par ordre d'intensité décroissante

1. Travail du sol conventionnel (labour profond sur env. 30 cm)
2. Travail du sol stratégique (labour profond ; seulement en cas de retournement d'une prairie artificielle ou de pression accrue des adventices)
3. Travail du sol réduit (travail superficiel du sol sans labour sur env. 5–10 cm)
4. Semis sous litière (procédé de semis sans labour)

### **L Légumineuses**

De la famille botanique des papilionacées qui vivent en symbiose avec des bactéries fixatrices d'azote.

### **M Matière organique du sol**

Ensemble des composés carbonés d'origine biologique dans le sol, appelée aussi humus. La quantité totale de C mesurée le stock de C et est exprimée par unité de surface (t C/ha).

### **P Prestations écologiques requises**

Exigence de base pour l'octroi de paiements directs versés dans l'agriculture conformément à l'ordonnance sur les paiements directs (art. 11 et suiv. OPD ; SR 910.13).

### **Propriétés du sol**

Désignation des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols telles que teneur en humus ou en argile, volume des pores, pH, etc.

### **Pyrolyse**

Fractionnement thermochimique de composés organiques sous haute température (200–900° C) en absence d'oxygène.

### **Q Qualité du sol**

Capacité du sol à remplir ses fonctions dans les écosystèmes<sup>178,179</sup>.

### **R Rotation des cultures**

Succession dans le temps de plantes cultivées sur une surface agricole.

### **S Services écosystémiques (SES)**

Services fournis aux hommes par les écosystèmes ou aspects des écosystèmes utilisés – activement ou passivement – pour le bien-être humain. Le concept de SES encourage la reconnaissance de la valeur du sol pour le bien-être humain et la prise en compte du sol dans les processus décisionnels<sup>11</sup>. À l'inverse, les fonctions du sol sont des fonctions que le sol remplit sans qu'il existe de relation directe entre la valeur du sol et le bien-être humain.<sup>180</sup>

### **Soil Structure Observatory**

Essai au champ de longue durée à l'Agroscope Reckenholz, qui permet d'étudier la régénération du sol après compactage ([www.sso.ethz.ch](http://www.sso.ethz.ch)).



**Sol**

Couche superficielle de l'écorce terrestre qui abrite des êtres vivants, à l'interface entre l'atmosphère, l'hydrosphère, la géosphère et la biosphère. Un échange intensif de substances et d'énergie entre l'air, l'eau et la roche a lieu dans le sol. En tant qu'élément de l'écosystème, le sol occupe une position clé dans les cycles de matières locaux et globaux.

**Succession**

Succession dans le temps de biocénoses au sein d'un biotope.

**T Terre**

Terme désignant la surface terrestre non recouverte d'eau.

**Terre agricole**

Tous les sols et surfaces exploités et utilisés dans le cadre de l'agriculture. Selon la statistique suisse de la superficie sont compris les prés et les terres ouvertes, les pâturages, les plantations fruitières, viticoles et horticoles ainsi que les alpages. Les plus précieuses de ces terres agricoles sont les surfaces d'assolement, c'est-à-dire les meilleures terres cultivables. Elles englobent principalement les terres ouvertes, les prairies artificielles intercalaires et les prairies naturelles arables. Les terres agricoles couvrent un bon tiers du territoire suisse, soit une superficie totale avoisinant 1 500 000 hectares. En leur sein, les surfaces d'assolement représentent environ 444 000 hectares (état : 2017).

(Traduction libre d'après<sup>181</sup>)

**Travail du sol**

Le travail du sol fait partie de l'exploitation du sol et définit les mesures mécaniques qui agissent sur le sol.

**U Utilisation des sols**

Selon la statistique suisse de la superficie, utilisation socio-économique de la superficie et donc en fait utilisation des terres (†).

[[www.bfs.admin.ch](http://www.bfs.admin.ch) → Statistique suisse de la superficie → Nomenclature]

**Utilisation des terres**

Série d'activités visant à produire un ou plusieurs biens ou services, en lien direct avec les sols, c'est-à-dire utilisant ses ressources ou ayant un impact sur lui. Une forme donnée d'utilisation ou d'exploitation du sol peut s'effectuer sur une ou plusieurs surfaces et différents modes d'utilisation peuvent se rencontrer sur une même surface.

Il ne faut pas confondre « utilisation des terres » avec les termes « utilisation du sol » ou « couverture du sol » utilisés par la statistique de la superficie.

(complété d'après<sup>182</sup>)

### Liste des abréviations

C	Carbone
CH <sub>4</sub>	Méthane
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
DOC	Dissolved Organic Carbon, pour carbone organique dissous
LPE	Loi fédérale sur la protection de l'environnement (Loi sur la protection de l'environnement, LPE; SR 814.01)
MOS	Matière organique du sol
N	Azote
N <sub>2</sub>	Azote élémentaire, diazote
N <sub>2</sub> O	Gaz hilarant, protoxyde d'azote
NABO	Observatoire national des sols
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Ammonium
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitrate
NaiS	Gestion durable des forêts de protection <sup>128</sup>
OSol	Ordonnance sur les atteintes portées aux sols (SR 814.12)
P	Phosphore
PER	Prestations écologiques requises
SE	Services écosystémiques
sso	Soil Structure Observatory

## Bibliographie

- 1 Häberli R., Lüscher C., Praplan Chastoney B., Wyss C. (1991) : *L'affaire sol: Pour une utilisation mesurée du sol en Suisse*. Editions Georg, Genève.
- 2 Egli M., Mavris C., Mirabella A., Giaccai D. (2010) : *Soil organic matter formation along a chronosequence in the Morteratsch proglacial area (Upper Engadine, Switzerland)*. *Catena* 82(2), 61–69.
- 3 Bernasconi S.M., Bauder A., Bourdon B., Brunner I., Bünemann E., Christl I., Derungs N., Edwards P., Farinotti D., Frey B., Frossard E., Furrer F., Gierga M., Göransson H., Gueland K., Hagedorn F., Hajdas I., Hindshaw R.S., Ivy-Ochs S., Lemarchand E., Luster J., Magnusson J., Mitchell E.A.D., Olde Venterink H., Plötze M., Reynolds B.C., Smittenberg R.H., Stähli M., Tamburini F., Tipper E.T., Wacker L., Welc M., Wiederhold J.G., Zeyer J., Zimmermann S., Zumsteg A. (2011) : *Chemical and biological gradients along the Damma glacier soil chronosequence (Switzerland)*. *Vadose Zone Journal* 10, 867–883.
- 4 Fitze P. (1987) : *Neue Hypothesen zur Bodenbildung auf Quartärlagerungen der Nordostschweiz*. *Geographica Helvetica* 2, 117–122.
- 5 van der Voort T.S., Hagedorn F., McIntyre C., Zell C., Walthert L., Schleppei P., Feng X., Eglinton T.I. (2016) : *Variability in 14C contents of soil organic matter at the plot and regional scale across climatic and geologic gradients*. *Biogeosciences* 13(11), 3427–3439.
- 6 Dominati E., Patterson M., Mackay A. (2010) : *A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils*. *Ecological Economics* 69(9), 1858–1868.
- 7 Offices fédéraux de l'environnement (OFEV), du développement territorial (ARE) et de l'agriculture (OFAG) (2016) : *Projet de stratégie nationale pour la gestion durable du sol (document interne)*.
- 8 Auerswald K. (1988) : *Bodenerosion durch Wasser*. Richter G. (Ed.; 1988) : *Bodenerosion – Analyse und Bilanz eines Umweltproblems*, 33–50. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- 9 Keller T., Ruiz S., Stettler M., Berli M. (2016) : *Determining Soil Stress beneath a Tire: Measurements and Simulations*. *Soil Science Society of America Journal* 80(3), 541–553.
- 10 Wüst-Galley C., Grünig A., Leifeld J. (2015) : *Locating Organic Soils for the Swiss Greenhouse Gas Inventory Authors*. *Agroscope Science* 26.
- 11 Schnabel U., Tietje, O., Scholz, R.W. (2004) : *Uncertainty Assessment for Management of Soil Contaminants with Sparse Data*. *Environmental Management* 33(6), 911–925.
- 12 Fässler E., Robinson B.H., Stauffer W., Gupta S.K., Papritz A., Schulin R. (2010) : *Phytomanagement of metal-contaminated agricultural land using sunflower, maize and tobacco*. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 136(1), 49–58.
- 13 Doppler T., Mangold S., Wittmer I., Spycher S., Comte R., Stamm C., Singer H., Junghans M. (2017) : *Hohe PSM-Belastung in Schweizer Bächen*. *Aqua & Gas* 4, 46–56.
- 14 Schleppei P., Curtaz F., Krause K. (2017) : *Nitrate leaching from a sub-alpine coniferous forest subjected to experimentally increased N deposition for 20 years, and effects of tree girdling and felling*. *Biogeochemistry* 134(3), 319–335.
- 15 Waldner P., Braun S., Kurz D., Thimonier A. (2016) : *Flux d'éléments nutritifs – les cas de l'azote et des cations basiques*. Pluess A.R., Augustin S., Brang P. (Eds.) : *Forêts et changements climatiques. Eléments pour des stratégies d'adaptation*. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne; Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (wsl), Birmensdorf, Haupt, Berne, Stuttgart, Vienne, 63–76.
- 16 Schmidt M.W.I., Torn M.S., Abiven S., Dittmar T., Guggenberger G., Janssens I.A., Trumbore S.E. (2011) : *Persistence of soil organic matter as an ecosystem property*. *Nature* 478(7367), 49–56.
- 17 Rasse D.P., Rumpel C., Dignac M.-F. (2005) : *Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation*. *Plant and Soil* 269(1–2), 341–356.
- 18 Lehmann J., Kleber M. (2015) : *The contentious nature of soil organic matter*. *Nature* 528(7580), 60–68.
- 19 Miltner A., Bombach P., Schmidt-Brücken B., Kästner M. (2012) : *SOM genesis: microbial biomass as a significant source*. *Biogeochemistry* 111, 41–55.
- 20 Gosheva S., Walthert L., Niklaus P.A., Zimmermann S., Gimmi U., Hagedorn F. (2017) : *Reconstruction of Historic Forest Cover Changes Indicates Minor Effects on Carbon Stocks in Swiss Forest Soils*. *Ecosystems* 20(8), 1512–1528. doi:10.1007/s10021-017-0129-9.

- 21 Leifeld J., Fuhrer J. (2009) : *Long-term management effects on soil organic matter in two cold, high-elevation grasslands: Clues from fractionation and radiocarbon dating*. European Journal of Soil Science 60(2), 230–239.
- 22 Ammann C., Spirig C., Leifeld J., Neftel A. (2009) : *Assessment of the nitrogen and carbon budget of two managed temperate grassland fields*. Agriculture, Ecosystems & Environment 133(3–4), 150–162.
- 23 Guelland K., Hagedorn F., Smittenberg R., Göransson H., Bernasconi S., Hajdas I., Kretzschmar R. (2013) : *Evolution of carbon fluxes during initial soil formation along the forefield of Damma glacier, Switzerland*. Biogeochemistry 113(1–3), 545–561.
- 24 Thürig E., Hagedorn F., Lindroth A. (2013) : *Influence of storm damage on the forest carbon balance Chapter 3.1*. Gardiner B., Schuck A., Schelhaas M.-J., Orazio C., Blennow K., Nicoll B. (Eds.) : What science can tell us, no. 3: Living with storm damage to forests, 47–54. European Forest Institute, Joensuu.
- 25 Bardgett R.D., van der Putten W.H. (2014) : *Belowground biodiversity and ecosystem functioning*. Nature 515 (7528), 505–511.
- 26 Hartmann M., Frey B., Mayer J., Mader P., Widmer F. (2015) : *Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming*. The ISME Journal 9, 1177–1194.
- 27 Hartmann M., Brunner I., Hagedorn F., Bardgett R.D., Stierli B., Herzog C., Chen X., Zingg A., Graf-Pannatier E., Rigling A., Frey B. (2017) : *A decade of irrigation transforms the soil microbiome of a semi-arid pine forest*. Molecular Ecology 26(4), 1190–1206.
- 28 Rupflin C. (2013) : *Effect of irrigation on soil biodiversity in the Pfyn forest, Valais, Switzerland*. Masterarbeit ETH Zürich, Umweltnaturwissenschaften.
- 29 Nussbaum M., Papritz A., Baltensweiler A., Walthert L. (2014) : *Estimating soil organic carbon stocks of Swiss forest soils by robust external-drift kriging*. Geoscientific Model Development 7(3), 1197–1210.
- 30 Gubler A., Schwab P., Wächter D., Meuli R.G., Keller A. (2015) : *Observatoire national des sols (NABO) 1985 à 2009. Etat et évolution des polluants inorganiques et des paramètres associés aux sols*. État de l'environnement 1507. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne.
- 31 Schlesinger W.H. (1990) : *Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils*. Nature 348, 232–234.
- 32 Etzold S., Ruehr N.K., Zweifel R., Dobbertin M., Zingg A., Pluess P., Häslar R., Eugster W., Buchmann N. (2011) : *The Carbon Balance of Two Contrasting Mountain Forest Ecosystems in Switzerland: Similar Annual Trends, but Seasonal Differences*. Ecosystems 14(8), 1289–1309.
- 33 Oberholzer H.R., Leifeld J., Mayer J. (2014) : *Changes in soil carbon and crop yield over 60 years in the Zurich Organic Fertilization Experiment, following land-use change from grassland to cropland*. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 177(5), 696–704.
- 34 Gattinger A., Müller A., Haeni M., Skinner C., Fliessbach A., Buchmann N., Mäder P., Stolze M., Smith P., Scialabba N.E.-H., Niggli U. (2012) : *Enhanced top soil carbon stocks under organic farming*. Proceedings of the National Academy of Sciences 109(44), 18226–18231.
- 35 Leifeld J., Reiser R., Oberholzer H. (2009) : *Consequences of Conventional versus Organic farming on Soil Carbon: Results from a 27-Year Field Experiment*. Agronomy Journal 101, 1204–1218.
- 36 Poeplau C., Don A., Vesterdal L., Leifeld J., Van Wesemael B., Schumacher J., Gensior A. (2011) : *Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone – carbon response functions as a model approach*. Global Change Biology 17(7), 2415–2427.
- 37 Fliessbach A., Oberholzer H.R., Gunst L., Mäder P. (2007) : *Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming*. Agriculture, Ecosystems & Environment 118, 273–284.
- 38 Brändli U.B. (Ed.) (2010) : *Inventaire forestier national suisse. Résultats du troisième inventaire 2004–2006*. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). Berne, Office fédéral de l'environnement, (OFEV).
- 39 Hiltbrunner D., Zimmermann S., Hagedorn F. (2013) : *Afforestation with Norway spruce on a subalpine pasture alters carbon dynamics but only moderately affects soil carbon storage*. Biogeochemistry 115, 251–266.
- 40 ProClim (2016) : *Coup de projecteur sur le climat suisse: Etat des lieux et perspectives*. Swiss Academies Reports 11(5), 34–45. Académies suisses des sciences.

- 41 Melillo J.M., Steudler P.A., Aber J.D., Newkirk K., Lux H., Bowles F.P., Catricala C., Magill A., Ahrens T., Morrisseau S. (2002) : *Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system*. *Science* 298, 2173–2176.
- 42 Hagedorn F., Martin M., Rixen C., Rusch S., Bebi P., Zürcher A., Hättenschwiler S. (2010) : *Short-term responses of ecosystem carbon fluxes to experimental soil warming at the Swiss alpine treeline*. *Biogeochemistry* 97(1), 7–19.
- 43 Frank D., Reichstein M., Bahn M., Thonicke K., Frank D., Mahecha M.D., Smith P., van der Velde M., Vicca S., Babst F., Beer C., Buchmann N., Canadell J.G., Ciais P., Cramer W., Ibrom A., Miglietta F., Poulter B., Rammig A., Seneviratne S.I., Walz A., Wattenbach M., Zavala M.A., Zscheischler J. (2015) : *Effects of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: concepts, processes and potential future impacts*. *Global Change Biology* 21, 2861–2880.
- 44 Conant R.C., Ryan M.G., Ågren G.L., Birge H.E., Davidson E.A., Eliasson P.E., Evans S.E., Frey S.D., Giardina C.P., Hopkins F.M., Hyvönen R., Kirschbaum M.U.F., Lavallee J.M., Leifeld J., Parton W.J., Steinweg J.M., Wallenstein M.D., Martin Wetterstedt J.Å., Bradford M.A. (2011) : *Temperature and soil organic matter decomposition rates – synthesis of current knowledge and a way forward*. *Global Change Biology* 17(11), 3392–3404.
- 45 Crowther T.W., Todd-Brown K.E.O., Rowe C.W., Wieder W.R., Carey J.C., Machmuller M.B., Snoek B.L., Fang S., Zhou G., Allison S.D., Blair J.M., Bridgman S.D., Burton A.J., Carrillo Y., Reich P.B., Clark J.S., Classen A.T., Dijkstra F.A., Elberling B., Emmett B.A., Estiarte M., Frey S.D., Guo J., Harte J., Jiang L., Johnson B.R., Kröel-Dulay G., Larsen K.S., Laudon H., Lavallee J.M., Luo Y., Lupascu M., Ma L.N., Marhan S., Michelsen A., Mohan J., Niu S., Pendall E., Peñuelas J., Pfeifer-Meister L., Poll C., Reinsch S., Reynolds L.L., Schmidt I.K., Sistla S., Sokol N.W., Templer P.H., Treseder K.K., Welker J.M., Bradford M.A. (2016) : *Quantifying global soil carbon losses in response to warming*. *Nature* 540(7631), 104–108.
- 46 Hagedorn F., Joos O. (2014) : *Experimental summer drought reduces soil CO<sub>2</sub> effluxes and doc leaching in Swiss grassland soils along an elevational gradient*. *Biogeochemistry* 117(2–3), 395–412.
- 47 Manzoni S., Schimel J.P., Porporato A. (2012) : *Responses of soil microbial communities to water stress: results from a meta-analysis*. *Ecology* 93, 930–938.
- 48 Ruehr N.K., Knohl A., Buchmann N. (2010) : *Environmental variables control on soil respiration on diurnal, seasonal and annual time-scales in a mixed mountain forest in Switzerland*. *Biogeochemistry* 98, 153–170.
- 49 Hagedorn F., Joseph J., Luster J., Peter M., Pritsch K., Geppert U., Kerner R., Molinier V., Egli S., Schaub M., Liu J.-F., Li M., Weiler M., Siegwolf R., Gessler A., Arend M. (2016) : *Recovery of trees from drought depends on belowground sink control*. *Nature Plants* 2, 16111.
- 50 Gilgen A., Signarbieux C., Feller U., Buchmann N. (2010) : *Competitive advantage of Rumex obtusifolius L. might increase in intensively managed temperate grasslands under drier climate*. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 135(1), 15–23.
- 51 Prietzel J., Zimmermann L., Schubert A., Christophel D. (2016) : *Organic matter losses in German Alps forest soils since the 1970s most likely caused by warming*. *Nature Geoscience* 9, 543–548.
- 52 Manusch C., Bugmann H., Wolf A. (2014) : *The impact of climate change and its uncertainty on carbon storage in Switzerland*. *Regional Environmental Change* 14(4), 1437–1450.
- 53 Wüst-Galley C., Mössinger E., Leifeld J. (2016) : *Loss of the soil carbon storage function of drained forested peatlands*. *Mires and Peat* 8, 1–22.
- 54 Leifeld J., Bassin S., Fuhrer J. (2005) : *Carbon stocks in Swiss agricultural soils predicted by land-use, soil characteristics, and altitude*. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 105 (1–2), 255–266.
- 55 Walker T.N., Garnett M.H., Ward S.E., Oakley S., Bardgett R.D., Ostle N.J. (2016) : *Vascular plants promote ancient peatland carbon loss with climate warming*. *Global Change Biology* 22, 1880–1889.
- 56 Bragazza L., Parisod J., Buttler A., Bardgett R.D. (2012) : *Biogeochemical plant-soil microbe feedback in response to climate warming in peatlands*. *Nature Climate Change*, 1–5.
- 57 Bader C., Müller M., Schulin R., Leifeld J. (2017) : *Peat decomposability in managed organic soils in relation to land-use, organic matter composition and temperature*. *Biogeosciences Discussions*. <https://doi.org/10.5194/bg-2017-187>
- 58 Bader C., Müller M., Schulin R., Leifeld J. (2017) : *Amount and stability of recent and aged plant residues in degrading peatland soils*. *Soil Biology and Biochemistry* 109, 167–175.

- 59 Capriel P. (2010) : *Standortabhängige Humusgehalte von Ackerböden in Bayern*. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 5/2010.
- 60 Hartmann M., Brunner I., Hagedorn F., Bardgett R.D., Stierli B., Herzog C., Chen X., Zingg A., Graf-Pannatier E., Rigling A., Frey B. (2017) : *A decade of irrigation transforms the soil microbiome of a semi-arid pine forest*. *Molecular Ecology* 26(4), 1190–1206.
- 61 Dalal R.C., Allen D.E. (2008) : *Greenhouse gas fluxes from natural ecosystems*. *Australian Journal of Botany* 56(5), 369–407.
- 62 Waldner P., Braun S., Kurz D., Thimonier A. (2016) : *Flux d'éléments nutritifs – les cas de l'azote et des cations basiques*. Pluess A.R., Augustin S., Brang P. (Eds.) : *Forêts et changements climatiques. Eléments pour des stratégies d'adaptation*. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne ; Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (wsl), Birmensdorf, Haupt, Berne, Stuttgart, Vienne, 63–76.
- 63 Decrem M., Spiess E., Richner W., Herzog F. (2007) : *Impact of Swiss agricultural policies on nitrate leaching from arable land*. *Agronomy for Sustainable Development* 27 (3), 243–253.
- 64 Lüscher A., Mueller-Harvey I., Soussana J.F., Rees R.M., Peyraud J.L. (2014) : *Potential of legume-based grassland-livestock systems in Europe: a review*. *Grass and Forage Science* 69(2), 206–228.
- 65 Oberson A., Frossard E., Bühlmann C., Mayer J., Mäder P., Lüscher A. (2013) : *Nitrogen fixation and transfer in grass-clover leys under organic and conventional cropping systems*. *Plant and Soil* 371(1), 237–255.
- 66 Thompson R.B., Meisinger J.J. (2002) : *Management factors affecting ammonia volatilization from land-applied cattle slurry in the Mid-Atlantic USA*. *Journal of Environmental Quality* 31(4), 1329–1338.
- 67 Montes F., Meinen R., Dell C., Rotz A., Hristov A.N., Oh J., Waghorn G., Gerber P.J., Henderson B., Makkar H.P.S., Dijkstra J. (2013) : *SPECIAL TOPICS – Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: II. A review of manure management mitigation options*. *Journal of Animal Science* 91(11), 5070–5094.
- 68 Meteotest (im Auftrag von EMPA, BAFU ; 2017) : *Lachgas-Emissionskataster Schweiz. Aufbereitung von Datengrundlagen, Berechnung des Katasters*.
- 69 Imer D., Merbold L., Eugster W., Buchmann N. (2013) : *Temporal and spatial variations of soil CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes at three differently managed grasslands*. *Biogeosciences* 10(9), 5931–5945.
- 70 Merbold L., Eugster W., Stieger J., Zahniser M., Nelson D., Buchmann N. (2014) : *Greenhouse gas budget (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O) of intensively managed grassland following restoration*. *Global Change Biology* 20, 1913–1928.
- 71 Shcherbak I., Millar N., Robertson G.P. (2014) : *Global metaanalysis of the nonlinear response of soil nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions to fertilizer nitrogen*. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111(25), 9199–9204.
- 72 Rockstrom J., Steffen W., Noone K., Persson A., Chapin F.S., Lambin E.F., Lenton T.M., Scheffer M., Folke C., Schellnhuber H.J., Nykvist B., de Wit C.A., Hughes T., van der Leeuw S., Rodhe H., Sorlin S., Snyder P.K., Costanza R., Svedin U., Falkenmark M., Karlberg L., Corell R.W., Fabry V.J., Hansen J., Walker B., Liverman D., Richardson K., Crutzen P., Foley J.A. (2009) : *A safe operating space for humanity*. *Nature* 461, 472–475.
- 73 Hiller R.V., Bretscher D., DelSontro T., Diem T., Eugster W., Henneberger R., Hobi S., Hodson E., Imer D., Kreuzer M., Künzle T., Merbold L., Niklaus P.A., Rihm B., Schellenberger A., Schroth M.H., Schubert C.J., Siegrist H., Stieger J., Buchmann N., Brunner D. (2014) : *Anthropogenic and natural methane fluxes in Switzerland synthesized within a spatially explicit inventory*. *Biogeosciences* 11(7), 1941–1959.
- 74 Office fédéral de l'environnement (OFEV ; 2015) : *Inventaire des émissions de gaz à effet de serre 1990–2015*. Berne.
- 75 Karki S., Elsgaard L., Kande, T.P., Lærke P.E. (2016) : *Carbon balance of rewetted and drained peat soils used for biomass production: a mesocosm study*. *GCB Bioenergy* 8(5), 969–980.
- 76 Regina K., Sheehy J., Myllys M. (2015) : *Mitigating greenhouse gas fluxes from cultivated organic soils with raised water table*. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 20(8), 1529–1544.
- 77 Freibauer A., Drösler M., Gensior A., Schulze E.-D. (2009) : *Das Potenzial von Wäldern und Mooren für den Klimaschutz in Deutschland und auf globaler Ebene*. *Natur und Landschaft* 84, 20–25.
- 78 Skinner C., Gattinger A., Muller A., Mäder P., Fliessbach A., Stolze M., Ruser R., Niggli U. (2014) : *Greenhouse gas fluxes from agricultural soils under organic and non-organic management – A global meta-analysis*. *Science of The Total Environment* 468–469, 553–563.

- 79 IPCC (2013): *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Eds.: Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M.M.B., Allen S.K., Boschung J., Midgley P.M., Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press.
- 80 Krauss M., Krause H.-M., Spangler S., Kandeler E., Behrens S., Kappler A., Mäder P., Gattinger A. (2016): *Tillage system affects fertilizer-induced nitrous oxide emissions*. *Biology and Fertility of Soils* 53(1), 49–59.
- 81 Harter J., Guzman-Bustamante I., Kuehfuss S., Ruser R., Well R., Spott O., Kappler A., Behrens S. (2016): *Gas entrapment and microbial N<sub>2</sub>O reduction reduce N<sub>2</sub>O emissions from a biochar-amended sandy clay loam soil*. *Scientific Reports* 6, 39574.
- 82 Venterea R.T., Halvorson A.D., Kitchen N., Liebig M.A., Cavigelli M.A., Grosso S.J.D., Motavalli P.P., Nelson K.A., Spokas K.A., Singh B.P., Stewart C.E., Ranaivoson A., Strock J., Collins H. (2012): *Challenges and opportunities for mitigating nitrous oxide emissions from fertilized cropping systems*. *Frontiers in Ecology and the Environment* 10(10), 562–570.
- 83 Küstermann B., Munch J.C., Hülsbergen K.-J. (2013): *Effects of soil tillage and fertilization on resource efficiency and greenhouse gas emissions in a long-term field experiment in Southern Germany*. *European Journal of Agronomy* 49, 61–73.
- 84 Fernandez F.G., Venterea R.T., Fabrizzi K.P. (2016): *Corn Nitrogen Management Influences Nitrous Oxide Emissions in Drained and Undrained Soils*. *Journal of Environmental Quality* 45(6), 1847–1855.
- 85 Krauss M., Ruser R., Müller T., Hansen S., Mäder P., Gattinger A. (2017): *Impact of reduced tillage on greenhouse gas emissions and soil carbon stocks in an organic grass-clover ley – winter wheat cropping sequence*. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 239, 324–333.
- 86 Krause H.-M., Thonar C., Eschenbach W., Well R., Mäder P., Behrens S., Kappler A., Gattinger A. (2017): *Long term farming systems affect soils potential for N<sub>2</sub>O production and reduction processes under denitrifying conditions*. *Soil Biology and Biochemistry* 114, 31–41.
- 87 Senbayram M., Chen R., Budai A., Bakken L., Dittert K. (2012): *N<sub>2</sub>O emission and the N<sub>2</sub>O/(N<sub>2</sub>O+N<sub>2</sub>) product ratio of denitrification as controlled by available carbon substrates and nitrate concentrations*. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 147, 4–12.
- 88 Flessa H., Müller D., Plassmann K., Osterburg B., Techen A.-K., Nitsch H., Nieberg H., Sanders J., Meyer zu Hartlage O., Beckmann E., Anspach V. (2012): *Studie zur Vorbereitung einer effizienten und gut abgestimmten Klimaschutzpolitik für den Agrarsektor*. *Landbauforschung, Sonderheft* 361, Braunschweig.
- 89 Ruser R., Schulz R. (2015): *The effect of nitrification inhibitors on the nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) release from agricultural soils – a review*. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 178(2), 171–188.
- 90 Pfab H., Palmer I., Buegger F., Fiedler S., Müller T., Ruser R. (2012): *Influence of a nitrification inhibitor and of placed N-fertilization on N<sub>2</sub>O fluxes from a vegetable cropped loamy soil*. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 150, 91–101.
- 91 Weiske A., Benckiser G., Herbert T., Ottow J. (2001): *Influence of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) in comparison to dicyandiamide (DCD) on nitrous oxide emissions, carbon dioxide fluxes and methane oxidation during 3 years of repeated application in field experiments*. *Biology and Fertility of Soils* 34(2), 109–117.
- 92 Scheer C., Rowlings D., Firrell M., Deuter P., Morris S., Riches D., Porter I., Grace P. (2017): *Nitrification inhibitors can increase post-harvest nitrous oxide emissions in an intensive vegetable production system*. *Scientific Reports* 7, 43677.
- 93 Woolf D., Amonette J.E., Street-Perrott F.A., Lehmann J., Joseph S. (2010): *Sustainable biochar to mitigate global climate change*. *Nature Communications* 1(5), 1–9.
- 94 Mandal S., Sarkar B., Bolan N., Novak J., Ok Y.S., Van Zwieten L., Singh B.P., Kirkham M.B., Choppala G., Spokas K., Naidu R. (2016): *Designing advanced biochar products for maximizing greenhouse gas mitigation potential*. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 46(17), 1367–1401.
- 95 Singh N., Abiven S., Maestrini B., Bird J.A., Torn M.S., Schmidt M.W.I. (2014): *Transformation and stabilization of pyrogenic organic matter in a temperate forest field experiment*. *Global Change Biology* 20(5), 1629–1642.
- 96 Hüppi R., Felber R., Neftel A., Six J., Leifeld J. (2015): *Effect of biochar and liming on soil nitrous oxide emissions from a temperate maize cropping system*. *SOIL* 1(2), 707–717.
- 97 Cayuela M.L., Sánchez-Monedero M.A., Roig A., Hanley K., Enders A., Lehmann J. (2013a): *Biochar and denitrification in soils: when, how much and why does biochar reduce N<sub>2</sub>O emissions?* *Scientific Reports* 3, 1732.

- 98 Cayuela M.L., van Zwieten L., Singh B.P., Jeffery S., Roig A., Sánchez-Monedero M.A. (2013b) : *Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis*. Agriculture, Ecosystems & Environment 191, 5–16.
- 99 Luo Z.K., Wang E.L., Sun O.J. (2010) : *Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments*. Agriculture, Ecosystems & Environment 139(1–2), 224–231.
- 100 van Kessel C., Venterea R., Six J., Adviento-Borbe M.A., Linquist B., van Groenigen K.J. (2013) : *Climate, duration, and N placement determine N<sub>2</sub>O emissions in reduced tillage systems: a meta-analysis*. Global Change Biology 19(1), 33–44.
- 101 Powlson D.S., Stirling C.M., Jat M., Gerard B.G., Palm C.A., Sanchez P.A., Cassman K.G. (2014) : *Limited potential of no-till agriculture for climate change mitigation*. Nature Climate Change 4(8), 678–683.
- 102 Liu B., Frostegård Å., Bakken L.R. (2014) : *Impaired Reduction of N<sub>2</sub>O to N<sub>2</sub> in Acid Soils Is Due to a Posttranscriptional Interference with the Expression of nosZ*. MBio 5(3), e01383–14.
- 103 Paradelo R., Virto I., Chenu C. (2015) : *Net effect of liming on soil organic carbon stocks: A review*. Agriculture, Ecosystems & Environment 202, 98–107.
- 104 Mosimann T., Maillard A., Musy A., Neyroud J.-A., Rüttimann M., Weisskopf P. (1991) : *Lutte contre l'érosion des sols cultivés: Mécanismes et causes de l'érosion des sols, Objectif de la conservation des sols, Estimation du risque d'érosion, Mesures de protection à l'échelle d'une exploitation agricole et d'un bassin versant. Guide pour la conservation des sols*. Rapport thématique du Programme national de recherche « Utilisation du sol en Suisse » (PNR 22).
- 105 Keller T., Colombi T., Ruiz S., Manalili M.P., Rek J., Stadelmann V., Wunderli H., Breitenstein D., Reiser R., Oberholzer H., Schymanski S., Romero-Ruiz A., Linde N., Weisskopf P., Walter A., Or D. (2017) : *Long-Term Soil Structure Observatory for Monitoring Post-Compaction Evolution of Soil Structure*. Vadose Zone Journal 16(4), doi:10.2136/vzj2016.11.0118.
- 106 Mohn J., Schürmann A., Hagedorn F., Schleppei P., Bachofen R. (2000) : *Increased rates of denitrification in nitrogen-treated forest soils*. Forest Ecology and Management 137(1), 113–119.
- 107 Larink O., Werner D., Langmaack M., Schrader S. (2001) : *Regeneration of compacted soil aggregates by earthworm activity*. Biology and Fertility of Soils 33(5), 395–401.
- 108 Lal R. (2003) : *Soil erosion and the global carbon budget*. Environment international 29(4), 437–450.
- 109 Grêt-Regamey A., Kool S., Bühlmann L., Kissling S. (2018) : *Un agenda du sol pour l'aménagement du territoire*. Synthèse thématique ST3 dans le cadre du Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68), Berne.
- 110 Meusburger K., Alewell C. (2014) : *Soil Erosion in the Alps. Experience gained from case studies (2006–2013)*. Federal Office for the Environment, Bern. Environmental studies no. 1408.
- 111 Meusburger K., Alewell C. (2008) : *Impacts of anthropogenic and environmental factors on the occurrence of shallow landslides in an alpine catchment (Urseren Valley, Switzerland)*. Natural Hazards and Earth System Sciences 8(3), 509–520.
- 112 Prasuhn V., Liniger H., Gisler S., Herweg K., Candinas A., Clément J.-P. (2013) : *A high-resolution soil erosion risk map of Switzerland as strategic policy support system*. Land Use Policy 32, 281–291.
- 113 Flückiger R., Rösch J., Sturny W., Vökt U. (2003) : *Bodenkunde; Allgemeiner Pflanzenbau, Teil I*. Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale, Zollikofen.
- 114 Wischmeier W.H., Smith D.D. (1960) : *A universal soil-loss equation to guide conservation farm planning*. Transactions 7<sup>th</sup> International Congress of Soil Science 1, 418–425.
- 115 Lüscher P., Frutig F., Sciacca S., Spjevak S., Thees O. (2010) : *Physikalischer Bodenschutz im Wald. Bodenschutz beim Einsatz von Forstmaschinen*. wsl-Merkblatt für die Praxis 45.
- 116 Lüscher P., Frutig F., Thees O. (2016) : *La protection des sols en forêt contre les atteintes physiques. La gestion forestière entre les impératifs de rentabilité et la préservation des propriétés physiques du sol*. Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne. Connaissance de l'environnement 1607.
- 117 Keller T., Berli M., Ruiz S., Lamandé M., Arvidsson J., Schjønning P., Selvadurai A.P.S. (2014) : *Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: Comparing measurements with simulations*. Soil and Tillage Research 140, 106–117.



- 118 Hiltbrunner D., Schulze S., Hagedorn F., Schmidt M.W.I., Zimmermann S. (2012): *Cattle trampling alters soil properties and changes soil microbial communities in a Swiss sub-alpine pasture*. *Geoderma* 170, 369–377.
- 119 Sommer C. (1985): *Ursachen und Folgen von Bodenverdichtungen sowie Möglichkeiten zu ihrer Verminderung*. *Landtechnik* 40(9), 378–384.
- 120 Ball B.C., Bingham I., Rees R.M., Watson C.A., Litterick A. (2005): *The role of crop rotations in determining soil structure and crop growth conditions*. *Canadian Journal of Soil Science* 85(5), 557–577.
- 121 Powlson D.S., Gregory P.J., Whalley W.R., Quinton J.N., Hopkins D.W., Whitmore A.P., Hirsch P.R., Goulding K.W.T. (2011): *Soil management in relation to sustainable agriculture and ecosystem services*. *Food Policy* 36 (Supplement 1), S72–S87.
- 122 Troxler J., Chatelain C., Schwery M. (2004): *Technical and economical evaluation of grazing systems for high altitude sheep pastures in Switzerland*. Land use systems in grassland dominated regions. Proceedings of the 20<sup>th</sup> General Meeting of the European Grassland Federation, Luzern, Switzerland, 21–24 June 2004, 590–592. vdf Hochschulverlag AG, Zürich.
- 123 Gisler S., Liniger H.P., Prasuhn V. (2010): *Technisch-wissenschaftlicher Bericht zur Erosionsrisikokarte der landwirtschaftlichen Nutzfläche der Schweiz im 2x2-Meter-Raster (ERK2)*. CDE Universität Bern und ART Zürich-Reckenholz.
- 124 Frehner M., Wasser B., Schwitter R. (2005): *Gestion durable des forêts de protection. Soins sylvicoles et contrôle des résultats: instructions pratiques*. Office fédéral de l'environnement (OFEV), L'environnement pratique 7005, Berne.
- 125 Graf F., Bebi P., Braschler U., De Cesare G., Frei M., Greminger P., Grunder K., Hählen N., Rickli C., Rixen C., Sandri A., Springman S.M., Thormann J.-J., von Albertini N., Yildiz A. (2017): *Pflanzenwirkungen zum Schutz vor flachgründigen Rutschungen*. wsl-Berichte, 56.
- 126 Rickli C., Raetzo H., MacArdell B., Presler J. (2008): *Hangstabilitäten*. Bezzola G.R., Hegg C. (Eds.): Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen, 97–116. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Berne, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (wsl), Birmensdorf.
- 127 Graf F., Frei M., Böll A. (2009): *Effects of vegetation on the angle of internal friction of a moraine*. *Forest Snow and Landscape Research* 82(1), 61–77.
- 128 Yildiz A., Askarinejad A., Graf F., Rickli C., Springman S. (2015): *Effects of roots and mycorrhizal fungi on the stability of slopes*. Proceedings of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development. Edinburgh.
- 129 Malin R., Rixen C. (2016): *Vegetation, Oberflächenerosion und Aggregatstabilität auf alpinen Weiden*. *Ingenieurbiologie* 3, 20–24.
- 130 Presler J., Carizzoni M., Widmer D. (2013): *Gemeinsame Bodenüberwachung der Zentralschweizer Kantone*.
- 131 von Rohr G., Margreth S., Hauert C. (2013): *Bodeninformationen für die Waldwirtschaft im Kanton Solothurn*. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (wsl; Ed.): Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. wsl-Bericht 6, 103–106.
- 132 Häusler S., Salm C. (2001): *Construire en préservant les sols*. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Guide de l'environnement 10, Berne.
- 133 Bellini E. (2015): *Sols et constructions*. Etat de la technique et des pratiques. Office fédéral de l'environnement (OFEV). Connaissance de l'environnement 1508, Berne.
- 134 Morrier A. (2012): *Umsetzung des Bodenschutzes im Aargauer Wald*. Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (wsl) (Ed.): Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. wsl-Bericht 6, 29–30.
- 135 [www.terranimmo.ch](http://www.terranimmo.ch)
- 136 Keller T. (2005): *A Model for the Prediction of the Contact Area and the Distribution of Vertical Stress below Agricultural Tyres from Readily Available Tyre Parameters*. *Biosystems Engineering* 92(1), 85–96.
- 137 Colombi T., Braun S., Keller T., Walter A. (2017): *Artificial macropores attract crop roots and enhance plant productivity on compacted soils*. *Science of The Total Environment* 574, 1283–1293.
- 138 Colombi T., Walter A. (2016): *Root responses of triticale and soybean to soil compaction in the field are reproducible under controlled conditions*. *Functional Plant Biology* 43(2), 114–128.
- 139 Colombi T., Walter A. (2017): *Genetic Diversity under Soil Compaction in Wheat: Root Number as a Promising Trait for Early Plant Vigor*. *Frontiers in Plant Science* 8, 420.

- 140 Ruiz S., Or D., Schymanski S.J. (2015) : *Soil Penetration by Earthworms and Plant Roots –*  
 141 *Mechanical Energetics of Bioturbation of Compacted Soils*. Plos One 10(6), e0128914.
- 142 Zhouà J., Jiang X., Zhou B., Zhao B., Ma M., Guan D., Li J., Chen S., Cao F., Shen D.,  
 143 Qin J. (2016) : *Thirty-four years of nitrogen fertilization decreases fungal diversity and*  
 144 *alters fungal community composition in black soil in northeast China*. Soil Biology &  
 145 Biochemistry 95, 135–143.
- 146 Graf F., Frei M. (2013) : *Soil aggregate stability related to soil density, root length, and my-*  
 147 *corrhiza using site-specific Alnus incana and Melanogaster variegatus s.l.* Ecological  
 148 Engineering 57, 314–323.
- 149 Graf F., Gerber W. (1997) : *Der Einfluss von Mykorrhizapilzen auf die Bodenstruktur*  
 150 *und deren Bedeutung für den Lebendverbau*. Journal forestier suisse 11, 863–886.
- 151 Standortsspezifische Mykorrhiza-Arten (Ektomykorrhiza): Hebeloma crustuliniforme,  
 152 Laccaria bicolor, Laccaria montana, Melanogaster variegatus.
- 153 Bast A., Wilcke W., Graf F., Lüscher P., Gärtner H. (2016) : *Does mycorrhizal inoculation*  
 154 *improve plant survival, aggregate stability, and fine root development on a coarse-grained*  
 155 *soil in an alpine eco-engineering field experiment ?* Journal of Geophysical Research :  
 156 Biogeosciences 121(8), 2158–2171.
- 157 <https://inoq.de/produkte-service/mykorrhiza-produkte/inoq-forst>.
- 158 Schnug E., Rogasik J., Panten K., Paulsen H.M., Haneklaus S. (2004) : *Ökologischer*  
 159 *Landbau erhöht die Versickerungsleistung von Böden – ein unverzichtbarer Beitrag zum*  
 160 *vorbeugenden Hochwasserschutz*. Ökologie Landbau 32(132), 53–55.
- 161 Schnug E., Haneklaus S., Rahmann G., Walker R. (2006) : *Organic farming – stewardship*  
 162 *for food security, food quality, environment and nature conservation*. Aspects of Applied  
 163 Biology 79, 57–61.
- 164 Graf F., te Kamp L., Auer M., Acharya M.S., Wu W. (2015) : *Soil Aggregate Stability in*  
 165 *Eco-engineering: Comparison of Field and Laboratory Data with an Outlook on a New*  
 166 *Modelling Approach*. Wu W. (Ed.) : Recent Advances in Modeling Landslides and  
 167 Debris Flows, 29–47. Springer International Publishing, Cham.
- 168 Lorenzen A., Burnison K., Servos M., Topp E. (2006) : *Persistence of endocrine-disrupting*  
 169 *chemicals in agricultural soil*. Journal of Environmental Engineering Science 5, 211–219.
- 170 Ying G.-G., Kookana R.-S. (2005) : *Sorption and degradation of estragon-like-endocrine*  
 171 *disrupting chemicals in soil*. Environmental Toxicology and Chemistry 24, 2640–2645.
- 172 Lee W.-M., Kim S.-W., Kwak J.-I., Nam S.-H., Shin Y.J., An Y.-J. (2010) : *Research Trends*  
 173 *of ecotoxicity of nanoparticles in soil environment*.
- 174 Jechlake S., Heuer H., Siemens J., Amelung W., Smalla K. (2014) : *Review: Fate and effects*  
 175 *of veterinary antibiotics in soil*. Trends in microbiology 22(9), 536–545.
- 176 Seneviratne S.I., Lüthi D., Litschi M., Schär C. (2006) : *Land-atmosphere coupling and*  
 177 *climate changes in Europe*. Nature 444, 205–209.
- 178 [www.4p1000.org](http://www.4p1000.org)
- 179 Wendling M., Büchi L., Amossé C., Sinaj S., Walter A., Charles R. (2015) : *Nutrient accu-*  
 180 *mulation by cover crops with different root systems*. Aspects of Applied Biology 129,  
 181 91–96.
- 182 Büchi L., Gebhard C.-A., Liebisch F., Sinaj S., Ramseier H., Charles R. (2015) :  
 183 *Accumulation of biologically fixed nitrogen by legumes cultivated as cover crops*  
 184 *in Switzerland*. Plant and Soil 393(1–2), 163–175.
- 185 Keller A., Franzen J., Knüsel P., Papritz A., Zürrer M. (2018) : *Plateforme d’information*  
 186 *des sols Suisse (PIS-CH). Informations du sol, méthodes et instruments pour une utilisation*  
 187 *durable de la ressource sol*. Synthèse thématique ST4 dans le cadre du Programme  
 188 national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68), Berne.
- 189 Martin M.P., Wattenbach M., Smith P., Meersmans J., Jolivet C., Bouillon L., Arrouays D.  
 190 (2011) : *Spatial distribution of soil organic carbon stocks in France*. Biogeosciences 8(5),  
 191 1053–1065.
- 192 Kuzyakov Y., Bogomolova I., Glaser B. (2014) : *Biochar stability in soil: Decomposition*  
 193 *during eight years and transformation as assessed by compound-specific 14C analysis*.  
 194 Soil Biology and Biochemistry 70, 229–236.
- 195 Roth T., Kohli L., Rihm B., Amrhein V., Achermann B. (2015) : *Nitrogen deposition and*  
 196 *multi-dimensional plant diversity at the landscape scale*. Royal Society of Open Science 2,  
 197 150017.
- 198 Baggs E.M., Smales C.L., Bateman E.J. (2010) : *Changing pH shifts the microbial*  
 199 *sources well as the magnitude of N<sub>2</sub>O emissions from soil*. Biology and Fertility  
 200 of Soils 46, 793–805.

- 163 Nearing M.A., Xie Y., Liu B., Ye Y. (2017) : *Natural and anthropogenic rates of soil erosion*. International Soil and Water Conservation Research 5, 77–84.
- 164 Leifeld J., Steffens M., Galego-Sala A. (2012) : *Sensitivity of peatland carbon loss to organic matter quality*. Geophysical Research Letters 39, L14704, doi:10.1029/2012GL051856.
- 165 Bollinger J., Hagedorn F., Leifeld J., Böhl J., Zimmermann S., Soliva R., Kienast F. (2008) : *Effects of land-use change on carbon stocks in Switzerland*. Ecosystems 11, 895–907.
- 166 Grüneberg E., Ziche D., Wellbrock N. (2014) : *Organic carbon stocks and sequestration rates of forest soils in Germany*. Global Change Biology 20, 2644–2662.
- 167 Hagedorn F., Moeri A., Walthert L., Zimmermann S. (2010) : *Kohlenstoff in Schweizer Waldböden – bei Klimaerwärmung eine potenzielle CO<sub>2</sub>-Quelle*. Journal forestier suisse 161(12), 530–535.
- 168 Schindlbacher A., Wunderlich S., Borcken W., Kitzler B., Zechmeister-Boltenstern S., Jandl R. (2012) : *Soil respiration under climate change: prolonged summer drought offsets soil warming effects*. Global Change Biology 18, 2270–2279.
- 169 Bader C., Müller M., Szidat S., Schulin R., Leifeld J. (2018) : *Response of peat decomposition to corn straw addition in managed organic soils*. Geoderma 309, 75–83.
- 170 COM 2012, Soil Thematic Strategy
- 171 Krause H.-M., Hüppi R., Leifeld J., El-Hadidi M., Harter J., Kappler A., Hartmann M., Behrens S., Mäder P., Gattinger A. (2018) : *Biochar affects community composition of nitrous oxide reducers in a field experiment*. Soil Biology and Biochemistry 119, 143–151.
- 172 Poeplau C., Don A. (2015) : *Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis*. Agriculture, Ecosystems & Environment 200, 33–41.
- 173 Freibauer A. (2015) : *Grossinventur auf deutschen Äckern*. Ökologischer Landbau 4, 15–17.
- 174 Daly H. (2007) : *Ecological Economics and Sustainable Development*. Selected Essays of Herman Daly, Elgar Publishing Limited, Cheltenham.
- 175 Gerber J.-D., Nahrath S. (2013) : *Beitrag zur Entwicklung eines Ressourcenansatzes der Nachhaltigkeit. Eine Diskussion am Beispiel der Regulation der Bodenressource*. CRED Research Paper No. 3, Berne.
- 176 *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten* (Loi fédérale allemande sur la protection des sols – BBodSchG)
- 177 *Ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol) du 1<sup>er</sup> juillet 1998* (État le 12 avril 2016).
- 178 Doran J.W., Coleman D.C., Bezdicek D.F., Stewart B.A. (Eds. ; 1994) : *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Science Society of America Special Publication 35.
- 179 Karlen D.L., Mausbach M.J., Doran J.W., Cline R.G., Harris R.F., Schuman G.E. (1997) : *Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation (A Guest Editorial)*. Soil Science Society of America Journal 61, 4–10. doi:10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x
- 180 Grêt-Regamey A., Drobnik T., Greiner L., Keller A., Papritz A. (2016) : *Soils and their contribution to ecosystem services*. Factsheet Soil and Ecosystem Services PNR 68. Bern.
- 181 Office fédéral du développement territorial (ARE) (2014) : *Feuilles d'information pour la consultation «Protection des terres agricoles»*. [https://www.are.admin.ch/dam/are/fr/dokumente/recht/kulturlandschutz.pdf.download.pdf/protection\\_des\\_terresagricoles.pdf](https://www.are.admin.ch/dam/are/fr/dokumente/recht/kulturlandschutz.pdf.download.pdf/protection_des_terresagricoles.pdf); accès : 10.7.2017
- 182 wocat, Glossary, <https://www.wocat.net/en/sitefunctions/glossary.html>, accès : 15.3.2017

## Impressum

### Auteurs

D<sup>r</sup> Frank Hagedorn, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), Birmensdorf  
D<sup>r</sup> Hans-Martin Krause, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), Birmensdorf; Institut suisse de recherches sur l'agriculture biologique (FiBL), Frick  
D<sup>re</sup> Mirjam Studer, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), Birmensdorf  
D<sup>r</sup> Andreas Schellenberger, Office fédéral de l'environnement (OFEV), Bern  
Prof. Andreas Gattinger, Institut suisse de recherches sur l'agriculture biologique (FiBL), Frick; Université Justus-Liebig, Giessen, Allemagne

Elaborée et publiée avec le soutien du Fonds national suisse de la recherche scientifique en tant que synthèse thématique dans le cadre du Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68).

### Editeur

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

### Groupe de suivi de la synthèse thématique

D<sup>re</sup> Irène Birolini, Prona AG  
Alexandra Cropt, Union suisse des paysans (USP)  
Nicolas Ecabert, ecaVert Sàrl  
D<sup>r</sup> Victor Kessler, Office fédéral de l'environnement (OFEV)  
D<sup>re</sup> Beatrice Kulli, ZHAW/Société suisse de pédologie (SSP)  
Andrea Loosli, Conférence suisse des directeurs cantonaux des travaux publics, de l'aménagement du territoire et de l'environnement (DTAP)  
Bettina Marbot, Agridea  
PD D<sup>r</sup> Daniel Schaub, Canton d'Argovie  
Benjamin Seitz, Agroscope

### Comité de direction du PNR 68

Prof. Emmanuel Frossard, EPF Zurich (Président)  
Prof. Claire Chenu, AgroParisTech, France  
Prof. Peter de Ruiter, Université d'Amsterdam, Pays-Bas  
D<sup>re</sup> Annette Freibauer, Institut Bavarois pour l'Agriculture, Allemagne

Prof. Bernd Hansjürgens, Centre Helmholtz de recherche environnementale (UFZ), Leipzig, Allemagne

Prof. Lorenz Hurni, EPF Zurich

D<sup>r</sup> Michael Obersteiner, Institut international pour l'analyse appliquée des systèmes, Autriche

Prof. Kurt Roth, Université d'Heidelberg, Allemagne

### Déléguée du Conseil national de la recherche

Prof. Claudia R. Binder, EPF Lausanne

### Représentants de la Confédération

Stephan Scheidegger, Office fédéral du développement territorial (ARE), Berne

D<sup>r</sup> Roland von Arx, Office fédéral de l'environnement (OFEV),

### Chargé du transfert de connaissances/rédaction

Urs Steiger, steiger texte konzepte beratung, Lucerne

### Manager du programme

D<sup>r</sup> Pascal Walther, Fonds national suisse (FNS), Berne

### Image de couverture

Nils Nova, Lucerne

### Conception graphique et mise en page

Kurt Brunner, Palézieux

### Corrections

Andreas Vonmoos, terminus textkorrektur, Lucerne

### Traduction

Marie-Pierre Frossard-Quesnee, Madetswil  
Trad8 Sàrl, Delémont

### Impression

Engelberger Druck, Stans

Pour ce qui a trait aux résultats de recherche mentionnés, la responsabilité en échoit aux équipes de recherche concernées, pour les synthèses thématiques et les recommandations, la responsabilité incombe aux auteurs concernés ainsi qu'au comité de direction. Leurs conclusions ne doivent pas nécessairement correspondre aux opinions des membres des groupes de suivi, du Fonds national suisse ou des équipes de recherche.

**Référence recommandée**

Hagedorn F., Krause H.-M., Studer M., Schellenberger A., Gattinger A. (2018): Sol et environnement. Matière organique du sol, émissions de gaz à effet de serre et atteinte physique des sols suisses. Synthèse thématique ST2 du Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68), Berne

ISBN: 978-3-907087-31-2

[www.fns.ch](http://www.fns.ch)

[www.pnr68.ch](http://www.pnr68.ch)

Disponible auprès du Fonds national suisse, Berne

© 2018, Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS), Berne

L'ouvrage, y compris l'ensemble des parties qui le composent, est protégé au titre du droit d'auteur. Toute utilisation en dehors des strictes limites de la loi sur le droit d'auteur est interdite sans l'accord de l'éditeur et est passible de poursuites. Cela vaut en particulier pour les reproductions, les traductions, les microfilmages ainsi que la sauvegarde et le traitement dans des systèmes électroniques.





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

Le Programme national de recherche « Utilisation durable de la ressource sol » (PNR 68) établit les bases pour une exploitation durable des sols en Suisse. À cette fin, il convient de prendre en compte les services tant écologiques qu'économiques fournis par le sol. Le concept des services écosystémiques permet de mettre en valeur les fonctions des sols et leur contribution au bien-être humain. Les recherches ont duré de 2013 à 2017. Les résultats sont rassemblés au sein de cinq synthèses thématiques et d'une synthèse globale.

### **Synthèse thématique ST2**

Sol et environnement

La synthèse thématique ST2 « Sol et environnement » du PNR 68 est axée sur la matière organique du sol, les émissions de gaz à effet de serre et les atteintes physiques des sols. Elle aborde en particulier la manière dont le changement climatique et l'utilisation des terres modifient les sols et leurs fonctions et étudie les mesures permettant de protéger le sol.

### **Synthèse thématique ST1**

Sol et production alimentaire

### **Synthèse thématique ST3**

Un agenda du sol pour l'aménagement du territoire

### **Synthèse thématique ST4**

Plateforme d'information des sols suisse (PIS-CH)

### **Synthèse thématique ST5**

Vers une politique durable des sols

