

## > 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*





# > 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*

## Impressum

### Éditeur

Office fédéral de l'environnement (OFEV)

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

### Auteurs

Peter Lüscher, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL Birmensdorf, unité de recherche Fonctions des sols et protection des sols

Fritz Frutig, WSL, unité de recherche Systèmes de production forestière

Oliver Thees, WSL, unité de recherche Systèmes de production forestière

Avec la participation de:

Andreas Freuler, Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung Wald, canton d'Argovie

Beat Frey, WSL, unité de recherche Processus rhizosphériques

Hans Kremer, TU Munich, Forstliche Arbeitswissenschaften

Christine Meyer, WSL, unité de recherche Fonctions des sols et protection des sols

Stéphane Sciacca, WSL, unité de recherche Fonctions des sols et protection des sols (jusqu'en 2009)

Sandra Thöny (Spjevak), WSL, unité de recherche Systèmes de production forestière (jusqu'en 2010); Stephan Zimmermann, WSL, unité de recherche Fonctions des sols et protection des sols

### Accompagnement à l'OFEV

Hans Peter Schaffer, Division Forêts (jusqu'en 2013)

Silvio Schmid, Division Forêts (2012 à 2015)

Christian Küchli, Division Forêts (2015)

Jean-Pierre Clément, Section Sols (jusqu'en 2014)

Corsin Lang, Section Sols (depuis 2014)

### Référence bibliographique

Lüscher P., Frutig F., Thees O. 2015: 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, Berne. Connaissance de l'environnement n° 1607: 160 p.

### Traduction

André Carruzzo, Genève

### Graphisme, mise en page

Karin Nöthiger, 5443 Niederrohrdorf

### Photo de couverture

Marco Walser, WSL, unité de recherche Fonctions des sols et protection des sols

## Commande de la version imprimée et téléchargement au format PDF

OFCL, Diffusion des publications fédérales, CH-3003 Berne

Tél. +41 58 465 50 50

[verkauf.zivil@bbl.admin.ch](mailto:verkauf.zivil@bbl.admin.ch)

Numéro de commande: 810.300.134f

[www.bafu.admin.ch/uw-1607-f](http://www.bafu.admin.ch/uw-1607-f)

Impression neutre en carbone et faible en COV sur papier recyclé

Cette publication est également disponible en allemand.

© OFEV 2016

# > Table des matières

<b>Abstracts</b>	<b>5</b>		
<b>Avant-propos</b>	<b>7</b>		
<b>Résumé</b>	<b>8</b>		
<b>Introduction</b>	<b>9</b>		
<hr/>			
<b>1</b>	<b>Exploitation des forêts dans le respect des sols: cadre général</b>	<b>10</b>	
1.1	Bases légales régissant la protection des sols contre les atteintes physiques en forêt	11	
1.1.1	Législation fédérale	11	
1.1.2	Tâches d'exécution des cantons	13	
1.1.3	Instruments de concrétisation du droit	14	
1.2	Stratégie suisse pour la protection des sols	16	
1.3	Exigences de la société	17	
1.4	Politique forestière 2020	17	
1.5	Certification	18	
1.6	Les sols forestiers sont hétérogènes	19	
1.7	Changements climatiques	20	
1.8	Exploitation accrue de bois	21	
1.9	Réglementations au plan européen	22	
1.10	La situation en Allemagne	22	
<hr/>			
<b>2</b>	<b>Le projet «Protection physique des sols en forêt»</b>	<b>26</b>	
2.1	Contexte	26	
2.2	Objectif	27	
2.3	Procédure	28	
2.4	Produits	28	
2.5	Programme «Gestion prospective de l'utilisation de la forêt»	29	
<hr/>			
<b>3</b>	<b>Bases pédologiques</b>	<b>30</b>	
3.1	Principales fonctions des sols	31	
3.2	La structure du sol en forêt	32	
3.2.1	Horizons organiques	32	
3.2.2	Formes d'humus	32	
3.2.3	Horizons minéraux	34	
3.2.4	Types de sols	35	
3.3	Caractéristiques et propriétés des sols	39	
3.3.1	Teneur en pierres et en gravier	39	
3.3.2	Texture et structure	39	
3.3.3	Densité apparente et espace poral	43	
	3.3.4	Perméabilité	44
	3.3.5	Caractéristiques et degrés d'hydromorphie	44
	3.3.6	Teneur en matière organique	45
	3.3.7	Appréciation globale	46
3.4	Régime hydrique	48	
	3.4.1	Régime hydrique et structure du sol	48
	3.4.2	Humidité du sol	48
	3.4.3	Réseaux de mesure	49
	3.4.4	Courbes de désorption	50
	3.4.5	Évolution annuelle de l'humidité du sol	51
<hr/>			
<b>4</b>	<b>Les types d'ornières comme indicateurs d'une circulation qui respecte les sols</b>	<b>53</b>	
4.1	Classement des types d'ornières visibles	54	
	4.1.1	Les types d'ornières en tant qu'indicateurs d'atteintes à la fertilité du sol	54
	4.1.2	Définition d'un dégât au sol	56
4.2	Modifications physiques et microbiologiques dans le sol	58	
	4.2.1	Physique des sols	58
	4.2.2	Aspects liés à la mécanique du sol	59
	4.2.3	Microbiologie du sol	60
<hr/>			
<b>5</b>	<b>Recherches pratiques</b>	<b>64</b>	
5.1	Choix des sites étudiés et buts visés	64	
5.2	Parcelles d'essai	65	
	5.2.1	Aperçu et procédure	65
	5.2.2	Messen-Junkholz	66
	5.2.3	Ermatingen-Hohrain	69
	5.2.4	Heitere-Bruucheren	70
	5.2.5	Unteriberg-Schlegwald	71
5.3	Réserves Lothar	74	
5.4	Essai de formation d'ornières	75	
	5.4.1	Sites d'essai et procédure	76
	5.4.2	Résultats	78
5.5	Essai de régénération	83	
<hr/>			
<b>6</b>	<b>Mise en pratique de la protection des sols contre les atteintes physiques</b>	<b>88</b>	
6.1	Planification et pilotage	88	

6.2	Principes de base et conditions requises au niveau de l'entreprise	92
6.2.1	Formation et sensibilisation des acteurs	92
6.2.2	Évaluation de la sensibilité du sol à la compaction	96
6.2.3	Desserte fine: utilité et planification	99
6.2.4	Desserte fine: aménagement et utilisation	101
6.2.5	Normes de qualité pour la protection des sols	103
6.2.6	Contrats et accords internes à l'entreprise	105
6.2.7	Modèles terra-mécaniques	106
6.3	Technique des engins et méthodes de travail	110
6.3.1	Forces agissant sur le sol	110
6.3.2	Mesures techniques visant à réduire la pression dans les zones de contact	111
6.3.3	Mesures techniques visant à réduire le patinage	117
6.3.4	Principes régissant le choix et la mise en œuvre des méthodes de travail et des engins	119
6.4	Utilisation des machines	122
6.4.1	Attribution du travail	122
6.4.2	Praticabilité du sol forestier	122
6.4.3	Tapis de branches	125
6.4.4	Interruption des travaux	127
6.4.5	Réception des travaux	128
6.5	Mesures incitatives de l'État	128
6.6	Les coûts de la protection des sols contre les atteintes physiques	129

<b>7</b>	<b>Situation actuelle et mesures nécessaires à l'avenir</b>	<b>132</b>
----------	---	------------

<b>Annexes</b>	<b>135</b>	
A1	Personnes ayant participé au projet	135
A2	Publications parues dans le cadre du projet «Protection physique des sols forestiers»	138
A3	Clé de détermination des formes d'humus	143
A4	Terminologie utilisée pour désigner les horizons pédologiques	144
A5	Clé de détermination de la répartition granulométrique (évaluation sur le terrain)	145
A6	Clé de détermination de l'hydromorphie d'un sol	146
A7	Estimation de la teneur en matière organique de sols minéraux en fonction de la couleur et de la texture	147
A8	Parcelles d'essais et sites destinés à la formation dans le cadre du projet «protection physique des sols en forêt»	147
A9	Cours de formation initiale et de formation continue réalisés dans le domaine de la protection des sols contre les atteintes physiques	149
A10	Arbre décisionnel pour évaluer la sensibilité des sols à la compaction dans le canton de Soleure	151
<b>Bibliographie</b>	<b>152</b>	
<b>Répertoire</b>	<b>155</b>	
<b>Glossaire</b>	<b>159</b>	

## > Abstracts

Based on general forest management conditions, known pedological basics and new research findings in the field of soil biology, wheel track types have been developed as indicators of careful use of forest soil by forest machinery. One of the defined wheel track types is indicative of a loss of soil fertility and, accordingly, ecological damage ("track type 3"). The wheel track types form the basis of the management of physical soil protection in forests. To this end, they are incorporated into the planning and monitoring of the wood harvesting operations. This detailed guide for forestry practice provides an insight into the associated theory and concrete tips for its implementation, for example in the selection and use of forestry machines and in relation to the cost of soil protection.

Ausgehend von den Rahmenbedingungen der Waldbewirtschaftung, bekannten bodenkundlichen Grundlagen und neuen Forschungsergebnissen der Bodenbiologie wurden Fahrspurtypen als Indikatoren für eine schonende Befahrung von Waldböden entwickelt. Dabei wird ein Fahrspurtyp definiert, der auf den Verlust der Bodenfruchtbarkeit und somit auf einen ökologischen Schaden hinweist («Spurtyp 3»). Die Fahrspurtypen bilden die Grundlage für das Management des physikalischen Bodenschutzes im Wald. Hierzu werden sie eingebettet in die Planung und Steuerung der Holzernte. Die detaillierte Anleitung für die Praxis vermittelt sowohl einen Einblick in die Theorie als auch konkrete Hinweise für die Umsetzung, zum Beispiel bei Wahl und Einsatz der Forstmaschinen und in der Frage der Kosten des Bodenschutzes.

Une typologie des ornières a été développée en tenant compte des conditions générales de l'exploitation forestière, de données pédologiques connues et de résultats récents de la recherche en biologie du sol pour servir d'indicateurs d'une circulation respectueuse des sols forestiers. L'un d'eux a été défini comme étant le signe d'une perte de fertilité et donc d'un dégât écologique («type d'ornière 3»). Les types d'ornières sont à la base de la gestion de la protection des sols forestiers contre les atteintes physiques. Pour cela, ils sont intégrés dans la planification et le contrôle de la récolte des bois. Ces directives détaillées destinées aux praticiens fournissent d'une part un aperçu des fondements théoriques, d'autre part des indications concrètes pour leur mise en œuvre, par exemple lors du choix et de l'utilisation d'engins forestiers ou pour la question du coût de la protection des sols.

**Keywords:**

Physical soil protection,  
soil compaction,  
wheel track types,  
skid trails,  
wood harvesting

**Stichwörter:**

Physikalischer Bodenschutz,  
Bodenverdichtung,  
Fahrspurtypen,  
Feinerschliessung,  
Holzernte

**Mots-clés:**

Protection des sols contre  
les atteintes physiques,  
compaction du sol,  
types d'ornières,  
desserte fine,  
récolte des bois

Partendo dalle condizioni quadro della gestione forestale, dalle basi pedologiche note e dai nuovi risultati della ricerca nell'ambito della biologia del suolo sono stati sviluppati dei tipi di solco come indicatori di un transito rispettoso nei terreni forestali. Al contempo viene definito un tipo di solco che mostra la perdita di fertilità del suolo e i conseguenti danni ecologici («tipo di solco 3»). I tipi di solco costituiscono la base della gestione della protezione fisica del suolo nella foresta e, a tale scopo, figureranno nella pianificazione e nella gestione della raccolta del legname. Al riguardo, la guida pratica dettagliata offre conoscenze teoriche e indicazioni concrete, ad esempio nella scelta e nell'impiego delle macchine forestali e negli aspetti concernenti i costi legati alla protezione del suolo.

**Parole chiave:**

**Protezione fisica del suolo,  
compattazione del suolo,  
tipi di solco,  
piste di esbosco,  
raccolta del legname**

---

## > Avant-propos

Le sol est une ressource non renouvelable et un fondement essentiel du bon développement des forêts. Il offre un substrat vital aux arbres et aux plantes terrestres de la forêt, et donc à la faune diversifiée qui y habite. Les sols forestiers sont de plus en plus influencés par une série d'activités humaines. Parmi celles-ci, la plus importante est l'utilisation d'engins forestiers pour la récolte du bois.

Au niveau fédéral, les dispositions légales régissant la protection des sols contre les atteintes physiques figurent dans la loi sur la protection de l'environnement, dans l'ordonnance sur les atteintes portées aux sols et dans la loi sur les forêts. Il en ressort que la fertilité du sol doit être préservée à long terme. Pour la gestion des forêts, cela signifie qu'il importe de minimiser les atteintes portées aux sols lors de la récolte du bois. Planifier et aménager systématiquement la desserte fine permet de garantir que seule une petite partie de l'aire forestière sera empruntée par les véhicules et que les risques de dégâts éventuels seront limités en termes de surface.

La présente publication a été élaborée par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) et l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). Elle contient des notions fondamentales sur les principaux aspects de la protection des sols forestiers contre les atteintes physiques et présente des mesures qui peuvent contribuer à minimiser l'impact des activités liées à la gestion des forêts. Ce guide s'adresse aussi bien aux services forestiers cantonaux qu'aux autorités chargées de la protection de l'environnement. Il sert en outre de document de référence pour la formation initiale et continue de tous les acteurs de la gestion forestière ainsi que pour l'information du public intéressé.

Le soussigné remercie toutes les personnes qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réalisation de cette publication et s'engagent pour sa mise en application.

Josef Hess  
Sous-directeur  
Office fédéral de l'environnement (OFEV)

## > Résumé

Le but du projet commun «Protection physique des sols forestiers» de l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL) et de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) était d'étudier et développer les bases de la protection des sols forestiers lors de l'utilisation de machines, et de mettre en application les résultats obtenus en étroite collaboration avec la pratique. Le présent guide en est un résultat partiel important.

Les conditions-cadre d'une gestion forestière respectueuse du sol en Suisse y sont traitées de façon détaillée. La loi sur la protection de l'environnement (LPE) et l'ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol) jouent en l'occurrence un rôle déterminant et servent de référence pour la mise en œuvre de la protection des sols au niveau cantonal. À cela s'ajoutent les prescriptions d'ordre politique, comme celles fixées par la Politique forestière 2020 de la Confédération, ainsi que les attentes grandissantes de la société et les éventuelles conséquences du changement climatique.

Des recherches pédologiques ont été menées dans différentes parcelles afin de déterminer l'impact du passage des engins forestiers. C'est ainsi que des essais sur le terrain ont permis d'analyser les modifications physiques et microbiologiques des sols sous différents types d'ornières. Les ornières quant à elles ont été classées en trois catégories qui constituent un indicateur pratique du degré de dégradation du sol. En présence du «type d'ornière 3», il faut s'attendre à une atteinte persistante à la fertilité du sol.

Depuis le lancement du projet, une formation intensive à laquelle ont été associés tous les groupes d'acteurs impliqués dans la gestion forestière a été menée parallèlement aux essais. Les enseignements tirés de ces formations initiales et continues ont été régulièrement pris en compte dans les travaux. Au programme de ces cours figuraient les bases pédologiques ayant un rapport avec la praticabilité des sols forestiers, le classement des

ornières en trois types distincts, et les mesures permettant de minimiser les atteintes aux sols.

La planification et l'exécution des coupes de bois de même que le choix et l'équipement des machines peuvent être optimisés à l'aide de mesures spécifiques. Notamment, la planification de la desserte fine des peuplements est très importante pour la protection des sols. Cette planification dépend de la station et devrait être établie pour chaque unité de desserte fine dans son ensemble et inscrite sur des cartes. Réalisée de manière systématique, elle permet d'utiliser pendant longtemps les mêmes layons et de circonscrire ainsi le risque d'atteintes aux sols dues au passage des véhicules. Les mesures techniques sur les machines aident à réduire la pression au niveau des zones de contact et à diminuer le patinage. Les possibilités d'utilisation des engins forestiers sont limitées selon la structure du sol par l'humidité croissante du terrain. Le choix des méthodes de travail et l'organisation de l'utilisation des machines permettent d'améliorer considérablement la protection des sols, même si cela peut impliquer de renoncer à l'utilisation d'engins au sol ou d'interrompre les travaux. Certaines mesures de protection des sols peuvent avoir un impact financier considérable. Une liste de ces mesures a donc été établie et un ordre de grandeur des coûts prévisibles calculé pour les différentes positions.

Les changements climatiques pourraient aussi raccourcir encore la période d'exploitation moins risquée durant laquelle il est possible de limiter les dégâts aux sols. Parallèlement, tout porte à croire que les besoins en ressources forestières vont augmenter et que les sols difficilement praticables seront davantage sollicités. À cela s'ajoutent les attentes grandissantes de la société qui pourraient imposer de nouvelles restrictions à la récolte des bois. Tout cela signifie que la protection des sols forestiers tendra à devenir plus difficile et plus coûteuse. Par conséquent, protéger les sols dans le cadre de la gestion des forêts restera un grand défi.

---

## > Introduction

Avec la pression économique à laquelle est soumise la production de bois augmente l'emploi d'engins de plus en plus performants et lourds en forêt, aggravant ainsi le risque de dégâts aux sols.

Parallèlement, plus la société est sensibilisée aux questions environnementales, plus elle est exigeante en termes écologiques envers l'exploitation forestière. Souvent, ces attentes vont de pair avec des critiques à l'encontre des exploitants, à qui il est reproché de ne pas prendre suffisamment soin des sols. De nombreux arguments justifient la nécessité de protéger le sol en tant que bien environnemental. Souvent, les solutions développées pour concilier les impératifs de la protection du sol avec ceux de la rentabilité sont difficilement applicables et peu durables. Les auteurs estiment qu'il convient de trouver ici une voie qui tienne compte de toutes les parties en présence et de leurs revendications légitimes.

L'objectif dans ce contexte est de sensibiliser tous les acteurs de la gestion forestière à la protection des sols et de les former en conséquence. Il est important de définir et introduire une procédure qui intègre à la fois les exigences écologiques, économiques et sociales et qui puisse être mise en œuvre sous forme d'engagement sur le plus long terme possible.

La présente publication traite de la protection des sols contre les atteintes physiques, c'est-à-dire principalement la compaction et l'érosion. Les aspects étudiés comprennent la structure du sol, les modifications structurales sous l'effet de contraintes mécaniques, les conséquences de ces modifications, ainsi que les mesures organisationnelles et techniques liées à la protection des sols. Elle tente aussi de créer les bases d'une future norme permettant d'assurer une gestion forestière durable et respectueuse des sols.

Cette publication a vu le jour dans le cadre du projet «Protection physique des sols forestiers» mené à l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL) et cofinancé par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). La formation initiale et continue des acteurs de la gestion des forêts dans les nombreuses entreprises forestières des régions du Plateau et du Jura accessibles aux engins constitue un élément important de ce projet. Une documentation de base existe déjà sous la forme d'une notice pour le praticien.

# 1 > Exploitation des forêts dans le respect des sols: cadre général

On attend de la gestion des forêts qu'elle soit à la fois proche de la nature et rentable. Elle doit aussi tenir compte des nombreuses exigences de la population. Ces contraintes posent le cadre général d'une exploitation forestière respectueuse des sols.

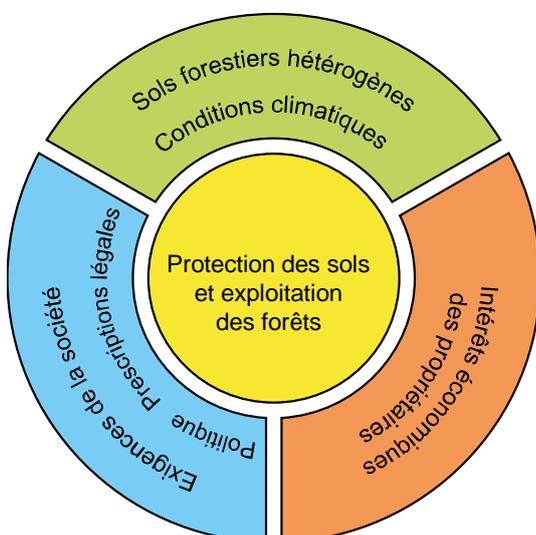
Parmi les conditions extérieures à l'entreprise figurent avant tout les prescriptions légales suisses de la loi sur la protection de l'environnement et de la loi sur les forêts. Au niveau fédéral, la stratégie suisse pour la protection des sols fixe des valeurs indicatives et des seuils d'intervention pour les sols forestiers (selon le rapport explicatif de l'OSol, OFEFP 2001).

Les attentes de la population envers les exploitants et la problématique de la protection des sols sont discutées dans la Politique forestière 2020 (OFEV 2013). Le système suisse de certification comporte également des exigences sur la protection des sols qui viennent s'ajouter aux prescriptions légales. Pour compléter l'aperçu, nous jetterons un coup d'œil au-delà des frontières pour montrer la situation chez nos voisins.

L'hétérogénéité des sols forestiers en Suisse et leurs fortes variations d'humidité tout au long de l'année sont des données dictées par la nature et non modifiables qui revêtent une importance capitale pour la mise en œuvre de la protection des sols.

**Fig. 1 > Conditions influençant la protection des sols dans la gestion forestière**

*En bleu: conditions extérieures à l'entreprise; en vert: conditions naturelles, en grande partie non modifiables; en rouge: conditions liées à l'entreprise.*



Le propriétaire forestier souhaite entretenir sa forêt et exploiter la matière première bois. Des méthodes efficaces faisant appel à des engins forestiers performants lui permettent d'exécuter ces travaux de manière rationnelle, mais en raison du poids des machines, elles présentent aussi des risques de compaction du sol. Ces facteurs constituent les conditions internes à l'entreprise qui influencent la protection du sol.

Conflit d'intérêt entre rentabilité et protection du sol

## 1.1 Bases légales régissant la protection des sols contre les atteintes physiques en forêt

La loi fédérale du 7 octobre 1983 sur la protection de l'environnement (LPE; RS 814.01), l'ordonnance du 1<sup>er</sup> juillet 1998 sur les atteintes portées aux sols (OSol; RS 814.12) et la législation forestière de la Confédération avec la loi fédérale du 4 octobre 1991 sur les forêts (LFo; RS 921.0) et l'ordonnance fédérale du 4 octobre 1991 sur les forêts (OFo; RS 921.01), contiennent des dispositions sur la protection physique des sols qui doivent aussi être respectées pour récolter le bois. Le développement de la récolte mécanisée au cours des dernières années soulève de plus en plus de questions sur l'application et le respect de ces prescriptions. Les explications ci-après, basées en grande partie sur une contribution d'Iten (2009), précisent ce que demandent les bases légales suisses par rapport à la protection physique des sols lors de la récolte de bois, et comment les autorités d'exécution peuvent veiller au respect du droit.

### 1.1.1 Législation fédérale

#### La protection des sols contre les atteintes physiques dans la loi sur la protection de l'environnement

La législation sur la protection des sols en Suisse a pour but de garantir à long terme la fertilité du sol (art. 1, al. 1, LPE, art. 1 OSol). La notion de «long terme» implique que la fertilité du sol doit aussi être préservée pour les générations futures. Pour y parvenir, il y a lieu d'éviter le plus possible les atteintes nuisibles aux sols encore sains.

De cet objectif découle l'objet protégé par le droit suisse sur la protection des sols, à savoir: le sol fertile. Selon l'art. 7, al. 4<sup>bis</sup>, LPE, seule la couche de terre meuble de l'écorce terrestre où peuvent pousser les plantes est qualifiée de sol. L'épaisseur du sol au sens de la LPE correspond ainsi à la limite d'enracinement et comprend en général la couche supérieure et la couche sous-jacente. Ces couches sont biologiquement actives et peuvent donc être fertiles (OFEP 2001). En forêt aussi, le sol ainsi défini est protégé par le droit suisse sur la protection des sols.

Selon l'art. 2, al. 1, OSol, le sol est considéré comme fertile «s'il présente une biocénose diversifiée et biologiquement active, une structure typique pour sa station et une capacité de décomposition intacte (art. 2, al. 1, let. a, OSol); 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 (art. 2, al. 1, let. b, OSol); 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 et si son ingestion ou inhalation ne menace pas la santé de l'homme et des animaux (art. 2, al. 1, let. c et d, OSol)». Les aspects pertinents pour

évaluer les atteintes à la fertilité du sol dues à la compaction sont énoncés principalement aux let. a et b de l'art. 2, al. 1, OSol.

Pour limiter les atteintes à la fertilité des sols, la LPE prévoit deux niveaux d'intervention: d'une part des mesures prescrites par la Confédération à l'échelle nationale (art. 33 LPE), et d'autre part, si nécessaire, un renforcement des mesures par les cantons à l'échelle locale (art. 34 LPE).

S'agissant des mesures de protection contre les atteintes physiques édictées à l'échelle suisse, l'art. 33, al. 2, LPE fixe comme règle générale qu'il n'est permis de porter atteinte physiquement à un sol que dans la mesure où sa fertilité n'en est pas altérée durablement. L'art. 2, al. 4, OSol, définit les atteintes physiques aux sols comme des atteintes à la structure, à la succession des couches pédologiques ou à l'épaisseur des sols résultant d'interventions humaines. Les compactations des sols, autrement dit la compression mécanique du milieu poreux et la destruction des agrégats, constituent une forme d'atteinte physique aux sols. Compte tenu du fait que pratiquement toute exploitation du sol entraîne certaines modifications, généralement temporaires, de la structure, l'interdiction est limitée aux atteintes persistantes à la fertilité des sols, les atteintes temporaires étant quant à elles acceptées (Message du Conseil fédéral de 1993, Tschannen 1999). L'art. 6 OSol explicite les règles de l'art. 33, al. 2, LPE avec des prescriptions sur la prévention des compactations (al. 1) et de l'érosion (al. 2). Pour la protection des sols contre les atteintes physiques lors de la récolte de bois, entrent surtout en ligne de compte les dispositions relatives à la prévention des compactations. L'art. 6, al. 1, OSol précise que «quiconque construit une installation ou exploite un sol doit, en tenant compte des caractéristiques physiques du sol et de son état d'humidité, choisir et utiliser des véhicules, des machines et des outils de manière à prévenir les compactations et les autres modifications de la structure des sols qui pourraient menacer la fertilité du sol à long terme».

**Pas d'atteinte à long terme à la fertilité du sol**

Si la fertilité du sol dans une région donnée n'est plus garantie à long terme, les cantons, en vertu de l'art. 34, al. 1, LPE, renforcent, en accord avec la Confédération, les prescriptions nationales sur la prévention des compactations de manière à empêcher l'aggravation des atteintes. Ils peuvent ordonner à cet effet de rendre plus strictes les exigences liées aux mesures d'exploitation, par exemple en limitant ou en interdisant l'utilisation de certains outils et véhicules dans des parcelles sensibles ou déjà atteintes.

La question qui se pose par rapport à la récolte de bois est de savoir comment celle-ci doit être réalisée et quelles dispositions doivent être prises pour éviter que le sol subisse des compactations qui menaceraient sa fertilité à long terme. En général, on parle d'une atteinte à long terme lorsque le sol ne parvient plus à se régénérer rapidement par ses propres moyens (Tschannen 1999). Ce qui est le cas surtout lorsque la couche sous-jacente est compactée (OFEFP 2001). Pour pouvoir déterminer à partir de quand le passage d'un engin de récolte peut causer un dégât écologique, il a été défini différents types d'ornières et évalué leurs conséquences sur la fertilité du sol forestier au moyen d'études pédologiques. Le type d'ornière 3 (cf. 4.1.1) correspond à une atteinte à long terme de la fertilité du sol. Les principales mesures permettant de limiter la formation de ce type d'ornière sont traitées au chapitre 6.

Selon l'art. 61, al. 1, let. m, LPE, la violation des prescriptions sur les atteintes physiques des sols constitue une contravention pénale punie d'une amende. Est punissable la violation intentionnelle, c'est-à-dire commise volontairement et en connaissance de cause ou du moins en acceptant la possibilité qu'elle se produise. La violation par négligence de ces prescriptions est passible d'une amende (art. 61. al. 2, LPE). Agit par négligence quiconque, par une imprévoyance coupable, commet un crime ou un délit en n'ayant pas usé des précautions commandées par les circonstances et par sa situation personnelle, sans se rendre compte des conséquences de son acte ou sans en tenir compte (art. 12, al. 2 et 3, du Code pénal suisse du 21 décembre 1937; CP; RS 311.0).

### **La protection des sols contre les atteintes physiques dans la législation forestière**

Aux prescriptions de la LPE et de l'OSol s'ajoutent celles de la législation forestière de la Confédération. Ainsi, l'art. 20, al. 2, LFo précise que les cantons édictent les prescriptions nécessaires en matière d'aménagement et de gestion, en tenant compte notamment des exigences de l'approvisionnement en bois, d'une sylviculture proche de la nature et de la protection de la nature et du paysage. Les art. 26, al. 1, let. a, et 27, al. 1, LFo prévoient que la Confédération et les cantons prennent des mesures visant à prévenir et réparer les dégâts aux forêts. L'art. 28, let. d, OFo précise aussi que les cantons prennent des mesures contre les causes de dégâts qui peuvent mettre en danger la conservation de la forêt, comme la réduction des charges physiques du sol.

#### **1.1.2 Tâches d'exécution des cantons**

L'art. 36 LPE et l'art. 13, al. 1, OSol précisent que l'application des prescriptions fédérales sur la protection des sols incombe en principe aux cantons. Il en va de même des dispositions de la LFo (art. 50 LFo). En vertu de l'art. 38 LPE et de l'art. 49 LFo, la Confédération surveille la mise en œuvre au niveau cantonal et conseille les cantons dans les questions liées à l'exécution. Ceux-ci sont en principe libres de décider comment remplir leurs obligations. Ils peuvent ainsi confier à des collectivités de droit public ou à des particuliers l'accomplissement de diverses tâches d'exécution, en particulier en matière de contrôle et de surveillance (art. 43 LPE).

Les cantons édictent les dispositions nécessaires à la mise en œuvre du droit fédéral, notamment en créant des organes d'exécution et en fixant leurs compétences. Ils peuvent aussi concrétiser dans leurs dispositions d'exécution les prescriptions du droit fédéral relatives à la prévention des compactations du sol. En vertu de l'art. 20, al. 2, LFo, ils sont expressément tenus d'édictier des prescriptions en matière d'aménagement et de gestion. L'art. 18 OFo concrétise cette obligation pour le domaine de la planification forestière: les cantons doivent fixer, entre autres, les sortes de plans et leur contenu (let. a), les responsables de la planification (let. b), et les buts de la planification (let. c). Dans ce contexte, ils peuvent exiger des propriétaires forestiers qu'ils établissent avant la récolte de bois une planification appropriée de la desserte fine, qui sera valable pour toutes les récoltes mécanisées. Ils peuvent aussi prévoir dans leurs prescriptions que le canton édicte lui-même les plans directeurs forestiers pour l'ensemble du territoire cantonal ou pour certaines régions forestières. Ils ont par exemple la possibilité d'y fixer de manière contraignante pour les autorités les conditions générales de la desserte forestière, en tenant compte des droits de propriété des propriétaires forestiers, en

La desserte fine représente un outil important pour l'application des prescriptions sur la protection des sols

particulier dans les forêts privées. Les plans directeurs forestiers peuvent aussi contenir des indications sur la sensibilité des sols aux atteintes.

Outre l'édition de dispositions d'exécution, les cantons doivent veiller à ce que le droit fédéral soit effectivement appliqué dans la pratique et prendre des mesures concrètes de mise en œuvre (art. 50 LFo). Ils doivent s'assurer du respect de l'obligation pour chacun d'éviter les atteintes persistantes à la fertilité du sol par des compactations. Par exemple, ils peuvent assortir les activités en forêt soumises à autorisation de réserves destinées à prévenir les compactations. Il serait notamment imaginable que le service forestier, dans son permis de coupe au sens de l'art. 21 LFo, exige de l'auteur de la demande qu'il établisse et respecte un plan de la desserte fine lorsqu'il n'en existe pas. Il pourrait aussi prescrire l'utilisation de véhicules ménageant le sol ou une exploitation respectueuse des sols. En outre, le canton a toujours la possibilité de fixer des conditions lorsqu'il subventionne des activités en forêt liées à la récolte de bois. Si celles-ci ne sont pas respectées, l'autorité compétente peut les imposer, par exemple en décidant d'établir elle-même une planification de la desserte fine aux frais de la personne responsable en tant que mesure de substitution.

Les cantons peuvent exiger de chacun de fournir les renseignements nécessaires à l'application des exigences de la législation sur l'environnement relatives à la protection des sols, de procéder éventuellement à des enquêtes ou de les tolérer (art. 46 LPE). Dans le domaine de la protection des sols en forêt, cette obligation peut concerner notamment le propriétaire forestier. Enfin, la poursuite pénale de violations des prescriptions sur la protection des sols contre les atteintes physiques relève également de la responsabilité des cantons.

### 1.1.3 Instruments de concrétisation du droit

Les prescriptions fédérales ci-dessus sur la protection des sols contre les atteintes physiques énoncent des principes généraux qui, s'ils ne sont pas concrétisés, se révèlent difficiles à mettre en œuvre, comme constaté dans les secteurs de la construction et de l'agriculture. Le développement des engins de récolte des bois et des atteintes aux sols qui en résultent a mis en évidence que ces dispositions doivent aussi être concrétisées dans le domaine de la sylviculture. Cela peut se faire par exemple en précisant dans des aides à l'exécution, des normes techniques, des accords sectoriels ou des publications, comment procéder pour éviter les atteintes persistantes à la fertilité des sols forestiers.

Les aides à l'exécution sont des instruments de surveillance destinés aux autorités d'exécution. Elles fournissent aussi indirectement des éléments de référence aux particuliers qui souhaitent évaluer la conformité au droit de leur action. Les aides à l'exécution concrétisent des notions juridiques indéterminées provenant de lois et d'ordonnances et favorisent ainsi une application uniforme de la législation. Si les autorités d'exécution en tiennent compte, elles peuvent partir du principe que leurs décisions seront conformes au droit fédéral. D'autres solutions sont aussi licites dans la mesure où elles sont conformes au droit en vigueur. Les aides à l'exécution de l'OFEV sont aussi souvent appelées directives, instructions, recommandations, manuels ou aides pratiques. Les cantons peuvent aussi publier des aides à l'exécution soit individuellement, soit en collaboration avec d'autres cantons.

Les normes techniques des associations professionnelles sont établies à titre volontaire par des organisations spécialisées. D'ordinaire, elles concrétisent l'état reconnu de la technique et permettent une harmonisation du cadre général de l'activité économique. Les normes techniques ne sont pas juridiquement contraignantes, mais elles développent indirectement un effet juridique lorsque le droit se réfère à elles pour concrétiser des notions juridiques indéterminées. Elles ne sont pas liées au droit en vigueur et peuvent donc aller au-delà de ce qu'exige le droit public. En droit privé, les normes techniques peuvent devenir contraignantes lorsqu'elles sont qualifiées de déterminantes p. ex. dans des contrats ou dans les statuts d'une organisation pour ses membres. Ainsi, des normes techniques pour la gestion forestière intégrant des exigences du droit environnemental pourraient être déclarées contraignantes dans les contrats d'exploitation entre propriétaires et entrepreneurs forestiers.

Les accords sectoriels sont des conventions dans lesquelles les membres d'une branche économique fixent leurs droits et obligations réciproques sur une base volontaire. Ils permettent d'une part de concrétiser des prescriptions environnementales, mais peuvent aussi servir à convenir d'exigences dépassant celles du droit environnemental. Ces accords revêtent un caractère contraignant en droit privé pour les membres de la branche. Ils renforcent la responsabilité des milieux économiques concernés par rapport au respect du droit environnemental et constituent donc un instrument précieux pour préciser des notions juridiques indéterminées.

Parmi les instruments disponibles pour concrétiser le droit environnemental en vigueur figurent également les publications qui ciblent les groupes de population concernés par les dispositions, les informent des exigences à respecter et des mesures nécessaires et les invitent à les appliquer. Les cantons peuvent publier par exemple des notices, des brochures ou des listes de contrôle.

Comme le montrent les expériences faites dans le secteur de la construction, ces instruments permettent d'obtenir de bons résultats. Les aides à l'exécution, directives, notices et autres documents publiés par l'Office fédéral de l'environnement, les cantons et les associations professionnelles ont contribué à la mise en application des nouvelles connaissances scientifiques et des techniques de construction et de remise en état de terrains conçues pour ménager les sols. Dans le domaine de la protection des sols contre les atteintes physiques en forêt, des solutions similaires à celles développées pour le secteur de la construction sont aussi envisageables. On peut imaginer par exemple que la Société spécialisée de la forêt de la Société suisse des ingénieurs et des architectes élabore, en tenant compte des progrès de la technique, des normes qui concrétiseraient les exigences relatives à la protection des sols contre les atteintes physiques lors de la récolte de bois. Économie forestière Suisse en sa qualité d'organisation faîtière nationale des propriétaires forestiers suisses, ou l'Association des entrepreneurs forestiers suisses pourraient s'engager en faveur d'une solution de branche pour la protection des sols contre les atteintes physiques lors de la récolte de bois. De leur côté, les cantons peuvent utiliser la possibilité de donner des instructions aux autorités compétentes (services forestiers par exemple) au moyen d'aides à l'exécution, mais aussi publier des documents d'information pour sensibiliser les propriétaires de forêt, les exploitants, les forestiers et les entrepreneurs forestiers privés à la nécessité de protéger le sol contre les atteintes physiques et leur présenter des mesures permettant de ménager au mieux le sol lors de la récolte de bois.

1.2

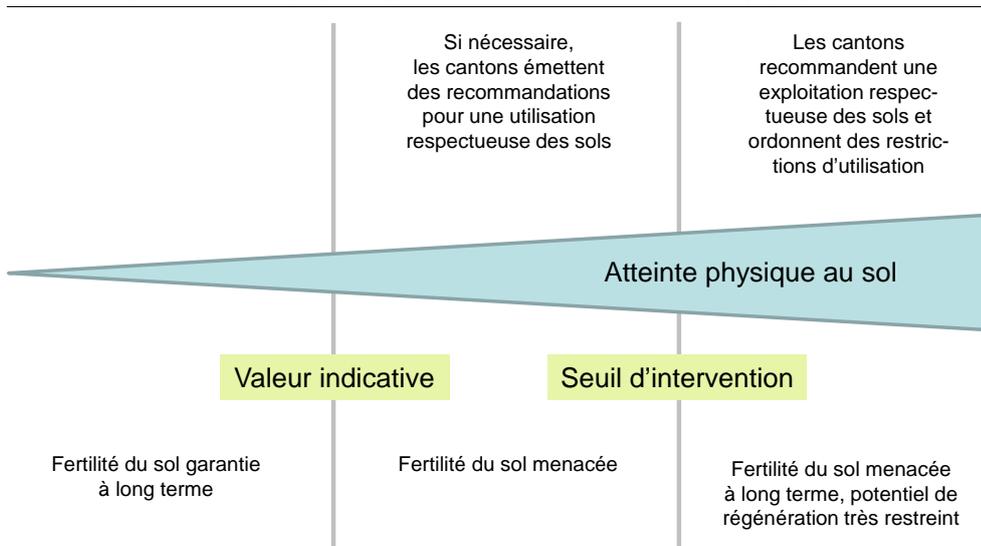
## Stratégie suisse pour la protection des sols

Cette stratégie (selon le rapport explicatif de l'OSol, OFEFP 2001) se fonde sur la réglementation de la protection des sols prévue par la loi sur la protection de l'environnement (LPE) et l'ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol). Elle permet notamment à la Confédération et aux cantons d'évaluer les atteintes aux sols et à leur fertilité, et de décider des mesures le cas échéant. Les cantons doivent veiller à ce que les valeurs indicatives et les seuils d'intervention qui y sont indiqués soient respectés et, en cas de dépassement, demander à l'exploitant de prendre des mesures. Ces valeurs sont inscrites dans l'OSol et donc contraignantes. La Confédération élabore les bases d'une stratégie des sols, à partir de laquelle une stratégie nationale sera développée avec les cantons dès 2016.

Un projet de stratégie a été élaboré pour la protection des sols contre les atteintes physiques en forêt (Buchter et Häusler 2009). Des valeurs indicatives et des seuils d'intervention ont été formulés pour pouvoir évaluer les atteintes aux sols (fig. 2). La détermination de ces valeurs est demandée dans la Politique forestière 2020 (cf. 1.4). Le tableau 1 indique les valeurs des paramètres physiques et mécaniques les plus importants pour évaluer la gravité des atteintes aux sols forestiers. Il s'agit de la conductivité hydraulique à saturation, de la densité apparente effective, du volume des pores grossiers et de la résistance à la pénétration. Les valeurs indicatives et les seuils d'intervention sont valables pour tous les sols affectés à la sylviculture, et se réfèrent aux couches minérales supérieure et sous-jacente du sol jusqu'à une profondeur maximale de 60 cm (Buchter et al. 2004). Une classification des ornières en forêt a été entreprise en tenant compte de ces paramètres et des valeurs indicatives et seuils d'intervention définis à cet effet (cf. 4.1.1).

**Paramètres pour déterminer les atteintes aux sols:**  
conductivité hydraulique à saturation, densité apparente, volume des pores grossiers, résistance à la pénétration

**Fig. 2 > Proposition de stratégie pour la protection des sols contre les atteintes physiques**



**Tab. 1 > Valeurs indicatives et seuils d'intervention pour la protection des sols contre les atteintes physiques en forêt proposées par la Société suisse de pédologie SSP**

	Densité apparente effective <sup>1</sup> g/cm <sup>3</sup>		Volume des pores grossiers <sup>2</sup> en % du vol.		Conductivité hydraulique à saturation <sup>3</sup> m/s		Résistance à la pénétration <sup>4</sup> MPa	
	Couche supérieure	Couche sous-jacente	Couche supérieure	Couche sous-jacente	Couche supérieure	Couche sous-jacente	Couche supérieure	Couche sous-jacente
Valeur indicative	1,50	1,7	10	7	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	1,5	2,0
Seuil d'intervention	1,65	1,85	7	5	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	3,0	3,5

<sup>1</sup> Densité apparente effective: densité apparente [g/cm<sup>3</sup>] + 0,009 x teneur en argile [%]

<sup>2</sup> Pores grossiers: contiennent de l'eau gravitaire, diamètre équivalent >0,05 mm

<sup>3</sup> Conductivité hydraulique à saturation: débit par unité de surface et de temps lorsque tous les pores sont saturés et conducteurs [cm/d]

<sup>4</sup> Résistance à la pénétration: résistance (exprimée en mesure de pression [Pa]) rencontrée par une sonde de mesure enfoncée dans le sol.

Buchter et al. 2004, adapté

### 1.3 Exigences de la société

La protection des sols répond aussi à une attente de larges groupes de la population. Celle-ci apprécie la matière première bois, mais souvent s'indigne en voyant les ornières laissées par les machines après la récolte. Dans les forêts de détente périurbaines, les visiteurs se montrent particulièrement sensibles à cette problématique. L'utilisation de la forêt à des fins récréatives et touristiques a fortement augmenté au cours des deux dernières décennies, en même temps que l'urbanisation se développait. Des articles de presse et des lettres de lecteurs font régulièrement état de dégradations des sols consécutives à la récolte du bois. Pour que ces travaux restent bien acceptés par la population et pour que les bonnes pratiques de la gestion des forêts soient respectées, l'exploitant a tout intérêt à prévenir ces conflits dans la mesure du possible.

La recherche d'une solution globale à la problématique de la protection des sols doit donc se faire en tenant compte non seulement des exigences écologiques et économiques, mais aussi des attentes de la société.

### 1.4 Politique forestière 2020

La Politique forestière 2020 expose les intentions du Conseil fédéral dans ce domaine jusqu'à l'horizon 2020. Parmi les onze objectifs mentionnés figure la protection du sol forestier: «Les sols forestiers, l'eau potable et la vitalité des arbres ne sont pas menacés par des apports de substances, ni par une gestion inadéquate, ni par des agents physiques» (objectif 7; OFEV 2013).

La protection des sols contre les atteintes physiques est l'un des objectifs de la Politique forestière 2020

Pour y parvenir, le Conseil fédéral propose trois lignes stratégiques:

- > Initiatives intersectorielles visant à réduire l'azote et les métaux lourds
- > Circulation des véhicules à moteur sur le sol forestier
- > Bilan nutritif

La ligne stratégique «Circulation des véhicules à moteur sur les sols forestiers» concerne la protection des sols contre les atteintes physiques. «La Confédération examine comment faire pour que les exigences et les conditions pour une gestion respectueuse du sol soient prises en compte dans le cadre des indemnisations et des aides financières de la Confédération (nouvelle péréquation financière [RPT]). Parallèlement, elle développe des mesures de communication sur la protection des sols contre les atteintes physiques» (ligne directrice 7.2 «Circulation des véhicules à moteur sur le sol forestier»; OFEV 2013).

Les mesures appropriées sont les suivantes:

- > éviter de circuler sur l'ensemble de la surface en concentrant le passage des véhicules sur les chemins et les layons de débardage;
- > adapter l'écartement des layons de débardage aux conditions locales;
- > marquer durablement les layons de débardage sur le terrain et/ou les inscrire sur des plans.

## 1.5 Certification

À l'heure actuelle, 56 % de l'aire forestière suisse, soit environ 700 000 ha, sont certifiés selon la norme FSC ([www.fsc-schweiz.ch](http://www.fsc-schweiz.ch)) ou PEFC ([www.pefc.ch](http://www.pefc.ch)) ou selon les deux systèmes ([www.agr.bfs.admin.ch](http://www.agr.bfs.admin.ch), état au 21.07.09). Si les exigences en matière de gestion des forêts diffèrent parfois selon les systèmes (OFEV 2009), les normes relatives à la protection des sols contre les atteintes physiques sont les mêmes dans les deux certifications. Elles sont formulées comme suit (FSC 2009; PEFC 2008):

«Un réseau de desserte fine, adapté à la station et couvrant si nécessaire plusieurs propriétaires, est mis en place pour permettre une récolte et une vidange des bois ménageant le peuplement et le sol. Les layons définis sont clairement marqués avant les interventions. Le réseau de layons est documenté au moins sous forme de croquis à main levée sur des cartes».

La circulation est limitée aux chemins forestiers et aux layons de débardage. On ne sillonne pas la forêt. Les systèmes de desserte sont adaptés à la topographie de manière à minimiser autant que possible l'emprise de la circulation sur le sol forestier. La distance minimale entre les layons de débardage est de 20 m, ou la densité de la desserte ne dépasse pas 500 m par hectare.

Interdiction de sillonner la forêt

Les ornières des layons de débardage qui détruisent à long terme la structure et la fertilité du sol et du sous-sol doivent être évitées (type d'ornières 3 selon les notices WSL), ou au moins réduites (type d'ornières 2 selon les notices WSL). L'interdiction de sillonner la forêt est également valable en cas de calamité. Dans un tel cas, on prendra en considération les recommandations de l'Office fédéral de l'environnement.

Lorsqu'une coupe de bois est terminée, un contrôle est effectué afin de relever les dégâts au sol et au peuplement. Si des dégâts sont constatés, qui dépassent les proportions définies de manière interne ou par contrat, des mesures correctives appropriées seront prises. Ces dégâts excessifs font l'objet d'un procès-verbal et des mesures correctives sont définies. Lors de la certification, le propriétaire forestier est respon-

sable du respect des principes, critères et indicateurs, sauf s'il délègue la gestion forestière à un tiers (et ainsi toutes les activités stratégiques et opérationnelles, pour autant qu'elles soient concernées par ces normes nationales pour la forêt)».

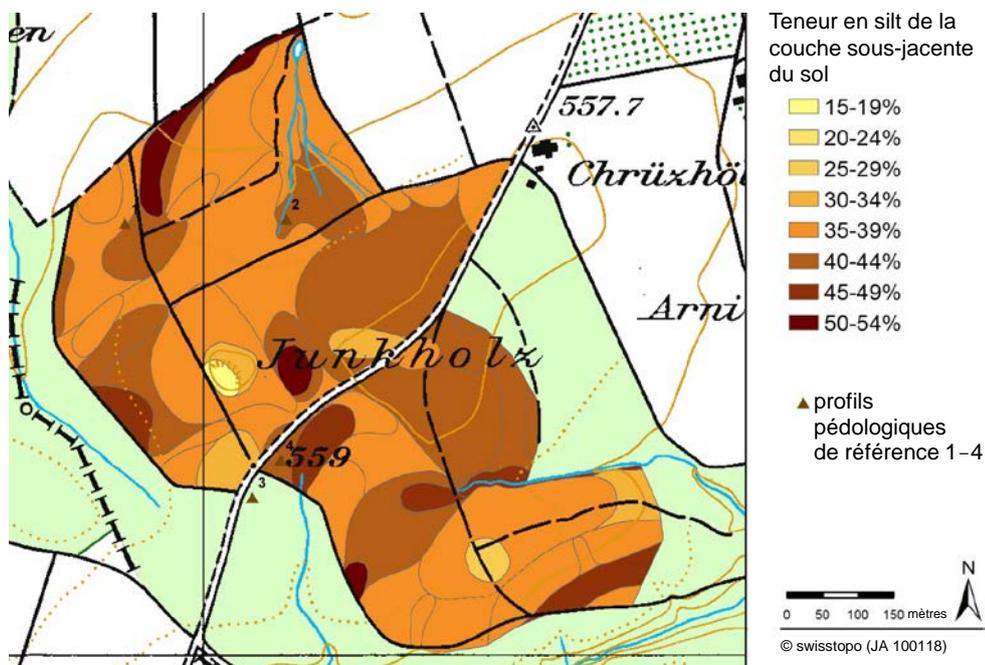
Les normes communes des labels FSC et PEFC sont harmonisées avec la Politique forestière 2020 (cf. 1.4).

## 1.6 Les sols forestiers sont hétérogènes

Les sols forestiers possèdent en général une structure naturelle et leurs caractéristiques sont très variables à petite échelle. Dans la plupart des cas, les sols les plus homogènes et faciles à travailler ont été convertis il y a longtemps à l'agriculture. Cette hétérogénéité naturelle empêche l'évaluation globale des conditions déterminantes pour le système de desserte fine (layons de débardage) pour de grandes surfaces. Même sur un terrain dont la surface paraît homogène, les caractéristiques pédologiques peuvent varier à petite échelle. Ces différences s'observent notamment au niveau de la granulométrie, de la pierrosité, de l'humidité et de la teneur en matière organique, qui sont autant de propriétés déterminantes pour l'évaluation de la sensibilité à la compaction. Les cartes des sols permettent de présenter ces caractéristiques pour la couche supérieure et la couche sous-jacente du sol. La fig. 3 illustre les différences de texture de la couche sous-jacente du sol de la parcelle d'essai de Messen-Junkholz sur la base de la teneur en limon. On constate que dans les polygones délimités lors de la cartographie, cette teneur varie considérablement (de 30 à 60 %<sub>g</sub>). Il est donc relativement difficile et fastidieux d'évaluer la sensibilité à la compaction sur cette base. La fig. 39 (cf. 5.2.2) est une présentation commentée de la sensibilité à la compaction de la couche sous-jacente du sol de cet extrait cartographique.

L'hétérogénéité des sols forestiers rend plus difficile l'évaluation de la sensibilité à la compaction

Fig. 3 > Présentation des différentes propriétés granulométriques (teneur en silt) de la couche sous-jacente du sol de la parcelle d'essai de Messen-Junkholz



Données pédologiques: Amt für Umwelt, canton de Soleure.

## 1.7 Changements climatiques

Selon le rapport à l'OFEV de l'Organe consultatif sur les changements climatiques (OcCC 2008), les changements climatiques pourraient avoir les conséquences suivantes pour la gestion forestière respectueuse du sol:

La température estivale moyenne (juin, juillet, août) augmentera de 2,5 à 7,5 °C d'ici à 2070 par rapport à la moyenne des années 1961 à 1990. La limite inférieure de la fourchette est calculée selon le scénario d'une intervention visant à protéger le climat (réduction immédiate et radicale des émissions anthropiques de CO<sub>2</sub>). Une hausse des températures s'accompagne toujours d'une augmentation de l'évaporation. En été, les précipitations pourraient ainsi diminuer de 40%. En hiver, il faut s'attendre à un réchauffement de 1 à 5 °C par rapport à la moyenne des années 1961 à 1990 et à une légère augmentation des précipitations (+8%). Le nombre de jours de fortes gelées diminuera.

La hausse des températures et l'évaporation accompagnée d'un recul des précipitations en été rendront les sols plus secs et donc en principe plus portants en période estivale. En hiver par contre, l'augmentation des températures et des précipitations et la diminution des jours de fortes gelées rendront les sols plus humides et les conditions moins propices à la circulation des véhicules. Ces conditions défavorables se feront d'autant plus ressentir que la saison des coupes de bois recouvre aussi les mois d'hiver. Les exploitants seront ainsi encore plus souvent amenés à exécuter les coupes pendant la période végétative et à courir le risque de causer davantage de dégâts aux peuplements.

Contrairement aux changements discutés précédemment (température, précipitations), les prévisions relatives aux événements météorologiques extrêmes, comme vagues de chaleur et tempêtes, sont encore entachées de beaucoup d'incertitudes. Il faut néanmoins s'attendre à une augmentation des exploitations forcées et donc à un risque accru que des engins circulent sans précaution particulière pour les sols forestiers lors des travaux de déblaiement.

En conclusion, il faut s'attendre à ce que les conditions climatiques soient d'une manière générale moins favorables à la protection des sols lors de la récolte de bois. Les hivers doux et humides et les événements extrêmes réduiront encore les périodes adaptées à la circulation des engins forestiers, qui risquent ainsi d'être plus souvent utilisés dans des conditions défavorables.

**Les changements climatiques rendront beaucoup plus difficile de protéger les sols lors de la récolte de bois**

## 1.8 Exploitation accrue de bois

Le bois est une matière première renouvelable présentant un bilan écologique en général bien meilleur que celui des énergies fossiles (Steubing 2013). Après avoir été utilisé comme matériau, il peut encore servir à produire par exemple de l'énergie, ce qui résout en grande partie le problème de l'élimination et du recyclage. En raison de ses nombreux avantages, le bois sera de plus en plus demandé à l'avenir.

Pour que l'exploitation forestière soit intéressante, la mise à disposition du bois devrait couvrir au moins à court terme les frais du propriétaire de forêt et devenir rentable à long terme. Le produit de la vente doit aussi financer toutes les prestations fournies en dehors de la production du bois, comme les soins sylvicoles, l'entretien des chemins et les frais administratifs. Cependant, les prix de vente du produit bois sont très influencés par le marché mondial. Ils sont donc bas en Suisse par rapport aux frais de production. Par conséquent, il faut réduire au maximum les coûts d'exploitation. C'est la raison pour laquelle la récolte mécanisée s'est fortement développée au cours des vingt dernières années dans les régions du Plateau, des Préalpes et du Jura accessibles aux engins forestiers. Cette évolution a encore été accentuée par les grandes quantités de bois à façonner et les chutes de prix enregistrées à la suite des tempêtes Vivian (1991) et Lothar (1999). Aujourd'hui encore, la pression sur les coûts conduit à utiliser des machines toujours plus performantes et donc en général plus lourdes. C'est ainsi que le risque de dégradation des sols lors de la récolte de bois augmente selon la station, d'autant plus que pour répondre à la hausse de la demande, l'exploitation s'étend à des régions plus difficilement praticables.

**La demande accrue en bois augmente, le risque de dégâts aux sols**

L'optimisation logistique de la chaîne de récolte constitue également une source de conflits potentiels entre la récolte de bois et la protection des sols. Avec les délais serrés et les stocks réduits des entreprises de transformation du bois, les exploitants n'ont souvent pas beaucoup de marge si les conditions météorologiques sont défavorables (sols humides). Les engins utilisés dans le cadre des processus de récolte hautement mécanisés sont coûteux et doivent donc être exploités au maximum sur l'année. Comme leur déplacement à court terme vers un site présentant des conditions plus favorables entraîne des coûts supplémentaires, on préfère souvent continuer de travailler sur place, même si le terrain est trop humide. À cela s'ajoute le fait que les entre-

preneurs forestiers privés n'ont souvent que peu de latitude pour organiser les travaux en cas de mauvais temps et qu'ils doivent respecter un planning à long terme.

## 1.9 Réglementations au plan européen

L'Union européenne n'a pas encore édicté de réglementation contraignante traitant directement de la protection des sols. Cependant, un projet de directive-cadre a été élaboré en 2006. Elle a déjà été mise en discussion, mais aucune décision n'a été prise jusqu'ici. L'introduction de cette directive doit permettre de répertorier et évaluer les menaces qui pèseront sur les sols à l'échelle européenne. Parmi les huit menaces énumérées ([www.umweltbundesamt.at](http://www.umweltbundesamt.at), état au 24.07.09) figure le tassement, qui comprend aussi la compaction due à l'exploitation des forêts (Commission de l'Union européenne 2006).

Dans le cadre de mesures volontaires, le modèle DPSIR (abréviation de Driving forces, Pressures, States, Impacts and Responses) est utilisé parmi d'autres au plan européen. Le DPSIR vise à répertorier les problèmes, comme celui de la protection des sols, à surveiller leur évolution dans le temps et à contrôler et gérer les forces, les influences et les actions qui les sous-tendent. Il permet ainsi de présenter de manière systématique et claire les atteintes environnementales et les mesures de protection de l'environnement. Ce modèle est employé notamment par l'Agence européenne pour l'environnement (European Environment Agency EEA), le Programme des Nations Unies pour l'environnement (United Nations Environment Programme UNEP) et, en Suisse, par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Dans le cas qui nous concerne, son objectif est l'utilisation durable du sol (Lüscher et al. 2008). Le principe consiste à déterminer tout d'abord les forces (D), qui engendrent à leur tour des pressions (P), lesquelles conduisent à un état (S). De cet état découlent des impacts (I) directs et indirects, qui nécessitent des mesures correctives au sens d'une réponse (R). Cette approche montre la voie d'une collaboration directe entre les milieux scientifiques, la société et la politique. Elle permet également de déduire une stratégie pour le transfert de connaissances (Lüscher et al. 2008).

Au plan européen, le modèle DPSIR esquisse les axes d'une utilisation durable du sol

## 1.10 La situation en Allemagne

La protection des sols contre les atteintes physiques occupe une place importante dans l'économie forestière allemande. Au plan fédéral, elle est inscrite dans la loi sur la protection des sols (Bundesbodenschutzgesetz BBodSchG 1998), dans la loi sur la protection de la nature (Bundesnaturschutzgesetz BNatSchG 2002) et dans la loi sur les forêts (Bundes-Waldgesetz BWaldG 1975). La loi sur la protection de la nature est celle qui formule le plus clairement les objectifs du point de vue des exigences; elle prescrit que la capacité de fonctionnement et de régénération du sol et son utilisation durable soient garanties à long terme (Kremer et al. 2009). La loi sur la protection des sols, en revanche, se limite à des énoncés sur la préservation ou la restauration durables des fonctions du sol. Quant à la loi sur les forêts, elle souligne la fonction de performance du système naturel et prévoit en outre des possibilités de restriction d'utilisation.

La conservation de la forêt contribue à garantir la performance du système naturel, y compris la fertilité des sols (BWaldG 1975; Choudhury et al. 2001).

À l'échelon des Länder s'appliquent les lois d'exécution correspondantes, comme la loi bavaroise sur la protection des sols (BayBodSchG 1999). Leur importance pratique pour l'économie forestière est restée modeste, car le droit sur la protection des sols, en tant que droit plus spécifique, est en principe subordonné à la législation forestière. Il en va de même de la loi sur les atteintes environnementales (Umweltschadengesetz USchadG), entrée en vigueur en 2007. Par conséquent, les lois sur les forêts des Länder, comme celles du Bade-Wurtemberg (LWaldG 1995) ou de la Bavière (Bay-WaldG 2005), déploient leurs effets principalement par leurs prescriptions sur l'exploitation. La première met l'accent sur la préservation de la fertilité des sols forestiers, la seconde précise que ces sols doivent être «traités avec ménagement». Toutes deux intègrent aussi une dimension spatiale, dans la mesure où la desserte fine est également liée à la protection du «sol forestier».

Sur proposition de la conférence des inspecteurs des forêts, le groupe de travail sol de l'association allemande pour les travaux forestiers et la technique sylvicole KWF («Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik») s'est accordé en 2009 sur les points suivants:

- > circuler uniquement sur les layons de débardage;
- > planifier les layons indépendamment du peuplement forestier présent, les aménager de façon permanente et documenter leurs emplacements;
- > utiliser les layons de manière qu'ils restent praticables, qu'ils n'entraînent pas d'érosion et que les exigences esthétiques soient respectées;
- > planifier à l'avance les mesures (organisationnelles et techniques) visant à protéger les layons;
- > internaliser les coûts de réparation des dégâts (principe de causalité).

Les outils de mise en œuvre des objectifs de protection des sols développés dans l'ensemble du pays comprennent les directives des administrations forestières, les notices, et les lignes directrices pour la certification. Presque toutes les directives des Länder traitant de la protection des sols contre les atteintes physiques en forêt se réfèrent à la desserte fine. En l'état actuel, toutes prescrivent un réseau de layons permanents et le maintien de la praticabilité technique. Elles interdisent les mouvements de machines en dehors des layons de débardage et des autres chemins (Schack-Kirchner et Hildebrand 2009).

Par exemple, la brochure sur la protection des sols de l'administration forestière bavaroise «Bayerische Staatsforsten» interdit de silloner la forêt, prescrit la création de layons permanents, et traite de divers autres paramètres techniques pertinents concernant la desserte fine et les machines utilisées (Kremer et al. 2009, BaySF 2010). Elle précise que les layons existants doivent être repris si possible dans les nouvelles planifications, et interdit en principe les travaux de terrassement sur les layons. Ce système permet à l'exploitant d'exiger dès la planification et la mise au concours de la récolte des bois l'utilisation de méthodes de travail appropriées et d'une technique adéquate, ce qui est en général appliqué de manière systématique. Par ailleurs, un contrôle approfondi portant sur les aspects de la protection des sols doit être effectué et documenté

**Les Länder allemands ont publié de nombreuses directives sur la protection des sols**

après chaque mesure. Cette procédure aboutit à la création d'un système d'assurance-qualité centré sur l'amélioration permanente.

Un autre exemple est la directive détaillée sur la desserte fine («Richtlinie Feinerschliessung») publiée par l'administration forestière du Bade-Wurtemberg (ForstBW 2003), qui repose sur une stratégie clairement orientée vers la prévention. En voici quelques points importants:

Directive sur la planification de la desserte fine dans le Bade-Wurtemberg

- > relevé et analyse de la situation actuelle de la desserte fine à l'échelle de plusieurs parcelles;
- > adaptation du réseau de desserte fine existant;
- > création de nouveaux réseaux de layons;
- > marquage des réseaux de layons pour s'assurer qu'ils puissent être retrouvés;
- > conservation et restauration de la praticabilité technique des layons: prévention de la formation d'ornières;
- > marche à suivre en cas d'événements extraordinaires;
- > découvertes pédologiques et leurs conséquences;
- > conditions générales.

La planification de la desserte fine part des principes suivants:

1. la circulation en tous sens doit être évitée;
2. les layons constituent des lignes permanentes de la desserte fine;
3. les layons ne sont en principe pas consolidés;
4. les layons ont au plus 4 mètres de large;
5. les layons doivent être signalés de façon permanente et documentés sur des cartes;
6. les layons existants doivent être repris dans les nouvelles planifications même si leur emplacement n'est pas optimal.

La stratégie se base sur un classement de la sensibilité écologique et technique au passage de véhicules selon la texture des sols et le groupe de substrat, qui sont à déterminer en se basant sur la carte des stations. Le choix du type de desserte fine et du tracé des lignes est établi sur cette base.

Dans la pratique, cette stratégie de protection doit être mise en œuvre selon un schéma déterminé. Les aides à la décision suivantes sont proposées pour les trois points importants «relevé de l'état, analyse et adaptation»:

1. Aide à la décision sur les normes techniques des types de desserte fine
  - déclivité
  - largeur
  - niveau d'aménagement
2. Aide à la décision sur les types de desserte fine en fonction de la morphologie et du substrat
  - terrain plat/pente: toujours deux catégories en fonction des classes de sensibilité
3. Aide à l'exécution sur le tracé des lignes des différents types de desserte fine
  - tracé des lignes
  - distances entre les lignes

L'accent est mis sur la nécessité de conserver la praticabilité technique. Il est même recommandé de consolider les layons lors de leur restauration, ce qui peut entraîner une perte totale de la fonctionnalité écologique du sol. Il est admis que toute contrainte cause des dégâts aux sols, mais ceux-ci ne sont pas définis concrètement. Les paramètres des machines ne sont pas pris en considération dans les aides à la décision.

Comme dernier exemple, il convient de mentionner deux brochures de l'administration forestière de l'État libre de Thuringe consacrées à la protection des sols lors de la récolte des bois («Bodenschutz und Holzernte», ThüringenForst 2008) et dans le cadre de la desserte forestière («Bodenschutz und Walderschliessung», Thüringen-Forst 2009). Ces directives clairement structurées sont conçues comme des aides pour les professionnels de la forêt dans le domaine de la récolte de bois et de la desserte forestière, et mettent l'accent sur la préservation des sols. Elles préconisent là aussi des lignes de desserte fine permanente. Les points les plus intéressants se trouvent aux chapitres suivants:

Protection du sol et récolte  
des bois en Thuringe

#### 1. Définitions

- dégâts aux sols (perte de fonction des sols par suite de compaction);
- praticabilité technique (maintien du réseau de layons au-delà de la période de production);
- réaction du sol (classification, facteurs d'influence et ensemble de critères);
- appréciation sur le terrain (formation d'ornières réparties en 3 classes: 0–30 cm tolérable, 30–60 cm critique, >60 cm inacceptable). Si la formation d'ornières critiques est prévisible, la mesure ne doit pas être lancée. À partir de 20 % d'ornières critiques, la mesure est interrompue (les connaissances récentes montrent qu'il est discutable de se baser uniquement sur ce type de déformation).

#### 2. Mesures techniques

- éviter les problèmes de traction;
- normes minimales pour les engins forestiers (traction, répartition de la charge sur les essieux, pneumatiques, semi-chenilles);

#### 3. Méthodes de récolte respectueuses du sol

- les dégâts aux peuplements, les atteintes aux sols, la charge de travail et le risque d'accidents sont évalués sur une échelle de cinq degrés allant de très faible à très élevé;

#### 4. Lien avec la pratique

- présentation de stratégies de mise en œuvre détaillées depuis les questions de responsabilité jusqu'aux coûts de la protection des sols. Des formulaires spéciaux d'accompagnement des travaux permettent de documenter la préparation, le suivi et l'interruption des mesures. Les consignes relatives à la formulation des risques dans les appels d'offres et à la justification écrite des interruptions de travaux et des coûts supplémentaires qui en résultent doivent être suivies. Enfin, des données chiffrées sont fournies sur l'augmentation des coûts du mètre cube plein et les possibilités de suppléments pour difficultés d'exploitation sont examinées.

Les trois exemples ci-dessus visent à illustrer l'éventail des solutions envisagées et montrent différentes priorités fixées. Ils permettent de constater que malgré des objectifs similaires et une volonté commune, la façon de concevoir la protection des sols dans le domaine de la gestion des forêts est encore loin d'être uniformisée.

## 2 > Le projet «Protection physique des sols en forêt»

---

Les travaux de déblaiement entrepris après l'ouragan Lothar ont causé des dégâts très graves aux sols en de nombreux endroits. En suite de quoi, un besoin en formations initiales et continues sur la protection des sols lors de la récolte des bois s'est fait ressentir dans la pratique forestière. C'est ainsi qu'en 2001, le WSL a organisé un premier cours sur ce thème à la bourgeoisie de Berne. D'autres cours organisés par la suite ont mis en évidence la nécessité de disposer de bases plus complètes. Après divers petits projets, le WSL a développé en coordination avec l'OFEV le programme «Protection physique des sols» en 2004. Il s'agissait d'un projet interdisciplinaire mené en commun par l'unité de recherche Sols forestiers et biogéochimie et le groupe de recherche Systèmes de production forestière. Il était soutenu au plan technique par la chaire de génie forestier et d'informatique appliquée de l'école polytechnique de Munich (Technische Universität München). Un groupe d'accompagnement constitué de représentants de la pratique (annexe A1-2) l'a suivi depuis son lancement et a régulièrement formulé de précieuses suggestions. Ce projet, dont la durée a été fixée à quatre ans (2006–2010), comportait d'une part des travaux de recherche, d'autre part des cours de formation continue à l'intention des divers acteurs de la gestion forestière. Par ailleurs, des mesures étendues de mise en œuvre au niveau cantonal ont été élaborées dans le cadre de conventions pluriannuelles avec le service des forêts du canton d'Argovie (2009–2011).

Enfin, le projet sur la régénération de sols compactés avec des aulnes glutineux mené en collaboration avec l'EPFZ et financé par le Fonds pour les recherches forestières et l'utilisation du bois, a permis d'obtenir des résultats complémentaires sur l'amélioration active des fonctions de l'espace racinaire dans des sols dégradés (cf. 5.5).

### 2.1 Contexte

Comme l'ont montré des recherches menées dans des réserves Lothar (cf. 5.3), les travaux de déblaiement ont eu un impact sur les sols, qui ont subi des perturbations et des dégâts plus ou moins importants. À l'époque, les risques de compaction n'avaient pas toujours été suffisamment pris en compte lors de la planification et de la mise en œuvre de ces travaux.

Dans le cadre du troisième inventaire forestier national IFN (Brändli 2010), un relevé des ornières visibles a été entrepris pour la première fois sur le réseau d'échantillonnage 2004–2006 afin de dresser une vue d'ensemble suisse. Les ornières ont été classées en trois catégories (légère, moyenne, forte) qui correspondent aux classes 1, 2 et 3 présentées sous le point 4.1.1. Un extrait des résultats de l'Inventaire forestier national IFN3 (Schwyzer und Keller 2009) est reproduit au tableau 2. On constate que 2 % de la surface forestière praticable par les engins forestiers en Suisse ont subi des

Relevé des dégâts aux sols dans  
l'Inventaire forestier national IFN3

dégâts du sol, ce qui représente 13 300 ha. Pour la région du Plateau, où la part de surfaces praticables est la plus élevée, la proportion atteint près de 4 %. À l'échelle suisse, les surfaces gravement endommagées (type d'ornière 3) représentent 0,2 % de la surface forestière praticable par les engins forestiers, soit près de 1400 ha. Dans l'inventaire forestier national, la surface praticable a été déterminée sur la base des procédés de récolte utilisés sur les placettes. Il s'agit de terrains présentant une pente maximale de 45 % et un sol suffisamment portant. Outre les résultats actuels de l'inventaire forestier national, les prochains relevés seront particulièrement intéressants, car ils permettront de suivre l'évolution de l'utilisation d'engins forestiers sur le réseau d'échantillonnage.

**Tab. 2 > Ornières relevées dans les forêts suisses selon l'Inventaire forestier national IFN3**

Région de production forestière	Surface forestière avec ornières (types 1–3). 100 % = surface forestière totale praticable en Suisse		dont surface forestière avec des types d'ornières 3 (= dégâts au sol d'un point de vue écologique)	
	%	ha	%	ha
Plateau	3,6	8 075	0,2	449
Préalpes	1,2	1 535	0,3	384
Alpes	0,4	435	0,1	109
Sud des Alpes	0,1	27	0,0	0
Jura	1,8	3 425	0,3	381
Suisse	2,0	13 566	0,2	1 357

adapté d'après Schwyzer und Keller 2009

## 2.2

### Objectif

Le but du projet était de créer des bases sur la protection des sols contre les atteintes physiques lors de l'exploitation des bois, et de sensibiliser les acteurs de la gestion des forêts à cet aspect lors de l'utilisation d'engins forestiers. Le projet a compris les activités suivantes:

- > mise à disposition de connaissances de base adaptées aux conditions de la forêt suisse dans le domaine du sol et de l'utilisation des engins forestiers;
- > aménagement de parcelles d'essai à des fins de recherche et de formation (5.2);
- > essais d'utilisation d'engins forestiers pour étudier la formation d'ornières dans des conditions contrôlées (5.4);
- > analyse des atteintes aux sols et description adaptée à la pratique de ces atteintes sur la base de différents types d'ornières (4);
- > établissement de corrélations entre processus physiques et biologiques pour délimiter les types d'ornières (4.2.3);
- > étude de mesures de régénération de sols ayant subi des atteintes mécaniques (5.5);
- > intégration dans le système de gestion forestière des processus liés à la protection des sols relevant de l'entreprise et des autorités (6);
- > présentation des domaines dans lesquels la protection des sols occasionne des coûts et ordre de grandeur de ces derniers (6.6);
- > élaboration de documents pédagogiques adaptés aux différents niveaux et d'offres de formation continue ciblées en fonction des destinataires (6.2.1).

**Intégrer la protection des sols dans les mesures forestières**

2.3

## Procédure

Des parcelles d'essai, pour lesquelles différentes données de base sur les sols et la végétation étaient disponibles, ont été sélectionnées dans des stations forestières typiques de diverses régions du Plateau suisse, puis analysées en détail et aménagées à des fins de recherche et de formation (5.2). Elles ont aussi fait l'objet d'un relevé cartographique de la desserte fine et de son état. Les layons ont été cartographiés d'après la typologie des types d'ornières. Ces relevés ont fourni la base de l'étude des corrélations physiques et biologiques. Les essais de passages d'engins (5.4) en conditions contrôlées ont permis d'étudier la formation d'ornières à partir de données connues. Par ailleurs, différents schémas de circulation ont été analysés et des mesures de régénération mises en œuvre dans des réserves Lothar. Enfin, de nombreuses surfaces ont été aménagées pour pouvoir accueillir des cours de formation continue.

Une à deux fois par mois, le groupe d'accompagnement constitué de représentants de l'OFEV, des institutions de formation, des associations forestières et de la pratique (annexe A1-2) a reçu des informations sur les travaux réalisés et sur ceux en projet. En raison de l'importance que revêt la formation initiale et continue pour la protection des sols contre les atteintes physiques, et en prévision de l'élaboration d'une documentation de cours appropriée, un groupe spécialisé formé de représentants des institutions de formation forestière et d'une représentante de l'OFEV (annexe A1-3), a été institué pour s'occuper des questions didactiques.

Accompagnement du projet par des spécialistes de la pratique

2.4

## Produits

Les produits issus de ce projet sont nombreux et variés et reflètent la diversité des thèmes traités et du public cible (annexe A2):

- > publications dans des revues forestières et agricoles,
- > publications dans des magazines scientifiques,
- > articles dans la presse quotidienne,
- > notices pour le praticien du WSL, complétées si nécessaire par des dépliants,
- > la présente publication.

Parallèlement aux travaux du projet, de nombreuses séances de formation initiale et continue ont été proposées dès le début à tous les acteurs de la gestion des forêts: propriétaires forestiers, chefs d'exploitation, entrepreneurs forestiers, conducteurs d'engins, services forestiers et autorités forestières, services de la protection des sols, organisations de protection de l'environnement et responsables de la certification. Au total, quelque 1900 participants ont reçu ainsi une formation. Une présentation détaillée de la formation figure à l'annexe A9.

Mise en œuvre étendue des résultats dans la pratique

Différentes priorités ont été fixées pour les activités de formation. En 2006, celles-ci se sont adressées en particulier aux représentants des services cantonaux de la protection des sols, en 2007 aux responsables de la formation dans les cantons, et en 2008 aux enseignants des écoles professionnelles.

Au programme de ces cours d'une journée figuraient la structure naturelle du sol, les caractéristiques d'un sol compacté, les différents types d'ornières, et les mesures de protection des sols d'ordre organisationnel et technique.

## 2.5 Programme «Gestion prospective de l'utilisation de la forêt»

Le programme de recherche du WSL «Gestion prospective de l'utilisation de la forêt» avait pour objectif de développer des bases, des méthodes et des instruments de gestion qui permettent d'organiser et de gérer de manière plus efficace et plus efficiente l'exploitation des forêts, en particulier sur le plan économique. L'accent a été mis sur l'exploitation du bois, le but étant d'améliorer la compétitivité des entreprises et des produits au moyen de solutions innovantes et adaptées à la pratique.

Ce programme de recherche a fourni des données de base, des méthodes et des instruments pour la gestion des exploitations forestières. Il a été conclu par la publication en octobre 2009 d'un livre résumant les principaux projets et résultats obtenus (Thees et Lemm 2009). L'ouvrage se présente sous la forme d'un recueil réunissant plus de 30 contributions contrôlées. Les résultats y sont subdivisés en six domaines, l'un d'eux intégrant la protection des sols contre les atteintes physiques. Certains aspects de la présente publication y sont décrits de façon plus approfondie. C'est le cas notamment des principes de gestion de la protection des sols contre les atteintes physiques lors de la récolte de bois. Des analyses juridiques, écologiques et économiques fournissent des bases pour professionnaliser l'application de ces principes. Il s'agit des contributions suivantes:

- > Bases légales de la protection des sols contre les atteintes physiques» (Iten 2009)
- > Atteintes à long terme à la fertilité des sols forestiers suite à des perturbations (Lüscher et al. 2009b)
- > Réflexions conceptuelles sur la gestion de la protection des sols contre les atteintes physiques (Spjevak und Thees 2009a)
- > Modélisation de l'utilité des équipements d'engins forestiers pour la protection des sols contre les atteintes physiques (Spjevak et al. 2009b).

**Intégration de la protection des sols dans la gestion des exploitations forestières**

## 3 > Bases pédologiques

---

Le sol constitue une zone intermédiaire entre l'atmosphère, la biosphère et la géosphère. Les phénomènes se déroulant dans les couches limitrophes sont en général complexes et difficiles à comprendre. Les utilisateurs de cette zone intermédiaire – comme la sylviculture – doivent reconnaître et accepter les contraintes qui en découlent. Pour ce faire, il est indispensable de posséder des connaissances sur le sol en tant que bien à protéger.

Les sols forment la couche superficielle de la croûte terrestre. Leur épaisseur va de la surface du sol jusqu'à la roche-mère. Ils sont composés de constituants solides, minéraux et organiques, aux propriétés spécifiques et d'espaces poreux occupés par de l'eau et de l'air. Les pores remplis d'air et d'eau sont le siège d'un échange de matières et d'énergie entre les constituants solides, la roche-mère, l'atmosphère, l'hydrosphère ainsi que les êtres vivants du sol et les plantes.

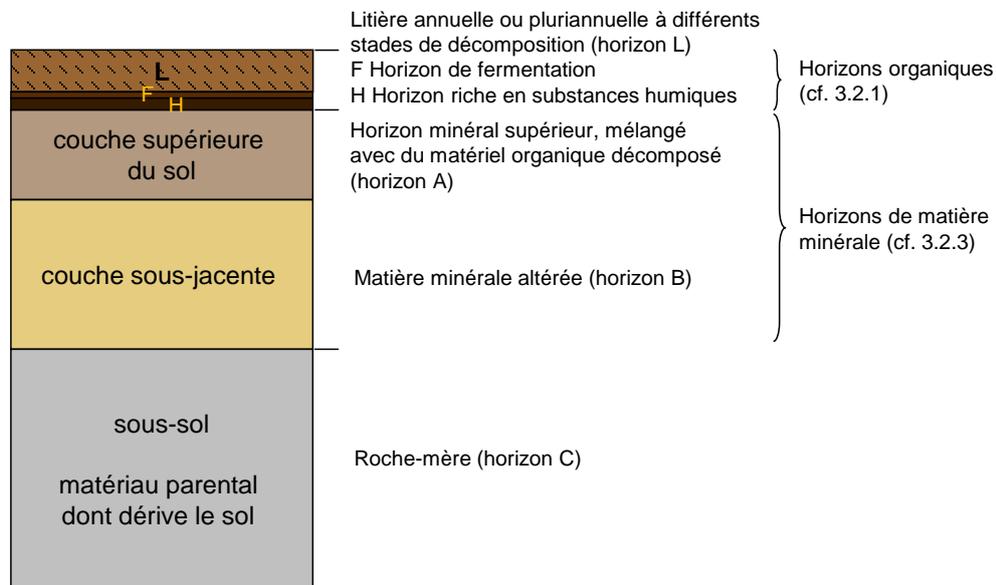
**Le sol est formé de constituants solides et d'espaces poreux remplis d'air et d'eau**

La formation du sol est un processus évolutif permanent déterminé par différents facteurs pédogénétiques. Parmi ceux-ci figurent la roche-mère, le climat, le relief et les organismes qui exercent ensemble leur influence au fil du temps, généralement depuis la dernière glaciation.

Les principaux processus intervenant dans la pédogenèse sont l'altération (physique, chimique, biologique), la formation de l'humus, la formation de la structure, la néoformation de matière minérale ainsi que la migration de minéraux argileux, des éléments nutritifs et des substances humiques. L'influence de ces divers facteurs conduit à la formation de sols différemment structurés (3.4.2) présentant des caractéristiques et propriétés spécifiques (3.3), et constitués de couches évoluant en général parallèlement à la surface regroupées par horizons pédologiques.

La structure du sol et certaines propriétés pouvant accroître la résistance aux forces exercées jouent un rôle déterminant dans l'évaluation du risque de compaction (Lüscher 2013). Les données de base nécessaires à cette évaluation sont présentées dans les pages suivantes.

Fig. 4 > Représentation schématique de la structure du sol



### 3.1

## Principales fonctions des sols

Un sol intact remplit une multitude de fonctions. Les principales sont les suivantes:

- > Les sols servent de lieu de croissance aux plantes supérieures auxquelles ils offrent des possibilités d'enracinement et un approvisionnement en eau et en éléments nutritifs. La fertilité est par conséquent la caractéristique la plus significative d'un sol dans la mesure où la végétation doit s'adapter aux conditions naturelles du milieu. Le sol représente en outre la base de la production dans la foresterie comme dans l'agriculture.
- > Les sols possèdent un fort pouvoir de tampon contre l'acidification et forment de surcroît un filtre efficace contre les substances indésirables qui peuvent polluer la nappe phréatique et porter atteinte à la qualité de l'eau potable. Cette capacité de filtration permet à nombre de ces substances, comme les métaux lourds, d'être stockées pendant très longtemps dans le sol et de revenir ensuite dans la biosphère à travers le cycle des éléments nutritifs.
- > Les sols servent d'habitat à de nombreux organismes vivants comme les bactéries, les acariens, les insectes, les nématodes, les vers, les champignons, etc. Tous ces organismes forment une chaîne de décomposeurs où ils occupent d'importantes fonctions dans la décomposition, la transformation et la réorganisation de la matière organique. Ils participent également à l'altération des roches ainsi qu'à la mobilisation de micronutriments par la sécrétion d'acides organiques. Les champignons mycorhiziens facilitent l'absorption de l'eau et des éléments nutritifs pour de nombreuses plantes et en particulier pour les arbres forestiers. L'activité des vers de terre est aussi à l'origine de la formation de complexes argilo-humiques, de types de structures favorables et de pores conducteurs dans le sol. Ces organismes sont difficiles à voir ou à quantifier dans leur ensemble, mais c'est grâce à leur grande diversité que les fonctions les plus importantes de nos sols sont préservées.

Le sol est vivant

## 3.2 La structure du sol en forêt

Les sols forestiers se distinguent des sols agricoles principalement par leurs horizons organiques et par la succession intacte des horizons pédologiques. La matière organique se décompose sans influences extérieures (pas de travail mécanique du sol ni d'apports de matières auxiliaires), ce qui conduit à la formation de couches supérieures typiques pour la station appelées formes ou types d'humus. Celles-ci fournissent des indications sur l'activité biologique et sur sa capacité à décomposer la matière organique (cf. 3.2.2). Elles permettent aussi de tirer indirectement des conclusions sur le risque de compaction et la capacité de régénération.

Les sols forestiers ont conservé une structure naturelle

Les caractéristiques des sols forestiers sont très variables à l'échelle locale, ce qui est aussi une particularité de ce type de sols.

L'enracinement sous une forêt est lui aussi très variable. Suivant la composition et la structure des peuplements, l'espace poral est occupé et influencé sur une période plus ou moins longue par les racines lignifiées.

### 3.2.1 Horizons organiques

Les débris végétaux frais sont transformés plus ou moins rapidement par les organismes du sol en fonction du degré d'activité biologique. Il en résulte différents niveaux de décomposition décrits comme horizons organiques: l'horizon L constitué essentiellement de litière fraîche non transformée, l'horizon Of où les débris végétaux sont décomposés (fermentés), et enfin l'horizon Oh dans lequel la matière organique est, dans son ensemble, déjà décomposée en humines (fig. 6–8).

### 3.2.2 Formes d'humus

Les formes d'humus sont décrites et définies d'après la succession des horizons et l'épaisseur des horizons organiques (fig. 5). Un autre critère est l'épaisseur de l'horizon de matière minérale mélangé à de l'humus (horizon A, cf. 3.2.3). La forme d'humus est un indicateur de la capacité de transformation des éléments nutritifs de la couche supérieure du sol et par conséquent de son degré d'activité biologique pour une station donnée. Les perturbations affectant la couche supérieure du sol freinent la transformation et la mise à disposition des éléments nutritifs et, en cas d'atteintes graves, peuvent menacer sa fonction de lit de germination pour le rajeunissement naturel en forêt. Les formes d'humus, par leur constitution et leur structure, fournissent ainsi de premières indications sur la sensibilité des sols à la compaction. Plus la proportion de matière organique dans la couche supérieure du sol est importante, moins le risque de compaction est élevé. Les effets de la compaction peuvent se faire sentir jusqu'au niveau de la couche sous-jacente, dont la capacité de régénération est limitée.

Les formes d'humus fournissent des indications sur la sensibilité des sols à la compaction et sur leur capacité de régénération

Les formes d'humus typiques (mull, moder, mor ou humus brut, fig. 6–8) se développent généralement en conditions aérobies. Le mull se forme lorsque les débris végétaux sont décomposés en l'espace d'une année et que la matière organique transformée se mélange en profondeur avec la matière minérale fine (horizon A). L'humus brut résulte d'une décomposition lente des résidus végétaux et se distingue par des horizons organiques épais et une faible incorporation dans les horizons minéraux inférieurs. Le

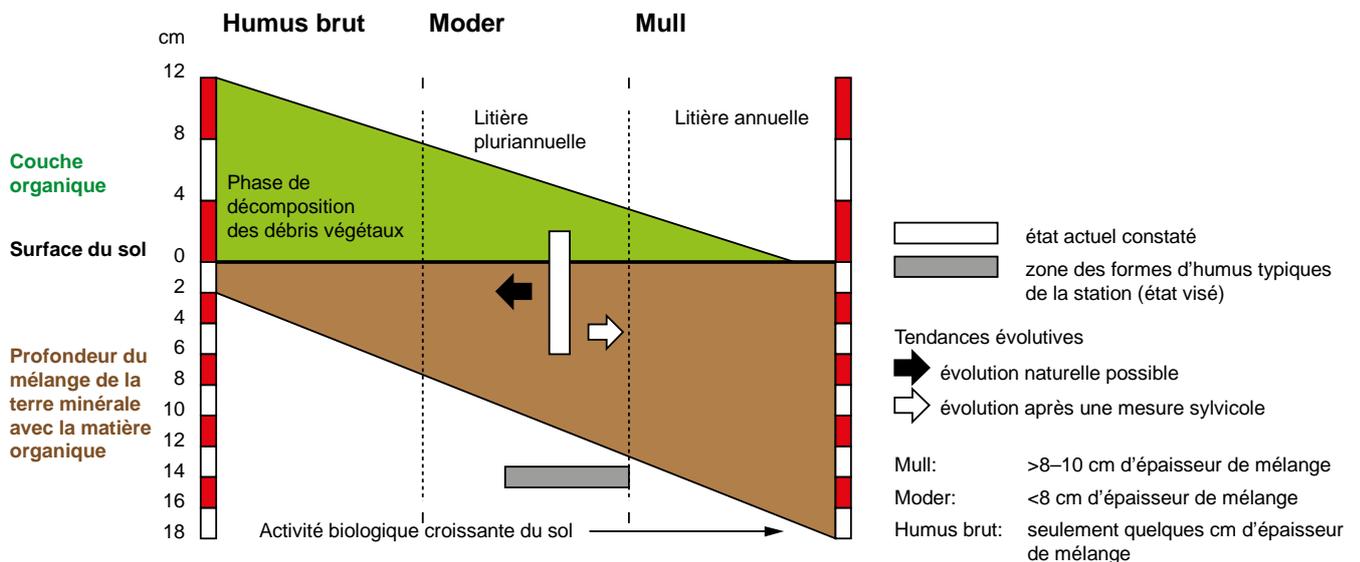
moder est une forme intermédiaire entre le mull et le mor et témoigne d'une activité biologique légèrement réduite.

À ces formes d'humus typiques s'ajoutent diverses autres qui varient suivant le régime de l'air et de l'eau dans la couche supérieure du sol: formes d'humus xériques (en milieux secs), hydromorphes (en milieux humides), très hydromorphes (en milieux saturés d'eau), et formes d'humus spéciales. En présence de tourbe ou d'anmoor, l'utilisation des véhicules doit être évitée.

Les caractéristiques de la couche supérieure du sol varient suivant la forme d'humus spécifique à la station. L'épaisseur de cette couche est reconnaissable à sa couleur sombre, due à la présence de matière organique. En général, plus la concentration de matière organique est élevée, plus la couleur du sol est sombre jusqu'à noirâtre. La documentation de base des cantons sur les stations de même que les instructions pratiques sur la gestion durable des forêts de protection (Frehner et al. 2005) fixent des objectifs à atteindre pour les formes d'humus des différents types de stations forestières. L'épaisseur que devrait avoir la couche supérieure du sol dans des conditions idéales, proches de l'état naturel, est ainsi indirectement définie à travers la forme d'humus. Les différences entre l'état visé pour une forme d'humus donnée et l'épaisseur observée de la couche supérieure (état actuel) s'expliquent généralement par des interventions sylvicoles passées (fig. 5).

**Influence des mesures sylvicoles sur l'humus**

**Fig. 5 > Formes d'humus typiques et tendances évolutives liées à l'activité sylvicole**



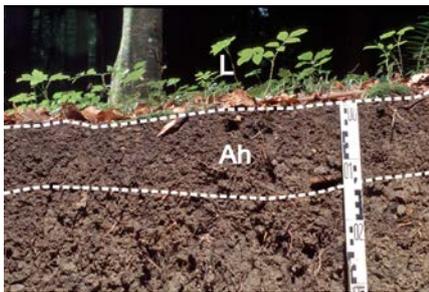
Le mull (L-Ah) est une forme d'humus biologiquement très active, caractérisée par une décomposition rapide des débris végétaux (généralement un an) et un mélange intime des substances humiques et de la matière minérale. Ce mélange, dû notamment à l'action des vers de terre, entraîne la formation de complexes argilo-humiques stables et en général de structures grumeleuses. L'acidité du mull va de très acide à alcalin. L'horizon Ah est en général d'une épaisseur supérieure à 8 cm (fig. 6).

Le moder (L-F-(H)-Ah) présente une activité biologique réduite. La décomposition de la litière est plus lente et incomplète. Un horizon de fermentation se forme à partir de restes végétaux de plusieurs années. L'horizon Ah est généralement moins épais et moins structuré que chez le mull. Le degré d'acidité se situe dans la zone acide à très acide (fig. 7).

L'humus brut (L-F-H-Ah ou L-F-H-AE) ne présente qu'une faible activité biologique. La décomposition des restes végétaux est freinée. Les horizons organiques se distinguent nettement et peuvent être épais. L'horizon Ah est peu structuré et de faible épaisseur, avec un degré d'acidité se situant dans la zone très acide. Sous la couche organique, on observe souvent une zone décolorée (horizon AE) qui s'appauvrit sous l'effet de l'éluviation du fer et de la matière organique (fig. 8).

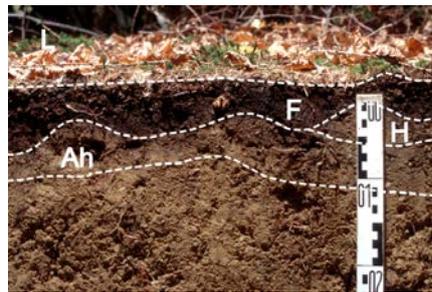
**Fig. 6 > Mull**

*Peu sensible à sensible: couche meuble, grumeaux en partie stables, capacité de régénération variable selon le milieu de décomposition.*



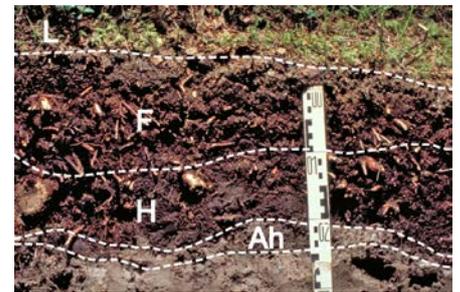
**Fig. 7 > Moder**

*Sensible à extrêmement sensible: profondeur d'incorporation faible, capacité de régénération limitée.*



**Fig. 8 > Humus brut**

*Extrêmement sensible à sensible: couches organiques parfois épaisses, capacité de régénération pratiquement nulle.*



L'annexe A3 propose une clé de détermination simplifiée des formes d'humus.

### 3.2.3 Horizons minéraux

Les horizons minéraux comprennent la couche supérieure du sol (horizon A) et la couche sous-jacente (horizon B), qui reposent sur la roche mère (horizon C). Les horizons A, B et C sont constitués principalement de composants minéraux. Dans l'horizon A, ceux-ci sont mélangés avec de la matière organique. Les critères de distinction des horizons minéraux sont la teneur en matière organique (couche supérieure), la structure, la brunification, l'hydromorphie et la migration (lessivage, accumulation).

L'horizon A est un horizon de couleur foncée constitué d'un mélange de matière minérale et de matière organique décomposée. C'est un milieu qui abrite de nombreux organismes du sol. En général, il forme une couche meuble et présente un enracinement intense.

L'horizon B, aussi appelé horizon minéral d'altération, doit sa couleur brune aux processus d'altération, de migration, d'accumulation et/ou de néoformation d'argile. La roche mère s'altère à mesure du développement du sol, ce qui aboutit à la formation de

**Les horizons pédologiques résultent de la formation et du développement des sols**

nouveaux minéraux et agrégats plus stables. En principe, l'incorporation de la matière organique n'atteint pas l'horizon B. Les seules exceptions sont les horizons illuviaux qui, dans certaines conditions, peuvent aussi s'enrichir en matières humiques par des processus de migration (podzolisation). De tels processus s'observent aussi avec l'argile (lessivage), entraînant dans ce cas la formation de sols bruns lessivés (cf. 3.2.4).

L'horizon C est constitué de la roche mère plus ou moins altérée. Celle-ci peut-être carbonatée (>75 % en masse de carbonate), marneuse (2 à 75 % en masse de carbonate) ou silicatée (<2 % en masse de carbonate) et se présenter sous forme de roches meubles, de blocs ou de roche massive.

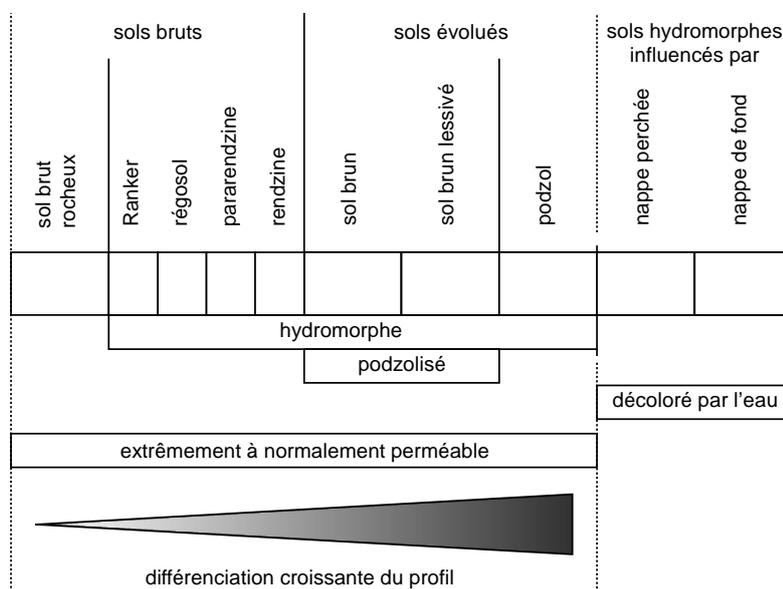
### 3.2.4 Types de sols

La formation du sol est un processus évolutif permanent déterminé par différents facteurs pédogénétiques. Parmi ceux-ci figurent la roche-mère, le climat, le relief et les organismes qui exercent ensemble leur influence au fil du temps.

Les principaux processus intervenant dans la pédogenèse sont l'altération (physique, chimique, biologique), la formation de l'humus et de la structure, la néoformation de matière minérale ainsi que la migration de minéraux argileux, des éléments nutritifs et des substances humiques. Ces processus conduisent à la formation de couches longitudinales, évoluant souvent parallèlement à la surface. Ces couches, appelées les horizons du sol, sont subdivisées en fonction de leurs caractéristiques. Elles se distinguent par leur apparence, mais aussi par leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques. Plus l'action de ces processus est intense, plus les sols se développent. Leur évolution va des sols bruts et sols bruts rocheux aux sols comprenant des horizons éluviaux et illuviaux, en passant par les sols altérés. Les sols hydromorphes sont influencés par les eaux stagnantes, de fond ou de pente.

Les horizons pédologiques déterminent la structure et donc le type de sol

Fig. 9 > Aperçu simplifié du développement du sol



Les types de sols fréquents en Suisse sont présentés ci-après avec une évaluation de leur sensibilité à la compaction. Des indications complémentaires sur le risque de compaction selon les caractéristiques et les propriétés du sol suivent au point 3.3.

### Sols bruts

Le sol brut rocheux (lithosol) (Ai à (A)-C) est constitué d'horizons organiques sur roche dure ou meuble; il est en général extrêmement superficiel (<15 cm), très pierreux et pauvre en terre fine. La roche contient parfois de nombreuses fentes et fissures comblées et/ou des interstices remplis de terre entre les pierres (fig. 10).

Le ranker (Ah-AC-C) est un sol constitué de roche dure non calcaire ou pauvre en calcaire. Il est superficiel à moyennement profond, souvent pierreux. Un ranker peut être brunifié et/ou podzolisé (fig. 11).

Le régosol (Ah-AC-C) est un sol constitué de roche meuble non calcaire ou pauvre en calcaire. Il est superficiel à moyennement profond, souvent pierreux. Un régosol peut être brunifié et/ou podzolisé. Il en existe aussi des formes hydromorphes (fig. 12).

La rendzine (Ah-AC-C) est issue de roche carbonatée dure ou meuble. C'est un sol superficiel à moyennement profond, qui devient parfois finement granuleux en s'altérant. Il est souvent pierreux et s'accompagne généralement d'une forme active d'humus. La rendzine peut être brunifiée et existe aussi sous des formes hydromorphes (fig. 13).

**Fig. 10 > Sol brut rocheux**

*Pas sensible.*



**Fig. 11 > Ranker**

*Les rankers moyennement profonds sont peu ou pas sensibles lorsqu'ils sont riches en pierres.*



**Fig. 12 > Régosol**

*Les régosols sont peu ou pas sensibles lorsqu'ils sont riches en pierres.*



**Fig. 13 > Rendzine**

*Les rendzines moyennement profondes sont peu ou pas sensibles lorsqu'elles sont riches en pierres.*



### Sols évolués

Le sol brun (Ah-Bv-BC-C) présente un horizon minéral d'altération (horizon de brunissement Bv) bien marqué. Il offre des conditions optimales de stockage d'eau et d'éléments nutritifs, une aération normale, une perméabilité à l'eau normale et un pH légèrement à fortement acide. C'est un sol moyennement à très profond qui peut être podzolisé ou engorgé (fig. 14).

Le sol brun lessivé (Ah-EI-Bt-BC-C) est caractérisé par une migration de l'argile depuis la couche supérieure lessivée (plus claire) (EI) vers la couche sous-jacente de couleur rouge-brun à brun (Bt). Ainsi, cette dernière zone emmagasine une plus grande quantité d'eau et d'éléments nutritifs, mais présente aussi un risque accru de périodes d'engorgement localisé (fig. 15).

Le podzol (Ah-E-Bh-Bs-B-BC-C) possède un horizon éluvial E décoloré par acidification, de couleur gris clair, appauvri en matière organique. En dessous se trouvent les horizons illuviaux Bh et Bs riches en éléments nutritifs. Les matières humiques sombres sont entraînées en profondeur où elles s'accumulent (Bh), les oxydes de fer et d'aluminium quant à eux précipitent juste en dessous (Bs), donnant à l'horizon une couleur brun rougeâtre (fig. 16).

**Fig. 14 > Sol brun**

*Peu sensible à extrêmement sensible selon la texture et l'humidité du sol.*



**Fig. 15 > Sol brun lessivé**

*Peu sensible à extrêmement sensible selon la texture et l'humidité du sol.*



**Fig. 16 > Podzol**

*Peu sensible à moyennement sensible, car se trouve en général sur des sols à texture grossière se ressuyant rapidement.*



## Sols influencés par l'humidité

### Sols saturés d'eau

Un pseudogley (Ah-Sw-Sd) se distingue par la présence d'un horizon naturellement compacté et peu perméable. En fonction des précipitations, il alterne des phases d'engorgement et de dessiccation et présente ainsi des signes d'hydromorphie bien marqués (fig. 17).

### Sols saturés d'eau en surface

Un stagnogley (Ah-ES-Sw-Sd) avec un horizon fortement décoloré peut se former jusqu'à la surface si les phases de saturation d'eau sont prolongées. L'éluviation se produit avec l'abaissement de la nappe (fig. 18).

### Sols humides

Le gley (Ah-Go-Gr) est influencé par une nappe phréatique se situant toujours à un niveau élevé; il possède ainsi un horizon de réduction (Gr) gris-bleu à verdâtre constamment saturé d'eau et sans racines. Un horizon d'oxydation (Go) sus-jacent présentant des taches de rouille se forme dans la zone de fluctuation de la nappe phréatique (fig. 19).

**Fig. 17 > Pseudogley**

*Peu sensible à extrêmement sensible selon la texture et l'humidité du sol.*



**Fig. 18 > Stagnogley**

*Peu sensible à extrêmement sensible selon la texture et l'humidité du sol.*



**Fig. 19 > Gley**

*Peu sensible à extrêmement sensible selon la texture et l'humidité du sol.*



### 3.3 Caractéristiques et propriétés des sols

Il est possible d'évaluer le risque de compaction des sols forestiers à partir de certaines caractéristiques et propriétés pédologiques et de la pente du terrain. Ces propriétés sont la teneur en pierres/gravier, la texture (granulométrie), la structure, la densité apparente, la perméabilité, l'hydromorphie comme reflet des conditions d'aération moyenne et la teneur en matière organique. L'importance de l'état actuel d'humidité sur la portance du sol lors du passage de véhicules est expliquée au point 6.4.2.

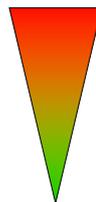
#### 3.3.1 Teneur en pierres et en gravier

La teneur en pierres et gravier (pierrosité) d'un sol prend en compte tous les éléments minéraux d'un diamètre dépassant 2 mm (galets, pierres, blocs). La pierrosité est exprimée en pourcentage du volume (%<sub>v</sub>). Plus un sol est pierreux, moins il contient de terre fine, et l'espace accessible aux racines en est d'autant réduit. En raison des possibilités d'ancrage limitées, la stabilité des arbres diminue.

La pierrosité joue un rôle de soutien et confère au sol une bonne stabilité face aux contraintes mécaniques. Un sol très pierreux est plus résistant à la compaction par des engins lourds qu'un sol moins pierreux (Tab. 3). À partir d'une pierrosité de 50 %<sub>v</sub>, on peut considérer que le sol n'est pas sensible et que le risque de compaction est donc très réduit.

Les pierres dans le sol jouent un rôle de soutien lors de contraintes mécaniques

**Tab. 3 > Classement de la pierrosité d'après le groupe de travail sur la cartographie des stations (1996)**

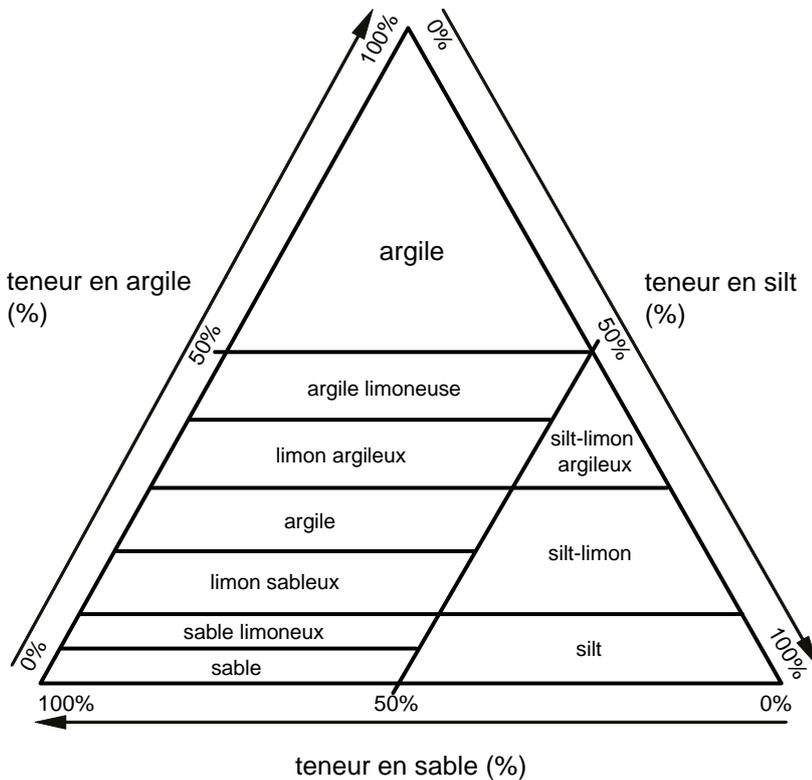
Pierrosité	Volume en pour cent [% <sub>v</sub> ]	Sensibilité
très peu pierreux	<2 % <sub>v</sub>	
peu pierreux	2–10 % <sub>v</sub>	
moyennement pierreux	11–25 % <sub>v</sub>	
pierreux	26–50 % <sub>v</sub>	
très pierreux	>50 % <sub>v</sub>	
extrêmement pierreux	>75 % <sub>v</sub>	

#### 3.3.2 Texture et structure

La texture, également appelée granulométrie, peut servir à évaluer grossièrement le risque de compaction, la capacité de stockage de l'eau et des éléments nutritifs, l'aération et le degré d'altération d'un sol. Elle exprime la répartition en pour cent de l'argile (diamètre <0,002 mm), du silt (diamètre 0,002–0,063 mm) et du sable (diamètre 0,063–2 mm) dans la terre fine. Walthert et al. (2004) distinguent dix classes granulométriques, dont la composition peut être déterminée à l'aide du triangle reproduit à la fig. 20. L'annexe A5 propose une clé de détermination de la texture du sol (appréciation sur le terrain par test tactile).

La texture a une influence déterminante sur le risque de compaction

Fig. 20 > Triangle des textures avec les classes utilisées par l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage



Walther et al. 2004

Il existe aussi un système plus fin, comptant 13 classes, qui est utilisé en Suisse pour la cartographie des sols forestiers (Ruef et Peyer 1996).

En Allemagne et dans certaines régions de Suisse (p.ex. dans le canton de BL), la texture est répartie en 31 classes selon le classement du manuel de cartographie pédologique «Bodenkundliche Kartieranleitung» (KA52005). Celui-ci se distingue clairement des systèmes à 10 ou 13 classes.

Plus la texture est fine, plus le sol réagit de façon plastique et plus il sera sensible à une contrainte mécanique; cette réaction dépend aussi de la teneur en eau.

Plus la texture du sol est fine,  
plus le risque de compaction est  
élevé

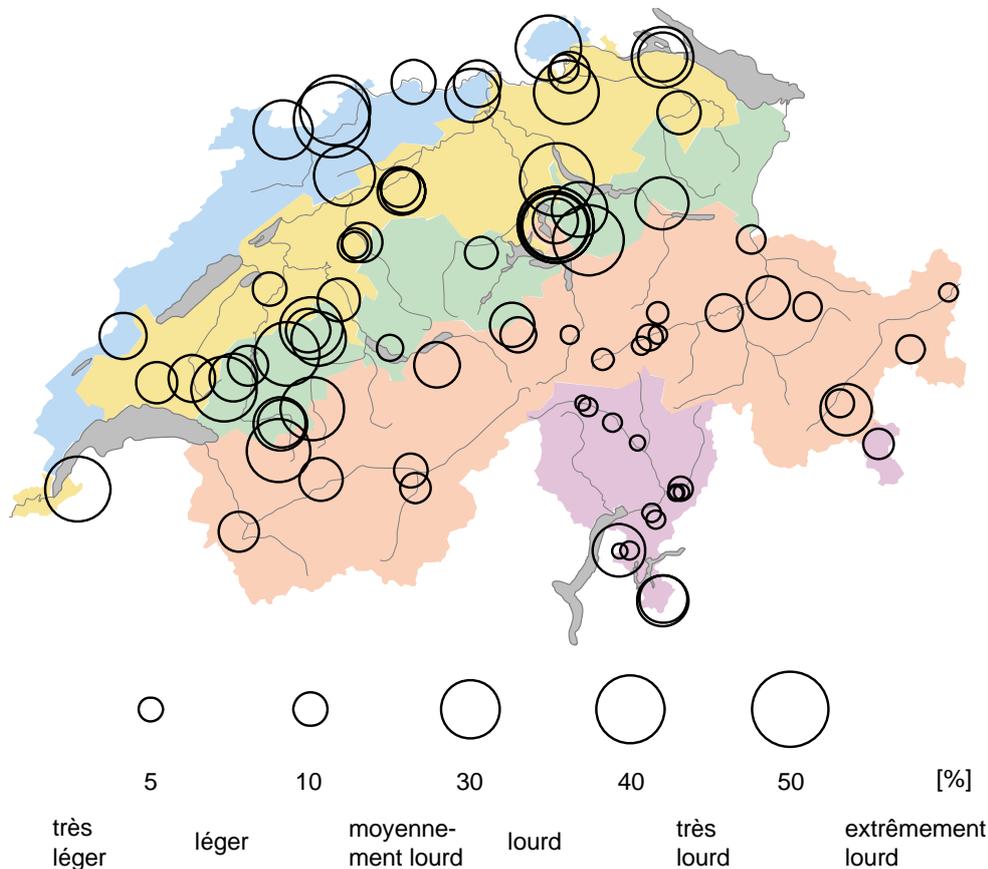
À l'état sec, les sols très argileux (proportion d'argile >40 %<sub>g</sub>) sont extrêmement durs et portants (fig. 21). Lorsque l'humidité augmente, ils deviennent plus plastiques et déformables, ce qui accroît leur sensibilité aux contraintes mécaniques. Les sols argileux retiennent fortement l'eau du sol dans les pores fins et se ressuient donc plus lentement, raison pour laquelle il faut attendre un certain temps après un épisode pluvieux avant que les véhicules puissent à nouveau les emprunter sans risque.

Les sols silteux (proportion de silt >50 %<sub>g</sub>) atteignent nettement plus vite que les sols argileux la zone plastique en cas de précipitations. Ils sont donc non seulement très sensibles, mais aussi plus vite menacés quand il commence à pleuvoir. Après de fortes

pluies, il faut attendre au moins trois jours avant de pouvoir à nouveau y circuler avec des véhicules, car ces sols comportent une proportion élevée de pores fins et moyens.

Les sols sableux (proportion d'argile <10 %<sub>g</sub>) sont peu déformables à l'état humide, et le ressuyage des pores (en majorité grossiers) se fait en l'espace de trois jours. Ils sont donc vite à nouveau praticables après des précipitations. Cependant, une faible proportion de silt suffit déjà à augmenter très fortement leur sensibilité.

**Fig. 21** > Teneur moyenne en argile des horizons minéraux des 95 profils étudiés dans la publication sur les sols forestiers de Suisse



Adapté d'après Zimmermann et al. 2006

La représentation des teneurs en argile des horizons minéraux (fig. 21) selon les profils étudiés dans la publication sur les sols forestiers de Suisse («Waldböden der Schweiz», Zimmermann et al. 2006) fait ressortir les différences dans les régions. La fraction argileuse est une propriété physique importante, qui est assimilée dans la pratique à la lourdeur du sol. Parmi les propriétés pédologiques ayant une influence sur la portance figure la finesse des fractions granulométriques. Plus celles-ci sont fines, plus la sensibilité à la compaction augmente. Dans le Jura, les sols sont issus de roches carbonatées, ils sont donc lourds à extrêmement lourds. Sur le Plateau, les sols morainiques sont en général moyennement lourds, mais s'ils se sont développés sur des moraines de fond, ils peuvent aussi être lourds à très lourds. Dans les Préalpes, les sols classés comme

lourds à extrêmement lourds se trouvent principalement dans les régions à flysch relativement riches en argile. Dans les Alpes, les sols étudiés sont en majorité moyennement lourds à lourds. Au sud des Alpes, les sols formés sur une roche cristalline sont typiquement très légers à légers. Les exploitants des forêts peuvent trouver des informations sur la texture de leurs sols dans les cartes des stations et les cartes pédologiques. Il est toutefois recommandé, pour évaluer la praticabilité des sols, de vérifier les données sur le terrain au moyen d'une bêche et d'une tarière (cf. 6.2.2).

La structure se forme sous l'influence des organismes du sol et de processus chimiques et physiques. La cohésion des particules, et donc la réaction du sol à une contrainte p. ex. lors du passage d'un engin forestier, varient selon la forme et l'agencement des constituants solides du sol. On fait une distinction entre structure particulaire, structure en agrégats et structure cohérente (fig. 22 à 24). La structure en agrégats est elle-même subdivisée en différentes catégories (grumeaux, polyédrique et subpolyédrique).

Suivant son type de structure, le sol possède un système poral plus ou moins développé et ramifié, ce qui, dans les sols formés naturellement, se traduit par une densité apparente typique. La structure a aussi une influence sur d'autres propriétés importantes, comme le cycle de l'air, de l'eau et des éléments nutritifs.

**Structure particulaire:** les particules du sol ne sont pas liées entre elles mais librement juxtaposées. Ces sols sont peu sensibles aux fortes contraintes, car les espaces entre les particules (pores grossiers) ne subissent pas d'atteintes. Les structures particulières se trouvent surtout dans les sols sableux pauvres en argile et en humus (fig. 22).

**Structure en agrégats:** les particules du sol constituent des agrégats cohérents qui se distinguent clairement de leur milieu environnant. Ces agrégats sont l'effet de sécrétions d'animaux du sol, de la cimentation de l'humus, de colonies de champignons et de bactéries ainsi que des racines fines. Grâce à la cohésion accrue des particules, les structures en agrégats confèrent au sol une meilleure résistance à la compaction (fig. 23).

**Structure cohérente:** les particules du sol sont solidement cimentées entre elles sous l'effet des forces de cohésion et forment une masse homogène, non structurée. La cohérence est étroitement liée à la teneur en eau. À l'état sec, cette structure est très portante et donc peu sensible. Mais plus le sol est humide, plus les forces de cohésion entre les particules s'affaiblissent, et le sol devient plus sensible (fig. 24).

**Fig. 22 > Structure particulaire**



**Fig. 23 > Structure en agrégats**



**Fig. 24 > Structure cohérente**



### 3.3.3 Densité apparente et espace poral

La densité apparente est un paramètre qu'il est important de connaître, car elle fournit des informations sur le régime de l'air et de l'eau et sur la capacité d'enracinement du sol. Elle a en outre une influence sur sa praticabilité.

Par densité apparente, on entend la masse de substance solide (séchée) du sol en place par unité volumétrique ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ ). Dans un sol en place, la densité apparente présente un gradient typique en fonction de la profondeur. Dans la couche supérieure, elle augmente significativement jusqu'à une profondeur de 20 cm environ; dans l'horizon B sous-jacent et dans le matériau parental, l'augmentation est moins marquée.

La mesure de la densité se fait sur des échantillons volumétriques non remaniés prélevés à l'aide de cylindres métalliques. Dans les sols forestiers, la densité peut être déterminée par des méthodes gravimétriques ou radiométriques ou avec des pénétromètres (fig. 52).

Le système poral est l'ensemble des espaces interstitiels du sol. Il est la plus importante caractéristique structurale, car il soutient les principales fonctions écologiques du sol. Il est décrit par trois paramètres: l'espace poral, la distribution du diamètre des pores et leur connexion.

L'espace poral désigne le volume occupé par l'ensemble des cavités du sol. Il diminue d'abord rapidement avec la profondeur, puis, suivant le degré d'évolution du sol, reste à un niveau quasi constant dans l'horizon B. La distribution du diamètre des pores désigne l'espace occupé par les différentes catégories de pores. Dans un sol en place, les pores grossiers, moyens et fins représentent entre un tiers et la moitié du volume total du sol. Chaque classe de grandeur remplit des fonctions écologiques spécifiques importantes, p. ex.:

- > pores grossiers: drainage et aération;
- > pores moyens: eau pour les plantes;
- > pores fins: réserve d'éléments nutritifs.

Pour que l'espace poral puisse remplir ses fonctions, les pores doivent être reliés entre eux. On appelle cette propriété connexion ou continuité des pores.

Pour qu'un système poral fonctionne de façon optimale, les trois conditions suivantes doivent être remplies: espace poral suffisant, distribution équilibrée des diamètres et bonne connexion des pores.

Si l'une de ces conditions se trouve en dessous de la valeur critique, l'ensemble du système est défaillant.

### 3.3.4 Perméabilité

La perméabilité à l'air et à l'eau revêt une importance capitale pour l'écologie du sol. Une conductivité insuffisante entraîne un engorgement et des problèmes d'aération et même de l'érosion dans certaines conditions. À court et à moyen terme, le sol devient anaérobie et donc défavorable à la vie. L'air et l'eau empruntent tous deux l'espace poral pour se déplacer. Un bon drainage assure une bonne aération et donc de bonnes conditions de vie. Les modifications structurelles dues à la circulation des véhicules, comme les phénomènes de compaction, touchent plus particulièrement l'espace des pores grossiers, qui constituent la composante la plus vulnérable. C'est pourquoi la conductivité réagit avec une extrême sensibilité à la compaction. La conductivité à l'air et à l'eau peut être mesurée in situ avec des infiltromètres ou en laboratoire avec des cylindres métalliques.

Une perméabilité insuffisante entraîne un engorgement et des problèmes d'aération dans le sol

### 3.3.5 Caractéristiques et degrés d'hydromorphie

La profondeur à laquelle se trouvent les signes d'hydromorphie et leur intensité reflètent les conditions d'aération dans la zone racinaire. La saturation peut être due à un manque de perméabilité (eau stagnante) ou à l'influence des eaux de fond ou de pente. Les phases d'aération déficiente consécutive à une saturation d'eau se manifestent par des signes plus ou moins marqués en fonction de leur durée.

Les caractéristiques d'hydromorphie reflètent les conditions d'aération dans le sol

Concrétions de manganèse: les petites taches violettes à noires indiquent un faible degré de saturation. Le manque d'air n'est que de courte durée et souvent ponctuel (fig. 25).

Les taches de rouille se forment généralement dans des horizons à granulométrie plutôt fine car l'eau et l'air y circulent mal et les ions de fer et de manganèse entrent peu en contact avec l'oxygène et seulement localement. C'est ainsi qu'apparaissent des taches de rouille de diverses grandeurs (fig. 26).

La marmorisation (colorations rouge pâle) se produit lorsque les éléments se déplacent en tous sens durant les phases de saturation. L'eau stagnante en est souvent la cause. Ces colorations de petites dimensions sont composées d'une alternance de lignes pâles (zones d'appauvrissement), de bandes rouges, dues à l'accumulation de fer, et de taches de rouille et de manganèse (zones d'accumulation). La marmorisation est un phénomène typique dans les horizons influencés par l'eau stagnante (fig. 27).

Fig. 25 > Concrétions de manganèse



Fig. 26 > Taches de rouille (de quelques mm à quelques cm)

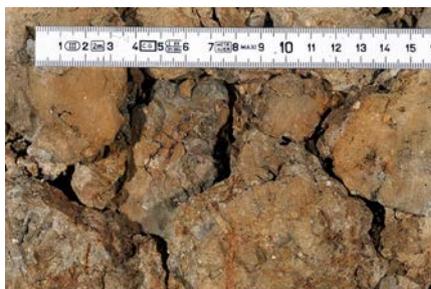


Fig. 27 > Marmorisation



Décolorations hydromorphes (couleurs pâles): une décoloration de la matière minérale se produit sous l'effet de conditions réductrices lorsqu'une zone du sol est appauvrie en éléments. Si le sol est saturé jusqu'à sa surface, il arrive que les éléments migrent dans les horizons inférieurs lorsque le niveau de l'eau stagnante baisse (fig. 28).

Les couleurs de réduction sont présentes dans la zone du sol dont les pores sont constamment saturés d'eau. Ces couleurs gris-bleu à verdâtre sont dues à un manque d'oxygène. Dans ce milieu, les racines ne peuvent pratiquement pas pénétrer (fig. 29).

**Fig. 28** > Décoloration hydromorphe



**Fig. 29** > Couleurs de réduction



Le tableau synoptique de l'annexe A6 facilite une appréciation uniforme et claire du degré d'hydromorphie. Une distinction est faite entre les sols influencés par la nappe phréatique (gleys) et ceux soumis à l'action de l'eau stagnante (pseudogleys). Les gleys sont classés en fonction du niveau de la limite supérieure de l'horizon de réduction Gr ou de l'horizon d'oxydation Go sur une échelle allant des gleys peu influencés par la nappe phréatique jusqu'aux gleys tourbeux. L'appréciation des sols influencés par l'eau stagnante est nuancée en fonction du niveau de la limite supérieure de l'horizon de stagnation temporaire Sw ou de l'horizon de plancher de la nappe Sd.

Degré d'hydromorphie

La saturation est qualifiée de forte lorsque les signes d'hydromorphie se manifestent dans toute la zone d'enracinement, et de faible lorsqu'ils n'apparaissent que de façon ponctuelle ou peu marquée. Plus le degré d'hydromorphie est élevé, plus le sol est sensible au passage de véhicules (annexe A6).

### 3.3.6 Teneur en matière organique

La teneur en matière organique peut être très différente d'un sol à l'autre et varie en fonction de l'activité biologique, de la structure et de l'humidité du sol ainsi que de la couverture végétale, du climat et de l'utilisation de la forêt. En principe, plus la couleur du sol est sombre, plus sa teneur en matière organique est élevée. Un tableau d'évaluation de la teneur en matière organique est reproduit à l'annexe A3.

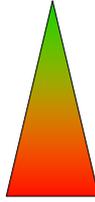
Les formes d'humus typiques (mull, moder, humus brut, cf. 3.2.2) ont une incidence sur la sensibilité du sol à la circulation des véhicules. On ne peut toutefois pas tirer de conclusion précise. Par exemple, les horizons organiques épais caractéristiques de l'humus brut forment un support idéal pour la circulation, car ils absorbent une grande

partie des forces agissantes. Mais d'autre part, leur activité biologique limitée et la faible incorporation de la matière organique peuvent entraîner une réduction de la capacité de régénération de ce type de sols après le passage de véhicules. La teneur en matière organique et l'épaisseur des horizons humiques Ah revêtent une grande importance pour la protection des sols. La matière organique influence la plasticité (déformabilité) des sols.

S'agissant de la répartition régionale, on constate que les teneurs élevées en matière organique se trouvent surtout sur le versant sud des Alpes ainsi que dans le Jura et dans les Préalpes occidentales (Zimmermann et al. 2006). Sur le versant sud des Alpes et dans les Alpes, on trouve surtout des podzols, alors que dans les Préalpes et le Jura, les formes les plus fréquentes sont les gleys et les sols bruts.

Le Manuel sur la cartographie des sols forestiers (Ruef et Peyer 1996) utilise le classement suivant des teneurs en matière organique:

**Tab. 4 > Classement des teneurs en matière organique selon Ruef et Peyer (1996)**

Teneur en matière organique	Pour cent en poids (% <sub>g</sub> )	Sensibilité
peu humifère	<2 % <sub>g</sub>	
faiblement humifère	2-5 % <sub>g</sub>	
humifère	5-10 % <sub>g</sub>	
riche en humus	10-20 % <sub>g</sub>	
très riche en humus	20-30 % <sub>g</sub>	
organique	>30 % <sub>g</sub>	

Le comportement mécanique de l'humus est comparable à celui de l'argile. Plus la teneur en matière organique est élevée, plus le sol à l'état humide réagit de manière plastique aux contraintes mécaniques et moins le risque de compaction par les véhicules est important. Comme pour l'argile, les sols riches en matière organique ne présentent un comportement viscoplastique qu'à partir d'une teneur en eau très élevée.

Les propriétés pédologiques comme la texture, la pierrosité, la teneur en matière organique, la structure, mais aussi la déclivité (un terrain dont la pente est >50 % est considéré comme non praticable par des véhicules à roues) permettent de se faire une première idée de la sensibilité d'un sol aux contraintes mécaniques. Il ne s'agit toutefois que d'une évaluation statique, car la teneur en eau au moment du passage des véhicules n'est pas prise en compte. Cette appréciation peut être affinée par l'observation des caractéristiques d'hydromorphie (cf. 3.3.5): plus elles sont marquées et proches de la surface, plus les phases de saturation de l'ensemble de l'espace poral sont fréquentes et/ou prolongées et plus le risque de compaction est élevé.

### 3.3.7 Appréciation globale

En principe, une distinction peut être faite entre les propriétés qui dépendent de la structure du sol et ne changent que très lentement en l'absence d'intervention humaine, et les caractéristiques techniques des machines qui, elles, peuvent être à tout moment

influencées. Le paramètre de l'humidité du sol (teneur en eau) revêt toujours une importance déterminante.

La portance ou résistance du sol à une contrainte physique dépend principalement des propriétés suivantes:

### Pierrosité

La pierrosité, les graviers et les pierres ont un effet stabilisant. Un sol graveleux est donc plus portant que p. ex. un loëss ne contenant pratiquement pas de pierres. La règle est que plus la pierrosité est importante, moins la sensibilité à la compaction est élevée et moins il y a de risque de dégâts.

### Texture (granulométrie)

Comme de nombreuses autres propriétés du sol, la portance dépend dans une large mesure de la composition de la terre fine (proportion d'argile, de silt et de sable). Plus la proportion de silt et d'argile est élevée, plus la sensibilité du sol augmente.

### Humidité du sol

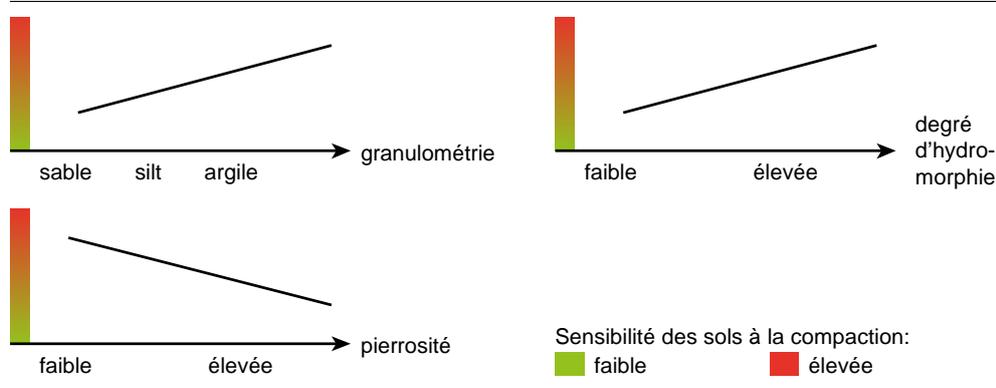
La portance est la résultante de forces d'adhérence et de frottement entre les particules du sol. Plus l'humidité augmente, plus ces forces diminuent et plus le risque de compaction augmente.

### Teneur en matière organique

La teneur en matière organique a une influence sur la cohérence du sol. Elle rend les sols riches en argile moins collants, ceux riches en sable plus cohérents (Ruef et Peyer 1996). Dans les deux cas, le risque de compaction diminue. Des calculs expérimentaux effectués avec le système d'information ProFor (Ziesak 2004) ont confirmé l'effet positif de l'augmentation de la teneur en matière organique.

La figure 30 présente un aperçu de l'influence de certaines caractéristiques du sol sur sa sensibilité à la compaction.

**Fig. 30 > Influence de certaines caractéristiques du sol sur le risque de compaction**



### Pente

Le risque de dégâts s'accroît avec l'augmentation de la pente. Les contraintes mécaniques défavorables et l'augmentation du patinage provoquent un éclatement des matériaux terreux et accentuent ainsi l'érosion.

### 3.4 Régime hydrique

#### 3.4.1 Régime hydrique et structure du sol

La structure permet de tirer des conclusions sur le régime hydrique, par exemple en déterminant le type de sol. Les sols possédant un horizon compact subissent souvent l'influence de l'eau stagnante (pseudogleys, sols pseudogleyifiés). Les sols influencés par l'eau de fond ou de pente (gleys, sols gleyifiés) présentent des horizons hydromorphiques à humidité changeante et un horizon constamment engorgé situé à une profondeur variable. La profondeur à laquelle apparaît l'état saturé varie fortement, tant en hiver qu'en été, en fonction du degré d'hydromorphie (annexe A6). Les signes d'engorgement revêtent donc une grande importance pour l'évaluation du régime hydrique d'un sol par rapport à sa sensibilité au passage de véhicules. Ainsi, les gleys sont en général très sensibles à extrêmement sensibles. Même en présence d'un degré d'hydromorphie qualifié de «peu influencé» par la nappe phréatique (zone saturée à plus d'un mètre de profondeur), cas exceptionnel apparaissant surtout en été, on peut supposer que le sol reste encore moyennement sensible à la compaction.

Les sols pseudogleyifiés (influencés par l'eau stagnante) avec des signes de saturation qualifiés de «très peu à moyennement pseudogleyifiés» ont une sensibilité à la compaction moyenne à très forte, surtout en été. La zone à humidité changeante périodiquement saturée s'abaisse alors à plus d'un mètre de profondeur.

Les sols normalement perméables sans signes d'hydromorphie (p. ex. sols bruns) ont un régime hydrique équilibré, variable selon leur texture et leur pierrosité. Ils sont ainsi à nouveau praticables par les véhicules trois à cinq jours après un épisode pluvieux.

Ces observations sont utiles pour évaluer la sensibilité du sol à la compaction (cf. 6.2.2) et planifier la desserte fine. Mais avant d'engager des véhicules, il faut aussi toujours tenir compte de l'humidité actuelle du sol en fonction de l'évolution des conditions météorologiques (cf. 6.4.2).

#### 3.4.2 Humidité du sol

La teneur en eau (en % du volume) correspond à la proportion d'eau contenue dans l'espace poral d'un volume de sol donné, tandis que la force de succion décrit la force nécessaire pour extraire l'eau du sol. Elle est exprimée en pascal (N/m<sup>2</sup>). Pour éviter de devoir modifier les valeurs traditionnellement indiquées dans les anciennes unités de mesure, la littérature utilise souvent l'hectopascal (hPa) (1 hPa ≈ 1 cm de colonne d'eau ≈ 1 mbar). Les tensiomètres que l'on trouve dans le commerce mesurent la force en centibar (cbar). Une autre unité qui s'est généralisée est la valeur de pF (log<sub>10</sub> (force de succion en hPa), pF 1 ≈ 10 cm de colonne d'eau).

La force de succion est liée à la teneur en eau. Cette corrélation peut être représentée sous forme de courbes de sorption et de désorption. L'évolution de ces courbes dépend de la granulométrie et est donc caractéristique pour chaque sol. La courbe de désorption (cf. 3.4.4), qui est mieux adaptée pour cela que la courbe de sorption, permet d'établir la teneur en eau à partir de la force de succion, et inversement.

La teneur en eau peut être facilement déterminée au moyen d'une sonde TDR (Time Domain Reflectometry), la force de succion avec un tensiomètre.

### 3.4.3 Réseaux de mesure

En Suisse, l'humidité du sol est relevée dans certains cantons par des réseaux de mesure. Des stations de mesure automatiques sont en service dans les cantons de Zurich, Berne, Soleure, Argovie, Bâle-Campagne, Lucerne et Uri. Les données mesurées (pour le moment la force de succion dans les couches supérieure et sous-jacente de sols agricoles, avec quelques stations en forêt) peuvent être directement consultées sur Internet. Elles fournissent des indications importantes sur l'évolution de l'humidité du sol en fonction des conditions météorologiques. Il s'agit d'une précieuse aide à la décision pour déterminer quand des travaux peuvent être entrepris de manière respectueuse du sol.

Réseaux de mesure fournissant des données régulièrement actualisées sur l'humidité du sol

Les adresses suivantes (sélection non exhaustive) sont actuellement en service, certaines intègrent aussi des sites forestiers:

- > Cantons d'AG, BL, SO (nord-ouest de la Suisse): 26 stations, dont quatre en forêt (Breitenbach (SO), Dulliken (SO), Etziken (SO) et Mühledorf (SO)).  
[www.bodenmessnetz.ch](http://www.bodenmessnetz.ch) (consultation le 28.08.2014).
- > Cantons d'AI, AR, GL, GR, SG, SH, TG, ZH et Principauté du Liechtenstein (Suisse orientale): 25 stations en terrain ouvert.  
[www.bodenfeuchte-ostschweiz.ch](http://www.bodenfeuchte-ostschweiz.ch) (consultation le 28.08.2014).
- > Canton de BE: six stations en terrain ouvert.  
[www.vol.be.ch/vol/de/index/landwirtschaft/landwirtschaft/bodenschutz/bodenzustand/messwerte\\_bodenfeuchte.html](http://www.vol.be.ch/vol/de/index/landwirtschaft/landwirtschaft/bodenschutz/bodenzustand/messwerte_bodenfeuchte.html) (consultation le 28.08.2014).
- > Canton de LU: quatre stations en terrain ouvert, deux autres sont prévues.  
[www.umwelt-luzern.ch/index/themen/bodenschutz/messnetz\\_bodenfeuchte.htm](http://www.umwelt-luzern.ch/index/themen/bodenschutz/messnetz_bodenfeuchte.htm) (consultation le 28.08.2014).
- > Canton d'UR: une station en terre ouverte.  
[www.boden-uri.ch](http://www.boden-uri.ch) (consultation le 28.08.2014).
- > WSL, Recherches à long terme sur les écosystèmes forestiers LWF: mesure des teneurs en eau dans dix stations forestières (Beatenberg (BE), Bettlachstock (SO), Celerina (GR), Davos (GR), Lausanne (VD), Lens (VS), Novaggio (TI), Othmarsingen (AG), Schänis (SG), Vordemwald (AG)).  
[www.wsl.ch/info/organisation/fpo/lwf/results/data/swc\\_FR](http://www.wsl.ch/info/organisation/fpo/lwf/results/data/swc_FR) (consultation le 28.08.2014).

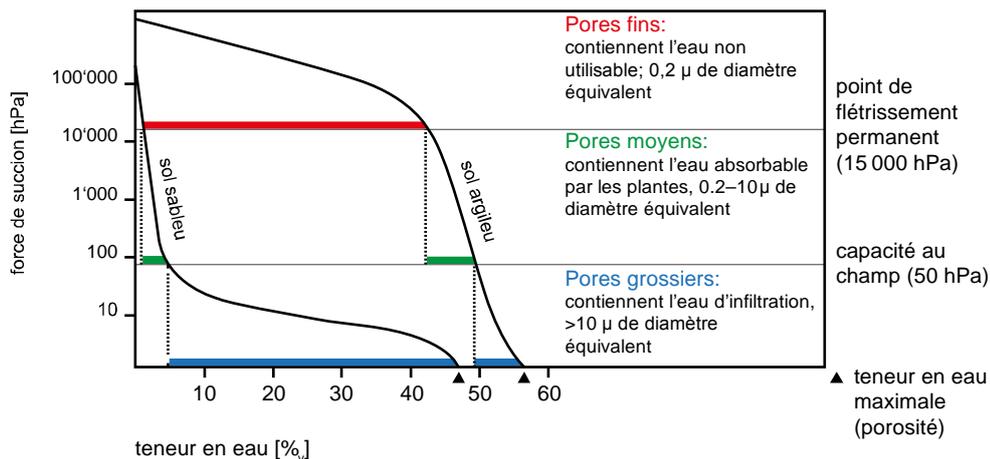
Les données sur l'humidité des sols fournies par les stations de mesure cantonales permettent d'évaluer la portance de sols présentant des caractéristiques comparables

### 3.4.4 Courbes de désorption

La courbe de désorption montre le rapport entre la teneur en eau d'un sol et sa force de succion (fig. 31). La force de succion peut aussi être désignée comme une valeur de pression négative. Plus elle est élevée, plus la teneur en eau du sol est faible. La courbe de désorption s'obtient en soumettant un échantillon de sol saturé d'eau à une dépression croissante pour en extraire l'eau, en mettant en rapport la quantité d'eau écoulée avec l'augmentation de la dépression. La force de succion nécessaire pour extraire l'eau du sol est d'autant plus importante que les pores fins sont nombreux (sols argileux). Et inversement, elle diminue lorsque les sols contiennent une proportion élevée de pores grossiers (sols sableux). La courbe de désorption permet donc de tirer des conclusions sur la distribution du diamètre des pores.

La courbe de désorption montre le rapport entre teneur en eau d'un sol et force de succion

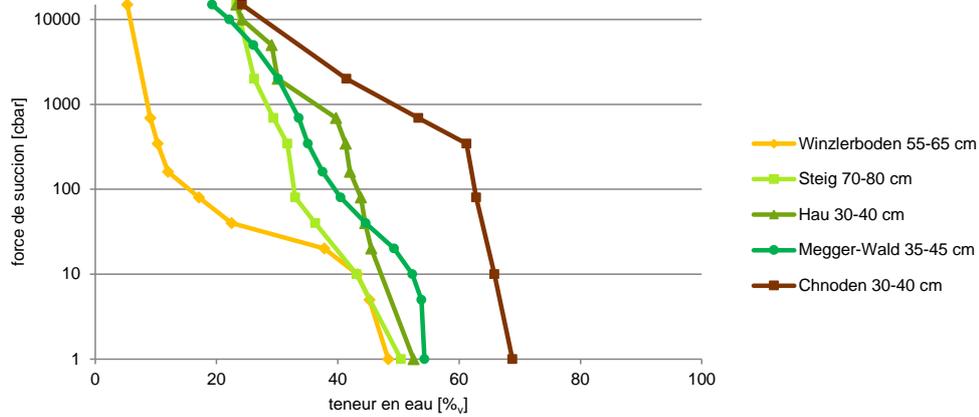
Fig. 31 > Courbe de désorption typique pour les sols sableux et les sols argileux



Walther et al. 2004

Si la teneur en eau du sol est connue, par exemple après une mesure sur le terrain, les courbes de désorption établies en laboratoire (fig. 32) permettent de déterminer la force de succion. Il faut toutefois que la texture du sol corresponde à celle du sol de la courbe de désorption. Si on mesure la force de succion sur le terrain au lieu de la teneur en eau, on obtient directement des indications sur la praticabilité du sol (cf. 6.2.4).

Dans les exemples de la figure ci-dessous, la forme locale du sol de Winzlerboden (Richard et Lüscher 1983/87) présente une proportion de sable supérieure à 90 %<sub>g</sub> à une profondeur de 55–65 cm et l'évolution de sa courbe de désorption est donc caractéristique d'un sol sableux. La forme locale de Chnoden se distingue par une proportion d'argile supérieure à 50 %<sub>g</sub> à 30–40 cm de profondeur et est donc caractéristique d'un sol argileux. Les courbes des formes locales des sols de Steig, Hau et Megger-Wald, qui possèdent entre 30 et 50 %<sub>g</sub> de silt, se situent à un niveau intermédiaire.

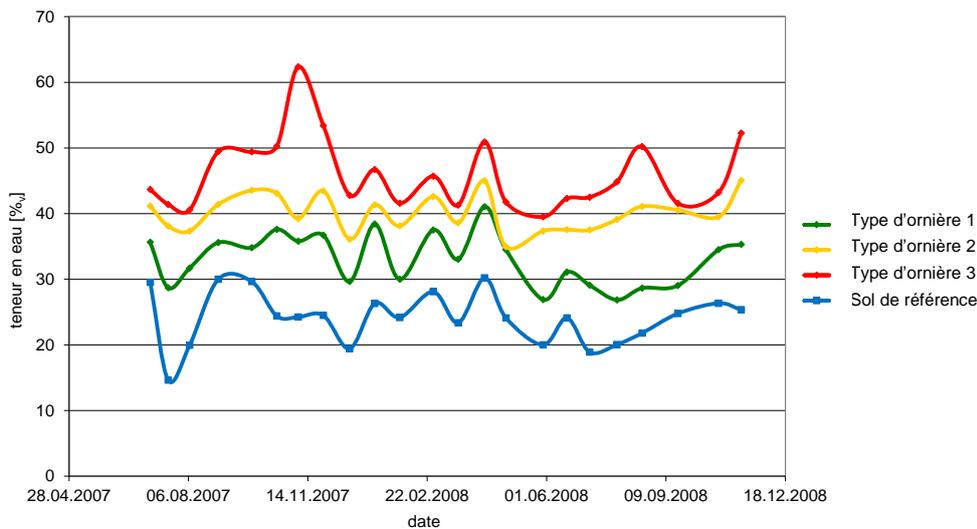
**Fig. 32** > Courbes de désorption de sols forestiers typiques de la Suisse

Richard et Lüscher 1983/87

### 3.4.5 Évolution annuelle de l'humidité du sol

Dans la parcelle test d'Ermatingen, des mesures de la teneur en eau dans des ornières ont été effectuées sur une période de 20 mois au moyen de sondes TDR (cf. 5.2.3). Les mesures ont été réalisées dans les trois types d'ornières et dans le sol de référence adjacent non parcouru par des véhicules.

La teneur en eau est toujours plus élevée dans les ornières que dans le sol voisin non parcouru par des véhicules

**Fig. 33** > Évolution annuelle de la teneur en eau [%v] dans différents types d'ornières, mesurée avec une sonde TDR (parcelle test d'Ermatingen)

---

L'évolution de la teneur en eau dans le sol de référence sur l'année fait apparaître un maximum au printemps après la fonte des neiges, un maximum peu marqué en juillet, les valeurs les plus basses sont atteintes en plein été, puis elles remontent légèrement jusqu'en hiver.

La teneur en eau mesurée dans les ornières suit globalement la même évolution, mais présente un lien étroit avec le type d'ornière. Ainsi, dans le type 2, le minimum en fin d'été n'apparaît plus. Plus le sol est compacté, plus l'humidité dans l'ornière est élevée tout au long de l'année. La dégradation de l'espace poral, et donc de la capacité d'infiltration, augmente avec l'accroissement de la compaction. L'augmentation de la teneur en eau a aussi des effets sur l'aération du sol qui devient par moments insuffisante. Dans le type d'ornière 3, la structure du sol, et donc le système poral, sont tellement dégradés que l'eau de pluie ne peut plus s'infiltrer librement et reste ainsi longtemps en surface.

## 4 > Les types d'ornières comme indicateurs d'une circulation qui respecte les sols

---

Dans un sol fertile et productif, les racines peuvent pousser sans entrave, elles ont suffisamment d'eau, d'air et d'éléments nutritifs à disposition et les échanges d'air ainsi que l'activité biologique sont assurés. Aujourd'hui, la qualité des sols est altérée, entre autres, par des contraintes mécaniques qui peuvent causer des compactations. Pratiquement tout passage de véhicule sur un sol modifie sa structure et menace au moins temporairement sa fertilité telle qu'elle est définie dans l'OSol (cf. 1.1). Les atteintes persistantes à la fertilité qui menacent l'utilisation durable du sol doivent être évitées (art. 33, al. 2, LPE, art. 6, al. 1, OSol).

Dans une majorité de forêts suisses, la circulation d'engins forestiers sur des sols naturels peut provoquer des modifications profondes et parfois persistantes au niveau des ornières et affecter les fonctions importantes du sol. La réduction de l'espace poral et des liaisons entre les pores diminue la capacité des sols à transporter l'eau et l'air dont ont besoin les racines et qui sont indispensables pour qu'un sol soit fertile. En cas de compactations importantes et/ou de ruptures de sol, les conditions pour le rajeunissement naturel sont fortement dégradées, non seulement au niveau du lit de semences, mais aussi des racines, dont la croissance peut être perturbée durablement jusqu'à une profondeur considérable.

Il est donc important, tant d'un point de vue écologique qu'économique, de définir et quantifier la notion d'«atteinte persistante à la fertilité après une contrainte mécanique» pour le sol en tant que bien à protéger.

Les modifications causées dans le sol par le passage de véhicules peuvent être mises en relation avec l'aspect extérieur des ornières. Pour l'application pratique de la protection des sols contre les atteintes physiques, une typologie des ornières signalant des modifications ayant un impact écologique a été développée à partir de certaines caractéristiques (tab. 5). La reconnaissance morphologique de ces types d'ornières a été étayée quantitativement par l'étude des modifications de la densité apparente effective, du volume des pores grossiers, de la conductivité hydraulique à saturation et de la résistance à la pénétration (Buchter et al. 2004). Dans un proche avenir, des paramètres microbiologiques seront également intégrés dans la palette de critères (Frey et al. 2009 et Frey 2010).

4.1 **Classement des types d'ornières visibles**

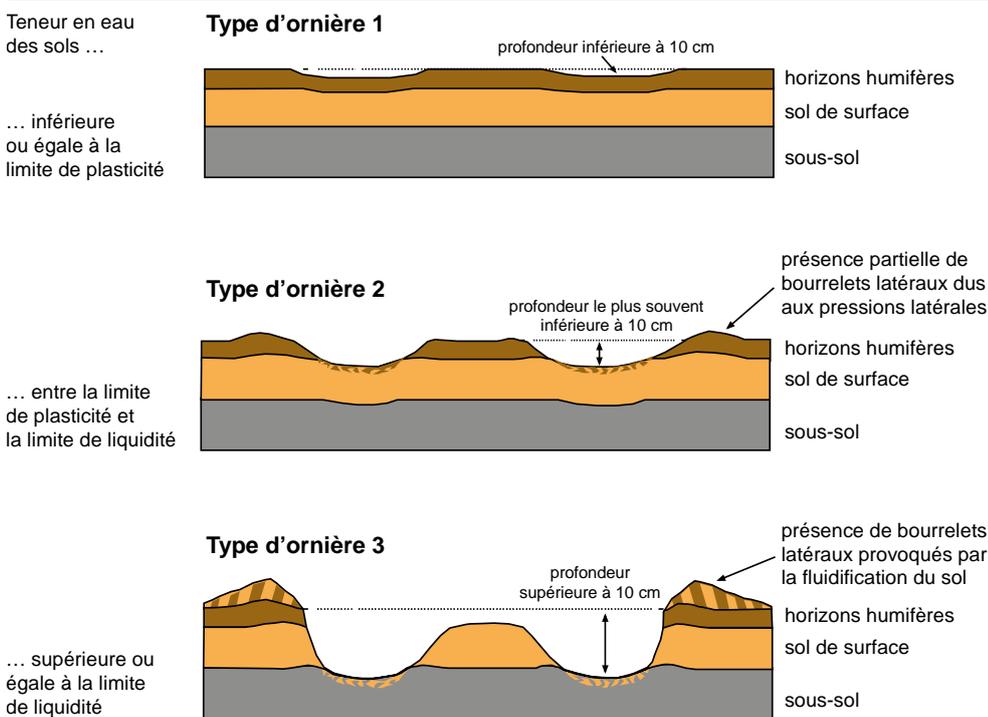
Les trois types d'ornières définis doivent servir d'indicateurs pour la protection des sols dans le cadre de l'exploitation des forêts. Elles remplissent ainsi une fonction analogue au système de classement des atteintes chimiques avec des valeurs indicatives et des seuils d'investigation de l'ordonnance sur les atteintes portées aux sols (OSol, RS 814.2).

4.1.1 **Les types d'ornières en tant qu'indicateurs d'atteintes à la fertilité du sol**

Pour faciliter la mise en œuvre de la protection des sols contre les atteintes physiques en forêt, une typologie claire des ornières a été élaborée à partir de critères morphologiques bien reconnaissables. Différents types de déformations (types d'ornières) relevant de la mécanique du sol ont ainsi été différenciés. Leur description se fonde sur les caractéristiques visuelles suivantes: structure du sol, présence et dimensions de bourrelets latéraux et profondeur des ornières. Les types d'ornières ont été définis en s'inspirant des valeurs indicatives et des seuils d'intervention de l'OSol (OSol, 1998; cf. 1.2). Les valeurs indicatives fournissent des informations sur le moment à partir duquel la fertilité du sol est menacée, les seuils d'intervention sur le moment à partir duquel des restrictions d'utilisation et d'autres mesures sont justifiées. Ce classement des types d'ornières facilite l'évaluation des risques d'atteinte à la fertilité du sol.

Les ornières peuvent être différenciées en fonction de caractéristiques déterminées

**Fig. 34 > Types d'ornières comme indicateurs pour l'évaluation de l'impact écologique de modifications du sol**



Ce classement morphologique simple peut être étayé par des résultats tirés de la physique, de la mécanique et de la microbiologie des sols (cf. 4.2).

**Tab. 5 > Caractéristiques des ornières, justification des mesures et lien avec la définition de la fertilité**

Caractéristiques permettant de distinguer les types d'ornières	Raisons justifiant des mesures	Lien avec la définition de la fertilité du sol selon l'art. 2, al. 1, OSol
Profondeur de l'ornière	Potential de régénération dans la couche sous-jacente limitée, praticabilité future du terrain compromise	Let. a et b: biocénose du sol, capacité de dégradation limitées, germination et développement du recrû plus difficiles
Structure de la couche supérieure du sol	Conservation d'une forme d'humus constituant une couche naturelle (objectif selon les critères du guide NaiS <sup>1</sup> )	Let. a: capacité de décomposition et structure du sol en relation avec la station
Couleur du sol, signes d'hydromorphie	Réduction de l'espace poral, augmentation de la densité apparente, diminution de la perméabilité	Let. b: espace d'enracinement, fonction de biotope
Déformation	Discontinuité au sein de l'espace poral	Let. b: structure du sol

<sup>1</sup> Frehner et al. 2005

Le type d'ornière 1 représente une atteinte légère au sol. D'un point de vue mécanique, il s'agit d'une déformation élastique, caractérisée par une pression exercée sur les horizons organiques. Ce qui signifie que dans des conditions favorables, les modifications de la structure du sol résultant de la contrainte mécanique exercée lors du passage des véhicules sont réversibles. Les horizons organiques sont encore présents dans l'ornière et en grande partie intacts. La succession naturelle des horizons est toujours conservée. En général, seule l'empreinte de la sculpture des pneus est visible, ou alors l'horizon organique est pressé. Les atteintes dépassent rarement la profondeur des sculptures. Par conséquent, la profondeur théorique de l'ornière se situe entre 5 et 10 cm au maximum et reste limitée aux horizons de la couche supérieure du sol.

**Type d'ornière 1:**  
atteinte légère aux fonctions  
du sol

Le type d'ornière 2 représente une atteinte moyennement grave au sol, car elle correspond à une déformation plastique. Les modifications structurelles sont en partie irréversibles, mais les dégâts causés par le passage des véhicules n'ont pas complètement détruit la structure du sol. En général, les horizons organiques ont totalement disparu ou ont été mélangés avec du matériel des horizons Ah ou A. La structure de la couche supérieure est partiellement détruite. Des bourrelets de matière organique résultant des pressions latérales sont souvent visibles sur les côtés de l'affaissement. La profondeur des ornières est généralement inférieure à 10 cm.

**Type d'ornière 2:**  
atteinte moyennement grave aux  
fonctions du sol

Le type d'ornière 3 représente une atteinte persistante à la fertilité du sol. La circulation de véhicules sur un terrain humide entraîne une déformation viscoplastique. En raison de la teneur élevée en eau, le sol s'écoule latéralement et les horizons pédologiques se mélangent. La structure naturelle du sol est détruite et des bourrelets latéraux marqués se forment sous l'effet de la fluidification du sol. La profondeur des ornières est toujours supérieure à 10 cm et atteint la couche sous-jacente du sol. La présence d'ornières de type 3 signifie que le seuil d'intervention (fig. 2) est dépassé.

**Type d'ornière 3:**  
atteinte grave aux fonctions du  
sol = dégât écologique au sol

**Tab. 6 > Critères de distinction des trois types d'ornières**

Critère	Type d'ornière 1	Type d'ornière 2	Type d'ornière 3
Profondeur de l'ornière	5 à 10 cm au max., dans les horizons de la couche supérieure du sol	généralement <10 cm	>10 cm, se prolongeant jusqu'aux horizons de la couche sous-jacente
Structure de la couche supérieure du sol	non détruite	+/- détruite	détruite
Déformation	aucune	+/-	marquée
Couleur (signes d'hydromorphie)	Signes d'hydromorphie présents suivant les conditions stationnelles		

Types d'ornières comme indicateurs d'atteintes au sol

Le tableau 6 présente un classement des critères de distinction des trois types d'ornières. Les déformations marquées se produisent lorsque l'humidité du sol au moment du passage des véhicules dépasse la limite de liquidité. La modification de l'espace poral est telle que le sol subit un dommage écologique. Sa structure est détruite et la profondeur des ornières atteint la couche sous-jacente, rendant la régénération naturelle rapide du sol pratiquement impossible.

Des signes d'hydromorphie peuvent apparaître de façon plus ou moins marquée dans les trois types d'ornières (dans le type 1, ils sont toutefois exceptionnels). Ils indiquent l'état d'aération moyen du sol. Leur intensité est directement liée à la durée de la saturation en eau et au manque d'aération. En général, ils n'apparaissent qu'à proximité de la surface, directement sous l'ornière, et sont le signe de conditions d'humidité fluctuantes et en partie anaérobies.

Les corrélations entre l'aspect extérieur d'une ornière et la fonctionnalité du sol permettent de définir un type d'ornière dont l'apparition signale clairement la présence d'un dégât écologique au sol nécessitant des mesures adéquates (type d'ornière 3). On dispose ainsi d'un indicateur simple pour le travail pratique en forêt sur lequel les acteurs peuvent se baser. Par exemple, les travaux doivent être suspendus dès l'apparition du type d'ornière 3.

Le relevé des types d'ornières le long des lignes de la desserte fine permet d'évaluer la qualité du travail et, le cas échéant, de prendre les mesures qui s'imposent (cf. 5.2).

#### 4.1.2 Définition d'un dégât au sol

Les modifications du sol occasionnées par le passage d'engins lourds sont classées en deux catégories selon que leurs effets sont temporaires (type 1) ou ont des conséquences négatives sur la fertilité du sol (types 2 et 3).

Si l'ornière ne touche que la couche supérieure du sol et que les déformations sont peu marquées (type 1), la structure du sol n'est pratiquement pas perturbée. En présence du type 2, nous partons du principe que le sol, grâce à son potentiel de régénération naturel spécifique à la station, parviendra à se rétablir à moyen terme. Ce genre d'atteinte est donc limité dans le temps, raison pour laquelle il est considéré comme minime ou

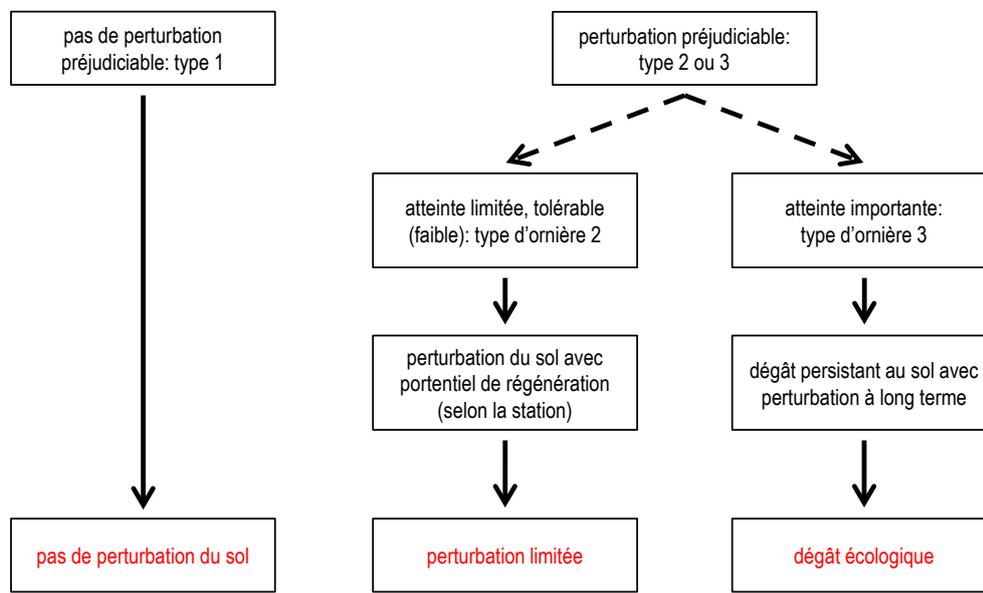
tolérable. Avec le type 3 en revanche, il faut supposer que l'atteinte est importante et de nature persistante et que la fertilité du sol sera durablement altérée (fig. 35).

La notion de dégât au sol doit être définie sur la base des prescriptions légales. Comme expliqué au point 1.1.1, on parle de dégât lorsque la fertilité du sol à long terme est menacée. S'agissant de la forêt, la fertilité du sol signifie que la biocénose forestière typique de la station doit être capable d'assurer son renouvellement de manière durable par régénération naturelle. C'est la condition la plus importante pour que le sol forestier puisse présenter une biocénose diversifiée et biologiquement active, une structure typique pour sa station et une capacité de décomposition intacte (art. 2, al. 1, OSol 1998).

L'identification morphologique des types d'ornières peut être étayée quantitativement par des résultats tirés de la physique, la mécanique et la microbiologie des sols. Les corrélations entre l'aspect extérieur d'une ornière et la fonctionnalité du sol permettent de définir un type d'ornière dont l'apparition signale clairement la présence d'un dégât écologique dans le sol. Il s'agit en l'occurrence du type d'ornière 3. Celui-ci indique que le sol est fortement et durablement dégradé et que son potentiel de régénération est inexistant ou très limité.

Un dégât au sol signifie une atteinte persistante à la fertilité du sol

**Fig. 35** > Évaluation d'une perturbation écologique du sol causée par la circulation de véhicules en forêt



Cette typologie des ornières offre dans le cadre de la mise en œuvre de la protection des sols un instrument pour apprécier et évaluer les atteintes résultant de contraintes mécaniques. Pour une appréciation plus complète, il faut également tenir compte de la proportion des surfaces touchées par type d'ornières et des conditions stationnelles.

## 4.2 Modifications physiques et microbiologiques dans le sol

On trouvera ci-après une présentation de données physiques, mécaniques et microbiologiques relatives aux différents types d'ornières. Ces données sont tirées de diverses études sur le terrain et en laboratoire.

### 4.2.1 Physique des sols

Du point de vue de la physique des sols, les importantes modifications structurelles et leurs conséquences sur la fonctionnalité des sols peuvent être mises en évidence par une simple chaîne de cause à effet. Celle-ci peut être décrite pour chaque type d'ornière (cf. 4.1.1).

Type d'ornière 1 (déformation élastique): après avoir subi une déformation rapide mais en grande partie réversible sous l'effet d'une charge, le sol retrouve son état initial. Des augmentations minimales de la densité apparente peuvent survenir. L'espace poral, en particulier le volume des pores grossiers, est en grande partie conservé et ses fonctions (aération et drainage) sont préservées.

→ Les légères restrictions de la conductivité sont rapidement compensées grâce à l'activité biologique et au pouvoir de régénération du sol.

Type d'ornière 2 (déformation plastique): sous l'effet d'une surcharge, le sol dans l'ornière subit un affaissement persistant. L'augmentation marquée de la densité apparente s'accompagne d'une diminution importante de l'espace poral. La compaction affecte surtout les pores grossiers conducteurs de gaz et d'eau. La conductivité est fortement réduite. La limitation des échanges gazeux peut entraîner un manque d'oxygène ou une accumulation de dioxyde de carbone dans les zones touchées. Cette transformation de l'espace poral aura toujours pour conséquence de limiter la capacité de drainage.

→ La compaction provoque toujours la disparition de pores grossiers et donc une réduction de la conductivité. Dans les cas extrêmes, elle peut conduire à l'imperméabilisation et l'engorgement du sol et à une augmentation de l'écoulement de surface.

Type d'ornière 3 (déformation viscoplastique): sous l'effet de la charge, le sol commence à se fluidifier et une atteinte persistante apparaît, la «rupture du sol». Il n'y a pas vraiment de compaction, car l'eau contenue dans les pores ne peut pas être comprimée. L'orientation des pores est profondément transformée et le réseau poral disparaît presque entièrement. Une conséquence extrêmement grave de cette modification structurelle est l'imperméabilisation massive de la surface du sol. La réorientation de l'espace poral entraîne une disparition complète de la conductivité hydraulique. L'accumulation d'eau et l'exclusion de l'air dans les ornières qui en résultent conduisent à des conditions d'anaérobiose dans le sol.

→ Même des dizaines d'années après le passage de véhicules, l'espace poral grossier et les liaisons entre les pores ne parviennent pas à se régénérer. Le terrain reste imperméable. Le sol dans les ornières présente toujours un manque d'oxygène et une concentration excessive de CO<sub>2</sub>.

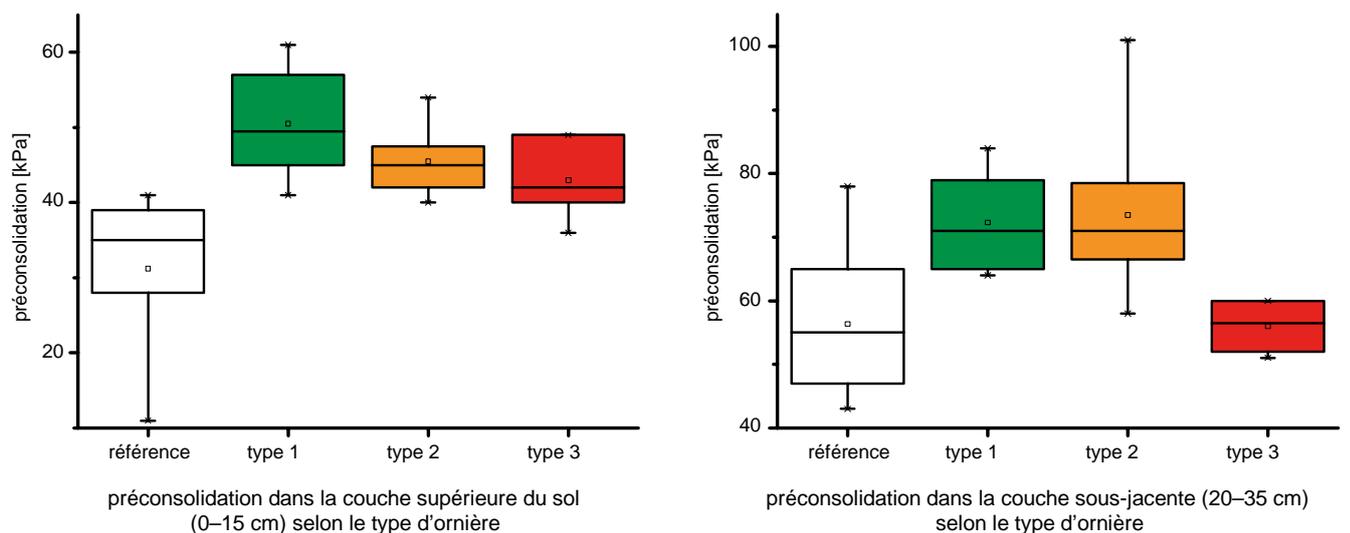
#### 4.2.2 Aspects liés à la mécanique du sol

Tout comme la texture, l'humidité du sol lors du passage des véhicules joue un rôle déterminant sur l'apparition d'un type d'ornière donné. Elle influence les forces de liaison entre les particules du sol et donc la déformation sous l'effet d'une contrainte. Les types de déformations peuvent être classés en fonction des différents états mécaniques du sol. Les transitions entre les états, appelées limites d'Atterberg, correspondent à des teneurs en eau définies. Deux d'entre elles sont importantes, la limite de plasticité et la limite de liquidité.

L'humidité du sol lors du passage des véhicules joue un rôle déterminant sur le degré de déformation

L'ampleur et l'intensité des déformations sont étroitement liées à la stabilité mécanique du sol. Celle-ci est caractérisée par la préconsolidation. La valeur de préconsolidation indique la pression que peut supporter un sol sans subir de déformation permanente. Lorsque les contraintes sont inférieures à la préconsolidation, le sol se déforme de manière élastique, autrement dit il se détend et retrouve sa forme initiale une fois qu'il n'est plus sous pression. Mais si le poids exercé est supérieur à la préconsolidation, le sol se déforme de manière plastique et il faut s'attendre à ce qu'il subisse des compactations. La préconsolidation du sol s'accroît à chaque augmentation de la charge, ce qui théoriquement améliore sa stabilité mécanique. Le laboratoire de l'École polytechnique fédérale de Zurich a procédé à des mesures œdométriques de la préconsolidation. Les valeurs moyennes pour les différents types d'ornières sont présentées à la figure 36.

**Fig. 36** > Valeurs moyennes de préconsolidation pour les différents types d'ornières dans la couche supérieure (0–15 cm) et la couche sous-jacente (20–35 cm) du sol



Type d'ornière 1 (déformation **élastique**): le sol est à l'état semi-solide; son humidité est en deçà de la limite de plasticité. Il est dur et non déformable. Il possède une très bonne portance naturelle et peut donc supporter des charges relativement élevées sans que sa structure subisse de modifications significatives.

→ La praticabilité technique est garantie.

Type d'ornière 2 (déformation **plastique**): le sol est à l'état plastique déformable; son humidité se situe entre la limite de plasticité et la limite de fluidité. Il se laisse pétrir comme de la pâte à modeler, mais conserve ensuite sa forme.

→ La stabilité du sol est moins bonne qu'avec le type d'ornière 1, mais la praticabilité technique reste garantie.

Type d'ornière 3 (déformation **viscoplastique**): le sol présente une consistance visqueuse, fluide; son humidité est égale ou supérieure à la limite de liquidité. Il ne conserve plus sa forme lorsqu'il est pétri. Les particules de sol exposées à une contrainte commencent à se fluidifier. La portance du terrain est extrêmement faible. Quand la limite de liquidité est atteinte ou dépassée, la règle générale est d'éviter toute circulation. Les contraintes exercées entraînent une destruction complète de la structure et des fonctions du sol (p.ex. conductivité de l'eau et de l'air) et il faut dans tous les cas s'attendre à des dégâts durables et profonds.

→ La stabilité du sol est beaucoup moins bonne qu'avec les types d'ornières 1 et 2. En cas de contrainte supplémentaire, les limites de la praticabilité technique sont rapidement atteintes.

Les déformations du sol peuvent être élastiques (réversibles), plastiques (affaissement persistant) ou visco-plastiques (fluidification du sol)

#### 4.2.3 Microbiologie du sol

##### Modification du sol et microorganismes

Jusqu'ici, la question de savoir à partir de quel degré de modification structurelle il y a lieu de parler d'atteinte au sol a été essentiellement étudiée du point de vue des effets sur l'aération et le régime hydrique (Kozłowski 1999; Schack-Kirchner et al. 2007). Les effets sur les microorganismes et leur capacité à transformer des substances dans les sols forestiers n'ont guère été pris en considération, bien qu'ils soient considérés comme un système d'alerte précoce de modifications dommageables aux sols (Wardle et al. 1999). Une microflore active a une influence déterminante sur les cycles de substances et donc sur la vitalité des peuplements forestiers. Un gramme de sol forestier peut contenir jusqu'à 8000 microorganismes différents, soit vingt fois plus qu'un sol cultivé. La disparition de cette diversité a de nombreuses conséquences sur la fertilité des sols, sur la décomposition de la litière et la formation de l'humus:

Les microorganismes du sol comme système d'alerte précoce en cas de modifications du sol

- > Les microorganismes peuvent signaler des déformations du sol, car ils reflètent les effets concrets s'exerçant au niveau local.
- > Une pédomicroflore active a une influence déterminante sur les cycles des substances et contribue ainsi à la vitalité des peuplements forestiers.
- > Les études microbiologiques de Frey et al. (2011) et Hartmann et al. (2014) visent à analyser les relations fonctionnelles qui existent entre les propriétés physiques des sols et les conditions de vie ainsi que la quantité, l'activité et la composition des microorganismes du sol, qui sont directement ou indirectement influencées par ces propriétés.

### Échanges gazeux

Les effets de contraintes mécaniques sur les microorganismes et leur activité sont complexes et dépendent de nombreux facteurs. Après des modifications structurelles, des interactions intenses entre processus biologiques, chimiques et physiques se déroulent dans le sol, notamment par les échanges gazeux. Un sol intact est constitué pour moitié de substances solides et pour moitié de pores conducteurs d'air ou d'eau. Dans la plupart des cas, la compaction entraîne une réduction du volume des pores grossiers. Lorsque le système poral est endommagé et réduit, la capacité de transport de l'eau et de l'air diminue. C'est pourquoi les pores sont plus souvent saturés d'eau. Comme l'oxygène diffuse 10 000 fois plus lentement dans l'eau que dans l'air, il pénètre beaucoup moins vite dans l'espace poral. Dans un terrain compacté, par exemple dans des ornières, les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère sont perturbés. Suivant les conditions climatiques et l'humidité, le cycle de l'air et de l'eau dans le sol, et donc les conditions de vie des microorganismes, sont influencés négativement par rapport à la teneur en O<sub>2</sub> et en CO<sub>2</sub> de l'air interstitiel et au potentiel redox. En cas de manque d'oxygène, des modifications interviennent au niveau des processus microbiens dans le sol, les microorganismes produisant alors leur énergie par des phénomènes de réduction plutôt que de combustion. Ces changements se retrouvent dans les gaz du sol rejetés dans l'atmosphère (Teepe et al. 2004) de même que dans la composition de la biocénose microbienne (Schnürr-Putz et al. 2006; Frey et Lüscher 2008; Frey et al. 2009). Cette dernière peut être déterminée directement d'après la communauté bactérienne du sol (Frey et al. 2009). Contrairement à la concentration d'oxygène dans l'air interstitiel, qui varie fortement sous l'effet de nombreux facteurs (p. ex. couverture neigeuse), les communautés bactériennes mettent beaucoup plus longtemps à réagir (deux à quatre semaines) et reflètent ainsi les conditions «moyennes» du milieu gazeux dans le sol sans l'influence des événements temporaires.

### La méthode de l'empreinte génétique

Des paramètres microbiens globaux sont souvent utilisés pour étudier les effets d'atteintes physiques aux sols sur les microorganismes. Cependant, les résultats n'ont pas permis d'établir de corrélations directes entre effets préjudiciables (sur l'activité microbienne globale) et paramètres physiques (densité apparente) (Li et al. 2004; Shestak et Busse 2005). Une explication à cela serait que les paramètres microbiens globaux sont trop imprécis ou pas assez sensibles pour mettre en évidence l'impact des modifications de la structure du sol sur les microorganismes.

Les modifications de la structure des sols peuvent aussi être mises en évidence à partir des échanges gazeux

Mais aujourd'hui, grâce aux empreintes génétiques de fragments d'ADNr 16S d'eubactéries, il est possible de démontrer clairement les effets d'atteintes physiques sur la composition des communautés microbiennes dans le sol (Frey et Lüscher 2008; Frey et al. 2009). Les «empreintes génétiques» sont souvent plus sensibles que les paramètres de l'activité microbienne globale. L'accent est mis sur l'identification des populations bactériennes dominantes après extraction d'ADN suivie d'un séquençage génétique par les méthodes T-RFLP (polymorphisme de longueur des fragments de restriction terminaux) et DGGE (électrophorèse sur gel en gradient dénaturant) dans les échantillons de sol.

#### Présence de bactéries dans les ornières

Des scientifiques de l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL ont effectué des essais de circulation en forêt, relevé minutieusement les modifications subies par les sols et esquissé les conséquences possibles (Frey et Lüscher 2008; Kremer et al. 2009; cf. 5.4). Des ornières ont été créées de manière ciblée selon un gradient d'humidité croissant afin d'obtenir une déformation de plus en plus importante de la structure du sol. Une analyse combinée de paramètres physiques et microbiologiques dans des échantillons prélevés à des distances rapprochées permet de localiser la transition entre une «simple» déformation structurelle du sol et un véritable «dégât au sol». Le passage de la catégorie «critique» à la catégorie «dommageable» en particulier doit pouvoir être étayé de manière fiable. On peut parler avec certitude d'un «dégât» lorsque le sol, fortement modifié dans sa structure, s'est durablement transformé d'un milieu aérobie en un milieu anaérobie. L'abaissement de la teneur en O<sub>2</sub> dans le sol peut en effet conduire jusqu'à l'anaérobie et modifier ainsi la variété spécifique des communautés microbiennes (Frey et al. 2009 et Frey 2010).

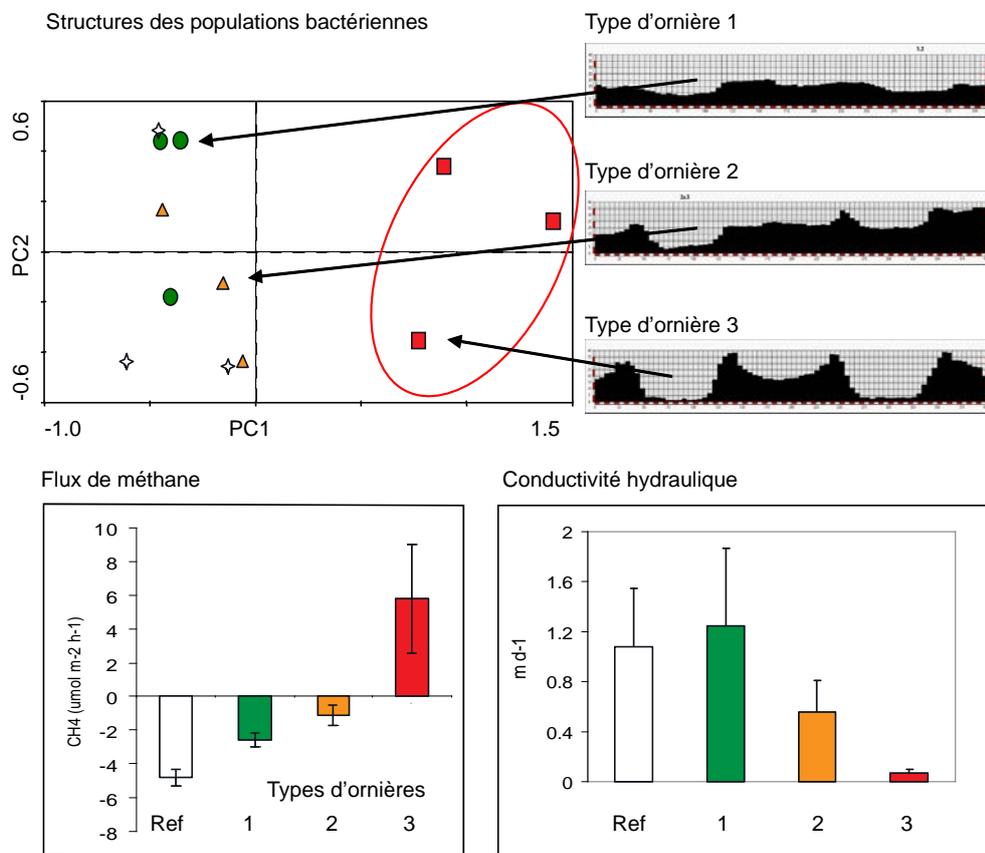
Dans une structure de sol intacte, on trouve surtout des bactéries aérobies dont la respiration produit du CO<sub>2</sub>, mais lorsque le sol subit des modifications structurelles plus importantes qui altèrent ses fonctions, ces bactéries disparaissent peu à peu au profit des populations anaérobies. Parmi les microorganismes anaérobies n'ayant pas besoin d'oxygène pour produire de l'énergie figurent des bactéries dénitrifiantes et méthanogènes. Dans les ornières compactées (type 2), des sondes génétiques spécifiques ont révélé une présence accrue de dénitrificateurs susceptibles de générer des émissions de protoxyde d'azote, un gaz à effet de serre (Zimmermann et al. 2009). Les conditions requises pour la production de méthane n'ont pu être atteintes que dans les ornières déformées par écoulement visqueux et totalement dépourvues d'oxygène (type 3), avant qu'elles ne se ressuent. Sous l'effet de ces déformations structurelles très importantes, toutes les souches aérobies finissent par disparaître pour être remplacées par des archées méthanogènes (Hartmann et al. 2014). Ces dernières sont ainsi un indicateur irréfutable d'un «dégât au sol» (type 3). L'étude des bactéries du sol représente donc un excellent outil pour identifier des conditions anaérobies dans le sol. Elle permet de «calibrer» toutes les méthodes et paramètres physiques et structurels de même que la morphologie typique des ornières.

**Les types d'ornières se distinguent non seulement sur le plan morphologique, mais aussi au niveau microbiologique**

**Le type d'ornière 3 présente des conditions anaérobies signalant un milieu défavorable à la croissance**

**Fig. 37** > Relations entre dégâts structurels causés par le passage de véhicules, fonctions du sol et composition des structures de populations bactériennes

Typologie visuelle des ornières selon la nature de la modification dans le sol d'après les trois types d'ornières (en haut à droite). Une atteinte grave au sol (type d'ornière 3) se distingue par une conductivité hydraulique fortement réduite (en bas à droite), une augmentation des émissions de méthane (en bas à gauche) et une modification des structures des populations bactériennes (en haut à gauche) dans les ornières. La composition de ces structures présente de fortes différences selon le type d'ornière au niveau des clusters de l'analyse des principaux composants (PC1; PC2). Les types d'ornières 1 (cercles verts) et 2 (triangles oranges) sont proches des points de la zone de référence non perturbée (étoiles). Les populations dans les types d'ornières 3 (carrés rouges) s'en distinguent clairement (Frey 2010).



## 5 > Recherches pratiques

### 5.1 Choix des sites étudiés et buts visés

Plusieurs surfaces forestières ont été sélectionnées en Suisse dans le cadre du projet «Protection physique des sols en forêt» d'une part pour mener des recherches scientifiques et pratiques, d'autre part pour disposer d'une base bien documentée pour les cours de formation.

Les sites ont été choisis de manière à être les plus représentatifs possible des conditions stationnelles prévalant sur le Plateau suisse. On a en outre veillé à la diversité des bases de données pédologiques et phytosociologiques disponibles pour chacun d'eux. Pour le site de Messen-Junkholz (canton de Soleure) il existait même une carte des sols à l'échelle 1:5000, pour celui d'Ermatingen-Hohrain (canton de Thurgovie) une carte générale des sols au 1:50000 et une carte des stations au 1:5000. Pour la parcelle d'Heitere-Bruucheren (canton de Berne), on ne possède en revanche qu'une carte phytosociologique au 1:25000. L'objectif était d'étudier l'influence des informations disponibles sur la qualité des décisions d'exploitation liées à la protection physique des sols et d'examiner les possibilités d'améliorer ces bases de données ou de mieux les utiliser.

Ces sites ont été complétés ultérieurement par une parcelle située dans un terrain non praticable par les véhicules à Unteriberg (canton de Schwyz). Ici, les essais visaient à étudier les impacts du débusquage d'arbres entiers avec câble-grue en matière de physique des sols.

Les caractéristiques des parcelles d'essai sont décrites en détail au point 5.2.

Des recherches approfondies sur la physique et la biologie du sol ont été menées sur ces parcelles. L'objectif était de développer une typologie pratique des ornières, d'analyser les modifications causées dans le sol par le passage de véhicules et de mettre en évidence leurs effets à long terme. Sur les parcelles d'Ermatingen-Hohrain et d'Heitere-Bruucheren, des essais ont été réalisés avec un engin forestier circulant dans des conditions connues très précisément (structure et humidité du sol, poids du véhicule, pression de gonflage des pneumatiques etc., cf. 5.4). Ils ont été complétés par des essais de plantation d'aulnes glutineux dans des ornières de type 3 visant à étudier les possibilités d'accélérer la régénération biologique de sols fortement compactés (cf. 5.5).

Ces parcelles d'essai sont aujourd'hui bien documentées et se prêtent ainsi à l'organisation de formations initiales et continues sur la thématique de la protection des sols. Les sites d'Ermatingen-Hohrain, de Heitere-Bruucheren et de Messen-Junkholz sont devenus de véritables centres de formation qui complètent les objets situés dans d'autres régions de Suisse.

Des parcelles d'essai documentées par différentes bases pédologiques et phytosociologiques

## 5.2 Parcelles d'essai

### 5.2.1 Aperçu et procédure

Le tableau 7 présente les principales caractéristiques des parcelles d'essai situées dans le Plateau suisse et les Préalpes.

**Tab. 7 > Aperçu des parcelles d'essai du Plateau suisse et des Préalpes**

Caractéristique	Messen-Junkholz	Ermatingen-Hohrain	Heitere-Bruucheren	Unteriberg-Schlegwald
Canton	Soleure	Thurgovie	Berne	Schwyz
Superficie (ha)	40	82	95	20
Forme du terrain	plat	plat à légèrement en pente	plat à légèrement en pente	en pente (30–40 %)
Texture	silt	sable limoneux	sable siltieux	limon argileux
Types de sols	2/3 infiltration verticale 1/3 sols à nappe perchée temporaire et à nappe permanente de fond ou de pente	sol brun, sol brun lessivé	sol brun, sol brun lessivé	gley de pente, en partie influencé jusqu'à la surface par l'eau de pente, en partie localement brunifié
Teneur en matière organique	≤5 %	≤5 %	≤5 %	>5 %
Pierrosité	peu pierreux	pierreux à très pierreux	peu pierreux à pierreux	peu pierreux à pierreux
Surface atteinte* [%]	8	1,7	3,7	-
• Type d'ornièrè 1	1,6	1	1,6	-
• Type d'ornièrè 2	1	0,2	0,7	-
• Type d'ornièrè 3	2,4	0,2	1,2	-
• Types d'ornièrès 4, 5 et 6	3	0,3	0,2	-
Données de base disponibles	Carte des sols au 1:5000	Carte des stations au 1:5000 Carte générale des sols au 1:50 000	Carte phytosociologique au 1:25 000	-

\*La surface atteinte a été calculée en partant des hypothèses suivantes:

Type d'ornièrè 1: longueur fois largeur de l'ornièrè

Type d'ornièrè 2: longueur fois largeur de l'ornièrè plus 10 cm de part et d'autre de l'ornièrè

Type d'ornièrè 3: longueur fois largeur de l'ornièrè plus 50 cm de part et d'autre de l'ornièrè

Types d'ornièrès 4–6: surface atteinte effective

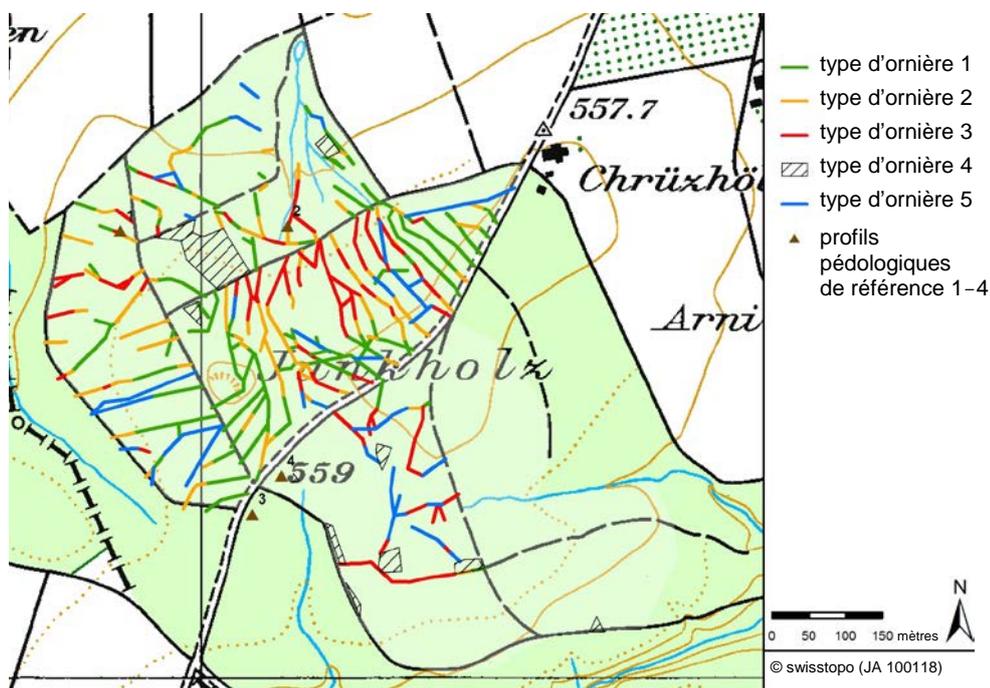
La parcelle d'essai préalpine d'Unteriberg-Schlegwald et décrite au point 5.2.5.

Toutes les ornières et traces de frottement encore visibles ont été relevées au moyen d'un appareil GPS Leica GS 50 avec système de navigation Swipos. Elles ont été classées en différentes catégories en distinguant trois types d'ornières supplémentaires (4 à 6). Les parcelles d'essai sont décrites en détail aux pages suivantes ainsi qu'à l'annexe A8.

### 5.2.2 Messen-Junkholz

Au printemps 2006, un relevé des ornières a été dressé sur une surface de 40 ha, qui a permis de définir deux nouveaux types d'ornières en plus des types 1, 2 et 3 (cf. 4.1.1): le type 4 qui désigne un terrain sillonné par les véhicules et comportant donc des ornières très rapprochées qui s'entrecroisent sur la surface, et le type 5 qui comprend les ornières non classables, trop anciennes pour pouvoir établir clairement au moment du relevé de quel type d'ornière il s'agissait initialement. À Messen-Junkholz, les ornières présumées ont aussi été classées dans la catégorie 5. Par ornières présumées, on entend des ornières tellement recouvertes de terre fine et de végétation qu'elles ne sont plus reconnaissables. Mais certains signes (présence de nombreuses plantes indicatrices d'engorgement et de compaction telles que carex et juncs, caractéristiques d'hydromorphie visibles dans des carottes prélevées à la tarière) permettent de déduire que des véhicules ont circulé dans ces zones par le passé. Pour les relevés ultérieurs (Ermatingen-Hohrain, Heitere-Bruucherer), les ornières présumées ont été classées séparément en tant que type d'ornière 6.

Fig. 38 > Ornières sur la parcelle d'essai de Messen-Junkholz classées par types d'ornières



État en 2006

La situation telle qu'elle se présente sur la parcelle d'essai de Messen-Junkholz peut être considérée comme représentative d'une grande partie des régions du Plateau accessibles aux véhicules. On voit clairement qu'une desserte fine a été aménagée à chaque coupe de bois, entraînant ainsi au fil des décennies la formation de réseaux de layons superposés. Les zones où la forêt a été entièrement couchée par l'ouragan Lothar fin 1999 sont aussi très reconnaissables: comme ce sont de grandes quantités de bois qui ont été récoltées sur une courte période, les layons ont été très sollicités, d'où la proportion élevée d'ornières de type 3 (en rouge sur le plan). Lorsque les arbres ont

été renversés avec la souche, il est souvent impossible d'aménager des layons continus d'une route forestière à l'autre et les anciens layons de débardage ne sont plus que partiellement utilisables.

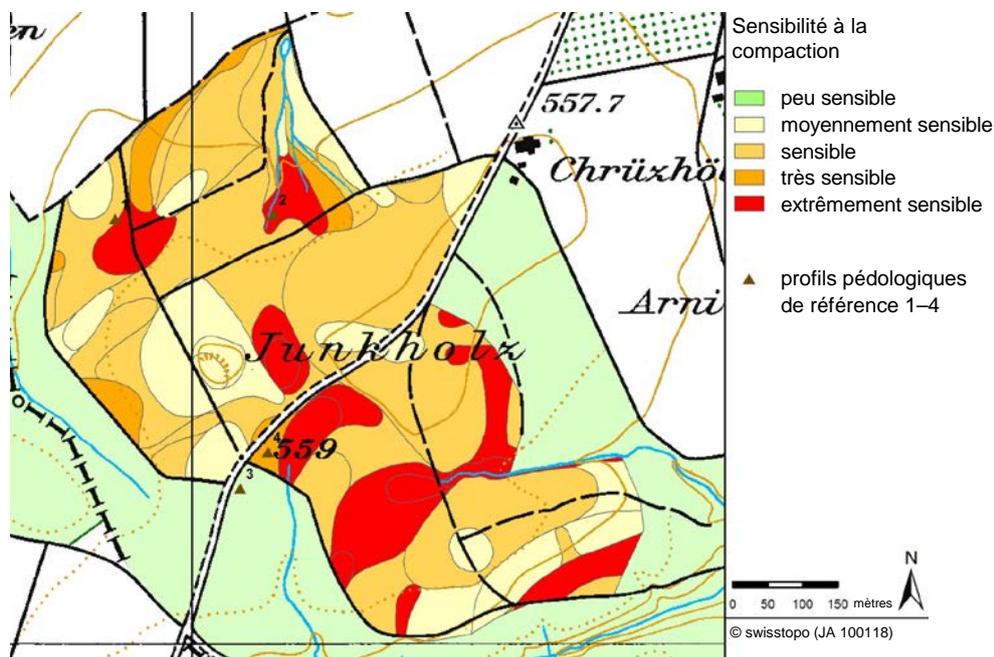
L'illustration de la répartition des layons montre que deux mesures s'imposent:

- > Planifier les layons de débardage de manière systématique et plus seulement pour chaque coupe de bois, mais pour l'ensemble des unités de la desserte fine.
- > Inscrire les layons de débardage dans un plan et les signaler si nécessaire sur le terrain afin qu'ils puissent être retrouvés de manière fiable à l'aide du plan.

La planification systématique de la desserte fine peut se faire directement d'après la carte des sols à l'échelle 1:5000, mais la carte de la sensibilité à la compaction de la couche sous-jacente du sol établie à partir de cette même carte offre une base plus facile à utiliser (fig. 39).

**Fig. 39** > Carte de la sensibilité à la compaction de la couche sous-jacente du sol pour la parcelle d'essai de Messen-Junkholz

*La carte présente la sensibilité naturelle des sols aux contraintes mécaniques.*



Les cartes sont mises à disposition sur Internet par l'office de l'environnement du canton de Soleure (service de la protection des sols) (von Rohr et al. 2013). Pour les régions forestières dont les sols ont déjà été cartographiés, la sensibilité à la compaction est directement déterminée à partir de propriétés connues du sol (teneur en eau, pierrosité, texture) au moyen d'un arbre décisionnel (annexe A10).

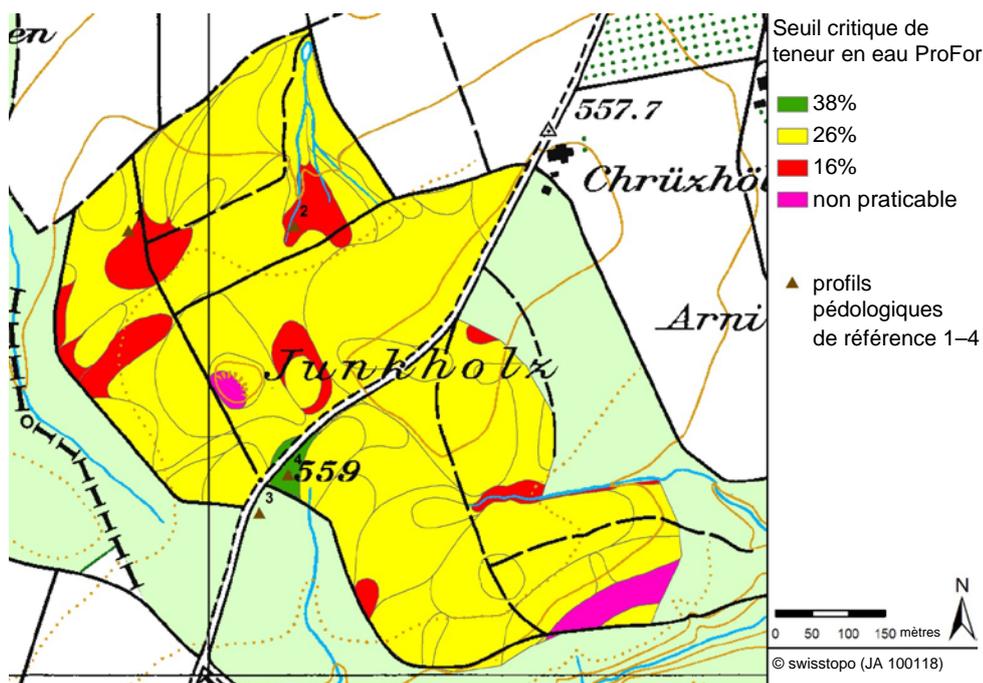
Pour les régions forestières dont les sols n'ont pas été cartographiés, un instrument existe aussi sous la forme d'une carte indicatrice de la compaction des sols («Hinweiskarte Bodenverdichtung») (von Rohr et al. 2013). Le canton d'Argovie, en collaboration avec le WSL, a établi des classes de risque de compaction à partir de la carte des stations, de la carte géologique au 1:25 000, des cartes des sols au 1:25 000 et de quelques profils pédologiques de référence. Ces classes de risque ont été transposées à des situations comparables dans le canton de Soleure. Comme les données sont indirectes et de plus petite échelle, les informations de la carte indicatrice sont moins précises que celles de la carte de la sensibilité à la compaction fondée sur la carte des sols. Elles permettent néanmoins d'avoir une vue d'ensemble pour la planification de la desserte fine et constituent une bonne base pour vérifier le risque de compaction sur le terrain.

Quelque temps avant que la carte de la sensibilité à la compaction de la parcelle de Messen ne soit disponible, une autre démarche avait déjà été entreprise pour rendre la carte des sols plus lisible en vue d'une utilisation pour la planification de la desserte fine. Le système d'information ProFor, développé par l'Université technique de Munich (Ziesak 2004), permet d'établir une carte des seuils critiques de teneur en eau du sol. Ces derniers sont calculés à partir de différents paramètres du sol et des machines. Si la teneur en eau effective lors du passage de l'engin est inférieure au seuil critique calculé selon ce modèle, les véhicules peuvent circuler sans risquer de causer des dégâts importants. La teneur en eau du sol est mesurée avec une sonde facile à utiliser.

La carte de la sensibilité à la compaction comme base de planification de la desserte fine

**Fig. 40 > Seuils critiques de teneur en eau du sol pour la parcelle d'essai de Messen-Junkholz, calculés avec le système d'information ProFor pour un porteur forestier, classe de charge utile 10 tonnes**

*Un seuil critique de teneur en eau de 26 % (en jaune) signifie que le sol ne devrait être utilisé que si sa teneur en eau actuelle est inférieure à cette valeur.*

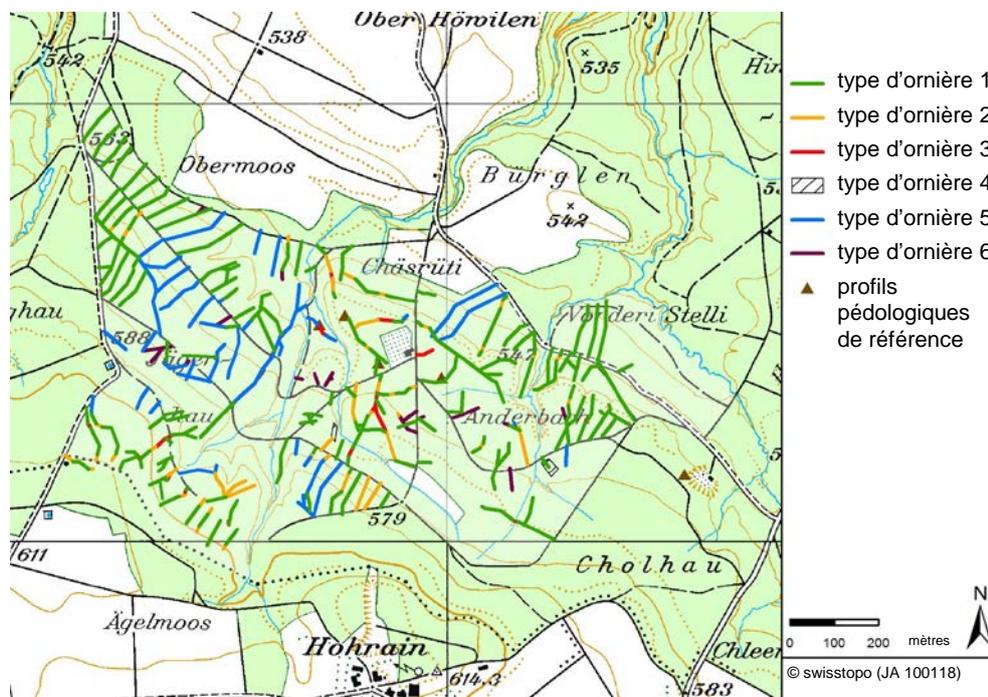


À noter que la carte des seuils critiques de teneur en eau n'est établie et valable que pour un type d'engin spécifique. S'il est prévu d'utiliser par exemple un véhicule avec une charge par roue ou par essieu plus élevée, la carte doit être recalculée pour ce type d'engin.

### 5.2.3 Ermatingen-Hohrain

Comme dans la parcelle d'essai de Messen-Junkholz, toutes les lignes de desserte fine encore identifiables ont été relevées sur une superficie de 82 ha et classées par types d'ornières.

Fig. 41 > Ornières sur la parcelle d'essai d'Ermatingen-Hohrain classées par types d'ornières



État en 2007

La figure 41 montre que les engins empruntent depuis longtemps les mêmes layons. La faible proportion d'ornières de type 3 montre en outre que les layons sont rarement utilisés dans des conditions météorologiques défavorables, c'est-à-dire sur un terrain trop humide. Il faut toutefois préciser qu'il s'agit ici de sols pierreux à très pierreux et donc beaucoup plus portants que par exemple ceux de la parcelle d'essai de Messen-Junkholz.

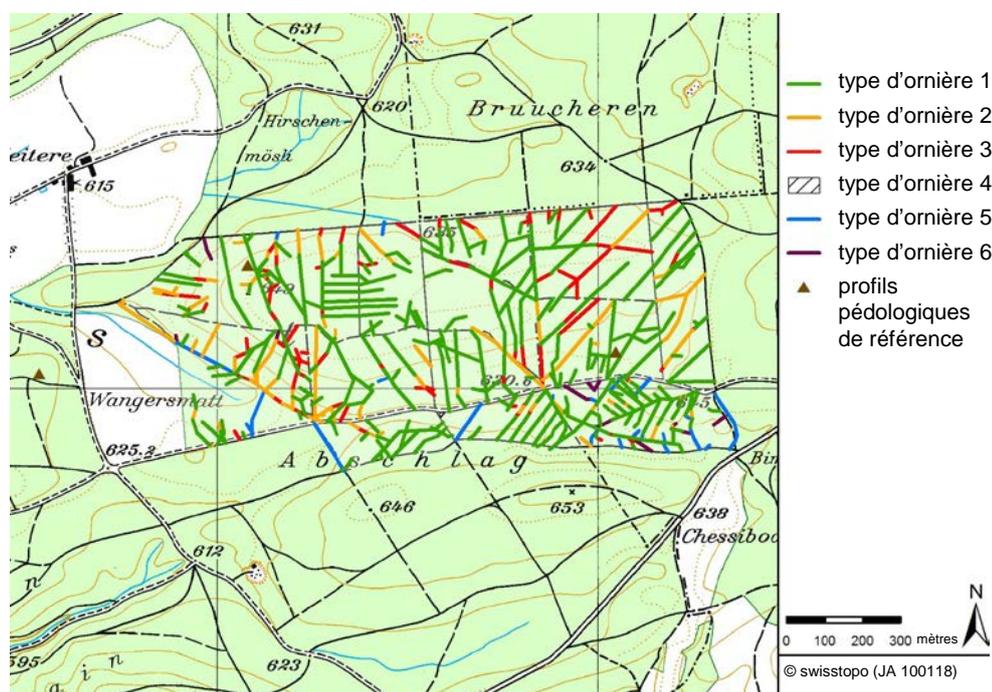
Dans le canton de Thurgovie, la sensibilité à la compaction a été établie à partir des associations forestières (Schmider et al. 2003). Elle a été classée en cinq niveaux allant de bonne praticabilité à non praticable. Des profils pédologiques de référence ont en outre été ouverts à différents endroits pour obtenir des indications plus précises sur le sol, car une même association forestière peut se développer sur plusieurs types de sol différents.

Comme pour la parcelle de Messen-Junkholz, il est possible de créer ici aussi une carte des seuils critiques de teneur en eau au moyen du système d'information ProFor en tant que base de planification de la desserte fine. Cependant, la carte des stations au 1:5000 et la carte des sols au 1:50000 fournissent des informations moins détaillées sur les données pédologiques nécessaires à ProFor qu'une carte des sols à l'échelle 1:5000, raison pour laquelle la carte des teneurs en eau est, elle aussi, moins précise. Elle peut néanmoins se révéler utile pour dresser une vue d'ensemble afin de planifier la desserte fine et choisir les engins de récolte.

#### 5.2.4 Heitere-Bruucheren

Dans la région forestière «Forst» de la bourgeoisie de Berne, les ornières existantes ont été cartographiées sur une surface de 95 ha de la même façon que dans les parcelles d'essai de Messen-Junkholz et Ermatingen-Hohrain. Il s'agit d'un terrain plat à légèrement en pente constitué de sols peu pierreux à pierreux (éminences topographiques locales).

Fig. 42 > Ornières sur la parcelle d'essai de Heitere-Bruucheren classées par types d'ornières



État en 2007

La figure illustrant les ornières montre que dans la région considérée, les engins empruntent depuis longtemps et de manière systématique les layons de débardage planifiés. La prédominance d'ornières de type 1 permet de déduire que les véhicules ont circulé dans des conditions d'humidité favorables. L'accumulation d'ornières de type 3 en certains endroits est due à l'exploitation des arbres suite à l'ouragan Lothar. D'importantes quantités de bois avaient été débardées sur une période très courte en

utilisant toujours les mêmes layons. De plus, la nécessité de sortir rapidement le bois avait induit l'engagement d'engins dans des conditions météorologiques défavorables.

Pour la région où se situe la parcelle d'essai, les données de base nécessaires à l'évaluation de la sensibilité des sols à la compaction sont peu nombreuses. La carte phytosociologique disponible ne fournit que des indications partielles. C'est pourquoi un procédé permettant de déterminer directement la portance sur le terrain a été développé et testé sur différents layons. Il est décrit de façon plus détaillée au point 6.2.2.

### 5.2.5 Unteriberg-Schlegwald

Dans les régions non accessibles aux véhicules, le bois est généralement débardé avec un câble-grue. Depuis les travaux de déblaiement liés à l'ouragan Lothar, le débardage d'arbres entiers est une méthode de plus en plus souvent utilisée. Les arbres abattus sont tirés, avec ou sans leur couronne, jusqu'à la route forestière à l'aide d'une installation de câble-grue. S'il s'agit d'arbres étêtés ou dont le tronc a subi d'autres coupes de séparation, le traînage de la section aux arêtes vives peut provoquer l'arrachement de la couche supérieure du sol. L'apparition de traces de frottement dépend de différents facteurs et de leurs interactions: type de sol, humidité du sol, forme du terrain, dimensions de l'arbre, hauteur du câble par rapport au sol et débardage d'arbres étêtés et non étêtés.

D'une manière générale, on constate que si le débardage avec le câble-grue cause des dégâts au sol, ceux-ci sont très limités et leurs conséquences moins graves que celles des ornières de véhicules. La couche superficielle atteinte ne représente qu'une surface très réduite par rapport à l'étendue totale d'une coupe de bois. Suivant la pente et la méthode de travail, les lignes de câblage sont aménagées tous les 50 à 80 m. Seule la zone centrale de la ligne où le bois débardé tête vers le haut traîne sur le sol est potentiellement menacée. Le risque de formation de traces de frottement peut être limité en débusquant des arbres entiers non étêtés, car les branches jouent un rôle d'amortisseur. Les dégâts apparaissent surtout lorsque des arbres trop gros pour l'installation doivent être débités et que la section inférieure la plus lourde du tronc est traînée sur le sol. Dans ce cas, il est particulièrement important que la hauteur du câble porteur soit réduite de manière à ce que l'angle entre les troncs et le sol soit le plus faible possible.

En général, les traces de frottement sont provoquées par le traînage des grumes qui entaillent profondément la surface du sol et écartent les matériaux terreux sur le côté. La compression du sol n'est toutefois pas aussi profonde que sous les ornières de véhicules, car la charge est nettement moins élevée. Il est plutôt rare que les traces atteignent la couche sous-jacente du sol (type d'ornière 3, fig. 44). Les conditions permettant la régénération des zones touchées sont donc bien plus favorables que dans le cas d'ornières.

Contrairement aux traces de types 1 et 2, celles de type 3 peuvent augmenter le risque d'érosion dans des terrains escarpés ou dans les régions aux sols sensibles, comme dans le flysch. Dans ce cas, il peut s'avérer nécessaire de prendre des mesures appropriées (aplanissement des traces, pose de traverses) après le débardage pour freiner l'écoulement des eaux superficielles de manière qu'elles ne puissent pas entraîner des particules de sol et développer un effet érosif. L'expérience pratique montre que la

forte luminosité dans les lignes de câblage favorise une régénération rapide de la végétation au sol. Dans la région étudiée d'Unteriberg-Schlegwald, aucun dégât d'érosion lié aux traces de frottement n'a été constaté.

Les traces de frottement ont été classées en différentes catégories par analogie aux types d'ornières:

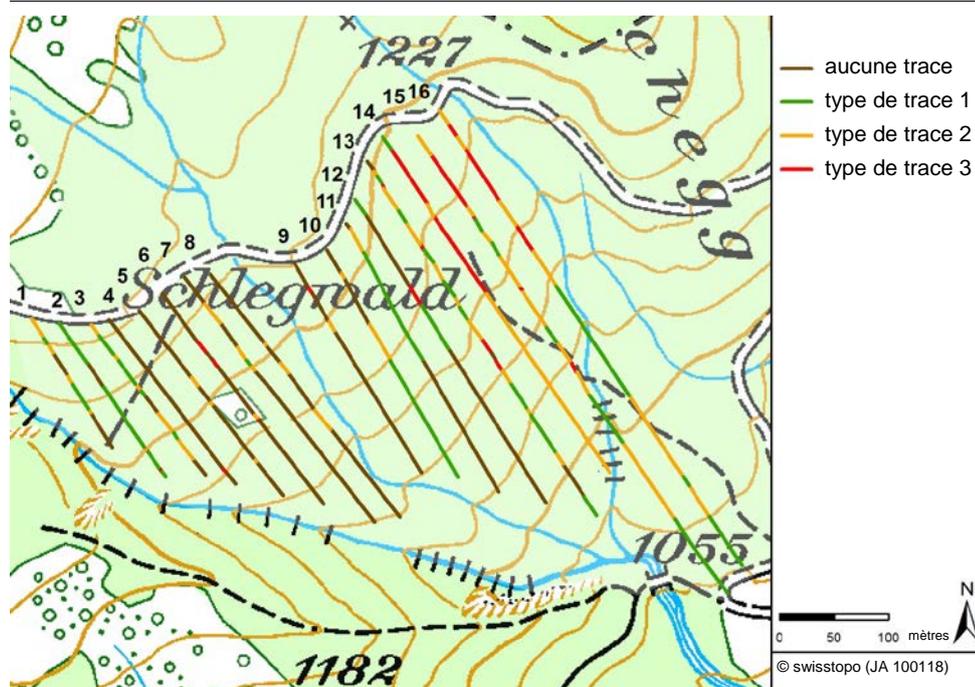
**Type de trace 1:** la trace n'est visible qu'au niveau des horizons organiques, sa profondeur est en général inférieure à 10 cm.

**Type de trace 2:** la profondeur de la trace atteint la couche supérieure du sol, elle est généralement inférieure à 10 cm.

**Type de trace 3:** la trace atteint la couche sous-jacente du sol et sa profondeur est en général supérieure à 10 cm. Contrairement aux ornières de type 3, les bourrelets latéraux sont peu marqués, car les forces exercées sont plus faibles et agissent dans une autre direction.

**Fig. 43** > Détail de la parcelle d'essai d'Unteriberg-Schlegwald

*Les traces présentes à certains endroits dans les lignes de câblage ont été évaluées d'après le même système que celui utilisé pour les ornières. Dans les lignes de câblage 1 à 8, le travail a été effectué selon la méthode dite de l'assortiment, c'est-à-dire que le bois est façonné dans le peuplement avec une récolteuse sur châssis de pelle-araignée, puis généralement ramené suspendu au câble porteur. Par conséquent, on ne trouve dans ces secteurs que des traces éparses.*



Dans la parcelle d'Unteriberg-Schlegwald, le système de classement des ornières (cf. 4.1.1) utilisé dans les terrains accessibles aux véhicules a été transposé aux traces des lignes de câblage. Contrairement aux parcelles décrites précédemment, celle-ci se situe dans un terrain non praticable et ses sols sont sensibles à la compaction (tab. 7). Entre 2001 et 2007, 16 lignes de câblage ont été aménagées dans le secteur présenté à la figure 43. Huit d'entre elles ont servi au débusquage d'arbres entiers.

Dans un terrain non praticable, les traces de frottement causées par le débusquage au câble-grue ont été répertoriées selon le même système que pour les ornières

**Fig. 44** > Traces de frottement de type 3 sur une arête du terrain

*Comme pour les ornières de type 3, la profondeur de la trace atteint la couche sous-jacente du sol. Suivant leur étendue et leur emplacement sur le terrain, ces types de traces peuvent augmenter le risque d'érosion.*



Sur le secteur de la parcelle d'essai illustré à la fig. 43, on constate que les traces de frottement de type 3 ne représentent qu'une faible portion de la longueur totale du réseau. Celles relevées dans les lignes de câblage 14 à 16 (débusquage d'arbres entiers) peuvent s'expliquer par différents facteurs: aplatissement du terrain près de la route (terrain de forme convexe), sol particulièrement sensible et/ou débusquage de sections d'arbres entiers formant des angles relativement prononcés par rapport au sol. L'important volume pourrait aussi constituer un facteur supplémentaire, car pratiquement tout le bois abattu le long de cette ligne de câblage est passé par cet endroit.

La surface touchée par les traces de frottement est proportionnellement très faible

Compte tenu de l'augmentation de la demande, il faut s'attendre à l'avenir à une mobilisation croissante de bois dans les terrains en pente et donc à un recours plus fréquent au débusquage d'arbres entiers au câble-grue. La problématique des traces de frottement devrait donc gagner en actualité. Dans l'éventualité d'une suite à ce projet, il serait intéressant d'obtenir des informations sur le risque potentiel de formation de traces de frottement en fonction de différents facteurs, comme le degré de façonnage du bois débusqué, la déclivité, le type de sol et son humidité, la forme du terrain et la microtopographie, la hauteur du câble porteur et les dimensions des arbres.

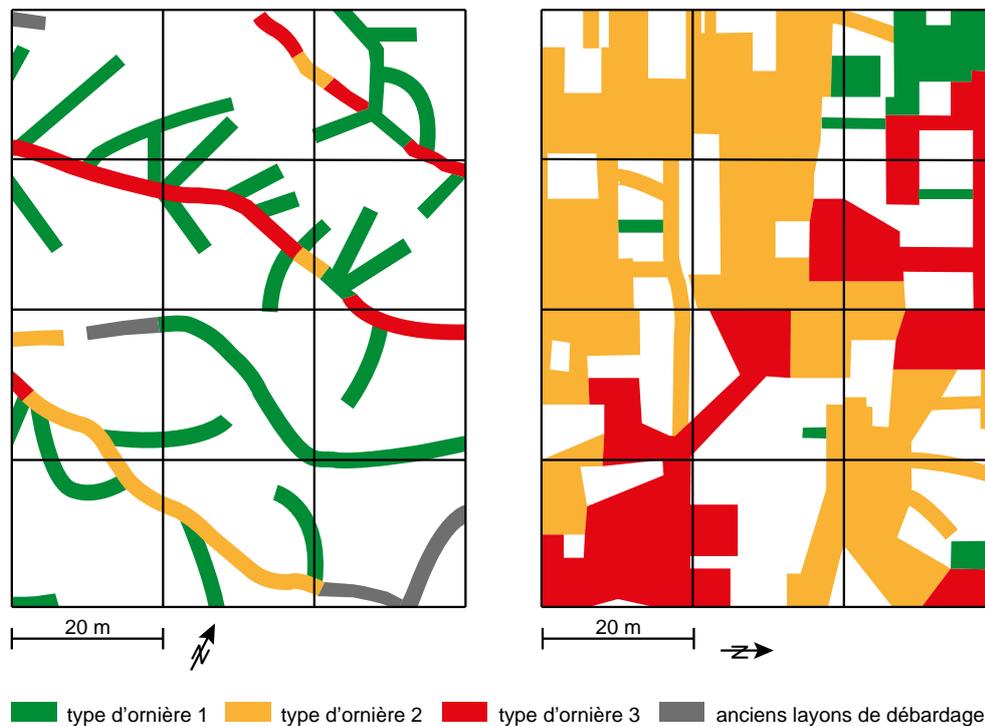
### 5.3 Réserves Lothar

Depuis l'an 2000, le WSL suit plusieurs réserves dans les forêts du Plateau suisse touchées par l'ouragan Lothar de 1999 afin d'étudier les conséquences des dégâts causés aux sols suite à des contraintes mécaniques et d'observer la faculté de régénération des sols (tab. 8). Lors des travaux de déblaiement de ces surfaces, les engins ont circulé soit selon une planification systématique en utilisant le système de desserte fine existant, comme à Habsbourg (AG), soit de manière non planifiée en sillonnant le terrain, comme à Brüttelen (BE). Les ornières, les perturbations et les dégâts aux sols étaient ainsi plus ou moins marqués (fig. 45).

Tab. 8 > Aperçu des réserves Lothar

Situation	Habsbourg (AG)	Brüttelen (BE)	Messen-Brunnenenthal (SO)
Géologie	graviers de la haute terrasse (faille)	molasse marine (grès et marne)	molasse d'eau douce, avec légère couverture morainique (Würm)
Caractéristiques des sols, types de sols	sol brun lessivé, acide, pierreux, légèrement hydromorphe à partir de 30 cm, compactés à partir de 60 cm	sol brun, sol brun lessivé, pseudogleyifié	sol brun, parfois pseudogleyifié à gleyeux
Forme d'humus	mull-moder à moder typique	mull-moder	mull-moder à mull typique
Température/pluviosité moyenne annuelle	9,5 °C / 1032,5 mm	9,4 °C / 1187 mm	9,4 °C / 1187 mm
Température/pluviosité moyenne en janvier	0,4 °C / 80,4 mm	0,2 °C / 104 mm	0,2 °C / 104 mm
Température/pluviosité moyenne en juillet	18,8 °C / 98,1 mm	19 °C / 96 mm	19 °C / 96 mm
Relief/altitude	exposition E, déclivité 0–5 %, 445–455 m	exposition N, déclivité 0–10 %, 545–550 m	exposition NE, déclivité 0–5 %, 510–530 m
Type de station forestière	hêtraie à aspérule	transition entre hêtraie à aspérule avec luzule et hêtraie à aspérule	hêtraie à aspérule avec une partie de hêtraie à aspérule avec luzule
Période des travaux de déblaiement	août – octobre 2000	février 2000, mars/avril 2001	été 2000
Engins forestiers utilisés	abatteuse ébrancheuse COBRA HS10, débusqueur à treuil TIMBERJACK 360C, porteur forestier TIMBERJACK 1110	tracteur forestier WOODY 110	tracteur forestier Landini, récolteuse Timberjack 1270 B, porteur forestier Valmet 820
Pression dans les zones de contact	90–100 kPa	non relevée	non relevée
Circulation sur terrain humide	éventuelle	probable	probable
Mesures de protection des sols	tapis de branches	aucune	non relevées

**Fig. 45** > Typologie des ornières et part de surface empruntée par les véhicules sur les parcelles d'essai de Habsbourg (à gauche) et de Brüttelen (à droite)



Même en cas d'évènement exceptionnel, la circulation sur le sol doit être circonscrite aux layons existants

À Habsbourg, les véhicules ont circulé sur 26,9 % de la surface, et 23 % des ornières relevées appartenaient au type 3. À Brüttelen où les véhicules ont sillonné le terrain, la proportion de surface utilisée atteint 67,3 % (36 % de types d'ornières 3). Cet exemple montre qu'après des dégâts de tempête notamment, les possibilités de limiter les dégradations liées au déblaiement du bois sont loin d'être entièrement exploitées et que dans le domaine de la protection des sols, des mesures de planification préventives permettraient d'éviter des dégâts importants. Des informations à ce propos sont rassemblées entre autres dans l'Aide-mémoire en cas de dégâts de tempête (OFEV 2008).

#### 5.4 Essai de formation d'ornières

S'il est possible de classer assez précisément les ornières trouvées sur le terrain, les conditions dans lesquelles elles se sont formées sont rarement connues. Pour pouvoir étudier et décrire les différents types d'ornières non seulement sur le plan morphologique, mais aussi sous l'angle de la physique et de la biologie des sols, différents types d'ornières ont été créés de façon ciblée lors d'une expérience menée dans des conditions connues (structure du sol, texture, teneur en eau, poids des machines, charge par roue, pression des pneus et nombre de passages).

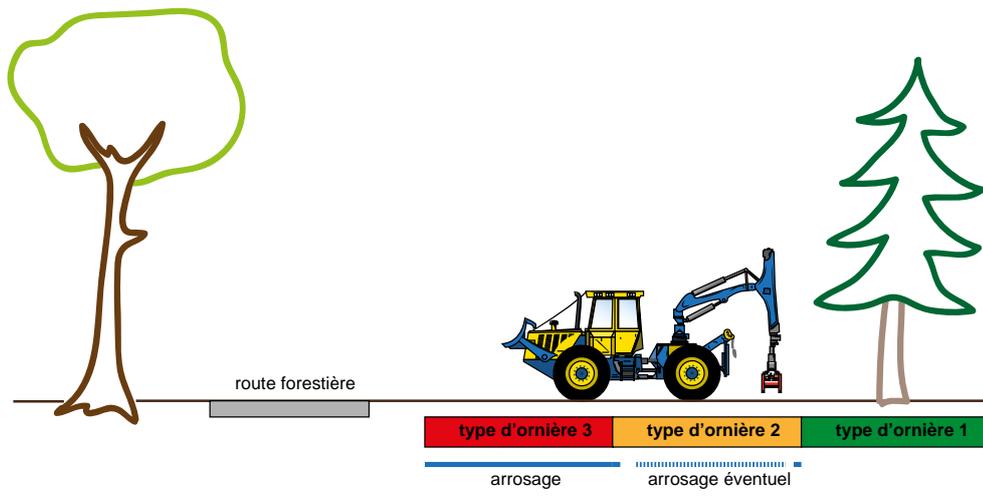
### 5.4.1 Sites d'essai et procédure

En été 2007, des essais de circulation avec un porteur forestier chargé ont été menés sur le site d'Ermatingen-Gerstlishau; cette expérience a été répétée en mai 2008 sur le site d'Heitere-Säget avec un tracteur forestier non chargé. Les trois types d'ornières 1, 2 et 3 ont été créés dans des conditions connues par un engin forestier circulant sur plusieurs pistes parallèles, puis soumises à des analyses morphologiques, physiques et biologiques.

Le seuil de teneur en eau théoriquement nécessaire pour obtenir les types d'ornières souhaités (1, 2 ou 3) lors du passage d'un véhicule a été calculé dans différents secteurs le long de plusieurs pistes parallèles à l'aide du système d'information ProFor de l'Université technique de Munich (Ziesak 2004) et obtenu au moyen d'arrosages ciblés. Pour des raisons pratiques, le type d'ornière 3 a été créé dans la zone la plus proche de la route forestière, car c'est là que le sol devait être le plus arrosé.

Des ornières des types 1, 2 et 3 ont été créées à des fins expérimentales dans des conditions de sol comparables mais à des taux d'humidité variables

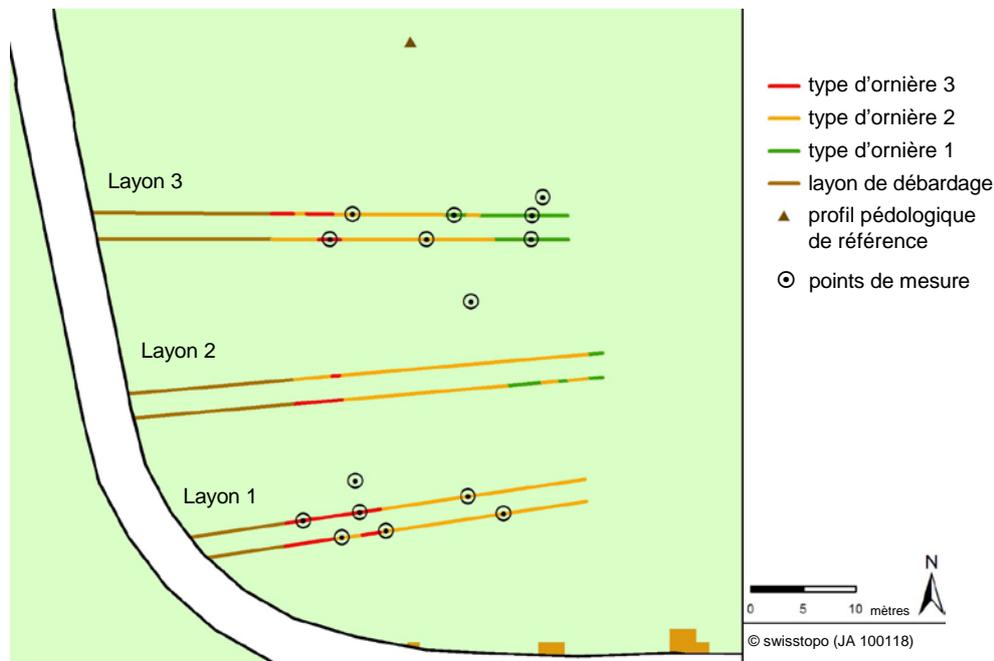
Fig. 46 > Illustration montrant le principe des essais de circulation avec un engin forestier



Trois pistes parallèles d'environ 30 m de long ont été aménagées à Ermatingen-Gerstlishau; à Heitere-Säget, elles étaient au nombre de cinq en raison du volume d'échantillonnage prévu.

Certaines ornières créées lors de ces essais ont été plantées avec des aulnes glutineux pour une étude à long terme de la régénération biologique des sols. Les objectifs de cette étude et les résultats obtenus jusqu'ici sont présentés de façon plus détaillée au point 5.5.

**Fig. 47** > Détail du plan d'essai à Heitere-Säget (canton de Berne), avec les types d'ornières qui se sont formées suite à l'arrosage ciblé et au passage du véhicule



Les paramètres relevés étaient les suivants:

- > description détaillée des types d'ornières 1 à 3 (cf. 4.1)
- > conductivité hydraulique à saturation ( $k_f$ )
- > conductivité à l'air intrinsèque ( $k_i$ )
- > quotient de pores
- > densité apparente
- > répartition granulométrique
- > paramètres de plasticité (limite de plasticité et limite de liquidité, indice de plasticité)
- > tomographie assistée par ordinateur
- > préconsolidation
- > composition et modifications des communautés microbiennes étudiées avec des méthodes moléculaires; des échantillons de sol ont été prélevés dans les ornières avant et après le passage des véhicules ainsi que dans un sol de référence non perturbé
- > mesures des échanges gazeux

Les entreprises forestières des bourgeoisies de Berne et d'Ermatingen ont mis à disposition les surfaces d'essai ainsi que les engins forestiers avec leur conducteur.

## 5.4.2 Résultats

La création des ornières a très bien fonctionné sur les deux sites d'essais de circulation. Mais il a fallu dans les deux cas augmenter la pression des pneus initialement prévue pour pouvoir obtenir les trois types d'ornières souhaités. Ces écarts peuvent s'expliquer par un relevé imprécis des paramètres pédologiques indiqués dans ProFor, des différences entre la teneur en eau effective du sol lors du passage des véhicules et le seuil de teneur en eau calculé, ou encore d'éventuelles imprécisions de ProFor. Ce problème a pu être corrigé en augmentant de quelques dixièmes de bars la pression des pneumatiques.

Les résultats des analyses physiques et mécaniques ont révélé des différences marquées entre les trois types d'ornières.

Au niveau de la biologie du sol, l'étude de l'activité des microorganismes dans le sol et les mesures des échanges gazeux dans les ornières ont montré que les ornières de type 3 présentaient des différences statistiquement significatives par rapport aux ornières de types 1 et 2, car le nombre de microorganismes anaérobies y était nettement plus élevé et l'activité biologique clairement réduite. Ces études sont décrites en détail au point 4.2.3.

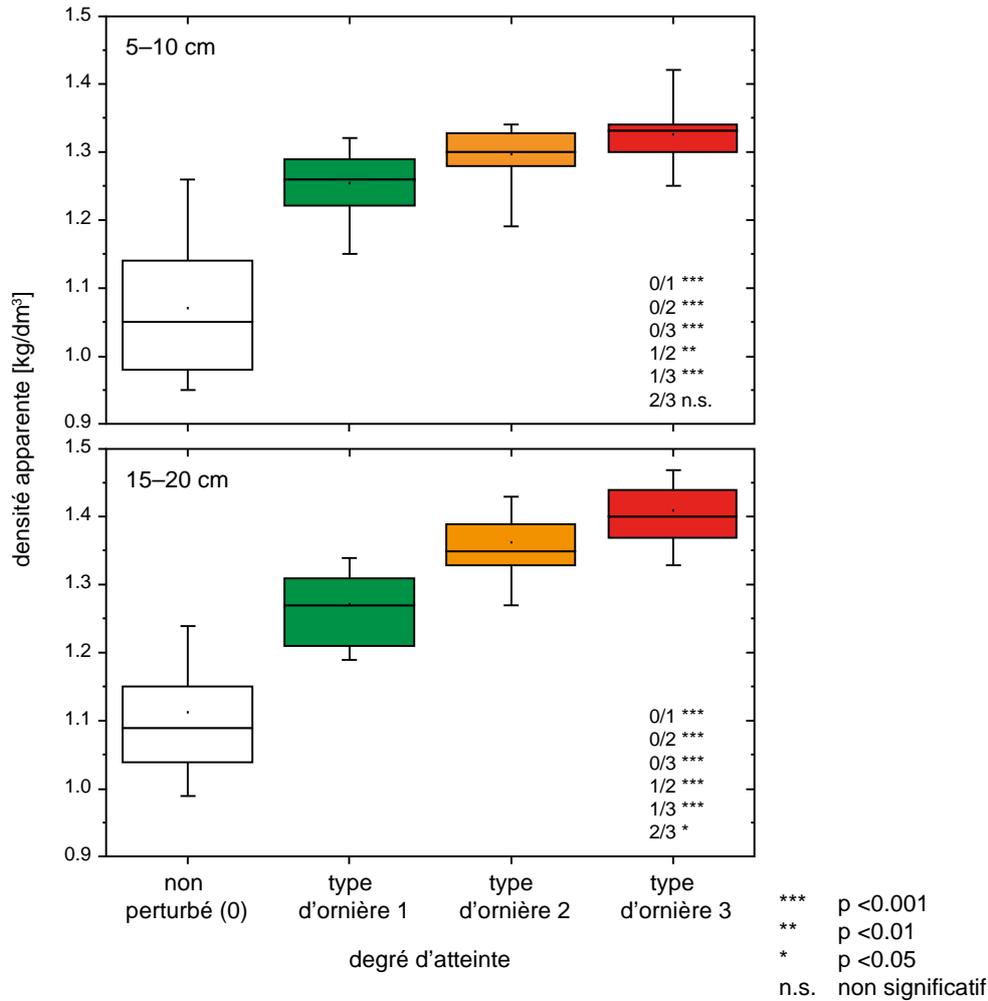
Les caractéristiques morphologiques ne sont donc pas le seul critère permettant de différencier les trois types d'ornières. Grâce aux résultats de ces recherches, ces différences peuvent désormais aussi être quantifiées.

Pour tous les paramètres mesurés, des différences marquées apparaissent entre la surface de référence non perturbée et les trois types d'ornières. Elles sont présentées à titre d'exemple pour l'essai mené à Heitere-Säget.

Après le passage du véhicule, la densité apparente augmente sensiblement sous l'effet de la sollicitation accrue (fig. 48) et atteint des valeurs supérieures à 1,2 kg/dm<sup>3</sup> aux deux profondeurs de mesure. Dans des sols morainiques comparables sous hêtraies à aspérule, les valeurs de densité sont inférieures de 20 à 25 % en moyenne (Zimmermann et al. 2006). Les différences mesurées entre les trois types d'ornières sont toujours significatives sauf entre les types 2 et 3 à la profondeur de 5 à 10 cm, car la densité près de la surface du sol est relativement hétérogène. La densité apparente permet donc de confirmer les atteintes décrites morphologiquement dans l'essai de Heitere-Säget. On constate par ailleurs que la valeur limite de 1,4 kg/dm<sup>3</sup> à partir de laquelle l'enracinement est perturbé (Gisi et al. 1997) a été atteinte à la profondeur de 15 à 20 cm dans le type d'ornière 3.

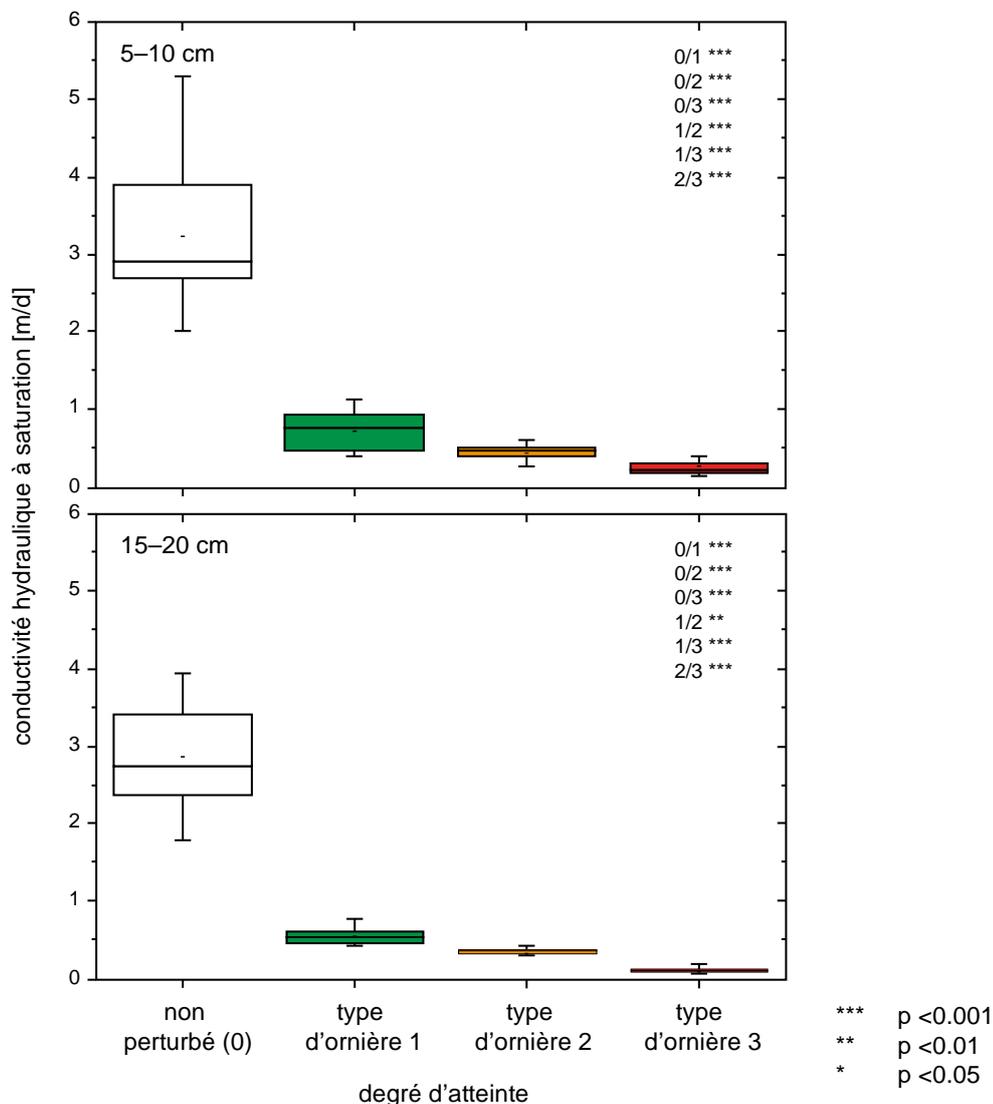
Les résultats des analyses physiques et mécaniques ont révélé des différences marquées entre le sol de référence non perturbé et les différents types d'ornières

**Fig. 48** > Densité apparente du sol de référence non perturbé par comparaison avec les types d'ornières 1 à 3 aux profondeurs de 5–10 cm et 15–20 cm sur la surface d'essai de Heitere-Säget



La conductivité hydraulique à saturation diminue nettement aux deux profondeurs de mesure suite au passage du véhicule (fig. 49). Sur la surface de référence non perturbée, elle se situe dans la fourchette de valeurs «extrêmement élevée» (>3 m par jour) entre 5 et 10 cm de profondeur, et «très élevée» (1 à 3 m par jour) entre 15 et 20 cm de profondeur. Après le passage du véhicule, elle s'abaisse dans la zone «moyenne» à «faible» (<0,4 m par jour). Dans les ornières de type 3, la perméabilité entre 15 et 20 cm de profondeur n'est plus que de 0,1 m par jour. Les différences mesurées entre la surface non perturbée et les trois types d'ornières sont toutes statistiquement significatives.

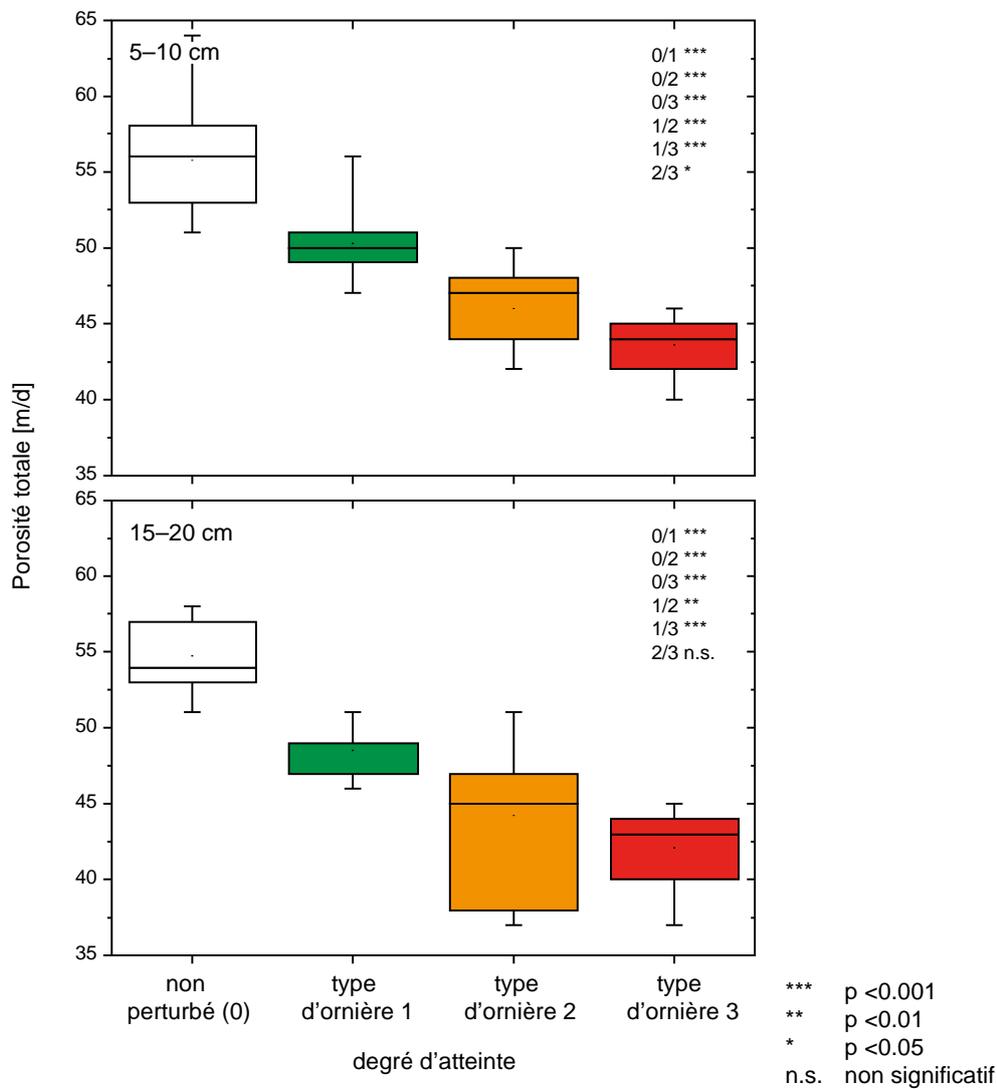
**Fig. 49** > Conductivité hydraulique à saturation du sol de référence non perturbé par comparaison avec les types d'ornières 1 à 3 aux profondeurs de 5–10 cm et 15–20 cm sur la surface d'essai de Heitere-Säget



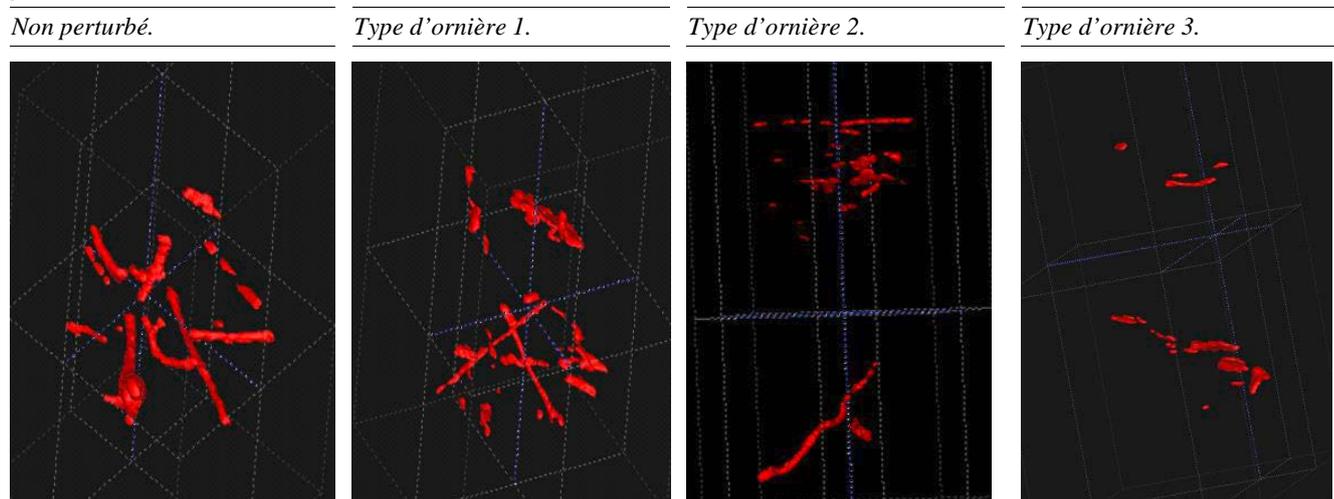
La conductivité hydraulique à saturation mesurée à différentes profondeurs du sol permet de tirer des conclusions sur les modifications de la fonctionnalité écologique de l'espace poral en fonction du degré d'atteinte. L'altération des conditions d'infiltration entraîne une augmentation des degrés de saturation, qui apportent une explication plausible aux problèmes d'aération mis en évidence par les signes d'hydromorphie. En outre, les teneurs en eau mesurées à différents moments de l'année (sur la période 2007–2009) à Ermatingen-Gerstlishau sont 5 à 15 % plus élevées en moyenne dans les ornières que dans la couche supérieure de sols non perturbés comparables (fig. 33). Les phases prolongées d'aération perturbée sont responsables de l'apparition de formes d'hydromorphie de plus en plus visibles surtout dans les ornières de types 2 et 3.

La porosité totale diminue de façon comparable aux deux profondeurs de sol (fig. 50). Dans tous les traitements, les valeurs sont inférieures de 1,5 % environ à une profondeur de 15 à 20 cm par rapport à une profondeur de 5 à 10 cm. Dans le cas le plus extrême, la porosité totale baisse de plus d'un cinquième après le passage du véhicule: à une profondeur de 15 à 20 cm, elle passe de 54,8 % dans le sol de référence non perturbé à 42,2 % dans les ornières de type 3. En outre, dans le type 3, les connexions entre les pores grossiers ont disparu (cf. fig. 51).

**Fig. 50** > Porosité totale du sol de référence non perturbé par comparaison avec les types d'ornières 1 à 3 aux profondeurs de 5-10 cm et 15-20 cm sur la surface d'essai de Heitere-Säget



**Fig. 51** > Formation des pores grossiers dans la matrice du sol sous les types d'ornières 1 à 3 par comparaison avec le sol de référence non perturbé

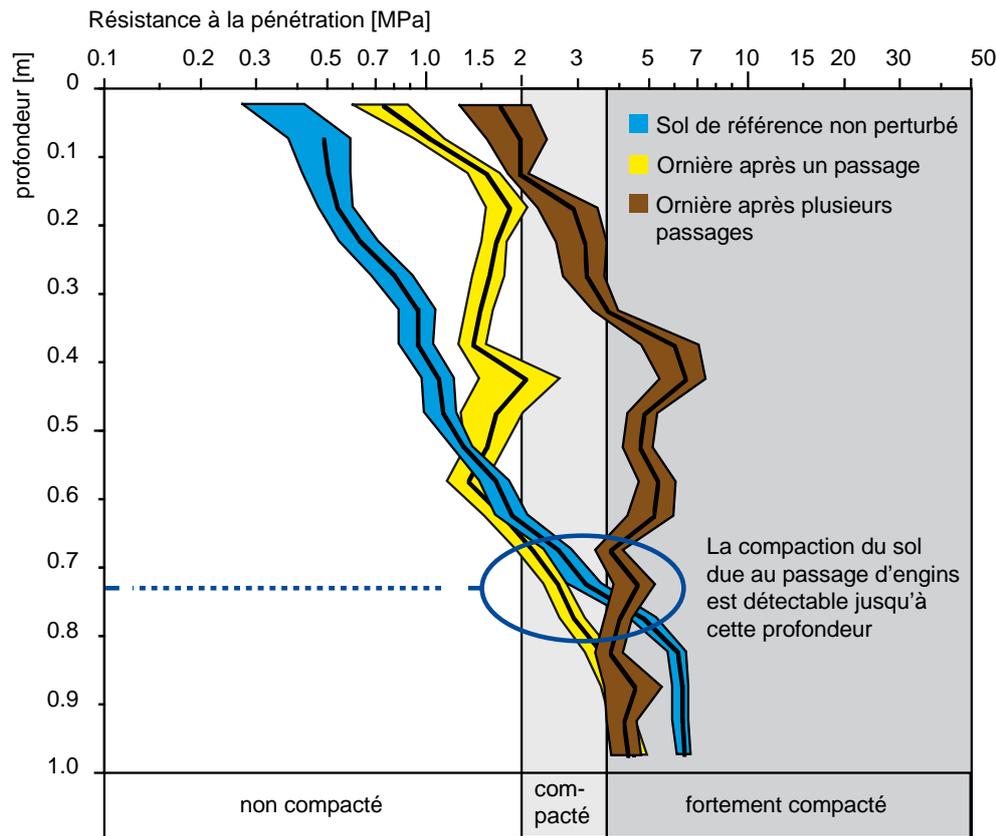


État en 2007

Les effets des atteintes après une circulation plus ou moins intense se manifestent aussi dans les couches profondes du sol (fig. 52). Avec une sonde mesurant la résistance du sol à la pénétration, il est possible de déterminer la compaction jusqu'à une grande profondeur dans la couche sous-jacente (Lüscher et al. 2009b). Dans un sol morainique de structure comparable à celle de la surface d'essai de Heitere-Säget, nous avons pu mettre en évidence que ce n'est qu'à 75 cm de profondeur que le signal de mesure du type d'ornière 3 rejoint les valeurs de référence de la surface non perturbée, dans la plage de valeurs «fortement compacté». De telles modifications affectent à long terme la croissance des racines dans la couche sous-jacente du sol.

**Fig. 52 > Une contrainte mécanique a des répercussions profondes dans le sol**

La compaction du sol peut être déterminée grâce à une sonde mesurant la résistance du sol à la pénétration. Un sol de référence non perturbé est comparé à une ornière réalisée après un seul passage et à une ornière réalisée après plusieurs passages dans des conditions homogènes de teneur en eau du sol sur toute la profondeur de la zone de mesure.



La mesure de la résistance à la pénétration permet de déterminer les effets de la compaction dans les couches profondes

## 5.5 Essai de régénération

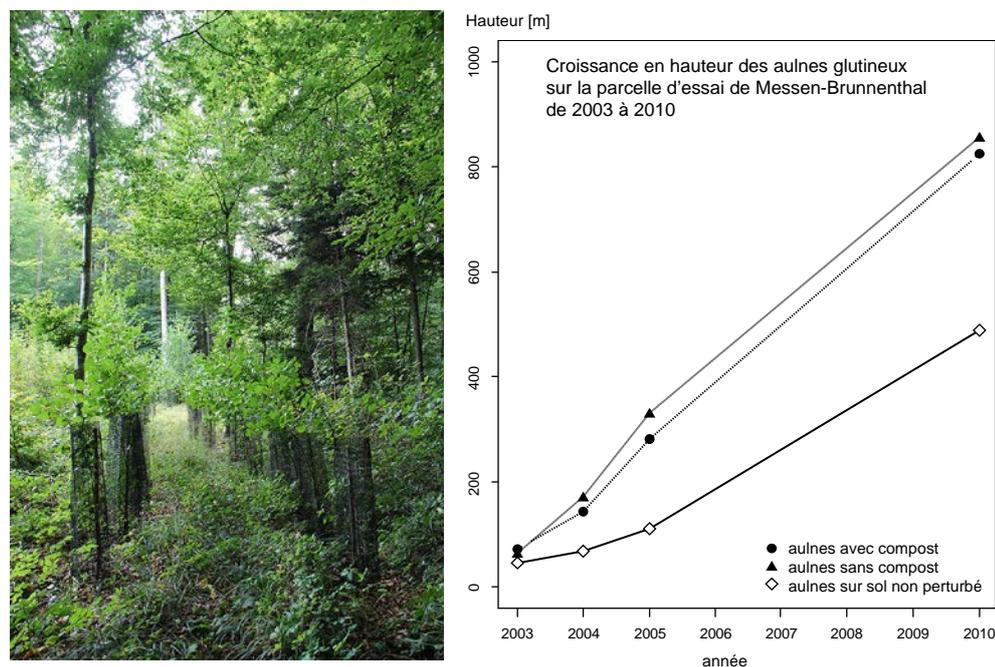
Malgré les efforts entrepris actuellement pour éviter ou limiter au maximum les atteintes, de nombreux sols portent encore les marques de dégâts « anciens », p. ex. dans des layons de débardage qui ne font plus partie du système actuel de desserte fine. La régénération de sols dégradés (type d'ornière 3) est très lente, surtout dans la couche sous-jacente, car les processus naturels de régénération (gonflement et retrait, effet du gel) agissent plutôt dans la couche supérieure du sol. La question qui se pose est de savoir comment accélérer ces processus naturels. Contrairement à l'agriculture, l'utilisation d'engins d'ameublissement du sol n'est guère possible en forêt et il faut donc trouver d'autres solutions.

Depuis 2002, le WSL étudie les effets éventuels d'«auxiliaires végétaux» dans trois «réserves Lothar» qui ont été déblayées après la tempête. Celles-ci se situent à Brütten (BE), Habsbourg (AG) et Messen-Brunenthal (SO). Toutes les surfaces étudiées appartiennent au type de station forestière de la hêtraie à aspérule et se trouvent sur le Plateau suisse. Partant du principe que les racines sont capables d'ameublir les zones compactées, des plants d'aulne glutineux de deux ans ont été plantés en 2003 dans des ornières de type 3. Une partie des ornières ont été remplies de compost avant la plantation. L'étude complète du développement des arbres et des racines des aulnes glutineux et de la régénération de la structure du sol a débuté en 2009.

Les années suivant la plantation, les aulnes glutineux se sont bien établis dans les ornières et ont affiché de bons taux de croissance (fig. 53). L'aulne glutineux étant une essence pionnière qui apprécie les milieux engorgés et pauvres en oxygène, les arbres se sont finalement nettement mieux développés dans les ornières que dans les surfaces de référence adjacentes non perturbées.

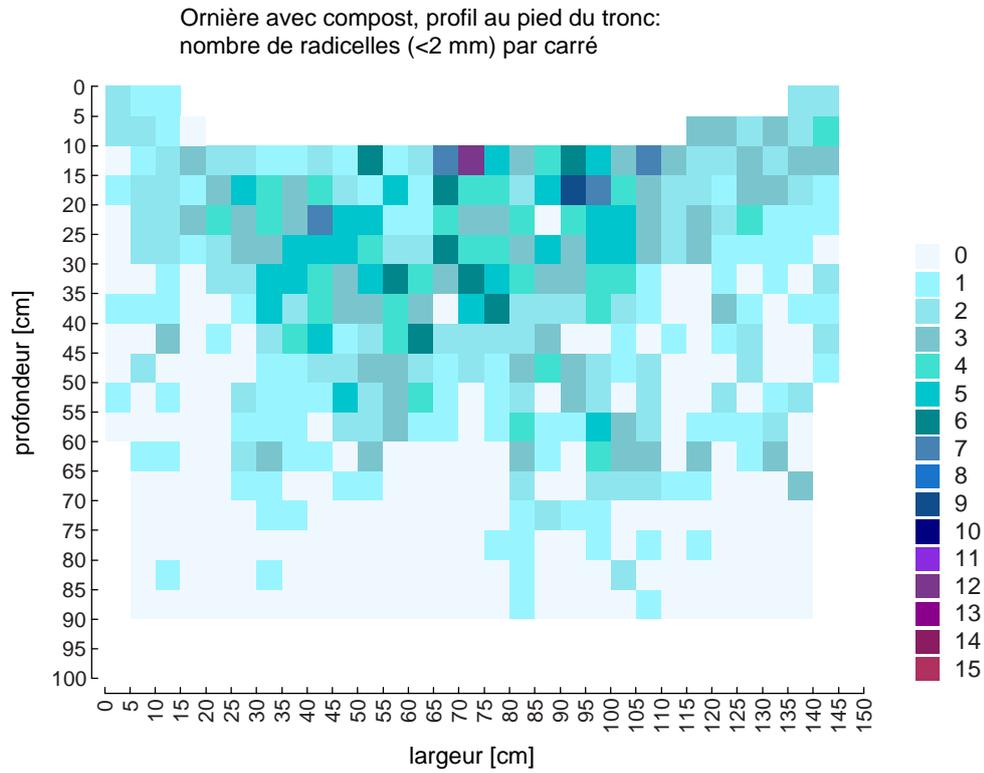
L'aulne glutineux permet de soutenir la régénération des fonctions de l'espace racinaire après une contrainte mécanique

**Fig. 53** > Croissance en hauteur des aulnes glutineux sur la parcelle de Messen-Brunenthal, canton de Soleure (2003–2010)



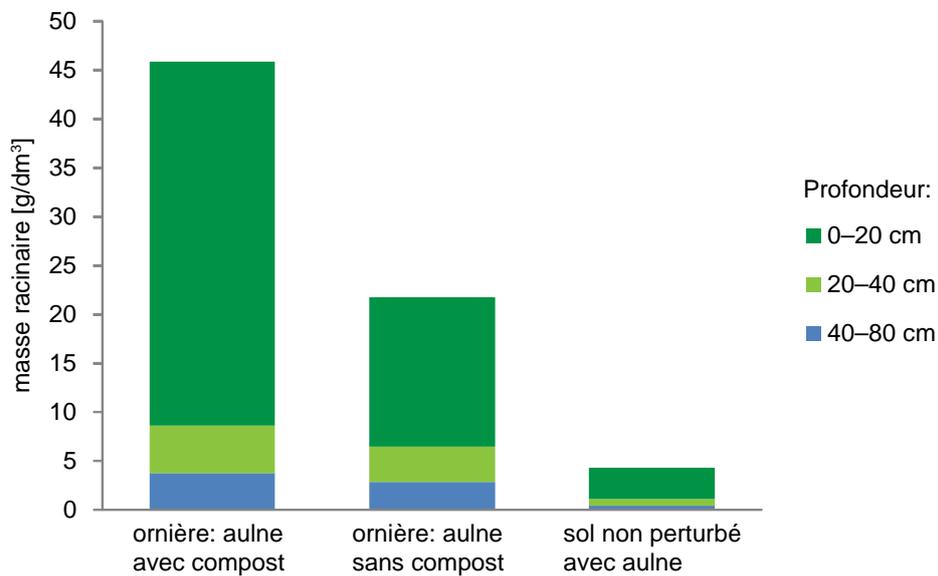
Pour une analyse plus précise de l'intensité d'enracinement et des propriétés du sol, des profils ont été creusés en travers des ornières à différentes distances des arbres. L'intensité de l'enracinement a été évaluée sur la base de décomptes et de collectes de racines effectués sur ces profils. Les racines des arbres plantés dans les ornières ont réussi à pénétrer jusqu'à plus de 80 cm de profondeur dans les zones de sol compactées. Mais la plus grande partie de la masse racinaire s'est formée dans la couche supérieure du sol, jusqu'à environ 20 cm de profondeur (fig. 54 et 55). Les zones situées entre 20 et 40 cm et plus bas comportaient moins d'un tiers de la masse racinaire.

**Fig. 54** > Exemple de répartition des racines dans les ornières avec aulnes et compost dans un profil creusé directement au pied du tronc sur la parcelle de Messen-Brunenthal, canton de Soleure



**Fig. 55** > Masse racinaire des racines d'aulnes à différentes profondeurs (poids sec par dm<sup>3</sup> de sol) sur la parcelle de Messen-Brunenthal, canton de Soleure

Relevés effectués dans une zone de 60 cm autour de la base des troncs.



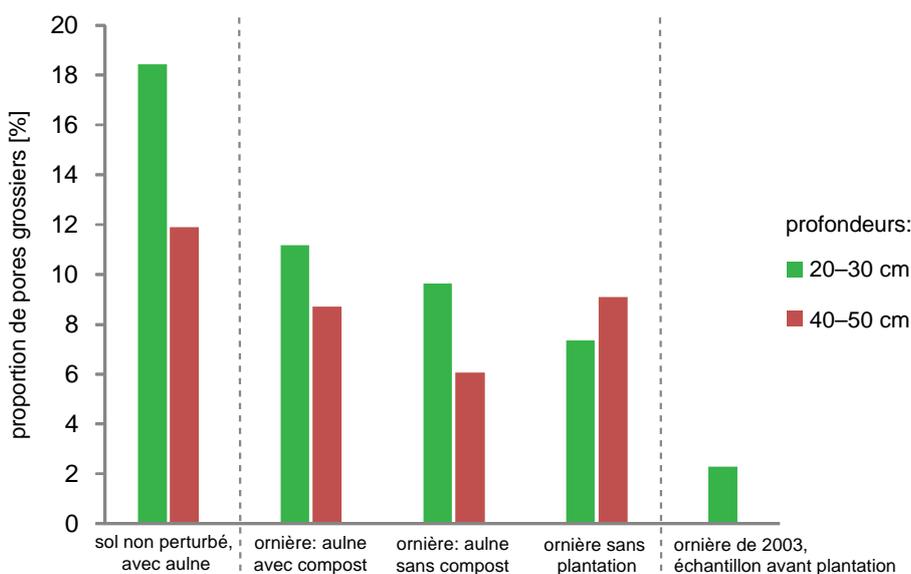
Entre les aulnes plantés avec compost et ceux plantés sans compost, une différence importante a été observée au niveau de la croissance des racines. Dans le premier cas, la masse racinaire qui s'est développée dans la couche supérieure du sol était environ deux fois plus grande que dans le second (fig. 55).

Pour savoir si la bonne croissance des arbres et des racines a aussi un effet positif sur la régénération de la structure du sol, des échantillons de terre ont été prélevés à différentes profondeurs et soumis à des analyses de paramètres physiques. Entre 20 et 30 cm, l'espace poral a augmenté et provoqué une diminution nette des valeurs de la densité apparente par rapport à 2003 (1,72 g/cm<sup>3</sup>). Comparé aux ornières non plantées où la densité atteignait 1,63 g/cm<sup>3</sup> (diminution de 3,6 % par rapport à 2003), la plantation d'aulnes a permis d'obtenir une amélioration d'au moins 5 % par rapport à 2003 (1,57 g/cm<sup>3</sup>) sans compost, et de 15 % (1,45 g/cm<sup>3</sup>) avec compost. Une tendance similaire a été observée à la profondeur de 30 à 40 cm, mais les différences entre les traitements étaient ici nettement moins marquées.

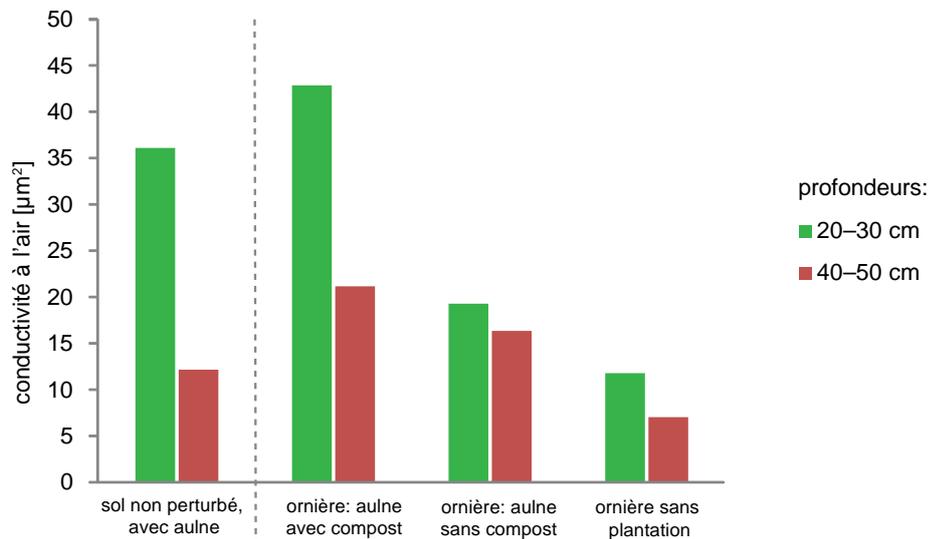
L'enracinement a aussi eu une influence positive sur la macroporosité à la profondeur de 20 à 30 cm (fig. 56). Les valeurs mesurées dans les ornières traitées se distinguent clairement de celles des ornières non plantées, même si elles n'ont pas encore atteint le niveau de la surface de référence non perturbée. Par rapport à 2003, la proportion de pores grossiers a fortement augmenté aussi bien dans les ornières plantées que dans celles non traitées.

**Fig. 56** > Macroporosité aux profondeurs de 20–30 cm et de 40–50 cm dans les différents traitements de la surface de Messen-Brunenthal, canton de Soleure

*La colonne verte tout à droite indique la macroporosité à 20–30 cm de profondeur peu après les travaux de déblaiement en 2003.*



**Fig. 57 > Conductivité à l'air aux profondeurs de 20–30 cm et 40–50 cm dans les différents traitements de la surface de Messen-Brunenthal, canton de Soleure**



Parallèlement à la régénération de l'espace poral, l'aération du sol, qui dépend principalement du nombre de pores et de leur continuité, s'est aussi rétablie (fig. 57). La conductivité à l'air aux profondeurs étudiées était plus élevée dans les ornières plantées que dans celles non traitées. C'est dans les ornières avec compost que l'augmentation a été la plus marquée, puisqu'elle a même atteint le niveau du sol non perturbé. La régénération de l'espace poral n'a pas seulement influencé la conductivité à l'air, mais aussi la conductivité hydraulique. Ainsi, des essais d'arrosage ont montré que la plantation avait permis de normaliser la conductivité hydraulique (non reproduite sur la figure). Cette normalisation signifie une diminution de l'engorgement et un meilleur approvisionnement en oxygène du sol, et donc des conditions plus favorables au développement d'une pédofaune et d'une pédoflore saines.

Ces essais montrent clairement que la plantation d'aulnes glutineux dans des ornières compactées peut avoir un effet très favorable sur la régénération de la structure du sol. Après sept ans de croissance des arbres, les propriétés physiques du sol étaient en grande partie restaurées jusqu'à 30 cm de profondeur. Dans les couches plus profondes, la régénération prend plus de temps. L'efficacité du compost a varié suivant la station. À Messen-Brunenthal (exemple présenté ici), station relativement humide possédant une forme d'humus très active assurant une transformation rapide de la matière organique, le compost a eu un effet stimulant. Tandis qu'à Habsbourg, station plus sèche où la forme d'humus est moins active, le compost n'a guère favorisé la régénération. De par ses propriétés d'arbre pionnier et de plante des milieux humides, l'aulne glutineux est une essence qui convient bien aux mesures de régénération de sols compactés (Meyer et al. 2014). Mais elle a besoin de beaucoup de lumière et dans les forêts fermées, elle devrait donc être remplacée par d'autres essences, comme la bourdaine par exemple.

La plantation d'aulnes glutineux dans les ornières a permis de restaurer en grande partie la conductivité à l'air et à l'eau jusqu'à 30 cm de profondeur en l'espace de 7 ans

## 6 > Mise en pratique de la protection des sols contre les atteintes physiques

---

Pour pouvoir être mise en pratique, la protection des sols contre les atteintes physiques doit être intégrée dans la gestion de l'exploitation des forêts. Il s'agit alors de définir les processus importants pour la protection des sols, de les intégrer dans ceux de l'exploitation du bois relevant de l'entreprise et des autorités, et d'en tenir compte dans les décisions pratiques. Pour garantir une mise en œuvre efficace et efficiente, il convient de clarifier notamment les questions suivantes:

**Les mesures de protection des sols contre les atteintes physiques doivent être intégrées dans les processus d'exploitation des forêts**

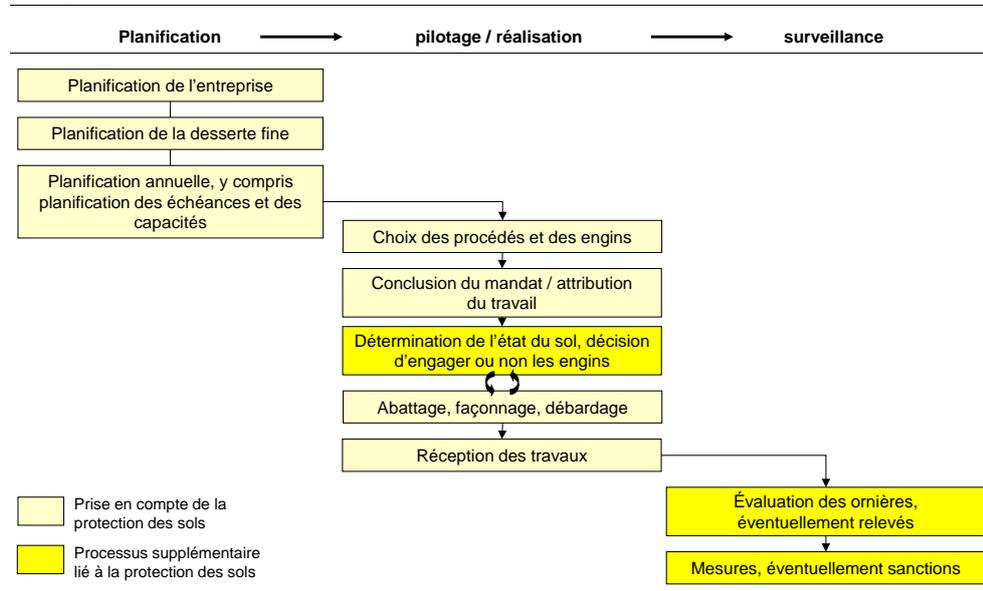
- > Quelles sont les tâches liées à la protection des sols? Comment les responsabilités sont-elles réparties?
- > Comment ces tâches peuvent-elles être réalisées du point de vue organisationnel et technique?
- > Quels sont les coûts induits par ces mesures?
- > Comment formuler et appliquer un critère de qualité pour la protection des sols?

Une bonne gestion de ces tâches est une condition importante pour garantir la compétitivité de l'exploitation des forêts tout en préservant les sols.

### 6.1 Planification et pilotage

La mise en œuvre des prescriptions relatives à la protection des sols au niveau de l'entreprise forestière implique d'une part que les tâches et responsabilités soient clairement définies et délimitées au préalable et, d'autre part, que ces tâches soient intégrées dans les processus de la récolte du bois et de la surveillance cantonale de l'exploitation des forêts (fig. 58). Les aspects liés à la protection des sols sont importants et doivent être pris en considération pendant pratiquement toute la procédure. L'intégration de la protection des sols contre les atteintes physiques à tous les stades de la planification, du pilotage et du contrôle de l'exploitation du bois (donc dans la préparation des travaux) est le propre d'une entreprise forestière durable et professionnelle.

**Fig. 58 > Intégration de la protection des sols dans les processus de l'exploitation du bois relevant de l'entreprise et des autorités**



Spjevak et Thees 2009a

### Planification d'entreprise

Tous les investissements et toutes les mesures structurelles en lien avec la protection physique des sols doivent être pris en considération. Les investissements peuvent comprendre la réalisation d'une carte de la sensibilité des sols au passage d'engins, l'achat d'instruments de mesure de l'humidité du sol ou encore l'acquisition d'équipements spéciaux tels que semi-chenilles ou treuil auxiliaire de traction. Les mesures possibles se réfèrent à la mise en place de nouveaux processus, comme l'évaluation de l'état du sol pour la décision d'engager ou non les engins ou d'interrompre les travaux.

### Planification de la desserte fine

Une bonne planification de la desserte fine joue un rôle important pour la protection des sols, car elle permet de réduire au minimum la proportion de surface forestière empruntée par les engins et de circonscrire le risque de dégâts aux lignes de la desserte (cf. 6.2.3).

### Planification annuelle, y compris planification des échéances et des capacités

Cette étape consiste à planifier les coupes de bois de la saison à venir et d'autres objectifs concrets de même que les mesures permettant de les atteindre, comme la formation à la protection physique des sols des collaborateurs participant à la récolte des bois. La planification des échéances et des capacités doit tenir compte de la sensibilité du sol à la compaction: en règle générale, les coupes de bois sur les sols les plus sensibles doivent être réalisées lorsque les conditions sont favorables, par exemple en période de gel et par temps sec. Il est éventuellement possible de travailler en deux équipes. Les coupes sur sols moins sensibles à la compaction permettent une plus grande flexibilité. Dans la mesure du possible, il faut prévoir des surfaces de réserve dans la planification des échéances. Pour la planification des capacités, il faut tenir compte des équipements spéciaux pour la protection des sols.

**Choix des procédés et des engins**

Le choix des engins et des procédés doit se faire en fonction de la sensibilité à la compaction et être fixé le cas échéant dans les appels d'offres et les accords (cf. 6.2.6).

**Conclusion du mandat/attribution du travail**

La protection des sols doit être réglée de façon contraignante dans les contrats avec les entrepreneurs forestiers et dans l'attribution du travail. Il faut en particulier fixer la qualité attendue des travaux effectués et s'entendre sur la réception des travaux. Une exigence minimale est de laisser circuler les engins uniquement sur les layons de débardage. On peut aussi prévoir une surface maximale tolérable pour les ornières de type 3 et/ou imposer l'utilisation de certains types d'engins et de procédés (6.2.6 et 6.4.1).

Rappelons que l'autorisation cantonale d'abattage est une condition préalable pour pouvoir conclure le contrat et attribuer le mandat de travail. Le canton peut assortir le permis d'exigences concernant la protection physique des sols.

**Détermination de l'état du sol, décision d'engager ou non les engins**

L'état actuel du sol doit être déterminé avant et pendant les travaux pour s'assurer que les engins peuvent circuler sans causer de dégâts aux sols (cf. 6.4.2).

**Abattage, façonnage, débardage**

Les normes fixées dans le contrat doivent être respectées pendant l'exécution des travaux. Pour maintenir les layons en bon état de praticabilité, notamment en cas de pluie, l'état actuel du sol doit aussi être relevé et évalué au cours des travaux. Si nécessaire, ces derniers seront interrompus.

**Réception des travaux**

En Suisse, la réception des travaux est en principe effectuée par le chef d'exploitation. En plus des critères habituels (p.ex. dégâts aux peuplements), il faut aussi s'assurer que les normes de qualité pour la protection des sols ont été respectées. En cas d'exécution incorrecte des travaux, le chef d'exploitation peut prendre des mesures, surtout si celles-ci s'appuient sur des contrats et des accords (cf. 6.4.5).

**Appréciation des ornières**

Parallèlement à la surveillance au niveau de l'entreprise, des contrôles doivent être opérés par les autorités. Le canton peut procéder à des contrôles par sondages ou selon certains critères déterminés ou encore effectuer un contrôle intégral. Ces contrôles sont à exécuter conformément aux conditions fixées le cas échéant dans le permis d'abattage.

Après avoir déterminé quelles sont les tâches occasionnées par la protection des sols pendant la récolte des bois ainsi que l'endroit où elles devront être prises en considération ou accomplies, il faut définir les responsables de leur exécution. Le tableau 9 permet de constater d'une part que la protection physique des sols fait intervenir de nombreux acteurs, d'autre part que le chef d'exploitation joue un rôle déterminant.

### **Propriétaire forestier**

C'est lui qui assume la responsabilité légale de la protection des sols en forêt. En outre, il est dans son intérêt économique que la fertilité du sol soit conservée durablement.

### **Chef d'exploitation**

En général, la gestion des forêts publiques est assurée par une exploitation forestière. Dans la phase de planification, le chef d'exploitation est à peu près le seul responsable de la protection des sols, alors que dans la phase d'exécution, il travaille en collaboration avec les acteurs concernés par les différents processus. Il est également responsable du contrôle final des travaux de récolte du point de vue de la protection des sols.

### **Entrepreneur forestier**

Lorsqu'un entrepreneur forestier est mandaté pour la récolte du bois, il est responsable de l'exécution des travaux dans le respect des dispositions légales et du cahier des charges contractuel relatif à la protection des sols. Les entrepreneurs forestiers sont les principaux artisans de la mécanisation de la récolte du bois et ils assument ainsi une responsabilité particulière dans la protection des sols à travers le choix des méthodes de récolte et des engins.

### **Conducteur d'engins**

Le conducteur d'engins d'une exploitation forestière ou d'un entrepreneur forestier est directement responsable de la qualité du travail. Il est important que pendant les travaux, il observe la formation des ornières et qu'en cas d'apparition d'ornières de type 3, il interrompe son activité et contacte la personne désignée au préalable.

### **Service forestier**

Le service forestier cantonal veille à faire respecter les dispositions liées à la protection des sols dans le cadre de ses fonctions de surveillance et de ses activités de conseil et de formation continue pour les propriétaires forestiers et les exploitations forestières.

### **Service de la protection des sols**

Le service cantonal de la protection des sols est l'organe chargé de faire respecter les dispositions légales. Il sert d'interlocuteur pour les questions s'y rapportant. Ces tâches peuvent aussi être déléguées au service forestier.

Pour que tous les acteurs puissent assumer leurs responsabilités, il est indispensable que leurs tâches soient clairement définies et délimitées. Ils doivent en outre être sensibilisés à la protection des sols et recevoir une formation adaptée à leurs tâches.

Pour que la protection physique des sols puisse être mise en œuvre avec succès, tous les acteurs de la gestion des forêts doivent connaître et assumer leurs responsabilités

**Tab. 9 > Acteurs de la récolte du bois en Suisse et répartition des responsabilités dans le domaine de la protection des sols contre les atteintes physiques**

Phases	Tâches	Acteurs					
		Propriétaire forestier	Chef d'exploitation	Entrepreneur forestier	Conducteur d'engins	Service forestier <sup>2</sup>	Service de la protection des sols
Planification	Planification d'entreprise	X	X			X	
	Planification des dessertes de détail		X				
	Planification annuelle	X	X			X	
	Planification des échéances et des capacités		X				
Pilotage et exécution	Choix des procédés et des engins		X	X			
	Attribution du travail		X	X			
	Détermination de l'état du sol <sup>3</sup>		X		X		
	Réception des travaux		X	X	X		
Surveillance au niveau de l'entreprise	Appréciation des omières		X				
	Choix des mesures à prendre		X				
Surveillance au niveau du canton <sup>4</sup>	Contrôles					(X) <sup>5</sup>	X
	Choix des mesures à prendre					(X) <sup>5</sup>	X

<sup>1</sup> Le propriétaire forestier peut, dans certains cas, reprendre les tâches incombant au chef d'exploitation. C'est la raison pour laquelle la ligne séparant les colonnes propriétaire forestier et chef d'exploitation a été représentée avec des pointillés.

<sup>2</sup> Le chef d'exploitation reprend souvent certaines tâches incombant au service forestier (garde forestier de triage). Il effectue dans ce cas celles spécifiées dans la colonne service forestier.

<sup>3</sup> S'agissant de la détermination de l'état du sol, la décision d'engager ou non les engins est prise avant chaque intervention.

<sup>4</sup> Le respect des dispositions légales concernant la protection des sols doit être examiné dans le cadre de la surveillance au niveau du canton.

<sup>5</sup> La surveillance de l'utilisation du sol conforme aux exigences légales peut également être déléguée au service forestier.

Source: adapté d'après Spjevak et Thees 2009a

## 6.2 Principes de base et conditions requises au niveau de l'entreprise

### 6.2.1 Formation et sensibilisation des acteurs

Les activités de formation et sensibilisation des acteurs de la gestion des forêts proposées dans le cadre du projet «Protection physique des sols» ont joué un rôle essentiel dans la mise en œuvre de la protection des sols. Le programme de formation comportait notamment les objectifs suivants:

- > sensibilisation à la protection des sols;
- > connaissances de la structure et des propriétés du sol ainsi que des processus intervenant dans le sol lors du passage d'engins;
- > connaissances des mesures techniques et organisationnelles en rapport avec la protection des sols.

Cette formation visait à sensibiliser les participants à la protection des sols contre les atteintes physiques. Chaque année, jusqu'à dix cours de formation continue ont ainsi été organisés parallèlement à l'élaboration des bases spécifiques. Les groupes cibles étaient constitués des principaux acteurs de la protection physique des sols forestiers: chefs d'exploitation, entrepreneurs forestiers, conducteurs d'engins, représentants des

autorités et administrations forestières, représentants des services de la protection des sols et des associations environnementales, responsables de la certification, ou encore responsables politiques de la forêt. Ce thème a aussi été intégré aux programmes des centres forestiers de formation de Lyss et de Maienfeld ainsi qu'à la Haute école spécialisée HAFL à Zollikofen.

Certaines années, les formations ont été proposées à des groupes cibles prioritaires, comme les représentants des services cantonaux de la protection des sols (2006), les responsables de la formation dans les cantons (2007) ou encore les enseignants des écoles professionnelles (2008). Parallèlement, des cours ont aussi été organisés à l'intention de catégories de participants spécifiques, comme les conducteurs d'engins dans de grandes entreprises forestières (2009).

Une formule qui a fait ses preuves consiste à réunir dans un même cours des participants de différents groupes cibles, car cela permet de mieux comprendre les problèmes des autres et de désamorcer les conflits potentiels. Les représentants des acteurs de la gestion forestière sont systématiquement invités à défendre leurs positions, ce qui donne souvent lieu à des discussions animées et fructueuses.

**La formation regroupée des différents acteurs favorise la compréhension mutuelle et permet de désamorcer les conflits**

Entre 2001 et 2014, quelque 1900 personnes ont participé à 75 journées de cours consacrés aux problèmes de la protection des sols contre les atteintes physiques lors de la récolte des bois et aux possibilités de les résoudre (annexe A9).

La thématique «Protection physique des sols en forêt» a également été présentée à d'autres occasions aux milieux intéressés, notamment lors des manifestations suivantes:

- > stand d'information aux journées thématiques KWF 2010 à Dierdorf (Rhénanie-Palatinat);
- > visite de terrain sur le thème amphibiens et ornières avec des représentants du KARCH et de l'OFEV sur la parcelle d'essais de Messen-Junkholz (2010)
- > stand d'information dans le cadre de l'exposition spéciale présentée à la Foire forestière de Lucerne (2011).

### **Contenu et forme des cours sur la protection des sols**

Les cours sur la protection des sols contre les atteintes physiques en forêt durent en général une journée et comprennent deux grands volets consacrés aux questions et aspects a) pédologiques et b) techniques et économiques:

#### **a) Connaissances de base sur le sol forestier**

- > Comment se présente la structure naturelle du sol?
- > Quelles sont les principales fonctions du sol?
- > Quelles caractéristiques du sol sont importantes par rapport à la compaction?
- > Quelles sont les conséquences de la compaction sur les principales fonctions du sol?
- > Quels sont les signes de la compaction?

#### b) Mesures possibles pour protéger le sol

- > lors de la planification (desserte fine, organisation des coupes de bois);
- > lors de l'exécution des travaux (engagement des engins);
- > au niveau technique (configuration et équipement des engins);
- > coûts des mesures de protection des sols contre les atteintes physiques;
- > réflexions sur le contrôle qualité.

Le cours débute par une courte introduction sur la problématique de la protection du sol en forêt. Puis, dans un espace aménagé sous forme d'«exposition» avec du matériel de présentation, des modèles et des photos, les participants reçoivent des explications sur les principales caractéristiques et fonctions du sol forestier telles que formes d'humus, le sol en tant que milieu naturel, les pores comme réservoir d'eau et espace d'infiltration, ou encore les signes d'hydromorphie (fig. 59). Ces divers éléments sont ensuite examinés au moyen d'un profil creusé dans un sol de référence non perturbé.

Les caractéristiques des types d'ornières 1, 2 et 3 sont expliquées en théorie et en pratique grâce à des profils pédologiques creusés dans des ornières.

Fig. 59 > Séquence de formation d'un cours donné dans le canton d'Argovie



Photo: division des forêts du canton d'Argovie

Le deuxième volet principal porte sur les mesures de protection du sol. Au début, cette partie était en général encore enseignée dans une salle, mais avec le temps nous avons commencé à présenter la matière sur des panneaux installés dans différents postes en forêt. La forêt offre un environnement réaliste et proche de la pratique, et le déplacement d'un site à l'autre permet chaque fois de concentrer l'attention des participants sur la nouvelle thématique. S'ils sont plus de vingt, les participants sont répartis en deux groupes et les deux volets principaux sont traités parallèlement.

Pour les exercices pratiques, les participants sont répartis en groupes chargés d'évaluer différents sols sous l'angle de leur sensibilité à la compaction. Les résultats sont ensuite rassemblés puis discutés en commun. Le cours s'achève par une synthèse de la matière traitée pendant la journée ce qui donne aux participants l'occasion de discuter des possibilités et des limites de la mise en pratique de ce qu'ils ont vu et entendu. La présentation des arguments des différents acteurs peut déboucher sur des discussions instructives.

En 2010, une forme particulière de cours a été développée pour la formation continue de l'ensemble du personnel forestier du canton d'Argovie (environ 400 participants) dans la forêt domaniale de Habsbourg. Le contenu était enseigné dans quatre postes animés chacun par un ou deux responsables et portant sur les thématiques suivantes:

- > sols et types d'ornières;
- > technique des engins et mesures organisationnelles;
- > desserte fine;
- > réflexions sur les coûts et les avantages de la protection des sols et sur les responsabilités.

Cette formule permet de former jusqu'à 80 personnes par journée de cours. Les participants sont répartis en groupes de 20 personnes au maximum et passent successivement par les quatre postes. À chaque changement, une pause est prévue en un lieu central. La préparation de ces cours demande certes beaucoup de travail, mais elle permet de former un grand nombre de personnes en peu de temps. Ce système a fait ses preuves et c'est ainsi qu'en 2011, un cours du même type a été organisé pour le service forestier du canton de Lucerne, et un autre en 2013 pour le canton de Soleure. Un troisième est prévu en 2015 dans le canton de Bâle-Campagne.

Depuis 2009, la Notice n° 45 du WSL «Protection physique des sols en forêt» (Lüscher et al. 2009a) élaborée dans le cadre de ce projet constitue la documentation de base des cours. Elle est disponible en français et en allemand et a également été traduite en italien pour une série d'articles de la revue *Sherwood*. Suivant les besoins, elle est complétée par d'autres documents consacrés au sol et aux mesures de protection des sols.

Dans la mesure du possible, les cours sur la protection des sols sont organisés dans l'une des trois parcelles d'essai du Plateau ou dans l'une des douze parcelles de formation aménagées dans différents cantons (annexe A8). Tous ces sites sont équipés d'une infrastructure appropriée, et toutes les données importantes sur le sol et la station de même que des informations sur l'exploitation passée et sur la desserte fine sont disponibles pour chacun d'eux.

La plupart des cours se sont naturellement déroulés dans les cantons rattachés pour l'essentiel aux régions forestières du Plateau et du Jura. Selon l'inventaire forestier national (Brändli 2010), la proportion de surface forestière praticable par les véhicules établie sur la base de la déclivité s'élève à 90 % sur le Plateau et à 74 % dans le Jura, contre 49 % dans les Préalpes, 31 % dans les Alpes et 24 % au sud des Alpes. Sur la base du seul critère de la déclivité, près de la moitié de l'aire forestière des Préalpes serait théoriquement accessible aux véhicules. Mais en pratique cette proportion se

révèle nettement plus faible, les sols des régions forestières préalpines se trouvent en grande partie sur du flysch et ne sont bien souvent que partiellement praticables. Le faible nombre de cours organisés dans ces régions n'est donc pas dû à un manque d'intérêt des exploitants locaux, mais au fait qu'en raison de leur portance limitée, les sols forestiers sur lesquels peuvent circuler les véhicules sont peu nombreux. Dans les régions forestières des Alpes et du sud des Alpes accessibles aux véhicules, les sols présentent généralement une pierrosité plus élevée, ce qui pose moins de problèmes de praticabilité.

Les réactions de la grande majorité des personnes ayant déjà participé aux cours permettent de conclure que la sensibilisation à la thématique de la protection des sols en forêt a été un succès. Les cours attirent beaucoup de monde et la demande se maintient même sans publicité de notre part. Les discussions lors des séances de formation montrent clairement que les participants reconnaissent l'importance de la protection des sols contre les atteintes physiques et qu'ils sont désireux de transmettre aux générations futures des sols les mieux préservés possible. Mais on constate aussi qu'il reste toute une série de questions à résoudre, comme celle des coûts occasionnés par les mesures de protection des sols.

**Le secteur forestier manifeste beaucoup d'intérêt pour la question de la protection des sols**

## 6.2.2 Évaluation de la sensibilité du sol à la compaction

L'évaluation de la sensibilité du sol au passage de véhicules, et donc au risque de compaction, constitue une base importante pour planifier la protection préventive du sol en forêt. Cette sensibilité est déduite ou estimée à partir de certaines propriétés du sol, à savoir la pierrosité, la texture (granulométrie), la structure, l'hydromorphie et la teneur en matière organique (cf. 3.3). Ces données peuvent être obtenues notamment à l'aide des instruments suivants :

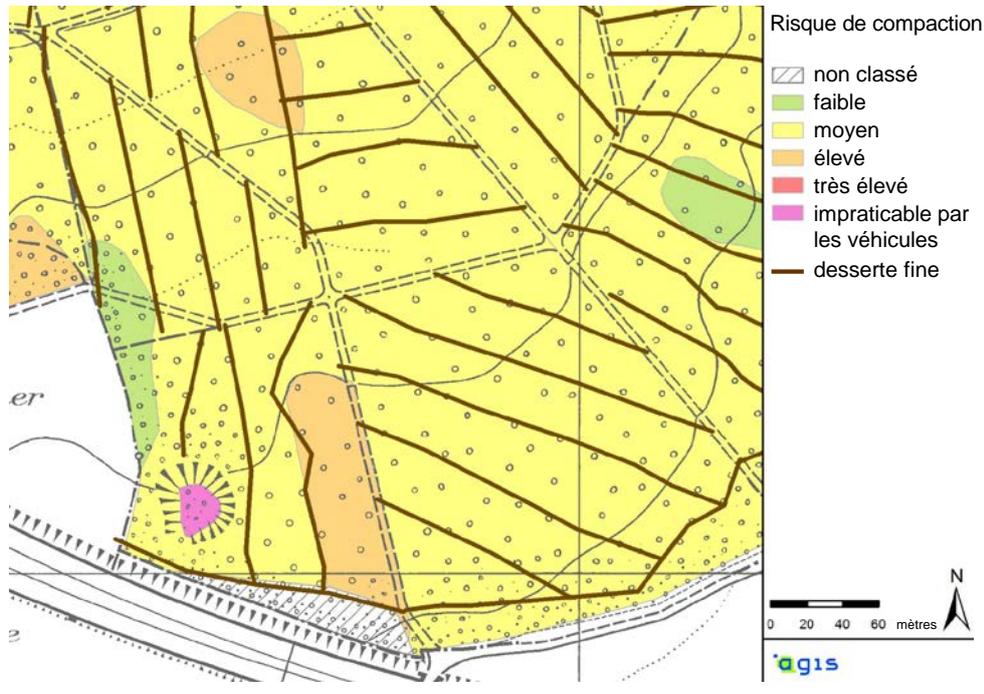
- > la carte des sols à l'échelle 1:5000 (p. ex. canton de SO);
- > la carte des stations forestières à l'échelle 1:5000 complétée par des données pédologiques tirées de profils de référence et des informations fournies par la carte des sols au 1:25 000 (p. ex. canton d'AG).

La sensibilité du sol au passage de véhicules et donc le risque de compaction donnent des informations sur la portance potentielle d'un sol, indépendamment de son état actuel d'humidité et des engins utilisés (cf. 6.4.2). Les cartes correspondantes permettent par exemple de voir les endroits où le sol, de par ses propriétés (p. ex. pierrosité), est en principe adapté à l'utilisation d'engins, ou de déterminer les zones où le terrain sera déjà impraticable après quelques chutes de pluie en raison de la granulométrie et de la perméabilité du sol. Ce genre de carte est utile pour planifier la desserte fine (cf. 6.2.3 et 6.2.4) et délimiter des surfaces de réserve lors de la planification de la récolte du bois. Quelques cantons disposent déjà d'une carte de la sensibilité des sols à la compaction (fig. 60).

**Évaluation de la sensibilité à la compaction à partir des cartes des sols et des cartes des stations forestières**

L'état actuel du sol (cf. 6.4.2) joue quant à lui un rôle déterminant lors de la récolte du bois. Associé à des mesures de l'humidité du sol (force de succion/teneur en eau), il sert à évaluer l'état actuel d'humidité du terrain et donc à prendre la décision d'engager ou non les engins forestiers.

**Fig. 60** > Détail d'une carte du risque de compaction avec desserte fine adaptée en conséquence du canton d'Argovie. Données cartographiques: AGIS



La réalisation de ces cartes demande beaucoup de travail, et la qualité dépend des bases de données disponibles. S'il n'a pas de cartes ni d'informations de base, l'exploitant peut déterminer lui-même la sensibilité du sol à la compaction. Ce genre de relevé – à l'instar de la planification de la desserte fine – ne doit être effectué «qu'une fois», car les propriétés déterminantes ne changent pas, ce qui relativise le travail nécessaire.

Une méthode simple consiste à effectuer des relevés ponctuels de la sensibilité du sol à la compaction le long des layons de débardage en prélevant un petit profil de sol avec une bêche (la largeur et la profondeur d'une bêche suffisent). Cet échantillon sert à évaluer la teneur en pierres et en gravier (cf. 3.3.1), à déterminer la texture (cf. 3.3.2) par test tactile (annexe A5), à repérer les signes d'hydromorphie (cf. 3.3.5) et à estimer la teneur en matière organique (cf. 3.3.6) (annexe A3). Ces quatre propriétés pédologiques sont évaluées par rapport à leur influence sur la sensibilité du sol au passage d'engins. Elles sont complétées par la détermination de la pente du terrain. Les informations obtenues permettent de savoir si les caractéristiques dominantes en un lieu donné sont positives, neutres ou négatives du point de vue de la sensibilité du sol à la compaction.

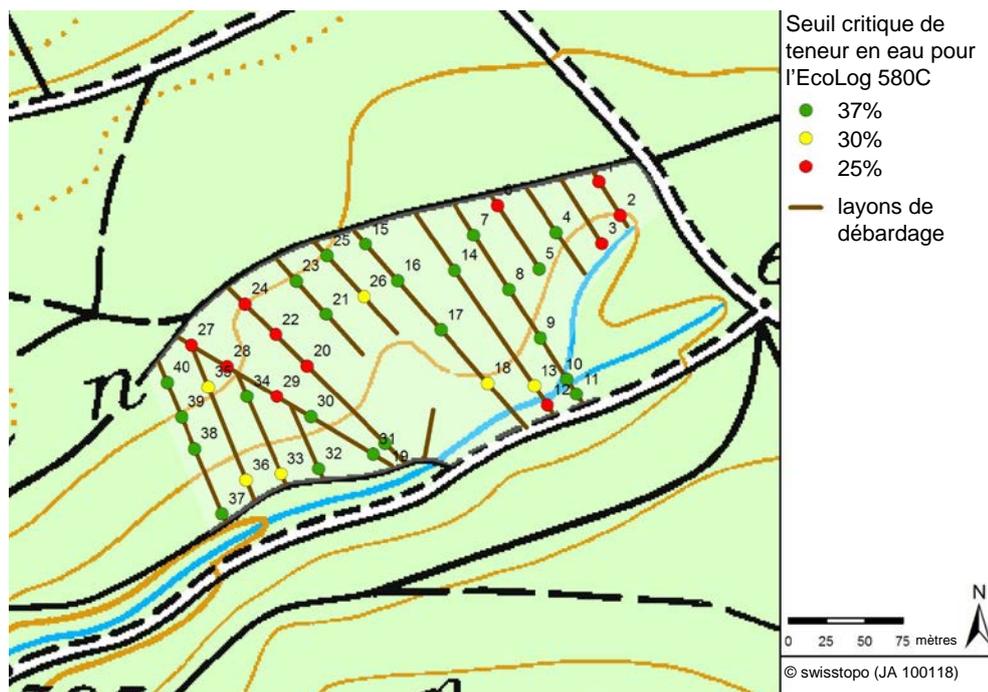
Le sol tel qu'il se présente dans l'échantillon du test à la bêche est le résultat des facteurs pédogénétiques (relief, roche-mère, organismes, forme d'exploitation, climat et durée) prédominants au niveau local. Si l'un de ces facteurs change, les propriétés du sol, et donc sa sensibilité, peuvent aussi être modifiées. Pour conserver une vue d'ensemble de la sensibilité du sol dans le secteur de la coupe, un test à la bêche est effectué chaque fois qu'un facteur pédogénétique change le long des layons. Sachant qu'en général, le climat, le temps et la roche-mère ne se modifient pas au sein d'un

layon de débardage, il suffit de se concentrer sur les modifications du relief (pente, replat, cuvette, etc.) et de la végétation. Quelques tests à la bêche le long des layons permettent d'obtenir une bonne vue d'ensemble de la sensibilité à la compaction dans le secteur d'une coupe et d'optimiser ainsi le déroulement de la récolte de bois en tenant compte des impératifs de la protection du sol.

Une variante demandant plus de travail consiste à déterminer à l'aide de ProFor, lors de chaque test à la bêche, le seuil critique de teneur en eau pour les engins prévus (cf. 6.2.7). Le seuil critique indique la teneur en eau jusqu'à laquelle les engins peuvent circuler sans provoquer de dégâts. La figure 61 présente un exemple de ce type de relevé.

**Fig. 61** > Teneur en eau sur les layons de débardage calculée avec ProFor pour une récolteuse EcoLog 580C

*Les chiffres indiquent les points de mesure. Les points rouges sont à considérer comme critiques aussi bien en raison du sol que de la disposition de la desserte fine.*



Cette méthode est facile à appliquer, mais elle implique un certain investissement en temps de travail pour les relevés. Il faut compter entre 45 minutes et une heure par hectare, selon la densité de la desserte fine et l'hétérogénéité du sol forestier.

### 6.2.3 Desserte fine: utilité et planification

#### Définition et signification de la desserte fine

La desserte fine aménagée dans les peuplements forestiers comprend les layons de débardage (lignes de desserte sans arbre), les pistes pour machines (chemins terrassés par des machines de chantier) et les lignes de câble-grue. La desserte fine permet aux engins d'accéder aux peuplements et d'évacuer le bois récolté. Elle constitue la base et la condition nécessaire pour récolter le bois de façon rationnelle tout en préservant le sol et les peuplements. L'aménagement de layons et leur utilisation systématique sur une longue durée permettent de limiter la circulation et les risques de dégâts à une surface réduite et clairement délimitée. Par conséquent, la desserte fine revêt une importance essentielle dans la protection des sols contre les atteintes physiques. Le présent chapitre ne traite que de la desserte fine avec des layons aménagés en terrain carrossable, car c'est surtout ce type de desserte qui peut entraîner des conflits avec la protection des sols. Dans les terrains exploités au câble-grue, le débardage d'arbres entiers peut aussi provoquer l'apparition de traces de frottement sous le câble porteur qui, suivant l'humidité du sol et la configuration du terrain, risquent de se transformer en ravines.

La planification de la desserte fine incombe au propriétaire forestier. Dans les forêts publiques, elle est généralement réalisée par le chef de l'exploitation forestière. Dans les forêts privées, le garde-forestier exerce une activité de conseil. Lorsque les forêts privées sont majoritairement constituées de parcelles relativement petites, la réalisation d'une desserte fine au-delà des limites de propriété nécessite souvent un travail de persuasion et de coordination.

#### Les principes de la planification de la desserte fine

Les principes de base de la planification de la desserte fine sont les suivants:

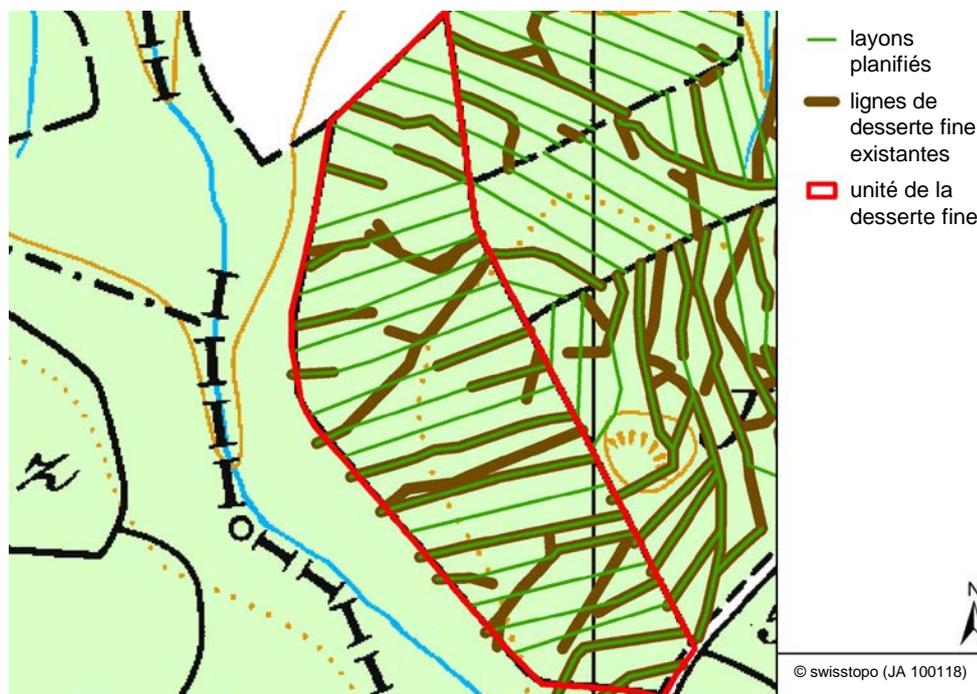
- > planifier à l'échelle des unités de desserte fine;
- > tenir compte de la sensibilité du sol à la compaction;
- > intégrer les layons de débardage existants;
- > inscrire dans un plan le réseau de layons prévu et le marquer sur le terrain;
- > le cas échéant associer les acteurs concernés au processus de planification;
- > fixer les distances entre les layons en fonction de la sensibilité du sol à la compaction;
- > tenir compte de la rentabilité de la récolte du bois.

Depuis quelques décennies, l'aménagement de dessertes fines s'est généralisé pour les coupes de bois effectuées dans les forêts publiques. Cependant, si ces dessertes sont réalisées séparément pour chaque coupe, elles risquent d'une part de ne pas être adaptées aux layons qui seront installés à proximité et d'autre part d'entraîner bien souvent la création de layons superflus. C'est pourquoi il est recommandé de les planifier pour l'ensemble de l'unité dans laquelle la coupe de bois est prévue. En général, les unités de desserte fine sont délimitées par des routes forestières, mais elles peuvent aussi l'être par des limites naturelles, comme des cours d'eau, des barres rocheuses, des crêtes, etc.

**Une bonne planification de la desserte fine permet de diminuer le risque de dégâts aux sols et de le circonscire à des lignes de desserte clairement délimitées**

**La desserte fine doit être planifiée pour l'ensemble de l'unité de desserte fine et non pour chaque coupe de bois**

Fig. 62 > Les layons existants doivent être intégrés le mieux possible dans la nouvelle planification afin de réduire au minimum la part de surface parcourue par les engins



Lors de la planification de la desserte fine, les layons doivent être inscrits dans un plan et marqués sur le terrain aux endroits stratégiques, afin qu'ils puissent être retrouvés de façon fiable. Seules les lignes qui doivent être utilisées pour la récolte des bois sont préparées.

La documentation cartographique du réseau de layons permet de garantir que les informations relatives à la desserte resteront durablement accessibles même en cas de changement de personnel ou d'organisation et d'assurer ainsi la continuité d'une exploitation forestière respectueuse du sol.

Le développement de la mécanisation a entraîné un transfert des travaux de récolte des entreprises forestières aux entrepreneurs forestiers. C'est pourquoi il peut se révéler utile dans certains cas liés à la planification de la desserte fine de faire appel aux services d'un «entrepreneur attitré» comme conseiller. Les cantons ont aussi la possibilité de proposer selon les besoins un conseil technique aux responsables de triages. Cette tâche pourrait être assurée par un garde-forestier ayant de l'expérience dans le domaine de la desserte fine. Ce service de conseil a déjà été mis en place de façon exemplaire par le canton d'Argovie, qui a créé au sein de la division cantonale des forêts un service chargé de la mise en œuvre de la protection des sols contre les atteintes physiques et de la planification de la desserte fine qui en découle.

La distance entre les layons et donc la densité du réseau de la desserte fine dépendent de nombreux facteurs, comme la configuration du terrain, la déclivité, la portance du sol, les procédés de récolte, les modes de sylviculture, etc. En terrain carrossable, la portance et donc la praticabilité jouent un rôle déterminant.

**Les lignes de desserte fine planifiées doivent être inscrites sur des cartes et signalées le cas échéant sur le terrain**

**Tab. 10 > Proposition de distances entre les layons en fonction de la sensibilité du sol à la compaction**

*Proposition basée sur la directive de l'administration forestière du Bade-Wurtemberg (ForstBW 2003) adaptée aux conditions suisses.*

Propriétés du sol et type de sol	Sensibilité à la compaction	Distance entre les layons
Sols extrêmement perméables et pierreux tels que ranker, rendzine, régosol	faible	20 m ou plus
Sols normalement perméables tels que sols bruns, sols bruns lessivés	moyenne zones sensibles et peu sensibles disséminées sur toute la surface	20 à 40 m ou plus
Sols hydromorphes tels que gleys, pseudogleys	élevée	40 m ou plus
Sols saturés d'eau en surface	non praticables	pas de layons

La rentabilité des processus de récolte dépend dans une large mesure des méthodes de travail choisies et par conséquent de la distance entre les layons:

- > Le façonnage entièrement mécanisé est la technique qui apporte le plus d'avantages en termes de coûts par rapport aux méthodes de travail partiellement mécanisées ou recourant à des engins manuels, en particulier pour les résineux aux stades de développement allant du perchis à la moyenne futaie. Si la distance entre les layons est supérieure à 20 m, cet avantage de coût diminue avec l'augmentation de l'espace-ment.
- > Dans les vieilles futaies, les avantages en termes de coûts de la récolte entièrement mécanisée sont plus faibles. La réduction de l'espacement entre les layons n'apporte pas d'avantage significatif, de sorte qu'il est souvent possible de n'utiliser qu'un layon sur deux. En raison de la longueur des arbres, le pré-débardage jusqu'aux layons n'est généralement pas nécessaire.
- > Pour des raisons de coûts, les systèmes de récolte entièrement mécanisés sont aussi de plus en plus souvent utilisés dans les terrains en pente. À partir d'une déclivité de 10 % environ, les layons devraient être aménagés si possible dans la ligne de pente. Les layons à plus forte pente présentent un certain risque d'érosion.

Pour prendre ces divers aspects, parfois contradictoires, en considération dans la planification de la desserte fine, il faut se rappeler que cette dernière est aménagée sur le long terme et qu'elle ne sera pas utilisée pour le peuplement tel qu'il se présente actuellement, mais aussi à tous ses futurs stades de développement, voire pour le peuplement qui lui succédera.

#### 6.2.4 Desserte fine: aménagement et utilisation

Suivant les interventions sylvicoles, les layons doivent être empruntés tous les 5 à 15 ans par des véhicules. Il est donc très important de les maintenir praticables. La notion de praticabilité technique doit être relativisée. Les engins de récolte actuels sont devenus si maniables qu'un layon peut être considéré comme techniquement praticable même s'il ne permet plus depuis longtemps une utilisation rationnelle ménageant les engins et l'environnement. Pour satisfaire à l'exigence d'une circulation respectueuse du sol forestier, le maintien de la praticabilité technique ne suffit pas. C'est non seule-

**Les layons doivent être ménagés par les véhicules**

ment parce que la loi l'exige, mais aussi et surtout dans l'intérêt de l'exploitant qu'il faut utiliser les layons de manière à ce qu'il ne résulte que des ornières de type 1 et 2 ou en veillant le cas échéant à ce que les ornières de type 3 restent très localisées et peu étendues. Les facteurs à prendre en compte sont la pierrosité, la texture, la structure et l'humidité du sol au moment du passage des véhicules, ainsi que la configuration technique des engins utilisés (masse, charge par roue, pneumatiques/chenilles, pression de gonflage des pneus, équipements complémentaires). Si les différentes possibilités techniques ne suffisent pas à empêcher l'apparition d'ornières de type 3 (cf. 6.3), les travaux doivent être interrompus.

Les layons présentant des ornières profondes sont souvent «restaurés» avec de petites pelles mécaniques. Cette mesure cosmétique permet certes d'éviter les critiques des visiteurs de la forêt, mais elle n'améliore pratiquement pas la portance des layons. Il faut parfois plusieurs dizaines d'années pour que la structure naturelle du sol se reforme. La régénération d'un sol, autrement dit le rétablissement de sa fertilité, peut être accélérée par des plantations ciblées (cf. 5.5). L'expérience actuelle ne permet pas encore de dire dans quelle mesure ces méthodes de régénération permettront d'améliorer la portance du sol pour les engins de récolte du bois, mais il ne faut cependant pas avoir d'attentes trop élevées.

La portance altérée du sol dans un layon ne peut être restaurée sans mesures bâties

En résumé, les mesures suivantes permettent de ménager le sol dans les layons:

> **Mesures de planification**

Les layons les plus rectilignes et les courbes à grand rayon limitent le risque de formation d'ornières sous l'effet des forces latérales de cisaillement.

> **Mesures organisationnelles**

Ne pas circuler sur les layons lorsque les sols sont trop humides (formation d'ornières de type 3). Pour ce genre de situation, il convient de prévoir des surfaces de réserve dans l'exploitation forestière voire à l'échelle de plusieurs exploitations. La prise en compte de la sensibilité des stations à la compaction lors du planning de la récolte permet de planifier les coupes de bois sur sols sensibles à une période probablement sèche. En revanche, il est difficile sur le Plateau suisse d'intégrer les sols gelés dans la planification des coupes, car la survenue des gels est très aléatoire.

> **Mesures techniques**

Dans les stations sur sols sensibles, il faut engager les engins les plus légers possible. Certaines mesures permettent en outre d'abaisser la pression dans les zones de contact: augmentation du nombre de roues, utilisation de pneus larges, réduction de la pression de gonflage, éventuellement pose de semi-chenilles. Si possible, aménager un tapis de branches.

> **Mesures bâties**

En principe, les layons de débardage sont des lignes de desserte non boisées aménagées sur le terrain sans aménagement bâti. Cependant, des améliorations simples et localisées peuvent se révéler utiles dans certains cas, pour franchir des ruisseaux (pose de tubes), pour consolider de petits tronçons humides avec du bois, pour décaiper des crêtes de talus, etc.

### 6.2.5 Normes de qualité pour la protection des sols

Les «normes» désignent d'une manière générale un document technique public développé par exemple par des associations professionnelles ou des entreprises, approuvé par la branche concernée et reconnu et utilisé de façon généralisée. Les normes définissent des règles, directives, activités ou résultats uniformisés et sont fixées pour des applications générales et répétées (Hartlieb et al. 2009). Sur le plan du contenu, ce terme s'applique notamment aux normes de sécurité, aux normes environnementales, aux normes de qualité et aux normes de produits.

Les normes représentent aussi une condition essentielle pour mettre en œuvre systématiquement la protection des sols contre les atteintes physiques. Elles revêtent un caractère contraignant, et définissent la qualité optimale du résultat du travail effectué et donc de l'état du sol après le passage des engins. Elles indiquent aux exécutants ce qu'il faut éviter de faire et les objectifs à atteindre lors des travaux forestiers. Elles peuvent en outre servir de base pour le contrôle des travaux. Les normes, ajoutées aux principes de précaution, de causalité et de coopération inscrits dans la loi sur la protection de l'environnement, permettent d'assurer le suivi des objectifs qualitatifs de la protection des sols.

Les normes de qualité pour la protection des sols en forêt sont théoriquement rattachées à celles plus étendues de la récolte du bois qui intègrent des aspects économiques, écologiques et sociaux. En Suisse, les normes de qualité pour la protection des sols lors de la récolte des bois sont encore à l'état d'ébauche. Les dispositions pertinentes des systèmes de certification forestière peuvent servir d'exemple.

Voici les avantages qu'apportent les normes de qualité:

- > concrétiser des dispositions légales formulées de façon très générale en matière de durabilité;
- > uniformiser l'application de ces dispositions, en particulier lorsqu'elles sont difficiles à contrôler, comme dans le cas de la circulation sur les sols forestiers;
- > renforcer l'image sociale d'une branche qui travaille dans et avec la nature en s'appuyant sur des moyens techniques;
- > améliorer la transparence et la loyauté dans la concurrence entre prestataires de services forestiers.

Les inconvénients éventuels peuvent être un renchérissement de la récolte, des charges supplémentaires pour les propriétaires et entrepreneurs forestiers et donc un handicap concurrentiel pour la production de bois. En outre, si les exigences fixées lors du processus de définition au niveau politique sont excessives et unilatérales, les normes risquent d'entrer en conflit avec une approche globale de la notion de durabilité, voire avec le droit de propriété.

À la question de la nécessité et de l'adéquation s'ajoute celle de la portée: faut-il élaborer une norme globale recouvrant l'ensemble ou une grande partie des aspects de la durabilité, autrement dit une recommandation générale pour la récolte du bois basée sur les «bonnes pratiques forestières», ou est-il préférable de se concentrer sur le seul aspect de la protection des sols? Il faut aussi déterminer si les normes doivent se limiter

Les normes de qualité peuvent faciliter la mise en œuvre de la protection des sols contre les atteintes physiques

aux exigences contenues dans la loi ou intégrer des exigences supplémentaires. Pour répondre à ces questions, une démarche coordonnée au niveau des associations en collaboration avec les milieux scientifiques devrait être envisagée.

Le type d'ornièrre 3 proposé dans la présente publication constitue une bonne base pour établir une norme sur la protection physique des sols lors de la récolte de bois. Il indique qu'un dégât écologique a été causé au sol ou va très probablement survenir.

Mais pour que le type d'ornièrre 3 puisse déboucher ultérieurement sur une norme, son opérationnalisation doit se poursuivre. Des descriptions supplémentaires sont nécessaires afin qu'il puisse être intégré dans une réglementation largement acceptée par les intéressés et qui soit contrôlable de façon objective et efficace. Il s'agit en premier lieu de fixer la proportion d'ornièrres de type 3 à partir de laquelle la norme ou la réglementation est considérée comme atteinte ou non atteinte, sachant que dans la pratique, ces ornièrres ne peuvent pas être entièrement évitées, même en travaillant dans les règles de l'art. Cette nécessaire quantification des dégâts tolérables peut se faire par exemple en postulant que les ornièrres de type 3 sont acceptables sur une proportion donnée de la longueur d'un layon et que cette proportion augmente avec la sensibilité du sol à la compaction. L'intégration de ces critères quantitatifs dans des normes de portée générale doit être négociée avec les associations et groupes d'intérêt concernés, dans le cadre d'un processus politique.

Comme on l'a vu, il n'existe pas encore de normes régissant la protection des sols. Celles-ci seront plus faciles à développer et à appliquer si ces travaux reposent sur une procédure bien étayée sur le plan théorique. Bergen et al. (2002) distinguent trois niveaux pour la formulation de normes: écologique, économique et politique. Le niveau écologique est celui où sont fixées les normes de qualité minimales. Le niveau économique intègre les coûts occasionnés par la protection de l'environnement (évaluation de l'adéquation des coûts de la prévention des dégâts). Enfin, le niveau politique concerne l'évaluation sociale des normes-cibles proposées sur la base de critères complémentaires. Pour la protection des sols contre les atteintes physiques, ces trois niveaux peuvent être formulés comme suit:

Au niveau écologique, la notion d'atteinte persistante à la fertilité du sol inscrite dans la loi doit être définie scientifiquement et formulée sous une forme adaptée à la pratique. L'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL a élaboré à cet effet un système de classification des ornièrres en forêts (cf. 4.1).

Au niveau économique, l'objectif consiste à garantir que le bois peut être récolté de façon rationnelle et concurrentielle, ce qui est impossible si les ornièrres de type 3 doivent être complètement évitées. En outre, du fait de l'hétérogénéité des sols, la formation de ce type d'ornièrres ne peut pas être prédite avec certitude. C'est pourquoi il est recommandé d'admettre une certaine proportion d'ornièrres de type 3. Cette proportion devrait être définie en fonction de la sensibilité du sol à la compaction et en tenant compte des conditions régionales et locales.

**La typologie des ornièrres peut constituer une précieuse base pour l'élaboration d'une norme de qualité**

**La proportion tolérable d'ornièrres de type 3 doit encore être négociée entre tous les acteurs**

Enfin, les normes définies doivent encore être évaluées au niveau politique pour savoir si elles sont acceptées par la population. Comme la société exige de plus en plus des sols forestiers en bon état, l'aspect politique gagne en importance, comme en témoignent des articles de presse parus à la suite de dégâts importants causés par des travaux de récolte de bois.

#### 6.2.6 Contrats et accords internes à l'entreprise

Que ce soit dans les contrats avec les prestataires de services forestiers ou dans les accords internes avec le personnel de l'entreprise, il est possible de fixer des exigences qualitatives sur la protection physique des sols visant à prévenir les dégâts lors de la récolte du bois. Le type d'ornièrre 3 se révèle là aussi une base très utile.

On distingue en principe deux approches: a) les contrats basés sur le résultat à atteindre et b) les contrats fondés sur des prescriptions spécifiques concernant le type et le mode d'exploitation, donc sur des obligations et des interdictions. Le premier système (a) consisterait par exemple à fixer une proportion maximale d'ornières de type 3, en laissant à l'exploitant le soin de décider la façon d'atteindre cet objectif (p. ex. par le choix du type de desserte fine, des processus de travail et des engins). Ce type de réglementation a l'avantage de ne privilégier aucune solution technique et de laisser ouvertes toutes les possibilités d'atteindre efficacement l'objectif visé. Le second système (b) consisterait par exemple à prescrire les distances entre layons et la configuration technique des engins utilisés (p. ex. définition d'une charge par roue maximale) en fonction de la sensibilité du sol forestier à la compaction. Pour le mandant, ce type de réglementation a l'avantage de limiter le risque de dégâts au sol (dans cet exemple, au niveau de leur étendue et de leur localisation).

En principe, une possibilité n'exclut pas l'autre. Ainsi, il est tout à fait envisageable de prévoir une proportion maximale d'ornières de type 3, tout en fixant une distance minimale de x mètres entre les layons et une charge maximale de x tonnes par essieu pour certaines stations sensibles. Dans les deux cas, un contrôle impliquant des coûts en conséquence de même que des sanctions en cas de non-exécution doivent être prévus dans le contrat.

Dans le domaine de la protection physique des sols, le contrat peut porter sur les points suivants: résultat, planification, réalisation, coûts, contrôle et sanction.

Définition du résultat à atteindre

Réglementation des machines engagées et de leur équipement

**Tab. 11 > Possibilités de réglementation de la protection physique des sols lors de la récolte du bois dans les contrats entre le mandant et le mandataire**

Objet	Exemples
Résultat	La circulation sur le sol forestier en dehors des layons de débardage et des autres lignes de la desserte fine n'est pas autorisée. Les ornières de type 3 occupent au maximum x % de la longueur d'un layon, en fonction de la sensibilité du sol.
Planification	Avant le début des travaux, le mandataire procède à une planification élargie de la desserte fine dépassant la seule zone concernée par la coupe. Le mandant prévoit des surfaces ou des travaux de réserve à l'échelle de plusieurs triages au cas où les travaux devraient être interrompus en raison des conditions météorologiques et des impératifs de la protection des sols.
Réalisation	Si des ornières de type 3 se forment sur plus du double de la longueur du véhicule, les travaux sont interrompus; c'est alors le mandant qui décide de la reprise ou de la suspension des travaux. Sur les sols sensibles à la compaction, le débardage par trainage doit se faire au moyen d'un débusqueur (skidder) à 6 ou 8 roues équipé de semi-chenilles.
Coûts	Les coûts supplémentaires occasionnés par la protection des sols lors de la récolte des bois sont payés par un fonds constitué à cet effet.
Contrôle	Le mandant contrôle les travaux sur la base d'un procès-verbal permettant d'avoir un aperçu quantitatif de la répartition des ornières de type 3 sur le réseau de layons avant les interventions. Le mandataire confirme avoir pris connaissance de ce procès-verbal avant le début des travaux.
Sanction	Les surfaces dégradées sont régénérées aux frais de l'auteur des dégâts à l'aide de mesures biologiques (p. ex. plantation d'aulnes si les conditions de luminosité le permettent).

Voici les points auxquels il faut prêter particulièrement attention en établissant les exigences contractuelles:

- > les règles doivent être claires et les mesures applicables dans la pratique (p. ex. il ne faut pas qu'elles échouent pour des raisons de coûts ou parce qu'elles ne sont pas acceptées par les acteurs);
- > ces mesures coûtent de l'argent que quelqu'un devra payer;
- > l'exploitation du bois doit être concurrentielle.

#### 6.2.7 Modèles terra-mécaniques

Des modèles visent à décrire les interactions complexes qui existent entre le véhicule et le sol. Ils peuvent aider à décider si les engins peuvent circuler sans causer de dégâts importants aux sols. On trouvera ci-après une brève présentation du modèle ProFor de l'Université technique de Munich (Ziesak 2004) ainsi que des principaux résultats du projet PrAllCon (Jacke et Ebel 2006).

ProFor: modèle pour le calcul des seuils critiques de teneur en eau

À partir des données fournies par l'utilisateur concernant le sol et l'engin prévu, le système d'information ProFor calcule une «teneur en eau du sol maximale tolérable» (seuil critique de teneur en eau) pour une intervention déterminée. Tant que cette valeur n'est pas dépassée, on peut partir du principe que les travaux ne causeront pas

de dégâts écologiques préjudiciables au sol, autrement dit qu'ils n'entraîneront pas la formation d'ornières de type 3.

Une première partie sert à entrer des informations sur le sol (texture, teneur en matière organique, hydromorphie et pierrosité) et la pente du terrain. Les sols sont classés en différentes classes de sensibilité en fonction de leurs propriétés plastiques (limites de plasticité et de liquidité). Une deuxième partie est destinée à la saisie de données sur les engins et, pour les véhicules à roues, sur les pneumatiques (y compris semi-chenilles Bogie). À partir des caractéristiques techniques des machines et des pneumatiques, ProFor calcule une pression spécifique dans les zones de contact et indique finalement une teneur en eau maximale tolérable pour une contrainte typique. L'utilisateur final navigue dans l'application avec des masques de saisie où il doit répondre à des questions simples (fig. 63).

À partir de données sur le sol et les véhicules, l'application calcule un seuil critique de teneur en eau jusqu'où il est possible de circuler sans causer de dégât au sol

Fig. 63 > Masques de saisie de ProFor pour le sol (à gauche) et les engins utilisés (à droite)

The image shows two side-by-side software windows from the ProFor application.

**Boden (Soil) window:** This window contains a soil classification ternary diagram (triangle) with vertices labeled S (Sand), T (Ton/Clay), and U (Schluff/Silt). The diagram is divided into various soil texture classes like Ts, Lts, Lt, Tu, St, Ls, Lu, Slu, Uls, Ut, Su, and Us. Below the diagram, there are input fields for:
 

- Humusgehalt: normal (<5%)
- Wechselfeuchte: nicht oder mäßig wechselfeucht
- Skeletgehalt: < 30 %
- Hangneigung: <= 15 %

 Buttons at the bottom include OK, Abbrechen, Übernehmen, and a help icon (?).

**Maschinendaten (Machine Data) window:** This window is for entering machine specifications. It includes:
 

- Maschinengruppe: Timberjack 1110
- Bereifung der Vorderachse: Nokia 600/55-26.5 PR 12
- Bereifung der 2.Achse: Nokia 600/55-26.5 PR 12
- Luftdruck (bar): 2.5 (for both axles)
- Zusatzgewicht [kg]: (empty field for both axles)
- Buttons at the bottom include OK, Abbrechen, Übernehmen, and a help icon (?).

Une fois la saisie terminée, l'application établit un protocole comprenant les données sur le sol, l'engin, la pression dans les zones de contact et la teneur en eau maximale tolérable.

Ce système d'information peut aider le propriétaire forestier à planifier plus sûrement l'utilisation de moyens techniques afin de limiter au maximum le risque de dégâts en faisant circuler des engins. Il permet également au propriétaire des véhicules d'attester à chaque intervention que les engins utilisés étaient adaptés aux exigences de la protection des sols. Lors de nouveaux investissements ou d'investissements de renouvellement

ment, il peut en outre l'aider à évaluer les engins modifiés/transformés ou les nouveaux véhicules sous l'angle de la protection des sols.

Le système d'information ProFor est un instrument précieux qui mériterait d'être développé et amélioré. Par exemple, le logiciel pourrait être intégré dans la cabine du véhicule et interagir ainsi directement avec un système électronique de régulation de la pression des pneus. Le raccordement à une balance de grue électronique sur un porteur forestier serait aussi envisageable. Ces deux possibilités ont déjà été réalisées au niveau expérimental et à celui de la technique du logiciel (Huber et al. 2010). La configuration du porteur forestier (pression des pneus et charge) pourrait ainsi être adaptée de façon optimale aux conditions actuelles du sol. Sur la base de l'évolution des précipitations saisonnières et des connaissances sur les sols, il est possible d'établir un planning annuel des interventions tenant compte de la protection des sols, qui prévoit par exemple d'exploiter les surfaces critiques en priorité pendant la saison sèche et de conserver les terrains praticables sans problème toute l'année comme réserves. L'association judicieuse de modèles du régime hydrique des sols avec les données pluviométriques régionales actuelles doit permettre de déterminer la teneur en eau du sol avec la précision voulue. Si, par ailleurs, on intègre les prévisions météorologiques dans la planification à court terme, il est possible d'émettre des recommandations pour l'engagement des véhicules en fonction de l'humidité attendue du sol pour la période de prévision considérée (actuellement de 3 à 5 jours pour une probabilité de respectivement >80 % et >50 %).

Des calculs approfondis effectués par le WSL ont toutefois fait naître des doutes fondés quant à l'exactitude de certaines parties du modèle ProFor (Spjevak et al. 2009b). Le classement des textures et la détermination de la pression dans la zone de contact nécessitent notamment d'être vérifiés. Concernant la texture, on a en effet constaté que deux sols présentant une différence de 40 % dans leur proportion de silt étaient classés dans la même catégorie. Ce résultat n'est pas plausible et il faut donc vérifier si le classement des textures ne devrait pas être affiné. Pour ce qui est de la détermination de la pression dans les zones de contact, de nouvelles études consacrées à cette question devraient être prises en considération (cf. p.ex. Jacke et Ebel 2006). Il s'agit notamment de revoir le calcul de la pression dans les zones de contact sous les semi-chenilles Bogie, qui est très simplifié et ne fait pas de distinction entre les différents types de semi-chenilles (semi-chenilles porteuses ou semi-chenilles de traction). Les résultats du projet PrAllCon pourraient apporter des améliorations considérables dans ce domaine.

### PrAllCon: modèle pour déterminer la pression dans les zones de contact

PrAllCon est l'abréviation de Pressure Allocation on Contact Areas under Forest Tires (Jacke et Ebel 2006), un projet du département «Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie» de l'Université de Göttingen. Dans le cadre de ces études, des mesures de la répartition de la pression ont été effectuées sous différents pneumatiques forestiers à l'aide de nattes équipées de capteurs en variant de nombreux paramètres (charge, largeur nominale, pression de gonflage, etc.). Les mesures ont été faites sur terrain dur et sur terrain meuble. Sur terrain dur, les pneus étaient directement en contact avec les capteurs. Sur terrain meuble, une couche de sable de 20 cm d'épaisseur a été épandue entre les pneus et les capteurs de pression afin de supprimer l'effet de la sculpture des pneus.

Si les résultats des mesures sur terrain dur sont intéressants surtout pour les routes et les chemins, ceux des mesures sur terrain meuble fournissent de précieuses informations pour la circulation sur les layons de débardage. Sur ce type de terrain, la répartition de la pression peut être décrite de façon très fiable à l'aide de trois paramètres, à savoir la charge, la pression de gonflage et la largeur nominale.

Plusieurs projets complémentaires ont été menés par la suite. Le projet PrAllCon-Track (Jacke et al. 2008a) a étudié l'effet de semi-chenilles sur la pression dans les zones de contact par roue indépendante. Le projet PrAllCon-Slash (Jacke et al. 2008b), dont les intéressants résultats sont présentés au point 6.4.3, a permis de déterminer la répartition de la pression exercée par des pneus forestiers sous des tapis de branches. D'autre part, depuis 2013, l'Université de Göttingen dispose d'un banc d'essai permettant de mesurer la répartition de la pression et ses pics sous des semi-chenilles Bogie et des pneus équipés de chaînes à maillons (Jacke et Hittenbeck 2013) ce qui permet d'étudier l'effet de différents types de semi-chenilles sur le sol.

Le département «Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnik» de l'Université de Göttingen a mis à disposition un calculateur de pression au format Excel (Jacke 2012). Après la saisie des différents paramètres des pneumatiques: charge par roue, largeur nominale du pneu, rapport hauteur/largeur, diamètre de la jante, pression de gonflage et type de profil (profil soft ou profil de traction), le modèle calcule la pression dans la zone de contact sur terrain dur et sur terrain meuble. Outre la pression dans la zone de contact, la charge par roue est aussi prise en considération dans l'évaluation globale. Il est ainsi tenu compte du fait que la masse (poids propre + charge utile maximale) tout comme les pneumatiques sont des facteurs déterminants pour la protection des sols. Le service des forêts du Bade-Wurtemberg («Forst BW») a publié une notice décrivant précisément la procédure d'évaluation de l'impact d'un véhicule sur le sol à l'aide des valeurs PrAllCon ([www.forstbw.de/fileadmin/forstbw\\_pdf/waldarbeit/prallcon-infoblatt.pdf](http://www.forstbw.de/fileadmin/forstbw_pdf/waldarbeit/prallcon-infoblatt.pdf)). Le «Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik» utilise aussi cette méthode dans ses tests de machines forestières pour évaluer l'impact des engins sur les sols.

Des recherches de l'Université de Göttingen ont mis en évidence l'influence de la pression de gonflage des pneus sur la pression dans les zones de contact

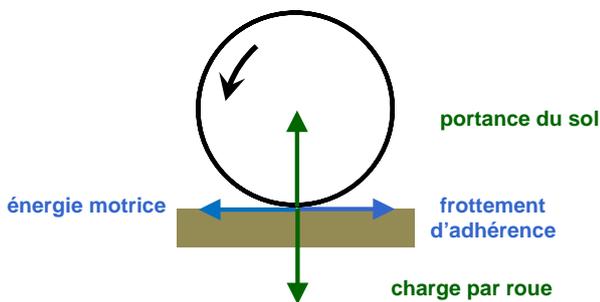
Modèle de calcul de la pression dans la zone de contact

## 6.3 Technique des engins et méthodes de travail

### 6.3.1 Forces agissant sur le sol

Lors du passage d'un véhicule, des forces verticales et horizontales s'exercent sur le sol et influencent sa structure.

Fig. 64 > Lors du passage du véhicule, des forces verticales et horizontales agissent sur le sol

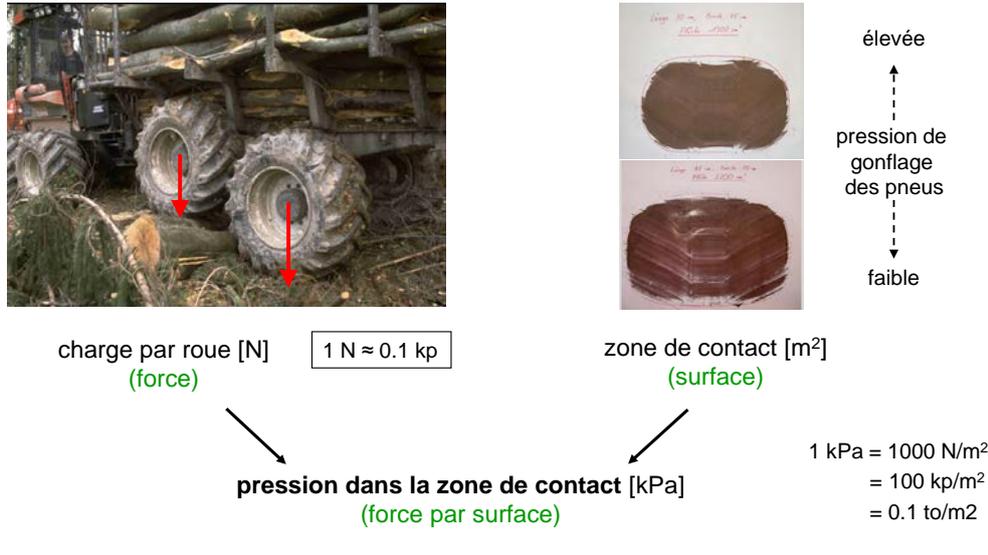


Lorsque la force verticale (charge par roue) exercée par les roues ou les chenilles de l'engin est plus importante que la portance du sol, les roues pénètrent dans le sol jusqu'à ce que l'état d'équilibre soit atteint. La roue subissant la charge forme une ornière sous laquelle le sol est compacté et l'espace poral pour l'eau et l'air est réduit.

Pour qu'un mouvement se déclenche, l'énergie motrice d'une roue doit surmonter la force de frottement entre le sol et la roue. Il en résulte un léger patinage: à chaque tour, le chemin parcouru par la roue motrice est légèrement plus court que celui d'une roue non motrice de même dimension. Si ce patinage dépasse 20 %, la roue motrice «fraise» une ornière dans le sol, et cela indépendamment de la charge. Sous l'effet des forces horizontales, les pores sont comprimés et des particules du sol sont déplacées horizontalement dans le sens opposé à l'avancement, détruisant ainsi la continuité des pores.

La pression dans la zone de contact (fig. 65) est une grandeur appropriée pour représenter quantitativement l'effet d'un engin sur le sol. Elle est déterminée à partir de la force verticale (charge par roue) et de la surface de contact entre les roues ou les chenilles et le sol.

**Fig. 65** > La pression dans les zones de contact des engins forestiers se situe en général dans une fourchette de 200 à 500 kPa (20 à 50 tonnes/m<sup>2</sup>)



Les premiers modèles de calcul, où la surface de contact était déduite de manière simplifiée à partir de la largeur des pneus et du diamètre de la roue, ne tenaient pas compte de la pression de gonflage des pneumatiques (Jacke et Ebel 2006). Or une série de mesures complètes menées sur terrain dur et sur terrain meuble dans le cadre du projet PrAllCon a montré que celle-ci avait une influence considérable sur la pression dans la zone de contact d'un pneu.

Des mesures peuvent être prises au niveau des véhicules pour éviter ou limiter leur enfoncement et assurer une transmission en douceur des forces motrices au sol. Elles sont présentées dans les points ci-après.

### 6.3.2 Mesures techniques visant à réduire la pression dans les zones de contact

Les deux mesures les plus efficaces pour réduire la pression dans les zones de contact sont la diminution de la charge par roue et l'élargissement de la surface de contact.

#### a) Réduction de la charge par roue

Une mesure technique consiste à utiliser sur les sols à faible portance les engins les plus légers possibles à vide, autrement dit des engins dont le poids est juste suffisant pour pouvoir exécuter leur tâche. Par exemple, les interventions dans une vieille futaie peuvent se faire avec une récolteuse légère. Une autre possibilité, au niveau du débardage cette fois, est de diminuer si nécessaire le poids du chargement des véhicules, ce qui signifie que la charge utile possible ou autorisée de l'engin n'est pas entièrement exploitée («débarder avec la moitié de la charge utile»). Cette mesure permet de réduire la pression de pointe et de diminuer ainsi la profondeur de la zone compactée. Un essai de circulation mené en 2013 par le WSL avec un porteur forestier à 8 roues a confirmé ces attentes.

L'élargissement de la surface de contact et la réduction de la charge par roue permettent de diminuer la pression et donc de réduire l'intensité et la profondeur de la compaction

Utiliser les engins les plus légers possible

L'idéal serait d'obtenir une répartition équilibrée de la masse entre les essieux avant et arrière, ce qui est pratiquement impossible à atteindre avec les véhicules de débardage. À vide, environ 60 % de la masse du véhicule reposent sur les essieux avant. En charge, la situation s'inverse: 60 à 70 % de la masse totale (véhicule avec chargement) reposent sur les essieux arrière. C'est ce poids qui détermine la pression de pointe, et donc la profondeur de la zone touchée par la compaction. Le tableau 12 montre une évaluation des charges par roue utilisée par le Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik pour ses tests d'engins.

Répartition la plus équilibrée possible de la masse

**Tab. 12** > Évaluation de la charge par roue pour des engins forestiers, base d'évaluation pour les tests du KWF validant l'utilisation de récolteuses (état en 2011)

Charge par roue L (kN)	Évaluation
L < 25	Très faible ++
25 ≤ L < 35	Faible +
35 ≤ L < 45	Moyenne 0
45 ≤ L < 55	Élevée -
55 ≤ L	Très élevée --

Aujourd'hui, les récolteuses et les porteurs forestiers sont en général équipés de 6 à 8 roues. L'augmentation du nombre d'essieux se heurte à des limites techniques (longueur totale du véhicule) et peut avoir des inconvénients pour la conduite (éclatement du sol sous l'effet des forces latérales de cisaillement lors des changements de direction).

Nombre élevé de roues

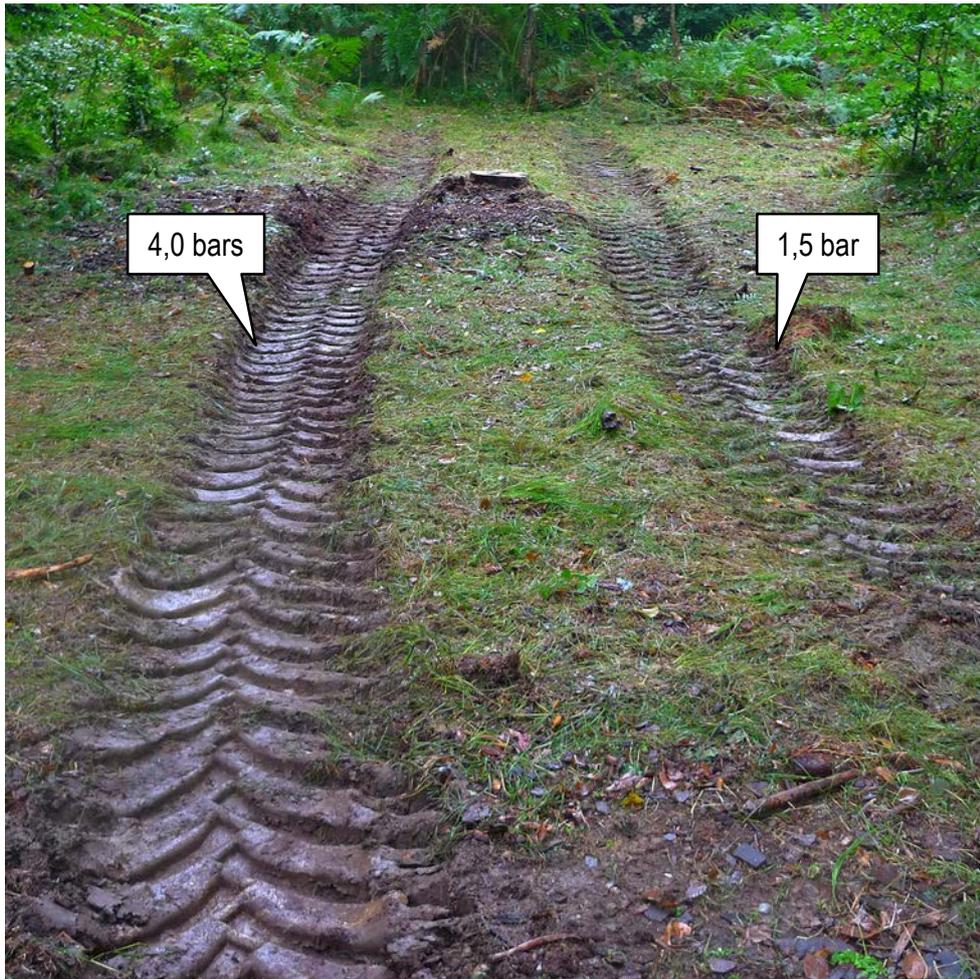
#### b) Augmentation de la surface de contact

Diminuer la pression de gonflage des pneus est la mesure la plus importante pour augmenter la surface de contact. Sur les layons de débardage (sols meubles), cette pression peut être réduite au besoin de 1,5 à 2 bars. En général, les pressions minimales indiquées dans les manuels d'utilisation des constructeurs sont plus élevées, car elles se réfèrent à la circulation sur un revêtement dur. Ici, une pression insuffisante provoquerait une usure excessive, voire l'éclatement des pneus. Mais il faut aussi être prudent en circulant sur le terrain. En effet, des pressions de gonflage trop basses peuvent par exemple entraîner une déchirure de la valve ou endommager le flanc des pneus. En outre, la stabilité des récolteuses et des porteurs diminuent lors de l'utilisation de la grue.

Diminuer la pression de gonflage des pneus (fig. 66)

**Fig. 66** > Ornières causées par le passage d'un véhicule avec des pneus gonflés à des pressions différentes du côté gauche et du côté droit. Essai mené dans la forêt domaniale de Habsbourg (canton d'Argovie) en septembre 2010

*Véhicule HSM 704, poids env. 9,5 tonnes, largeur des pneus 600 mm. Humidité du sol env. 35 %, 10 allers-retours sans chargement.*



Les pneus plus larges permettent d'augmenter la surface de contact avec le sol, mais dans une moindre mesure qu'une diminution de la pression de gonflage. Pour les récolteuses et les porteurs forestiers, les largeurs des pneus en l'état actuel de la technique sont de 700 à 750 mm (Weise 2008). Avec des pneus de 800 mm ou plus, la largeur totale du véhicule dépasse en général 3 mètres, ce qui complique la circulation sur les routes publiques (autorisations spéciales).

**Pneus larges**

Selon les mesures effectuées par Jacke et Ebel (2006), le diamètre de la roue n'a qu'une faible incidence sur la pression dans la zone de contact. Pour les engins forestiers, l'augmentation du diamètre se heurte en outre à des limites techniques (p.ex. braquage suffisant chez les tracteurs ou centre de gravité le plus bas possible chez les porteurs).

**Roues de grand diamètre**

On distingue trois types de semi-chenilles Bogie: semi-chenilles portantes, semi-chenilles de traction et semi-chenilles combinées (ForstBW 2013).

Semi-chenilles Bogie

Les **semi-chenilles portantes** (fig. 67, côté droit du véhicule) ont des plaques larges et peu espacées. La surface au sol élevée permet de réduire la pression dans la zone de contact, raison pour laquelle ces chenilles conviennent à une utilisation sur des sols sensibles à la compaction en terrain plat ou en légère pente. En revanche, elles ne sont utilisables sur la neige que dans certaines conditions.

Les semi-chenilles en matière synthétique ou les semi-chenilles métalliques recouvertes de matière synthétique ou de caoutchouc sont particulièrement respectueuses du sol et des racines. Les véhicules qui en sont équipés peuvent en outre circuler sur les routes forestières sans en endommager le revêtement.

Les **semi-chenilles de traction** (fig. 67, côté gauche du véhicule) ont des plaques étroites et espacées avec un profil saillant qui assurent une forte traction et limitent le patinage. Elles sont particulièrement indiquées sur les terrains en pente (jusqu'à 30 %) et enneigés.

Les **semi-chenilles combinées** représentent un compromis entre soutien à la traction et répartition de la pression. Elles sont utilisables sur terrains plats et en pente (jusqu'à 30 %). Sur les sols sensibles à la compaction, elles sont indiquées lorsqu'un soutien à la traction se révèle nécessaire.

**Fig. 67 > Porteur forestier avec différentes semi-chenilles Bogie**

*Cet engin a été équipé, à des fins de démonstration, de deux types fondamentalement différents de semi-chenilles Bogie: à gauche des semi-chenilles de traction destinées à améliorer les performances en montée et la sécurité en pente, à droite des semi-chenilles portantes permettant de préserver les sols à faible portance.*



Les mesures de la pression dans la zone de contact sous les semi-chenilles Bogie sont difficiles à réaliser, mais elles fourniraient des indications utiles sur la répartition effective de la pression et sur les points de pression sous la chenille. Jacke et al. (2008a) parviennent à la conclusion que les semi-chenilles Bogie ne sont en aucun cas comparables à de vraies chenilles quant à leur effet sur la réduction de la pression. Ils estiment que des recherches supplémentaires seraient nécessaires, notamment pour mieux connaître l'effet d'absorption de la charge de la zone située entre les deux roues et la profondeur correspondante de l'enfoncement. Le département «Arbeitswissenschaften und Verfahrenstechnologie» de l'Université de Göttingen a construit un banc d'essai adapté à ces études. Depuis 2013, dans le cadre du projet PrAllCon-Track, des mesures peuvent y être effectuées avec différentes configurations au niveau du type de semi-chenilles, de la tension des chenilles, du diamètre des roues et de la charge par roue (Jacke und Hittenbeck 2013).

Dans l'installation d'essai du projet PrAllCon, des mesures réalisées avec une roue indépendante entourée d'une semi-chenille de traction sur un tapis de branches ont montré qu'elle n'avait pratiquement pas d'influence sur la pointe de pression, qui est déterminée essentiellement par la charge par roue. L'effet de répartition de la pression du tapis de branches était similaire à celui observé avec les mesures sur des roues sans semi-chenilles (Jacke et al. 2008b). Il manque encore des mesures comparables avec des semi-chenilles Bogie.

**La pression dans la zone de contact sous les semi-chenilles nécessite des études plus approfondies**

Il faut aussi tenir compte de la masse supplémentaire des semi-chenilles Bogie: quatre semi-chenilles d'acier installées sur un porteur forestier peuvent facilement augmenter sa masse d'un tiers. À cela s'ajoutent une consommation accrue de carburant et une usure plus importante des pneus.

Les châssis sur chenilles augmentent considérablement la surface de contact. Dans des terrains sans obstacles (prairies, champs cultivés), les chenilles reposent presque entièrement sur le sol et permettent ainsi de réduire la pression dans les zones de contact. Sur les layons de débardage en revanche, il est rare que le terrain soit entièrement dégagé (microrelief, souches, etc.), de sorte que la surface des chenilles n'est souvent que partiellement en contact avec le sol. Les conséquences sont d'une part que la pression dans la zone en contact avec le sol augmente considérablement, d'autre part que la transmission des forces de traction au sol se concentre dans cette même zone, risquant ainsi de provoquer des dégâts à la surface du sol (patinage) et la formation d'ornières. Pour les chenilles comme pour les semi-chenilles Bogie, il faut veiller à ce que les véhicules ne circulent que sur des terrains plats ou en faible pente, sauf si les chenilles sont équipées d'entrouses spéciales qui améliorent le déplacement en montée et empêchent le glissement latéral. Mais dans ce cas, le risque de blessures aux racines, qui est déjà en soi plus élevé avec les châssis sur chenilles, est encore plus marqué. Pour essayer de pallier les inconvénients des châssis sur chenilles classiques de pelle-teuses, d'autres solutions techniques ont été développées, comme les chenilles avec des trains de roulement larges ayant un effet amortisseur («chenilles de char») ou les chenilles courtes à suspension oscillante. Les «chenilles de char» (cf. p. ex. récolteuse Impex Königstiger) s'adaptent bien au relief du terrain même sur des layons comportant beaucoup d'obstacles. Dans le cas du Valmet X3, les roues d'une récolteuse traditionnelle ont été remplacées par quatre chenilles à suspension oscillante. Cette technique combinée à la direction articulée permet aux quatre chenilles de reposer presque entièrement sur le sol même dans les terrains accidentés (fig. 68). Si les châssis sur chenilles sont encore peu répandus en Suisse, c'est entre autres parce qu'il n'existe pas de porteur forestier équipé du même type de châssis pour le débardage. Lorsque le bois doit de toute façon être débardé au câble-grue selon la méthode de l'assortiment, le débardage d'arbres entiers avec un câble-grue mobile suivi du façonnage sur la route forestière est une alternative plus avantageuse. L'emploi d'engins à châssis sur chenilles est aussi limité par le risque de dégâts aux routes forestières et par les coûts de déplacement entre les lieux d'intervention, plus élevés qu'avec les véhicules à roues. Une autre raison au fait que les véhicules à pneus équipés de chenilles soient peu répandus réside dans les coûts supplémentaires occasionnés par l'achat de ces équipements spéciaux et par leur entretien relativement intensif. Souvent, ces coûts supplémentaires ne sont pas correctement indemnisés par le mandant.

Chenilles

**Fig. 68** > Récolteuse Valmet X3 «Snake» et Ecolog 570D Soft Track équipées de châssis sur chenilles indépendantes à suspension oscillante

*Cette technique combinée avec la direction articulée assure une très bonne adaptation aux conditions du terrain. La récolteuse Ecolog (à droite) est en outre équipée d'essieux oscillants et de «soft tracks», chenilles en matière synthétique qui ménagent le sol.*



Pour limiter les dégâts aux racines causés par les chenilles métalliques, différentes solutions ont été développées, comme les chenilles en caoutchouc ou les chenilles métalliques recouvertes de matière synthétique. Comme pour les semi-chenilles, ces systèmes ne conviennent toutefois que dans les terrains plats ou en légère pente.

### 6.3.3 Mesures techniques visant à réduire le patinage

Différents types d'entraînement du véhicule et diverses mesures d'amélioration de la traction au niveau du châssis permettent de diminuer le patinage.

Les engins forestiers modernes sont équipés en série de servotransmissions ou d'entraînements hydrostatiques. Avec les servotransmissions, la transmission de la charge pendant le déplacement du véhicule se fait sans interruption du couple, ce qui permet d'éviter le patinage des roues tel qu'il se produit lors du réembrayage avec les transmissions mécaniques. Avec l'entraînement hydrostatique, la puissance mécanique du moteur est transformée en puissance hydraulique au moyen d'une pompe, puis convertie par un moteur hydraulique en un mouvement rotatif. Ce système permet de réguler la vitesse du véhicule sans à-coups et sans interruption de la force de traction.

Servotransmissions et entraînements hydrostatiques

Les pneus forestiers doivent satisfaire à des exigences extrêmement sévères (Weise 2008). Ils doivent pouvoir supporter des poids élevés et résister à diverses contraintes en circulant sur le terrain (écrasements, souches, branches, etc.). Les pneus des tracteurs de débardage de bois longs en particulier doivent transmettre des forces de traction importantes. À cela s'ajoute l'exigence croissante selon laquelle toutes ces fonctions doivent être assurées dans le respect du sol.

Des pneus forestiers respectueux du sol (fig. 69)

**Fig. 69** > Pneus avec profil de traction (à gauche) pour tracteur de débardage et avec profil «soft» (à droite) pour récolteuse et porteur forestier



Photos: Nokian Heavy Tyres

Les pneus destinés à transmettre des forces de traction élevées comportent des pavés massifs très espacés, disposés en forme de flèche (moins de 50 % de profil positif) et un épaulement aux arêtes relativement vives. Grâce à leurs pavés, ils pénètrent bien dans le sol et présentent en outre de bonnes propriétés autonettoyantes. Les pneus à profil «soft» ont des pavés nettement plus plats et moins espacés (plus de 50 % de profil positif) et un épaulement plus arrondi. Ils pénètrent moins profondément et de façon moins agressive dans le sol. Ce type de pneus est particulièrement indiqué pour les véhicules automoteurs comme les récolteuses et les porteurs forestiers, où la force de traction transmise sur le sol est moins élevée. Si la force de traction est plus importante, les semi-chenilles Bogie ou les chaînes de traction peuvent se révéler utiles.

Les chaînes de traction posées sur des roues à pneumatiques améliorent la traction dans les terrains difficiles (sols argileux, neige) et en montée, ainsi que la sécurité en pente. Elles ont cet inconvénient de blesser les racines et les empâtements des arbres situés au bord des layons. En outre, suivant la disposition des maillons, elles risquent de causer des dommages plus ou moins importants à la couche supérieure du sol et d'entraîner la formation d'ornières.

Chaînes de traction  
Semi-chenilles Bogie

Dans des conditions de terrain ou de sol difficiles, les pneus à profil «soft», couramment utilisés en particulier sur les récolteuses et les porteurs, sont limités dans la transmission des forces de traction par leur constitution et la forme de leur profil. Les semi-chenilles fixées sur deux roues reliées par le support de bogie permettent de diminuer le patinage et d'améliorer ainsi la traction et la stabilité sur les terrains en pente. Comme avec les chaînes de traction, le risque de blessures aux racines et aux empâtements des arbres augmente.

Avec le développement de la récolte entièrement mécanisée dans les terrains en pente, les problèmes de traction en montée et de stabilité des véhicules ont pris de l'ampleur. Plus la déclivité augmente, plus le patinage des roues ou des semi-chenilles s'accroît. Si le patinage dépasse environ 20 %, il faut s'attendre à ce que le sol subisse de graves dégâts.

Treuil de halage (fig. 70)

Ainsi, différents constructeurs proposent depuis quelques années des treuils dits de halage. Le véhicule (en général une récolteuse ou un porteur) est équipé d'un treuil d'une capacité en câble d'environ 300 m dont la vitesse d'enroulement est synchronisée avec la traction du véhicule et qui soutient de cette façon toutes ses forces de traction et de freinage (ThüringenForst 2008). Ce système permet de travailler dans le plus grand respect du sol à condition que la portance soit suffisante.

**Fig. 70** > Porteur équipé d'un treuil de halage

*Les treuils de halage permettent de ménager le sol lors des travaux en pente. L'acquisition du treuil et le montage du câble lors de l'utilisation augmentent les coûts de la récolte, qui devraient être dédommagés en conséquence par le mandant.*



#### 6.3.4 Principes régissant le choix et la mise en œuvre des méthodes de travail et des engins

Comme on le sait, le coût de la récolte du bois est déterminé en grande partie par le choix de la méthode de travail, l'exécution proprement dite des travaux n'ayant ensuite en général qu'une influence très limitée sur le résultat. S'agissant du risque et de l'étendue des dégâts aux sols forestiers, ils dépendent là aussi dans une large mesure du choix de la méthode de travail et des engins utilisés. Mais l'exécution des travaux peut avoir ici une grande importance. Car en fin de compte, le facteur déterminant est la décision d'engager ou non les véhicules dans des situations critiques, à savoir sur des sols forestiers humides.

Des principes de gestion peuvent donc être formulés aussi bien a) pour le choix de la méthode de travail et des engins que b) pour leur utilisation.

a) Le choix de la méthode de travail et des engins (y compris les décisions relatives à la desserte fine) doit s'effectuer en tenant compte de la sensibilité des sols au passage de véhicules:

- > choisir des distances appropriées entre les layons;
- > choisir des techniques de mécanisation adaptées permettant de ménager le sol;
- > privilégier les engins légers ainsi que des charges par roues et des pressions de gonflage réduites;
- > utiliser le cas échéant des équipements supplémentaires permettant de ménager les sols (treuil de halage, semi-chenilles Bogie, etc.).

b) Lors de la mise en œuvre proprement dite des systèmes de récolte, le plus important est d'évaluer l'état actuel du sol avant et pendant le passage des véhicules et de contrôler la qualité des travaux du point de vue de la protection du sol. Ces observations permettront de définir et prendre des mesures d'ordre technique et organisationnel, comme notamment:

- > restreindre la circulation aux layons de débardage;
- > former des tapis de branches, si possible aussi lors de la récolte des bois avec des engins manuels;
- > séparer éventuellement dans le temps le débardage et le façonnage;
- > éviter les parcours en charge en montée;
- > reporter ou interrompre l'utilisation d'engins dans des situations critiques (apparition d'ornières de type 3).

Le tableau 13 donne un aperçu des mesures techniques et organisationnelles recommandées en fonction de la sensibilité du sol au passage de véhicules. Les principes mentionnés ci-dessus sont concrétisés pour trois situations de sol différentes. Le résultat représente une ligne directrice très générale. Les mesures préconisées sont expliquées et précisées tout au long du chapitre 6.

À titre de comparaison, d'autres pays ont formulé des principes similaires. Le ForstBW (Bade-Wurtemberg) prévoit par exemple d'exiger l'utilisation de semi-chenilles pour les travaux de débardage avec des engins à 6/8 roues réalisés en forêts domaniales dans les zones sensibles au passage de véhicules, sauf durant les périodes stables de gel et de sécheresse (ForstBW 2012). L'office des forêts de la Saxe «Staatsbetrieb Sachsenforst» a publié des directives sur l'emploi des technologies de récolte du bois dans lesquelles toutes les méthodes de travail courantes sont décrites en détail sous l'angle de la protection des sols (Staatsbetrieb Sachsenforst 2006).

Une autre solution intéressante est l'intégration de modèles de mécanique du sol: les véhicules de débardage à 4 roues doivent respecter dans les conditions susmentionnées des normes minimales pour la pression dans la zone de contact et la charge par roue déterminées au moyen du calculateur PrAllCon (Jacke 2012). Il est en outre obligatoire d'emporter dans le véhicule un appareil de mesure de la pression des pneus.

**La sensibilité du sol au passage de véhicules doit être prise en compte lors du choix de la méthode de travail**

**Recommandations pour l'utilisation des machines dans les länder allemands**

Tab. 13 &gt; Principes régissant le choix et la mise en œuvre des processus de travail et des engins

Sensibilité au passage de véhicules (=risque de compaction et de formation d'ornières)	Choix des engins	Disposition de la desserte fine, en particulier distance entre les layons de débardage	Utilisation des machines
<b>faible</b>			
Sols extrêmement perméables et pierreux tels que sols bruts rocheux, ranker, rendzine, régosol	Récolteuse à roues ou à chenilles Porteur forestier Tracteur de débardage à câble ou à grappin sans équipement supplémentaire. Débardage de bois courts et de bois longs	Disposition systématique 20 m pour le façonnage entièrement mécanisé (toute la surface dans la zone de travail de la grue) 30–40 m pour le façonnage entièrement mécanisé avec abattage directionnel ou pré-débardage depuis les zones intermédiaires et pour le façonnage avec des engins manuels	Pas de mesures particulières Par temps pluvieux, surveiller l'humidité actuelle du sol, et si possible toujours travailler sur des tapis de branches lors de l'utilisation de récolteuses à chenilles (protège aussi contre les blessures aux racines)
<b>moyenne</b>			
Sols normalement perméables tels que sols bruns, sols bruns lessivés, podzols	Mêmes engins que ci-dessus, mais privilégier le débardage de bois courts et veiller à réduire la pression dans les zones de contact: <ul style="list-style-type: none"> <li>engins légers</li> <li>charge par roue moyenne (&lt;45kN)</li> <li>véhicules à 8 roues</li> <li>pression de gonflage réduite (&lt;2 bar)</li> <li>semi-chenilles Bogie (matières synthétiques/acier)</li> <li>châssis sur chenilles (en acier)</li> <li>en pentes de 30 à 50 %: treuil de traction</li> </ul>	30–40 m en situation normale 20 m en cas de dégâts de tempête – pour des raisons de faisabilité, de sécurité au travail et d'ergonomie	La période d'engagement des véhicules est importante: <ul style="list-style-type: none"> <li>mesurer l'humidité du sol</li> <li>laisser le sol se ressuyer si nécessaire</li> <li>former un tapis de branches</li> <li>séparer dans le temps l'abattage/façonnage et le débardage</li> <li>évent. débarder avec une charge réduite (diminution de la charge par roue)</li> </ul>
<b>élevée</b>			
Sols à eau stagnante tels que pseudogley et stagnogley ainsi que sols à nappe permanente comme les gleys	Circulation minimale sur le terrain: <ul style="list-style-type: none"> <li>pré-débardage avec de petits treuils automoteurs à câble, des chevaux ou des tracteurs légers</li> <li>débardage final comme ci-dessus, mais seulement sur terrain plat (équipements et mesures supplémentaires obligatoires, faible charge par roue [&lt;35 kN])</li> </ul> Pas de circulation sur le terrain: <ul style="list-style-type: none"> <li>câble-grue mobile, en particulier débardage d'arbres entiers avec câble-grue mobile puis façonnage au processeur sur la route forestière</li> </ul>	40–60 m, pour réduire au maximum la surface empruntée par les véhicules Risques de perturbations du sol (type d'ornière 3): l'étendue doit être minimale et les zones touchées doivent rester praticables Évent. transformer des layons principaux (layons collecteurs) en pistes de débardage (permis de construire nécessaire)	La période d'engagement des véhicules est particulièrement importante: <ul style="list-style-type: none"> <li>après des périodes sèches prolongées ou sur sols bien gelés. Éviter dans la mesure du possible l'utilisation de véhicules ou la limiter à quelques layons. Abattage directionnel ou prédébardage avec treuil à câble.</li> <li>Former un tapis de branches, y compris pour les travaux manuels avec engins à moteur. Consolider les layons avec du bois dans les zones à mauvaise portance</li> </ul>

## 6.4 Utilisation des machines

### 6.4.1 Attribution du travail

Outre le contrat ou l'accord conclu avec l'entreprise, l'attribution du travail constitue une base importante pour atteindre les objectifs de protection des sols lors de la récolte des bois. L'attribution porte sur les coupes de bois individuelles et les opérations de récolte à exécuter. Elle est établie et communiquée par écrit, comprend une description de la situation locale et fournit des informations sur les modalités d'exécution des travaux (quoi, qui, pourquoi, quand, en tenant compte de quelles particularités). C'est à ce niveau que peuvent être indiquées des données sur le caractère prioritaire de la protection du sol, sur les responsabilités, sur les méthodes de travail et les configurations/équipements des engins permettant de ménager les sols, sur les secteurs à risque en termes de protection des sols et sur les travaux de réserve prévus.

L'attribution du travail comprend impérativement un croquis de coupe et de l'organisation sur lequel peut être indiqué l'état des layons avant l'intervention. L'idéal est de localiser la répartition géographique et l'étendue des ornières de type 3. Cette documentation de l'état initial forme la base pour le contrôle final des travaux (cf. 6.4.5).

Pour établir l'attribution des travaux, il est recommandé d'utiliser le formulaire de la suva «Attribution du travail et organisation en cas d'urgence en forêt» (n° de commande 88216.f – 3.05). Ce document peut être adapté ou modifié si nécessaire en fonction des exigences de la protection des sols. Il est disponible en ligne.

L'état des layons de débardage doit être documenté avant l'utilisation des engins

### 6.4.2 Praticabilité du sol forestier

Il existe différentes possibilités d'évaluer la praticabilité d'un layon de débardage avant le passage d'un engin. Les méthodes présentées n'ont pas encore été optimisées pour une utilisation dans le cadre de la récolte des bois, mais elles constituent des approches prometteuses qui devraient être étudiées plus en détail et développées.

#### Force de succion

La force de succion désigne la force nécessaire pour extraire l'eau du sol. L'eau est retenue avec plus de force dans les pores fins que dans les pores grossiers. C'est pourquoi la force de succion est d'autant plus importante que le sol est sec. La force de succion est mesurée à l'aide d'un tensiomètre – une bougie poreuse en céramique installée dans le sol à la profondeur voulue. L'utilisation correcte des tensiomètres demande un certain travail et une certaine habitude. Cette méthode n'est donc que partiellement adaptée pour effectuer des mesures sur un layon avant le passage de véhicules. Par contre, il est possible d'aménager des stations tensiométriques fixes dans différents types de sol dans un triage forestier. Les forces de succion ainsi relevées permettent de tirer des conclusions sur la praticabilité de sols comparables. Plusieurs cantons gèrent des réseaux de stations tensiométriques aménagées dans différents sites, dont quelques-uns en forêt. Leurs mesures peuvent être consultées en ligne sur internet (cf. 3.4.3).

Les valeurs de force de succion comme mesure de l'humidité du sol permettent d'évaluer la portance d'un sol juste avant le passage d'un véhicule

En général, la force de succion est relevée à une profondeur de 35 cm, c'est-à-dire à la limite théorique entre la couche supérieure et la couche sous-jacente du sol. En forêt, il est parfois utile de se baser sur une mesure supplémentaire effectuée dans la couche supérieure du sol, surtout si cette dernière mesure moins de 35 cm d'épaisseur.

Les fourchettes de force de succion ci-dessous fournissent un ordre de grandeur pour l'utilisation de véhicules sur les sols agricoles et forestiers:

>25 cbar	sec
10–25 cbar	humide
6–10 cbar	très humide (ne pas circuler)
0–6 cbar	saturé d'eau (ne pas circuler et ne pas travailler le sol).

En raison de la constitution naturelle du sol, de l'important enracinement, de la transpiration des arbres et de l'interception des eaux météorologiques, le régime hydrique des sols forestiers n'est que partiellement comparable à celui des terres cultivées. Il n'en demeure pas moins que les fourchettes indiquées ci-dessus fournissent une bonne base pour évaluer si la circulation sur un sol forestier est critique ou non.

#### Teneur en eau du sol

La teneur en eau du sol correspond à la proportion d'espace poral rempli d'eau. Elle peut être mesurée par exemple avec des sondes de type TDR (Time Domain Reflectometry) ou FDR (Frequency Domain Reflectometry) et est exprimée en % du volume. La teneur en eau ne suffit pas à déterminer la praticabilité d'un sol. Elle doit être mise en rapport avec l'espace poral total, qui dépend de la structure et des propriétés du sol (annexe A10). Dans les régions où des cartes pédologiques détaillées sont disponibles (comme dans certaines parties du canton de Soleure), ces informations peuvent être consultées et permettent d'établir très facilement des cartes de la sensibilité du sol à la compaction.

La praticabilité d'un sol forestier avant le passage d'engins peut être évaluée au moyen du système d'information ProFor (cf. 6.2.7). À partir de données sur le sol et sur le véhicule, ProFor calcule un seuil critique de teneur en eau à ne pas dépasser pour ménager le sol. Avec les instruments de mesure mentionnés ci-dessus, il est facile de mesurer la teneur en eau du sol et de la comparer avec le seuil critique. Sous le point 6.2.7, il a été signalé que certaines bases du système ProFor devaient encore être améliorées pour obtenir des résultats mieux adaptés à la pratique. Cependant, l'approche choisie pour établir un seuil critique de teneur en eau en combinant des données sur le sol et sur le véhicule est très prometteuse et mériterait d'être développée. Elle permettrait en effet de disposer d'un système facile à utiliser dans la pratique et réellement peu coûteux pour évaluer la portance du sol avant de rouler sur les layons avec les engins.

Une autre possibilité d'obtenir des indications sur la portance d'un sol à partir de la teneur en eau est de se baser sur les courbes de désorption (cf. 3.4.4). Pour une texture donnée (proportion de sable, de silt et d'argile), chaque teneur en eau correspond à une force de succion spécifique. La praticabilité peut donc être déterminée sur la base de la force de succion comme indiqué au point précédent.

**Le système d'information ProFor calcule à partir de données sur le sol et sur les véhicules le seuil critique de teneur en eau en deçà duquel un sol est praticable sans dommage**

### Résistance à la pénétration

Une tige munie d'une pointe conique (pénétrromètre) est enfoncée dans le sol afin de mesurer la résistance à la pénétration, qui sera indiquée en valeur de pression sur un manomètre. La pression ou résistance à la pénétration obtenue suivant la forme et la surface externe de la pointe conique représente une mesure de la densité du sol et donc de sa portance. Cette méthode est toutefois assez rarement utilisée en forêt, car les résultats peuvent être faussés par la pierrosité du sol et la présence par endroits de nombreuses racines ligneuses, de sorte qu'une évaluation détaillée de la praticabilité n'est plus possible.

### Résistance au cisaillement

Selon les recherches de Jacke et al. (2011), la résistance au cisaillement de la couche supérieure du sol est une grandeur facile et rapide à déterminer qui pourrait être utilisée pour évaluer la praticabilité d'un sol forestier. Elle se mesure au moyen d'un instrument simple appelé scissomètre. Il s'agit d'une tige métallique munie de pales qui est enfoncée dans le sol. Les pales sont mises en rotation par un couple de torsion dans l'axe de la tige jusqu'au point de rupture du sol, c'est-à-dire jusqu'au moment où celui-ci est «cisailé». La résistance au cisaillement peut être déterminée sur la base du moment de torsion maximal mesuré et de la dimension des pales. Elle correspond en quelque sorte à la pression qui doit être exercée en direction horizontale pour cisailer le sol. Des essais de mécanique du sol ont permis d'établir une corrélation entre pression horizontale et pression verticale sur le sol. La pression d'un pneu exercée verticalement sur le sol (pression dans la zone de contact) peut être évaluée avec la formule PrAllCon (cf. 6.2.7). En comparant la pression dans la zone de contact avec la valeur de résistance au cisaillement (qui est aussi exprimée en tant que pression), on pourrait obtenir des indications sur la portance du sol. La praticabilité d'un layon pour un véhicule donné pourrait ainsi être déterminée rapidement et à moindre coût juste avant l'engagement de l'engin.

### Règle de base concernant la durée du ressuyage

Après des précipitations d'intensité moyenne sur des sols perméables non remaniés, les délais minimums suivants doivent être respectés pour que les véhicules puissent à nouveau circuler en ménageant le sol:

Sols sableux:	3 jours
Sols limoneux:	5 à 7 jours
Sols argileux:	7 à 10 jours

Les délais indiqués peuvent varier légèrement suivant la structure du sol. Après ce délai, les pores grossiers sont en principe ressuyés (capacité au champ).

### Essai de circulation

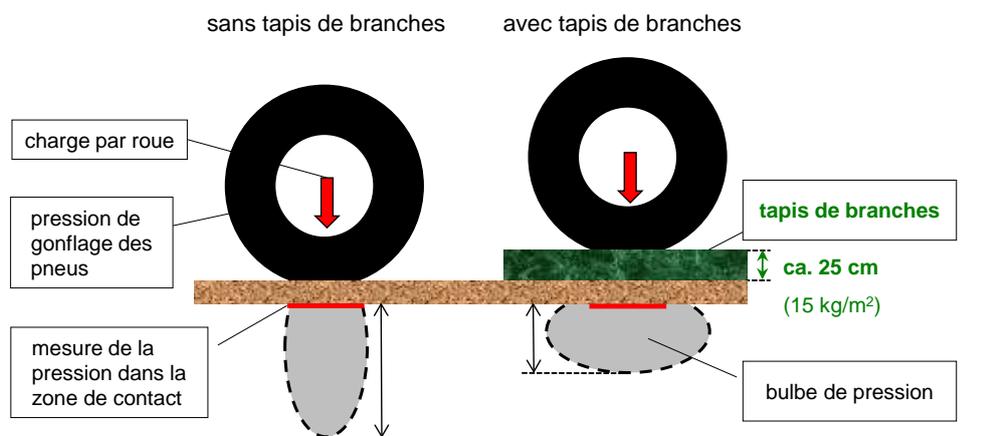
Lorsqu'il n'existe pas d'autre moyen d'évaluer la praticabilité, il faut engager les engins sur les layons et observer les ornières. Si des ornières de type 3 d'une longueur équivalant à deux fois celle du véhicule se forment, cela signifie que la teneur en eau

du sol est proche de la limite de liquidité et qu'une circulation respectueuse du sol n'est plus possible. Dans ce cas, les travaux doivent être interrompus.

### 6.4.3 Tapis de branches

L'utilisation systématique de tapis de branches pour consolider les layons a commencé avec le développement de la récolte entièrement mécanisée. Les arbres abattus sont ramenés sur les layons avec le bras de la récolteuse, puis ébranchés de manière que les branches tombent sur le sol en direction de l'avancement et forment un tapis de branches pour la récolteuse, et plus tard pour le porteur. Dans la mesure du possible, la création d'un tapis de branches sur le layon est aussi recommandée pour les processus de récolte avec abattage manuel, même si ce système ne permet pas d'obtenir la même qualité. L'épicéa et le sapin sont les essences les mieux adaptées, car l'épaisseur des branches est plus homogène et la part de branchage plus importante que par exemple avec le pin, le mélèze ou les feuillus.

**Fig. 71** > Représentation schématique de l'effet d'un tapis de branches par rapport à la réduction de la pression



Le tapis de branches a deux effets positifs :

- > Transfert des forces de traction dans le respect du sol  
La force propulsive d'une roue n'est pas directement transmise à la surface du sol mais sur le tapis de branches, ce qui évite de « labourer » le terrain et permet ainsi de limiter la formation d'ornières.
- > Limitation des pointes de pression sur le sol  
Les charges par roue sont réparties sur une surface plus grande, ce qui permet de réduire la pression dans les zones de contact. Jacke et al. (2008b) ont en outre démontré dans leurs essais que le frottement et la déformation du branchage atténuent une petite partie de l'énergie résultant de la charge par roue. Ces deux effets se traduisent par une réduction de la pointe de pression et donc de la profondeur de compaction (fig. 71). Les sols se régénèrent plus rapidement lorsque les compactations sont superficielles. Plus celles-ci sont profondes, plus la capacité de régénération du sol diminue.

Au-delà de ces effets positifs pour la circulation des véhicules, les tapis de branches peuvent aussi dans certains cas avoir des effets négatifs:

> Ralentissement du ressuyage du sol

Un tapis de branches protège le sol contre le dessèchement, si bien que, même plusieurs jours après des précipitations, le sol est plus humide dans les layons qu'à l'extérieur.

> Biomasse sur les layons

Les tapis de branches épais apportent trop de biomasse (branches et menu bois) qui réduit fortement la portance des layons. Ces cas ont été observés surtout dans des surfaces de chablis causés par l'ouragan Lothar, où de très importantes quantités de bois ont été traitées en même temps, ce qui a entraîné la formation de tapis de branches très épais sur les layons. Dix ans plus tard, lors de la première intervention pour les soins aux jeunes peuplements, les grandes quantités de branches en décomposition avaient rendu les layons presque impraticables.

> Risque de glissement des véhicules sur des terrains en pente

Selon des conducteurs d'engins forestiers ayant fait cette expérience, sur les layons en forte pente (40 à 50 % de déclivité), les tapis de branches formés par la récolteuse peuvent poser des problèmes de stabilité au passage du porteur, surtout s'ils contiennent une forte proportion de feuillus ou sont humides. Dans ces cas, des treuils de halage installés sur le porteur et synchronisés avec la traction peuvent se révéler une solution avantageuse.

Signalons aussi dans ce contexte le problème de l'absorption d'éléments nutritifs due à la formation de tapis de branches, même si la biomasse n'est pas retirée du peuplement mais seulement accumulée localement.

«Plus le tapis de branches est épais, plus il est efficace»: ce principe reste valable, cependant, des essais menés par Jacke et al. (2008b) avec des tapis de branches d'épicéa et de sapin ont montré que l'effet positif de l'épaisseur augmentait de façon dégressive. Des mesures détaillées effectuées avec quatre épaisseurs différentes de tapis de branches d'épicéa, trois dimensions de pneus, cinq degrés de gonflage des pneus et cinq charges verticales différentes ont permis de constater qu'à partir d'une masse d'environ 15 kg de branchages par m<sup>2</sup>, l'effet de réduction de la pression n'augmentait plus que faiblement avec l'augmentation de l'épaisseur du tapis. Une masse de branches de 15 kg/m<sup>2</sup> correspond à un tapis d'environ 25 cm de hauteur non tassé. Les résultats de Jacke et al. (2008b) sont très intéressants pour la pratique, car lors des coupes d'éclaircie, il est plutôt rare de disposer de suffisamment de branches pour former un tapis de bonne qualité. Les branches «en excédent» peuvent ainsi être disposées aux endroits du layon où il n'y a pas d'arbres à abattre et où le volume de menu bois produit est donc faible ou nul, ce qui permet de protéger une grande partie du layon de débardage. Même s'ils mesurent moins de 25 cm d'épaisseur, les tapis ont déjà un effet protecteur tant au niveau de la diminution des pointes de pression qu'à celui de la transmission des forces de traction.

**Des résultats de recherche intéressants: une épaisseur d'environ 25 cm suffit pour que les tapis de branches d'épicéa et de sapin déploient une grande partie de leur effet protecteur**

Les résultats des recherches de Jacke et al. (2008b) sont aussi intéressants en ce qui concerne les effets négatifs des tapis de branches. Après des précipitations, le sol se ressuie plus rapidement sous un tapis mince que sous un tapis épais et le volume de

biomasse sur le layon est moins important. Les inconvénients mentionnés ci-dessus sont ainsi limités.

#### 6.4.4 Interruption des travaux

L'interruption ou plus précisément la suspension des travaux de récolte des bois pour cause de conditions météorologiques défavorables est un important instrument de la protection des sols contre les atteintes physiques. Elle doit être réglementée dans des contrats ou des accords internes à l'entreprise. Par exemple, le «Staatsbetrieb Sachsenforst» a élaboré un accord interne sur le travail à la tâche dans la récolte du bois, qui prévoit que le conducteur de l'engin doit surveiller lui-même la formation d'ornières, et suspendre immédiatement les travaux et informer le donneur d'ordre si le véhicule s'enfoncé de plus de 15 cm sur plus d'une fois sa longueur. Par la suite, cette profondeur a été modifiée pour des raisons pratiques par la formulation «jusqu'au bord de la jante».

Ce genre de réglementation devrait préciser clairement:

- > dans quelles situations les travaux doivent être interrompus;
- > qui est habilité à décider de l'interruption;
- > s'il convient de prévoir des surfaces de réserve et comment organiser le déplacement;
- > les dédommagements éventuels.

Il n'est pas facile de décider et d'appliquer ces mesures. Elles peuvent occasionner des coûts directs et indirects non négligeables et entraîner des conflits avec le mandataire et son personnel. Le système de travail risque d'être paralysé. S'il n'y a pas de possibilités de remplacement, les capacités ne peuvent pas être pleinement utilisées et il en résulte un manque à gagner. Et même si des travaux de réserve sont prévus, le transfert des engins occasionne des coûts supplémentaires, surtout s'ils ne peuvent pas se déplacer de façon autonome et doivent être transportés sur une remorque surbaissée.

Par conséquent, il est important de prévenir autant que possible les interruptions des travaux par une planification et une organisation adéquates, afin que dans les stations sensibles à la compaction, le débardage, notamment, ne soit exécuté que lorsque les conditions météorologiques sont appropriées. Si une interruption est inévitable, il faut prévoir suffisamment de surfaces ou travaux de réserve – éventuellement en dehors de la récolte du bois si les travaux sont exécutés en propre par le maître d'ouvrage. La qualité de la planification et de l'organisation des interventions ainsi que la préparation des travaux joue en l'occurrence un rôle déterminant. Il convient d'établir une vue d'ensemble des coupes de bois à effectuer et de les classer en fonction de la sensibilité à la compaction des stations concernées et de l'urgence des travaux. En outre, il est important pour la planification que les coupes soient martelées et qu'une estimation des assortiments à exploiter soit disponible. Dans les conditions d'exploitation usuelles en Suisse caractérisées par des surfaces morcelées, une planification des interventions coordonnée au-delà du triage est nécessaire pour pouvoir disposer d'un choix suffisant de surfaces de réserve et assurer une organisation efficace.

L'interruption des travaux dans l'intérêt de la préservation des sols occasionne des dépenses considérables au niveau organisationnel et financier

Des mesures de planification et d'organisation peuvent aider à atténuer les conséquences financières d'une interruption des travaux

#### 6.4.5 Réception des travaux

Le contrôle de qualité dans le cadre de la récolte du bois porte en général sur différents aspects. La protection du sol en est un. Il s'agit notamment de contrôler les exigences concernant les points suivants:

- > assortiments façonnés (surtout quantité et qualité);
- > peuplement restant (surtout blessures à l'écorce, dégâts au rajeunissement);
- > état des routes forestières (surtout salissures, dégâts);
- > état du sol forestier (surtout ornières).

Le plus logique est d'intégrer la surveillance des aspects liés à la protection physique des sols dans le contrôle de qualité global. Cette surveillance s'opère aussi bien de façon permanente pour pouvoir intervenir dans le processus de récolte du bois, qu'à la fin des travaux lors de la réception à proprement parler. Cette réception consiste en une comparaison de l'état des layons avant et après le passage des engins et en une comparaison après le passage des engins par rapport aux accords contractuels ou internes à l'entreprise. Le relevé de l'état avant et après les interventions devrait être documenté par écrit dans l'attribution du travail. Le classement par types d'ornières offre en l'occurrence une base très utile (cf. 6.4.1). La comparaison de l'état des layons peut être plus ou moins détaillée ou précise, mais elle devrait être faite conjointement par des représentants autorisés du mandant et du mandataire avant le début et à la fin des travaux de récolte, et consignée dans un protocole.

Pour pouvoir évaluer la qualité des travaux du point de vue de la préservation du sol, l'état initial des layons doit être documenté

#### 6.5 Mesures incitatives de l'État

La politique environnementale dispose de différents instruments permettant d'améliorer la mise en œuvre des prescriptions écologiques et environnementales. Les principaux sont les mesures étatiques visant les auteurs des atteintes à l'environnement. Selon Bergen et al. (2013), les instruments suivants sont particulièrement importants:

- > *charges*: l'auteur ne doit pas dépasser une limite maximale absolue d'atteintes;
- > *subventions*: l'auteur reçoit un paiement pour les atteintes qu'il a évitées;
- > *redevances*: l'auteur doit effectuer un paiement pour les atteintes qu'il a causées;
- > *certificats*: l'auteur a le droit de causer des atteintes dans des limites bien déterminées, dépendant de la quantité des autorisations qu'il détient (certificats).

Bergen et al. (2013) ont procédé à une évaluation générale de ces instruments sur la base des critères de l'effectivité écologique, de l'efficacité économique et de l'acceptation sociale. Ils sont arrivés à la conclusion que les certificats présentent les meilleures caractéristiques en raison de leur effectivité écologique et de leur efficacité économique. En deuxième position viennent les charges, en troisième les redevances, les subventions occupant la dernière place du classement. Reste à savoir quels instruments sont pertinents et importants pour la protection des sols contre les atteintes physiques en forêt.

Les certificats et les redevances sont inappropriés, car prévoir un droit de porter atteinte au sol pour protéger celui-ci n'aurait pas de sens. Les subventions sont envisageables si elles visent à dédommager des prestations particulières en faveur de la protection du sol. Il peut s'agir notamment d'indemnités pour des investissements spéciaux (p. ex. équipements supplémentaires pour engins forestiers destinés à ménager le sol) ou pour des mesures particulières (p. ex. débardage au câble-grue uniquement pour des raisons de protection du sol).

S'agissant des charges, le service forestier cantonal a la possibilité de fixer des conditions en matière de protection physique des sols dans le permis de coupe (Iten 2009). Les normes de qualités présentées au point 6.2.5 pourraient ainsi être concrétisées sous forme de charges. En cas de non-respect de ces charges, des sanctions sont à prévoir, par exemple sous forme d'amendes, de dommages-intérêts (p. ex. paiement des mesures de régénération nécessaires), de résiliation ou encore d'exclusion des futures adjudications. À titre d'exemple, un accord interne du «Staatsbetrieb Sachsenforst» interdit la circulation sur le sol forestier en dehors des layons et stipule qu'en cas d'inobservation de cette règle, la rémunération convenue pour le débardage peut être réduite de 10 %, conformément aux dispositions contractuelles régissant le travail à la tâche dans la récolte des bois.

La mise en œuvre des exigences de la protection des sols à l'aide de ces instruments doit être contrôlée par les autorités. Il convient de définir à cet effet des procédures fixant les modalités des contrôles de l'état du sol (qui, comment, où, à quelle fréquence). Les normes en tant que critères de la qualité du travail peuvent là aussi fournir une base importante pour l'élaboration de ces procédures. Les contrôles peuvent se faire par sondages ou seulement dans les zones sensibles, ou encore être liés aux coupes de bois assujetties à des charges concernant la protection des sols. Quelle que soit la procédure choisie, un relevé objectif de l'état du sol avant et après l'intervention est nécessaire.

L'autorisation de coupe peut être assortie de charges concernant la protection des sols

## 6.6 Les coûts de la protection des sols contre les atteintes physiques

Les bénéfices de la protection physique des sols pour l'économie forestière et la société – la conservation à long terme du sol en forêt en tant que base de production – sont à mettre en regard avec ses coûts. La connaissance des coûts fournit une importante base quantitative pour les décisions relatives aux mesures d'exploitation. Dans le cadre de premières analyses menées en Suisse, les mesures ayant des répercussions financières ont été identifiées et classées de façon systématique par Spjevak et Thees (2009a). La structure des mesures (tab. 14) facilite l'estimation de la consommation des ressources. L'accent est mis sur les mesures liées à l'entreprise. Une distinction est faite entre les mesures d'investissement et celles concernant chaque coupe de bois. Les mesures de base au niveau de l'entreprise concernent la formation continue, l'appréciation de l'état du sol et le contrôle des travaux à la fin de chaque coupe de bois. Toutes les autres mesures sont ici considérées comme optionnelles, c'est-à-dire qu'il s'agira de les choisir au cas par cas suivant les conditions de station et en fonction de l'entreprise. Selon de premiers modèles de calcul du WSL, les coûts minimaux issus de l'application des mesures de base indiquées ci-dessus s'élèvent à environ 5 francs par ha et par an ou 0,5 francs par m<sup>3</sup>, ce qui représente à peine 1 % des dépenses moyennes

liées à la récolte du bois. Ces coûts de base relativement modérés peuvent néanmoins augmenter très fortement en présence de conditions difficiles et d'exigences élevées.

**Tab. 14 > Aperçu des mesures ayant des répercussions financières dans le cadre de la protection physique des sols**

*Les coûts minimaux résultent des mesures de base indiquées dans le tableau.*

	Investissements supplémentaires	Mesures supplémentaires pour chaque coupe de bois impliquant des coûts fixes et des coûts variables	
Planification (entreprise)	<b>Formation continue pour chef d'exploitation</b>	Détermination de surfaces de réserve	
	Cartographie des stations sur la base de la praticabilité des sols	Évaluation de la performance environnementale concernant la protection des sols <sup>1</sup>	
	Marquage et documentation de la desserte fine		
Pilotage et exécution (entreprise)	<b>Formation continue pour conducteur d'engins</b>	<b>Appréciation de l'état du sol → décision de rouler ou non</b>	Renoncer partiellement au passage avec des engins → distances de treuillage augmentées au débardage
	Logiciel permettant d'apprécier la praticabilité du terrain et l'impact des engins sur le sol <sup>2</sup>	Interruption des travaux et intervention sur des surfaces de réserves	Débarder en réduisant la charge, ou avec un engin plus petit
	Instruments de mesures de la teneur en eau des sols	Mesures de régénération	Passer d'un système de récolte au sol à un système de récolte par câble
	Équipements spéciaux pour les engins: pneus plus larges, installation de réglage automatique de la pression de gonflage des pneus, semi-chenilles Bogie, treuil de halage	<b>Contrôle à la fin des travaux</b>	
Surveillance (canton)		Contrôles	

<sup>1</sup> L'évaluation de la performance environnementale est un processus de gestion facultatif destiné à vérifier et à améliorer en permanence les critères environnementaux fixés pour l'exploitation forestière. Un critère important est l'étendue tolérable du type d'ornièr 3 en fonction des conditions de station.

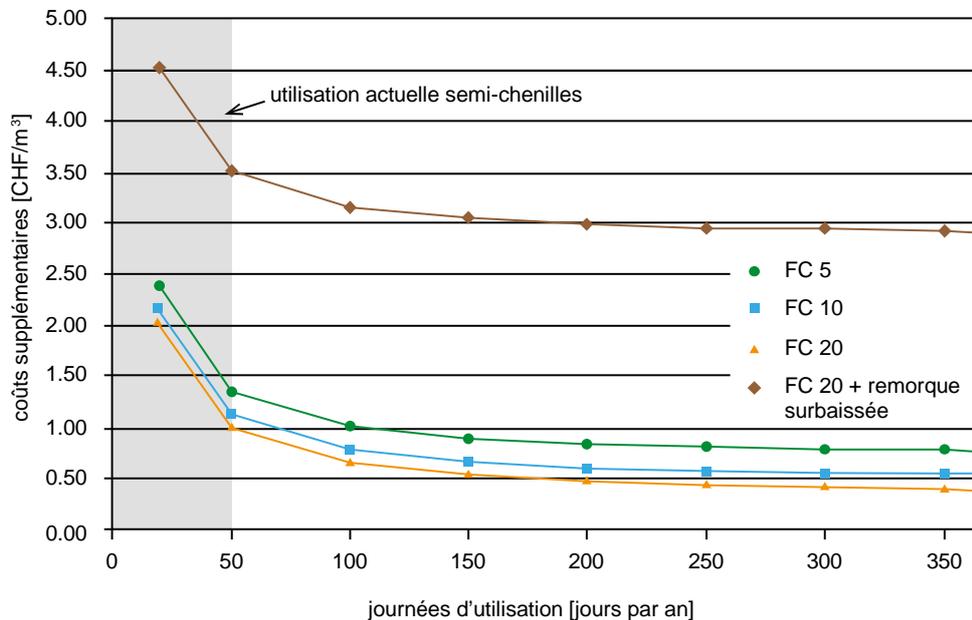
<sup>2</sup> Il existe des prototypes de ce genre de logiciel, comme les programmes PrAllCon et ProFor (cf. 6.2.7).

L'utilisation de semi-chenilles Bogie, initialement conçues pour améliorer la traction, prend de plus en plus d'importance dans la protection des sols. Par exemple, la stratégie de préservation durable de la fonctionnalité des layons du «Landesbetrieb ForstBW» (ForstBW 2012) prévoit que les engins de débardage à 6/8 roues appelés à circuler sur des stations sensibles à la compaction doivent en principe être équipés de semi-chenilles. La fig. 72 présente une estimation des coûts d'utilisation. Contrairement aux roues larges et aux installations de réglage automatique de la pression de gonflage des pneus, les semi-chenilles Bogie ne sont pas fixées en permanence sur le véhicule. Leur durée d'utilisation moyenne est très variable et difficile à évaluer; selon des informations issues de la pratique, elle est actuellement en Suisse de 50 jours par an au maximum. Les coûts supplémentaires des semi-chenilles calculés sur la base de cette utilisation varient entre 1,00 et 1,40 fr./m<sup>3</sup>, suivant le nombre de montages et démontages. Si les semi-chenilles doivent être montées et démontées tous les cinq

jours, les coûts seront plus élevés que si les changements sont moins fréquents. Pour le cas de figure d'un changement tous les 20 jours, les coûts supplémentaires d'un transport sur remorque surbaissée par rapport au déplacement autonome du véhicule ont également été calculés. On est parti de l'hypothèse que pendant un cycle de montage des semi-chenilles, le porteur ne se déplaçait pas par ses propres moyens, mais était transporté sur une remorque surbaissée.

**Fig. 72 > Coûts supplémentaires du bois exploité avec des semi-chenilles Bogie (BB)**

*FC: fréquence de changement des semi-chenilles tous les 5, 10 et 20 jours. En gris: durée d'utilisation moyenne en Suisse.*



## 7 > Situation actuelle et mesures nécessaires à l'avenir

---

Au cours des dix dernières années, d'importants efforts ont été déployés en Suisse pour sensibiliser tous les acteurs de l'exploitation des forêts à la problématique de la protection des sols lors de la récolte du bois, notamment en raison de la mécanisation croissante de la récolte et des dégradations causées par les véhicules à la suite de l'évacuation du bois mis à terre par l'ouragan Lothar fin 1999. À la même époque est entrée en vigueur l'ordonnance révisée sur la protection des sols (OSol 1998), instrument d'exécution qui comprend aussi la protection des sols contre les atteintes physiques. Des cours de formation initiale et de formation continue, des notices et des articles spécialisés informent les acteurs de l'exploitation des forêts notamment (1) de la structure et du principe de fonctionnement des sols, (2) des principes de classement des différents types d'ornières (3) et des mesures techniques et organisationnelles permettant d'améliorer la protection du sol. Tous les acteurs ont été associés à cette démarche, des personnes en formation aux chefs d'exploitation, propriétaires forestiers et leurs représentants, sans oublier les forestiers-bûcherons et les conducteurs d'engins. Dans plusieurs cantons, la mise en pratique de la protection des sols est déjà bien avancée.

À partir d'études approfondies dans les domaines de la physique et de la biologie du sol, une typologie des ornières adaptée à la pratique a été développée en fonction de leur impact écologique. Ces études ont permis de définir un type d'ornières (type 3) laissant supposer l'existence d'atteintes persistantes à la fertilité des sols et signalant ainsi un dégât écologique aux sols. Le type d'ornière 3 concrétise un état non tolérable du point de vue législatif. Selon les relevés des ornières effectués dans le cadre du troisième Inventaire forestier national (Brändli 2010), la situation se présente favorablement sur l'ensemble de l'aire forestière suisse accessible aux véhicules, même si des atteintes graves aux sols ont été observées ponctuellement.

Les changements climatiques pourraient avoir pour conséquence des sols très humides et rarement gelés en automne et en hiver, principale période d'abattage. La récolte du bois pourrait ainsi devenir plus difficile, voire impossible pendant de longues périodes. En outre, la société et la politique se montrent de plus en plus sensibles aux dégâts causés aux sols lors des travaux forestiers. Parallèlement à cela, il faut s'attendre à une augmentation de la demande de bois en tant que ressource renouvelable. Cette situation accroît les risques écologiques, économiques et politiques mais offre aussi des opportunités pour l'exploitation des forêts. L'objectif doit être de protéger durablement le sol en tant que base de production, tout en veillant à ne pas compromettre l'utilisation des forêts pour des raisons techniques ou économiques. Les exigences relatives à la protection des sols en forêt vont augmenter et il faut s'attendre à ce que les mesures qui en découlent deviennent plus difficiles et plus coûteuses à l'avenir.

La nécessité de protéger durablement le sol en tant que base de production est reconnue

Les types d'ornières comme indicateurs des atteintes au sol

Les changements climatiques pourraient entraîner une augmentation des dépenses pour la protection des sols

Compte tenu de la situation décrite ci-dessus, du travail accompli depuis plusieurs années dans le cadre du projet «protection physique des sols en forêt» ainsi que des échanges avec la pratique forestière suisse, voici les mesures qu'il faudra prendre:

(1) Poursuivre la formation initiale et la formation continue ainsi que la communication au public afin de pouvoir au moins conserver et si possible améliorer l'état actuel.

(2) Poursuivre le développement des bases et instruments de planification et de gestion:

La pratique a besoin de meilleures bases cartographiques pour planifier les mesures de protection du sol et notamment de cartes des sols, de cartes des stations forestières et de cartes de la sensibilité des sols à la compaction établies à partir des deux cartes précédentes. Actuellement, ces bases sont plus ou moins développées et parfois encore très rudimentaires selon les cantons.

Les connaissances en physique et en biologie du sol sont encore lacunaires notamment sur les conséquences de l'augmentation de la fréquence des passages sur des layons plus espacés ou sur l'utilisation de différents types de semi-chenilles Bogie.

Il faudrait en outre développer des stratégies pour mieux gérer les conséquences des changements climatiques sur la protection des sols lors de la récolte du bois, par exemple de manière à ce que l'utilisation des engins puisse être planifiée avec flexibilité et à grande échelle.

Il est également nécessaire de disposer de meilleures bases de planification pour évaluer les conséquences économiques de la mise en œuvre des mesures de protection des sols. Ces bases devront tenir compte non seulement des coûts, mais aussi des avantages à long terme de ces mesures.

La pratique a encore et toujours besoin d'un instrument simple pour évaluer la praticabilité des layons avant l'utilisation quotidienne des engins forestiers. Les approches présentées dans le cadre du projet «protection physique des sols en forêt» pourraient être développées dans cette optique.

(3) Améliorer les conditions générales par des mesures institutionnelles et politiques:

En principe, le propriétaire forestier est responsable de la protection du sol. Actuellement, la question de savoir qui assume les coûts de cette protection est en général réglée par le marché. Pour éviter et corriger les conséquences indésirables qui en résultent, il conviendrait d'examiner la possibilité de prévoir des mesures de nature institutionnelle, comme encourager les techniques de récolte particulièrement respectueuses du sol ou créer un instrument de péréquation pour financer les coûts supplémentaires correspondants.

**Des recherches sont nécessaires pour développer une méthode permettant de déterminer la praticabilité des sols au quotidien**

La création d'une norme de qualité pourrait apporter divers avantages compte tenu de l'augmentation des risques et des exigences dans le domaine de la protection des sols. L'élaboration d'une norme définissant les dégâts à éviter pourrait aboutir à un consensus entre les acteurs (propriétaires forestiers, population et entrepreneurs forestiers). Ce consensus devrait encourager à protéger le sol, tenir compte de l'équilibre entre les trois dimensions de la durabilité (écologie, économie, aspects sociaux) et garantir des conditions de concurrence identiques aux prestataires de services dans le domaine forestier. Il ne serait pas judicieux d'après les auteurs de prescrire des valeurs limites détaillées, comme des charges maximales par roue ou des distances fixes entre les layons. Les normes devraient plutôt servir à définir dans quel état doit être le sol après le passage des véhicules. Le type d'ornièrre 3 offre en l'occurrence une base de référence appropriée. L'exploitant pourrait ainsi décider lui-même par quel moyen il entend atteindre cet objectif. Dans le cadre du processus d'élaboration de cette norme, il s'agira de déterminer, en collaboration avec tous les acteurs de la pratique et des milieux scientifiques, la proportion tolérable d'ornières de type 3 et d'établir si cette proportion doit être définie en fonction de la station. Enfin, cette norme devra être intégrée aux processus de gestion et de contrôle de la récolte des bois sous une forme adaptée à la pratique.

Une question très discutée depuis quelques temps en lien avec l'exploitation d'arbres entiers et l'utilisation des branches et du menu bois à des fins énergétiques est celle de l'exportation de substances nutritives en-dehors du peuplement. Ces discussions ont abouti à la conclusion que les branches et le menu bois devaient rester à l'emplacement des arbres récoltés. Une interdiction générale d'utilisation de ces parties d'arbres remettrait notamment en question l'emploi de tapis de branches sur les layons pour protéger le sol au passage des véhicules. Les auteurs estiment que des modèles permettant d'évaluer l'absorption de substances nutritives et les possibilités d'intervention en fonction de la station pourraient contribuer à résoudre ces conflits d'intérêts de manière nuancée et à éviter ainsi les inconvénients d'une interdiction générale.

Les solutions aux problématiques évoquées ci-dessus sont généralement complexes et ne peuvent être élaborées qu'en étroite collaboration avec tous les acteurs.

La part tolérable d'ornières de type 3 doit encore être discutée

---

## > Annexes

### A1 Personnes ayant participé au projet

#### A1-1 Collaborateurs du projet

WSL, unité de recherche Fonctions des sols et protection des sols

Andreas Freuler  
Beat Frey  
Peter Lüscher  
Christine Meyer  
Stéphane Sciacca (jusqu'en 2009)  
Stephan Zimmermann

WSL, unité de recherche Systèmes de production forestière

Fritz Frutig  
Sandra Thöny (Spjevak) (jusqu'en 2010)  
Oliver Thees

Université technique de Munich  
Lehrstuhl für forstliche Arbeitswissenschaft und Angewandte Informatik

Johann Kremer  
Dietmar Matthies (jusqu'en 2011)

#### A1-2 Groupe d'accompagnement du projet Protection physique des sols en forêt

Peter Ammann  
canton d'Argovie, division des forêts  
section gestion forestière  
Aarau  
(remplacé en 2012 par Andreas Freuler)

Franz Borer  
canton de Soleure, office de l'environnement  
service de la protection des sols  
Soleure  
(remplacé en 2012 par Gaby von Rohr)

Joseph Brügger  
bureau d'ingénieurs Philipona & Brügger (dès 2013 pbplan)  
Plaffeien

---

Jean-Pierre Clément  
Office fédéral de l'environnement OFEV  
Section Sols  
Berne  
(remplacé en 2014 par Corsin Lang)

Andreas Freuler  
canton d'Argovie, division des forêts  
section gestion forestière  
Aarau  
(depuis 2012 en remplacement de Peter Ammann)

Felix Lüscher  
Oberallmeindkorporation Schwyz  
responsable du secteur forêt  
Schwyz

Rolf Lüscher  
OFOR Office des forêts  
Division forestière 5  
Riggisberg

Hans Peter Schaffer  
Office fédéral de l'environnement OFEV  
Division Forêts  
Berne  
(remplacé en 2013 par Silvio Schmid)

Bernard Schmidt  
Centre forestier de formation  
Lyss

Silvio Schmid  
Office fédéral de l'environnement OFEV  
Division Forêts  
Berne  
(depuis 2012 à 2015 en remplacement de Hans Peter Schaffer)

Gaby von Rohr  
canton de Soleure, office de l'environnement  
service de la protection des sols  
Soleure  
(depuis 2012 en remplacement de Franz Borer)

Pius Wiss  
Président de l'association Entrepreneurs forestiers Suisse  
Dietwil

---

Martin Ziesak  
Haute école spécialisée bernoise  
Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires HAFL  
Zollikofen  
(depuis 2012 comme représentant de l'HAFL)

Martin Zürrer  
myx GmbH, Bodenbiologie und Umweltökologie  
Uster

Experts externes

Heribert Jacke, Abteilung für Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie,  
Universität Göttingen, Allemagne

Siegmar Lelek, Forstlicher Maschinenbetrieb Schrofel, Baiersbronn, Allemagne

Joachim Schreiber, direction du Staatsforstbetrieb Sachsenforst, Königstein,  
Allemagne

**A1-3 Groupe de formation pour le projet Protection physique des sols en forêt**

Andreas Freuler  
canton d'Argovie, division des forêts  
section gestion forestière  
Aarau  
(depuis 2011 en remplacement de Benjamin Suter)

Fritz Frutig  
Institut de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL  
Systèmes de production forestière  
Birmensdorf

Daniela Jost  
Office fédéral de l'environnement OFEV  
Section Questions générales et métiers forestiers  
Berne

Peter Lüscher  
Institut de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL  
Unité de recherche Sols forestiers et biogéochimie  
Birmensdorf

Rolf Lüscher  
OFOR Office des forêts  
Division forestière 5  
Riggisberg

Bernard Schmidt  
Centre forestier de formation  
Lyss

Benjamin Suter  
canton d'Argovie, division des forêts  
section conservation des forêts  
Aarau  
(jusqu'en 2011, représentant des responsables cantonaux de la formation)

## **A2 Publications parues dans le cadre du projet «Protection physique des sols forestiers»**

### **2005**

Lüscher P. 2005: Bodenverdichtung. In: Indermühle M., Raetz P., Volz R. 2005: LOTHAR Ursächliche Zusammenhänge und Risikoentwicklung. Synthese des Teilprogramm 6. Umwelt-Materialien Nr. 184. OFEFP, Berne. 145 p.

Lüscher P. 2005: Regenerationsfähigkeit von Bodenschäden im Wald. In: Indermühle M., Raetz P., Volz R. 2005: LOTHAR Ursächliche Zusammenhänge und Risikoentwicklung. Synthese des Teilprogramm 6. Umwelt-Materialien Nr. 184. OFEFP, Berne. 145 p.

Lüscher P., Thees O., Frutig F., Sciacca S. 2005: Physikalischer Bodenschutz im Wald als Teil der Arbeitsqualität. SSP Bull. 28: 11–14.

Lüscher P., Thees O., Frutig F. 2005: Physikalischer Bodenschutz im Wald ist kein Luxus. Zürcher Wald 6: 10–13.

### **2007**

Kaufmann G., Lüscher P. 2007: Mechanische Belastung von Waldböden. Rückblick auf eine Tagung. Wald und Holz, 2: 32–33.

Lüscher P., Kaufmann G. 2007: Mechanische Belastung von Waldböden: Ursachen und Schadensminimierung. SZF, 158, 12: 444–445.

Sciacca S., Frey B., Kremer J., Lüscher P. 2007: Physikalischer Bodenschutz im Wald: Zwischen Beeinträchtigung und Schaden. Mitt. Dtsch. Bodenkdl. Ges. 110, 2: 711–712.

Neue Zürcher Zeitung, n° 83, 11.04.2007: Der Bodenschutz im Wald: Schadstoffanreicherung, Bodenversauerung und Bodenverdichtung als zentrale Gefährdungs-Faktoren.

**2008**

Lüscher P., Kaufmann G. 2008: Mechanische Belastung von Waldböden: Ursachen und Schadensminimierung. *Wald und Holz* 1: 44–45.

Lüscher P., Kaufmann G. 2008: Waldböden reagieren hoch sensibel. *Land und Forst*, 20: 52.

Frey B., Lüscher P. 2008: Mikrobiologische Untersuchungen in Rückegassen. *LWF aktuell* 67: 5–7.

Lüscher P., Sciacca S., Halter M. 2008: Regeneration von Wurzelraumfunktionen nach mechanischer Belastung. *LWF aktuell* 67: 11–12.

Lüscher P., Sciacca S., Thees O. 2008: Bestrebungen zur Verbesserung des Bodenschutzes in der Schweiz. *LWF aktuell* 67: 19–21.

Lüscher P., Sciacca S., Frutig F. 2008: Bodenschutz-Ausbildung in der Schweiz. *LWF aktuell* 67: 33–34.

Rapport annuel du WSL 2008: Mieux connaître les sols pour mieux les protéger, p. 19.

**2009**

Frey B., Kremer J., Rüdert A., Sciacca S., Matthies D., Lüscher P. 2009: Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. *European Journal of Soil Biology*. 45: 312–320.

Kremer J., Frey B., Lüscher P. 2009: Bodenstrukturveränderung oder Bodenschaden – wo liegt die Grenze? *Freiburger Forstliche Forschung*, Heft 79: 39–45.

Lüscher P., Sciacca S. 2009: Bodenbeeinträchtigung im Wald: Probleme und Lösungsansätze in der Schweiz. *Freiburger Forstliche Forschung*, Heft 79: 11–18.

Lüscher P., Borer F., Blaser P. 2009: Langfristige Beeinträchtigung der Fruchtbarkeit des Waldbodens durch mechanische Belastung. In: Thees O., Lemm R. (Hrsg) 2009: *Management zukunftsfähige Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente*. Birmensdorf, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL; Zurich, vdf Hochschulverlag. 816 p.

Lüscher P., Frutig F., Sciacca S., Spjevak S., Thees O. 2009: Physikalischer Bodenschutz im Wald. *Bodenschutz beim Einsatz von Forstmaschinen*. *Merkbl. Prax.* 45. 12 p.

Lüscher P., Frutig F., Sciacca S., Spjevak S., Thees O. 2009: Protection physique des sols en forêt. *Protection des sols lors de l'utilisation d'engins forestiers*. *Not. prat.* 45. 12 p.

Lüscher P., Frey B., Sciacca S., Frutig F. 2009: Physikalischer Bodenschutz im Wald – Datengrundlagen und Umsetzungsstrategie. In: Böden – eine endliche Ressource. Jahrestagung der DBG, Bonn, septembre 2009.

Nötzli K., Frutig F., Lüscher P. 2009: Feinerschliessung – der Schlüssel zur bodenschonenden Holzernte. Zürcher Wald 1: 22–25.

Spjevak S., Thees O., Lüscher P. 2009: Modellgestützte Bestimmung des Nutzens von Forstmaschinenausrüstungen für den physikalischen Bodenschutz. In: Thees O., Lemm R. (Hrsg) 2009: Management zukunftsfähige Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL; Zürich, vdf Hochschulverlag. 816 p.

## 2010

Frey B. 2010: Bewertung von befahrungsbedingten Bodenveränderungen mittels Bakterienpopulationen. Schweiz. Z. Forstwesen 161, 12: 498–503.

Frey B., Kremer J., Sciacca S., Matthies D., Lüscher P. 2010: Soil bacterial community structure reacts to compaction of soils with heavy logging machinery. Bulletin SSP 30: 109–112.

Lüscher P., Frutig F., Sciacca S., Spjevak S., Thees O. 2010: Protezione del suolo durante le utilizzazioni forestali. Prima parte: suoli, danni e indicatori. Sherwood 16, 1: 35–40.

Lüscher P., Frutig F., Sciacca S., Spjevak S., Thees O. 2010: Protezione del suolo durante le utilizzazioni forestali. Seconda parte: responsabilità e misure. Sherwood 16, 2: 21–27.

Lüscher P., Frutig F., Sciacca S., Spjevak S., Thees O. 2010: Physikalischer Bodenschutz im Wald. Bodenschutz beim Einsatz von Forstmaschinen. 2. Aufl. Merkbl. Prax. 45. 12 p.

Lüscher P. 2010: Bodenschutz im Wald: Die Beeinträchtigung des Waldbodens beim Einsatz von Forstmaschinen aus ökologischer Sicht. In Mosimann T., Kuhnt G. (Hrsg.): Waldböden und Kulturlandschaft im Baselbieter Jura. Exkursionsführer zur Jahresexkursion der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz am 27. und 28. Aug. 2010. Geosynthesis, Sonderband 7; Hannover, Inst. für Physische Geographie und Landschaftsökologie.

Lüscher P. 2010: Bodenveränderungen und Typisierung von Fahrspuren nach physikalischer Belastung. Schweiz. Z. Forstwesen 161, 12: 504–509.

Sciacca S., Halter M., Frey B., Brunner I., Lüscher P. 2010: Regeneration von Fahrspuren nach mechanischer Belastung. Bulletin SSP 30: 37–38.

von Wilpert K., Schäffer J., Schack-Kirchner H., Meyer C., Lüscher P., Schulin R. 2010: Regeneration von Befahrungsschäden, biologische Sanierung von Rückegassen. *AFZ-Der Wald*, 18: 42–43.

## 2011

Freuler A., Lüscher P., Ammann P. 2011: Verwendung von Bodenkarten 1:25 000 beim Vollzug des physikalischen Bodenschutzes im Wald im Kanton Aargau. *Bulletin SSP*, 31: 22–24.

Frey B., Niklaus P.A., Kremer J., Lüscher P., Zimmermann S. 2011: Heavy-machinery traffic impacts methane emissions as well as methanogen abundance and community structure in oxic forest soils. *Applied and Environmental Microbiology* 77: 6060–6068.

Lüscher P., Freuler A. 2011: Waldboden unter Druck. *Kommunalmagazin* 1: 28–30.

Meyer C., Lüscher P., Schulin R. 2011: Regeneration von mechanisch verdichtetem Boden unter Fahrspuren durch Sanierungsmassnahmen. *Bulletin SSP* 31: 12–16.

Meyer C., Lüscher P., Schulin R. 2011: Bodenverdichtung unter Fahrspuren – Strukturregeneration durch Bepflanzung mit *Alnus glutinosa*. In: *Böden verstehen, Böden nutzen, Böden fit machen*. Jahrestagung der DBG, Berlin, September 2011.

Meyer C., Lüscher P., Schulin R. 2011: Verdichteten Boden mit Schwarzerlen regenerieren? *Wald und Holz* 10: 40–43.

Meyer C., Lüscher P., Schulin R. 2011: Bodenverdichtung unter Fahrspuren – Strukturregeneration durch Bepflanzung mit *Alnus glutinosa*. *Bulletin SSP* 32: 15–19.

Ofner M., Meyer C., Krebs R., Lüscher P. 2011: Die physiologische Aktivität von *Alnus glutinosa* auf verdichteten Waldböden. *Bulletin SSP* 32: 13–14.

## 2012

Meyer C., Lüscher P., Schulin R. 2012: Einsatz von Schwarzerlen zur Regeneration von mechanisch verdichteten Waldböden. *Hochschule Osnabrück*, Heft 2012: 27–38.

## 2013

Augustin S., Schmid S. 2013: Bodenschutz im Wald – Beitrag der Waldpolitik 2020 des Bundes. In: *Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung*. WSL Ber. 6. 116 p.

Blum W.E.H. 2013: Bodenschutz in Europa. In: *Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung*. WSL Ber. 6. 116 p.

Clément J.-P. 2013: Protection du sol dans les forêts suisses. In: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. WSL Ber. 6. 116 p.

Freuler A. 2013: Umsetzung des Bodenschutzes im Aargauer Wald. In: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. WSL Ber. 6. 116 p.

Frey B., Hartmann M. 2013: Biodiversität von Waldböden – Auswirkungen des Einsatzes von Holzerntemaschinen auf mikrobielle Gemeinschaften. In: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. WSL Ber. 6. 116 p.

Lüscher P. 2013: Nur wer den Boden kennt, kann ihn schützen und nachhaltig nutzen. Gedanken zur «Mechanischen Belastung von Waldböden». In: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. WSL Ber. 6. 116 p.

Morier A. 2013: Umsetzung des Bodenschutzes im Aargauer Wald. In: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. WSL Ber. 6. 116 p.

Schulin R., Meyer C., Lüscher P. 2013: Bodenverdichtung und Bodenstruktur. In: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. WSL Ber. 6. 116 p.

Thees O., Olschewski R. 2013: Ökonomische Überlegungen zum physikalischen Bodenschutz im Wald. In: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. WSL Ber. 6. 116 p.

von Rohr G., Margreth S., Hauert C. 2013: Bodeninformationen für die Waldwirtschaft im Kanton Solothurn. In: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. WSL Ber. 6. 116 p.

## 2014

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

Meyer C., Lüscher P., Schulin R. 2014: Enhancing the regeneration of compacted forest soils by planting black alder in skid lane tracks. *European Journal of forest research*, 133: 453–465.

### A3 Clé de détermination des formes d'humus

**Tab. 15 > Détermination des formes d'humus terrestres selon l'Arbeitskreis Standortkartierung (1996) et Frehner et al. (2005)**

Forme d'humus	Mull typique (mull LI)	Mull moder (mull F)	Moder-mull	Moder typique	Moder-humus brut	Humus brut
Code	1	2	3	4	5	6
Horizons	L-Ah-	L-F-Ah-	L-F-(H)-Ah-	L-F-H-Ah-	L-F-H-Ah-	L-F-H-Ah-
Épaisseur de Ah	>8 cm, souvent 10–15 cm	<10 cm, souvent 5–7 cm	2–8 cm, souvent 3–4 cm	<5 cm	généralement <3 cm	généralement <3 cm
Limite de l'horizon Ah (vers le bas)	peu claire à diffuse	claire à très claire	très claire à abrupte			
Épaisseur de F		jusqu'à 1 cm	jusqu'à 3 cm, souvent 1–2 cm	jusqu'à 5 cm, souvent 1–3 cm	jusqu'à 6 cm, souvent 2–4 cm	jusqu'à 8 cm, souvent 2–4 cm
Épaisseur de H			0,2–0,5 cm	0,5–3 cm	2–4 cm	>4 cm, souvent 5–8 cm
Dissociabilité L/F/H de Ah				difficilement séparable	facilement séparable	très facilement séparable, en partie détachable sous forme de mottes

## A4 Terminologie utilisée pour désigner les horizons pédologiques

Tab. 16 > Terminologie utilisée pour désigner les horizons pédologiques

L	Horizon de litière	Débris végétaux généralement non décomposés avec moins de 10 % de substance organique fine
F	Horizon de fermentation	Débris végétaux partiellement décomposés, structure discernable, substance organique fine clairement présente (10–70 %v)
H	Horizon humique	Débris végétaux en grande partie décomposés, structure difficilement discernable, la substance organique fine domine (>70 %v)
A	Horizon organo-minéral de surface	Horizon supérieur du sol minéral; la couleur de la terre minérale fine est assombrie par la matière organique
Ai	Horizon A	Horizon A pauvre en matière organique au stade initial de formation du sol lorsque son développement est encore lacunaire
Ah	Horizon A	Très humique, souvent avec une structure grumeleuse marquée, forte accumulation de matière organique près de la surface du sol en cas d'activité biologique ralentie
Aa	Horizon A	Hydromorphe, formé sous l'action de l'eau à la surface du sol, généralement sans structure discernable, présente parfois des signes d'hydromorphie
B	Horizon minéral d'altération	L'altération et/ou la néoformation d'argile rendent la couleur et la teneur en éléments de cet horizon différentes de celles de la roche-mère
Bv	Horizon d'altération	Horizon fortement brun
Bt	Horizon illuvial	Horizon fortement enrichi en argile suite à la migration par lessivage de cette substance (pellicules argileuses reconnaissables).
Bh	Horizon illuvial	Horizon enrichi en matières humiques suite à l'illuviation (podzolisation), caractérisé par une couleur foncée
Bs	Horizon illuvial	Horizon enrichi en sesquioxydes suite à l'illuviation (podzolisation), caractérisé par une couleur rougeâtre
C	Roche-mère	Roche-mère à l'origine de la pédogenèse. Couche de fond à peine influencée par la pédogenèse
Cv	Roche-mère	Horizon présentant un début d'altération (généralement faible brunissement)
R	Roche-mère	Roche-mère (roche solide, substrat rocheux), à l'origine de la pédogenèse
E	Horizon éluvial (ou d'appauvrissement)	Horizon décoloré suite à une migration de fer et de substance organique (podzolisation)
El	Horizon d'éluviation d'argile	Horizon formé par la migration d'argile (lessivage), appauvri en cette substance
ES	Horizon éluvial	Horizon formé par décoloration hydromorphique, appauvri en sesquioxydes
S	Horizon à eau stagnante	Horizon influencé par l'eau stagnante (nappe perchée), avec des colorations rouge pâle, des taches de rouille et des concrétions de manganèse
Sw	Horizon de stagnation temporaire	Horizon de stagnation temporaire, marbré, à humidité fluctuante (occasionnellement privé d'air), plus perméable que l'horizon sous-jacent Sd
Sd	Horizon du plancher de la nappe	Marbré, plus dense, moins perméable et donc plus souvent privé d'air que l'horizon Sw sous-jacent
G	Horizon gleyeux	Horizon influencé par les eaux de fond (nappe de fond)
Go	Horizon d'oxydation	Horizon présentant des caractéristiques formées dans des conditions oxydantes. Taches de rouille dans la zone d'oscillation de la nappe phréatique ou de la nappe de pente, humidité fluctuante
Gr	Horizon de réduction	Horizon présentant des caractéristiques formées dans des conditions réductrices, colorations de réduction, presque constamment saturé d'eau
AB	Horizon de transition	Horizon présentant les caractéristiques de deux horizons
A-B-C		Représentation d'une succession d'horizons dans un profil pédologique
II	Changement de couches	Symboles supplémentaires indiquant un changement géologique des couches
(..)	Caractéristiques peu marquées	Les horizons aux caractéristiques indistinctes sont mis entre parenthèses

D'après Walthert et al. 2004 et Frehner et al. 2005

**A5 Clé de détermination de la répartition granulométrique (évaluation sur le terrain)**

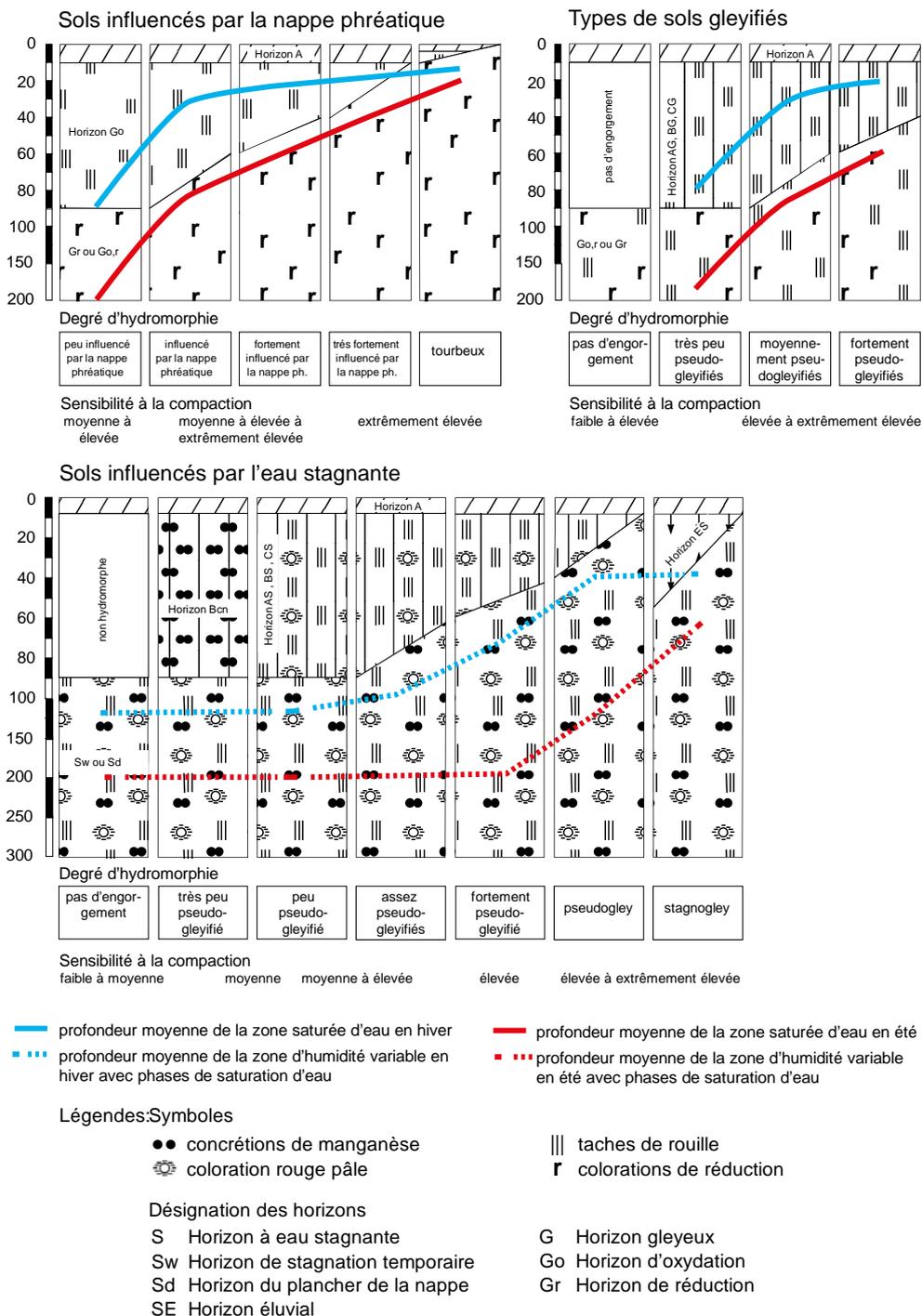
**Tab. 17 > Clé de détermination de la répartition granulométrique (évaluation sur le terrain)**

N°	Abréviation	Texture	Part des fractions [%]		Granulosité (substance fine)	Cohésion	Plasticité (surfaces de frottement)
			ARGILE	SILT			
1	S	SABLE	<5	<50	Grains bien visibles et perceptibles (au toucher), rugueux (d'autant moins rugueux qu'ils sont fins)	Non cohérent, n'adhère pas aux doigts	Non modelable
2	IS	SABLE limoneux	5-10	<50	Grains bien visibles et perceptibles; avec en plus un peu de substance fine	Non cohérent; émoussé-farineux: un peu de substance fine adhère aux doigts	Non modelable
3	sL	LIMON sableux	10-20	<50	Grains bien visibles et perceptibles; nette présence de substance fine	Légèrement cohérent; faiblement visqueux et gras; la substance fine adhère aux doigts	Difficilement modelable; se fendille et s'émiette au modelage
4	L	LIMON	20-30	<50	Grains de sable bien visibles et perceptibles; beaucoup de substance fine	Peu à moyennement cohérent; collant	Modelable; peut être pétri en boudin d'une épaisseur approximative d'un crayon, ensuite se défait
5	U	SILT	<10	>50	Soyeux-farineux; les grains de la fraction sableuse sont visibles et perceptibles	Non cohérent; adhère clairement aux doigts	Non modelable ou difficilement modelable
6	IU	SILT-LIMON	10-30	>50	Les grains de la fraction sableuse sont difficilement ou pas du tout visibles ni perceptibles; beaucoup de substance fine	Faiblement à moyennement cohérent; + surfaces de glissement émoussées; faiblement collant; adhère clairement aux doigts	Non modelable à moyennement modelable
7	tU	SILT-LIMON argileux	>30	>50	Généralement peu ou pas du tout de grains de sable visibles et perceptibles, proportion très élevée de substance fine	Cohérent; malléable entre les doigts; collant	Bien modelable et pétrissable en forme de boudin; surfaces de frottement légèrement luisantes
8	tL	LIMON argileux	30-40	<50	Peu de grains de sable visibles et perceptibles; proportion très élevée de substance fine	Cohérent; malléable entre les doigts; collant	Bien modelable et pétrissable en forme de boudin; surface de frottement légèrement luisante
9	IT	ARGILE limoneuse	40-50	<50	Grains de sable invisibles ou très peu visibles et perceptibles; proportion très élevée de substance fine	Comme 7, mais un peu plus émoussé (plus visqueux-farineux)	Comme 7
10	T	ARGILE	>50	<50	Pas de grains de sable perceptibles	Cohérent; très plastique; collant	Bien modelable et pétrissable en forme de boudin; surface de frottement brillante

## A6 Clé de détermination de l'hydromorphie d'un sol

Fig. 73 > Clé de détermination de l'hydromorphie d'un sol

Les différents degrés d'hydromorphie dans des sols influencés par la nappe phréatique et l'eau stagnante ont été classés en fonction de la sensibilité à la compaction.



Source: Walther et al. (2004), complété par Richard et al. (1983)

**A7 Estimation de la teneur en matière organique de sols minéraux en fonction de la couleur et de la texture**

**Tab. 18 > Valeurs selon le code des couleurs de Munsell (Standard Soil Color Charts 1994) pour des échantillons de sol humides**

Couleur	Valeur	Teneur en matière organique par rapport à la masse en %	
		Sables	Limons
gris clair	>6,5	<1	<1
gris	5-6	<1	1-2
gris foncé	4-4,5	1-2	2-4
gris-noir	3-3,5	2-4	4-8
noir	2-2,5	4-8	8-15

**A8 Parcelles d'essais et sites destinés à la formation dans le cadre du projet «protection physique des sols en forêt»**

**Tab. 19 > Parcelles d'essais**

		Bases disponibles
<b>Plateau suisse</b>		
Messen (SO)	Forstkreis Bucheggberg/Lebern	Carte des sols 1:5000
Ermatingen (TG)	Forstbetrieb Gemeinde Ermatingen	Carte générale des sols 1:50 000 Carte des stations forestières 1:5000
Heiteren (BE)	Burgergemeinde Bern	Carte phytosociologique (ancienne) au 1:5000
<b>Préalpes</b>		
Unteriberg (SZ)	Oberallmeindkorporation Schwyz	

**Tab. 20 > Sites destinés à la formation**

Lieu	Canton	Propriétaire/service forestier
Heiteren	BE	Burggemeinde Bern
Gantrisch	BE	Waldabteilung 5
Tavannes	BE	Division forestière 8
Habsburg	AG	Forstbetrieb Birretholz
Uitikon	ZH	Grün Stadt Zürich
Birmensdorf/WSL	ZH	Holzcorporation Birmensdorf
Ermatingen	TG	Gemeinde Ermatingen
Oberriet	SG	Gemeinde Oberriet
Jona	SG	Waldregion 4
Beringen	SH	Gemeinde Hallau, Stadt Schaffhausen
Cheseaux-Noréaz	VD	Arrondissement 8
Le Mont-sur-Lausanne	VD	CFPF Le Mont-sur-Lausanne, forêt domaniale à Froideville VD

**Tab. 21 > Essais de circulation**

Lieu	Canton	Propriétaire/service forestier
Ermatingen	TG	Gemeinde Ermatingen
Heiteren	BE	Burggemeinde Bern
Bremgarten	AG	Forstbetrieb Wagenrain

**Tab. 22 > Réserves Lothar (projet de régénération)**

Lieu	Canton	Propriétaire/service forestier
Habsburg	AG	Forstbetrieb Birretholz
Messen*	SO	Forstkreis Bucheggberg/Lebern
Brüttelen	BE	Waldabteilung 7

\* Messen-Brunenthal, il ne s'agit pas de la même parcelle que la parcelle d'essai de Messen-Junkholz

## A9 Cours de formation initiale et de formation continue réalisés dans le domaine de la protection des sols contre les atteintes physiques

*Remarque:*

Les désignations «service forestier», «division forestière», etc. englobent tous les acteurs de l'exploitation des forêts: ingénieurs forestiers, forestiers de triage, forestiers-bûcherons, entrepreneurs forestiers, et parfois aussi propriétaires forestiers, représentants d'organisations environnementales, services de la protection des sols, auditeurs de sociétés de certification, etc.

L'indication «service forestier» après le canton signifie que les participants provenaient de toutes les régions du canton.

**Tab. 23 > Cours de formation initiale et de formation continue réalisés dans le domaine de la protection des sols contre les atteintes physiques**

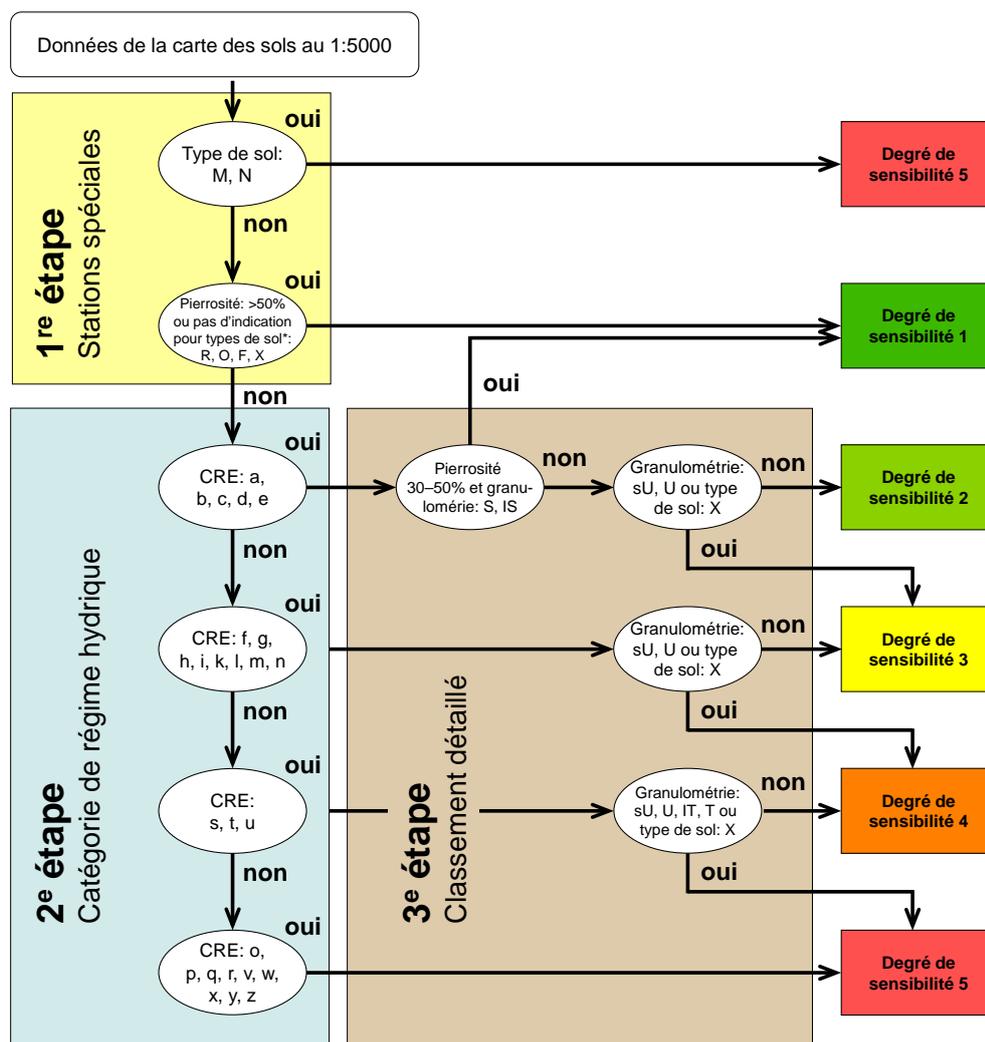
Année	Participants	Lieu du cours	Nombre
2001	Communes bourgeoises de Berne, Bienne et Berthoud	Heiteren	16
2002	Canton BE, Division forestière 5	Gantrisch	21
	Canton BE, Division forestière 5	Heiteren	17
2003	Canton SG, Arrondissement forestier IV	Jona	24
	Canton ZH, Service forestier	Uitikon/Chaire de sylviculture EPF	20
2004	Canton ZH, Service forestier	Uitikon/Chaire de sylviculture EPF	12
	SFS, GT Vegetation.& Boden	Uitikon/Chaire de sylviculture EPF	20
	Canton FR, Service forestier	Heiteren	27
	SANU Bienne, spécialistes de la protection des sols sur les chantiers	Heiteren	27
	SHL Zollikofen, étudiants en foresterie	Heiteren	10
2005	Canton FR, forestiers de triage	Heiteren	18
	Entrepreneur forestier Wiss Dietwil AG	Uitikon/chaire de sylviculture EPF	10
	Canton SG, Service forestier	Oberriet	22
2006	SHL Zollikofen, étudiants en foresterie	Heiteren	15
	Canton SG, Arrondissement forestier V	Oberriet	18
	SFS, GT Vegetation & Boden	Uitikon/Chaire de sylviculture EPF	22
2007	Canton VD, Service forestier	Cheseaux-Noréaz	32
	Groupe suisse de sylviculture de montagne GSM	Plaffeien/Plasselb FR	41
	SFS, GT Vegetation & Boden et responsables de la formation dans les cantons	Birmensdorf/WSL	22
	SANU Bienne, spécialistes de la protection des sols sur les chantiers	Heiteren	24

Année	Participants	Lieu du cours	Nombre
2008	Canton TG, Service forestier (3 x 0,5 jour)	Ermatingen	63
	Canton VD, conducteurs d'engins forestiers (2 x 1 jour)	Le Mont-sur-Lausanne	36
	SFS, GT Vegetation & Boden et formateurs professionnels des cantons	Birmensdorf/WSL	20
	Canton FR, Service forestier	Le Mont-sur-Lausanne	19
2009	EFS, formation de conducteurs d'engins forestiers	Birmensdorf/WSL	8
	Canton ZH, Arrondissement forestier 7	Birmensdorf/WSL	21
	Canton ZH, Arrondissement forestier 6	Opfikon/Bassersdorf	20
2010	Canton ZG, Service forestier (3 x 1 Tag)	Birmensdorf/WSL	70
	Canton SH, Service forestier	Beringen SH	15
	Canton AG, Service forestier (3 x 1 Tag)	Habsburg	200
	Canton NE, forestiers de triage (2 x 1 Tag)	Le Mont-sur-Lausanne	35
	SANU Bienne, spécialistes de la protection des sols sur les chantiers	Heiteren	28
	CEFOR Lyss, étudiants en foresterie	Heiteren	17
	CTF Communauté de travail pour la forêt	Birmensdorf/WSL	20
	Entreprise forestière Daniel Ruch Corcelles-le-Jorat, conducteur de machines	Le Mont-sur-Lausanne	15
2011	EFS, formation de conducteurs d'engins forestiers	Birmensdorf/WSL	14
	CEFOR Maienfeld, étudiants en foresterie	Bettwil AG	27
	Canton BE, Division forestière 8 (2 x 1 jour)	Tavannes	37
	Cantone GE/VD, Service forestier	Le Mont-sur-Lausanne	20
	Canton AG, Service forestier (3 x 1 jour)	Habsburg	200
	Canton SH, Service forestier	Beringen SH	40
	Canton LU, Service forestier	Neudorf LU	65
	EFD Entreprise Forêts domaniales Berne	Heiteren	22
	SANU Bienne, spécialistes de la protection des sols sur les chantiers	Heiteren	29
	Canton BE, Div. forestière. 3, Försterrapport	Allmendingen b. Thun	15
2012	EFS, formation de conducteurs d'engins forestiers	Birmensdorf/WSL	13
	CEFOR Lyss, étudiants en foresterie (d)	Heiteren	20
	CEFOR Lyss, étudiants en foresterie (f)	Tavannes	18
	Canton JU, Service forestier (2 x 1 Tag)	Tavannes	48
	Canton ZH, Arrondissements forestiers 2&3	Birmensdorf/WSL	32
	SANU Bienne, spécialistes de la protection des sols sur les chantiers	Heiteren	34
2013	EFS, formation de conducteurs d'engins forestiers	Birmensdorf/WSL	12
	CEFOR Maienfeld, étudiants en foresterie	Bettwil AG	27
	Canton ZH, Arrondissement forestier 1	Birmensdorf/WSL	30
	Canton BE, Service forestier	Heiteren	20
	Canton SO, Service forestier (2 x 1 Tag)	Messen	45
	EPF Zurich, DUWIS	Birmensdorf/WSL	25
2014	SANU Bienne, spécialistes de la protection des sols sur les chantiers	Muttenz	35
	CEFOR Lyss, étudiants en foresterie (d)	Heiteren	21
	CEFOR Lyss, étudiants en foresterie (f)	Heiteren	18
	CEFOR Maienfeld, étudiants en foresterie	Bettwil AG	28
Nombre total de participants			1900

### A10 Arbre décisionnel pour évaluer la sensibilité des sols à la compaction dans le canton de Soleure

Fig. 74 > Arbre décisionnel pour évaluer la sensibilité des sols à la compaction dans le canton de Soleure

Remarque importante: l'évaluation est valable pour des sols ressuyés atteignant au moins la capacité au champ (force de succion  $\geq 8 \text{ cbar}$ ).



\* Hypothèse: présence de roche ou de gravier directement sous l'horizon A

Source: Amt für Umwelt, canton de Soleure

## > Bibliographie

- Arbeitskreis Standortkartierung 1996: Forstliche Standortaufnahme. Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. 5. Auflage, IHW-Verlag, München. 352 p.
- BayBodSchG 1999: Bayerisches Gesetz zur Ausführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes vom 23. Febr. 1999.
- BayWaldG 2005: Waldgesetz für Bayern (BayWaldG) vom 22. Juli 2005.
- BaySF 2010: Bodenschutz bei den Bayerischen Staatsforsten. 9 p.
- BBodSchG 1998: Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten. Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG). 13 p.
- Bergen V., Löwenstein W., Olschewski R. 2013: Forstökonomie. Volkswirtschaftliche Ansätze für eine vernünftige Umwelt- und Landnutzung. Verlag Franz Vahlen München. 2. Auflage. 477 p.
- BNatSchG 2002: Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege. Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG). 38 p.
- Brändli U.-B. (Red.) 2010: Inventaire forestier national suisse. Résultats du troisième inventaire 2004–2006. Birmensdorf, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL. Berne, Office fédéral de l'environnement, OFEV. 312 p.
- Buchter B., Häusler S., Schulin R., Weisskopf P., Tobias S. 2004: Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen: Positionspapier der BGS-Plattform Bodenschutz. Société suisse de pédologie. Document SPS 13. 56 p.
- Buchter B., Häusler S. 2009: Arbeitshilfe zur Erfassung und Beurteilung von Bodenschadverdichtungen. Arbeitshilfe der Bodenschutzfachstellen der Kantone AG, AI, AR, BE, BL, BS, FR, GE, GR, JU, LU, NE, NW, OW, SG, SH, SO, SZ, TG, TI, VD und ZG sowie des Fürstentums Liechtensteins. 12 p.
- BWaldG 1975: Gesetz zur Erhaltung des Waldes und zur Förderung der Forstwirtschaft (Bundeswaldgesetz) vom 2. Mai 1975. 13 p.
- Commission des communautés européennes 2006: Proposition de directive du Parlement européen et du Conseil définissant un cadre pour la protection des sols et modifiant la directive 2004/35/CE 2004/35/EG. 32 p.
- CP 1937: Code pénal suisse du 21 décembre 1937 (RS 311.0). 170 p.
- Choudhury K., Kraemer R.A., Hollerbühl S., Nickel D. 2001: Machbarkeitsstudie zur Entwicklung von Anforderungen an den nachhaltigen Bodenschutz: Kriterienentwicklung zur Leistungsfähigkeit von Bodenfunktionen. Ecologic, Institut für Internationale und Europäische Umweltpolitik, Berlin. 153 p.
- ForstBW 2003: Richtlinie der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg zur Feinerschliessung von Waldbeständen. 27 p.
- ForstBW 2012: Konzept zur Sicherstellung der dauerhaften Funktionsfähigkeit von Rückegassen für den Landesbetrieb ForstBW. 69 p.
- ForstBW 2013: Merkblatt für den Einsatz von Bogie-Bändern. 11 p.
- Frehner M., Wasser B., Schwitter R. 2005: Gestion durable des forêts de protection. Soins sylvicoles et contrôle des résultats: instructions pratiques. L'environnement pratique. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne. 564 p.
- Frey B., Lüscher P. 2008: Mikrobiologische Untersuchungen in Rückegassen. LWF aktuell 67: 5–7.
- Frey B., Kremer J., Rüdts A., Sciacca S., Matthies D., Lüscher P. 2009: Compaction of forest soil with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. Eur. J. Soil Biol. 45: 312–320.
- Frey B. 2010: Bewertung von befahrungsbedingten Bodenveränderungen mittels Bakterienpopulationen. Schweiz. Z. Forstwesen 161, 12: 498–503.
- Frey B., Niklaus P.A., Kremer J., Lüscher P., Zimmermann S. 2011: Heavy-machinery traffic impacts methane emissions as well as methanogen abundance and community structure in oxic forest soils. Applied and Environmental Microbiology 77: 6060–6068.
- FSC (Hrsg.) 2009: Norme nationale FSC 2008 pour la Suisse. Version finale pour l'approbation par Policy & Standards Unit du Forest Stewardship Council. adoptée par l'assemblée générale du Groupe de Travail FSC Suisse le 13 mars 2009. 41 p.
- Gisi U., Schenker R., Schulin R., Stadelmann F.X., Sticher H. 1997: Bodenökologie. 2. Auflage. Thieme, Stuttgart. 350 p.
- Hartlieb B., Kiehl P., Müller N. 2009: Normung und Standardisierung: Grundlagen. Beuth, Berlin. 146 p.
- Hartmann M., Niklaus P.A., Zimmermann S., Schmutz S., Kremer J., Abarenkov K., Lüscher P., Widmer F., Frey B. 2014: Resistance and resilience of the forest soil microbiome to logging-associated compaction. The ISME Journal 8: 226–244.
- Huber T., Egner J.-P., Zormaier F. 2010: Interforst 2010. LWFaktuell 78: 50–53.
- Iten B. 2009: Gesetzliche Grundlagen für den Bodenschutz bei der Holzernte. In: Thees O., Lemm R. (Hrsg) 2009: Management zukunftsfähige Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL; Zürich, vdf Hochschulverlag. 816 p.
- Jacke H., Ebel A. 2006: PrAllCon: Neues über Reifen im Forst. Teile 1–6. Forst & Technik 1, 2, 3, 4, 5, 6.

- Jacke H., Sengpiel A., Brokmeier A. 2008a: PrAllCon-Track: Zur Wirkung von Bogiebändern auf den Kontaktflächendruck. ifa-Mitteilungen Reihe A, Heft 6.
- Jacke H., Brokmeier H., Sengpiel A. 2008b: PrAllCon-Slash: Druckverteilung von Forstreifen unter Reisigarmierung. ifa-Mitteilungen Reihe A, Heft 5.
- Jacke H., Hittenbeck J., Stiehm C. 2011: Spuren im Wald – Befahrbarkeitsprognosen für Waldböden. Forst&Technik 8: 20–24.
- Jacke H. 2012: PrAllCon-Kalkulator. Excel-basiertes Tool zur Berechnung des Spitzendruckes unter Forstreifen. Universität Göttingen, Abteilung für Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie. [www.uni-forst.gwdg.de/forst/iwf/prallcon.html](http://www.uni-forst.gwdg.de/forst/iwf/prallcon.html)
- Jacke H., Hittenbeck J. 2013: Ein Prüfstand für Kontaktflächendrucke unter Bändern und Gliederketten. Forsttechnische Informationen FTI, 1+2.
- KA5 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung. AG Boden der staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover. 5. Auflage. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart. 438 p.
- Kozłowski T.T. 1999: Soil compaction and growth of woody plants. Scandinavian Journal of Forest Research 14: 596–619.
- Kremer J., Frey B., Lüscher P. 2009: Bodenstrukturveränderungen oder Bodenschaden – Wo liegt die Grenze? In: Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Universität Freiburg; Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (Hrsg.): Walderschließung und Bodenschutz: Bodenverformung, Erosion, Hochwasserschutz. Berichte Freiburger Forstliche Forschung, Heft 79: 39–45.
- Li Q., Allen H.L., Wollum A.G. 2004: Microbial biomass and bacterial functional diversity in forest soils: effects of organic matter removal, compaction and vegetation control, Soil Biol. Biochem. 36: 571–579.
- LFo 1991: loi fédérale du 4 octobre 1991 sur les forêts (RS 921.0).
- LPE 1983: loi fédérale du 7 octobre 1983 sur la protection de l'environnement (RS 814.01).
- Lüscher P., Sciacca S., Frutig F. 2008: Bodenschutz-Ausbildung in der Schweiz. LWF aktuell 67: 33 ss.
- Lüscher P., Frutig F., Sciacca S., Spjevak S., Thees O. 2009a: Protection physique des sols en forêt. Protection des sols lors de l'utilisation d'engins forestiers. Notice pour le praticien 45. Link zu WSL Hauptseite Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL, Birmensdorf. 12 p.
- Lüscher P., Borer F., Blaser P. 2009b: Langfristige Beeinträchtigung der Fruchtbarkeit des Waldbodens durch mechanische Belastung. In: Thees O., Lemm R. (Hrsg) 2009: Management zukunftsfähige Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL; Zürich, vdf Hochschulverlag. 816 p.
- Lüscher P. 2013: Nur wer den Boden kennt, kann ihn schützen und nachhaltig nutzen. Gedanken zur «Mechanischen Belastung von Waldböden». In: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung. WSL Ber. 6. 116 p.
- LWaldG 1995: Waldgesetz für Baden-Württemberg. Landeswaldgesetz.
- Message du 7 juin 1993 relatif à une révision de la loi fédérale sur la protection de l'environnement (LPE), Feuille fédérale 1993, vol. II: 1337 ss.
- Meyer C., Lüscher P., Schulin R. 2014: Enhancing the regeneration of compacted forest soils by planting black alder in skid lane tracks. European Journal of forest research, 133: 453–465.
- OcCC 2008: Le climat change – que faire? Le nouveau rapport des Nations Unies sur le climat (GIEC 2007) et ses principaux résultats dans l'optique de la Suisse. OcCC – Organe consultatif sur les changements climatiques. Berne. 47 p.
- OFEFP 2001: Commentaires concernant l'ordonnance du 1<sup>er</sup> juillet 1998 sur les atteintes portées aux sols (OSol). L'environnement pratique. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, OFEFP. 46 p.
- Office fédéral de l'environnement OFEV 2008: Aide-mémoire en cas de dégâts de tempête. Aide à l'exécution pour la maîtrise des dégâts dus à des tempêtes en forêt classées d'importance nationale. L'environnement pratique n° 0801. Office fédéral de l'environnement, Berne. 3<sup>e</sup> édition révisée. 241 p.
- Office fédéral de l'environnement (OFEV) (éd.) 2013: Politique forestière 2020. Visions, objectifs et mesures pour une gestion durable des forêts suisses. Office fédéral de l'environnement, Berne: 66 p.
- OFo 1992: ordonnance du 30 novembre 1992 sur les forêts (RS 921.01).
- OSol 1998: ordonnance du 1<sup>er</sup> juillet 1998 sur les atteintes portées aux sols (RS 814.12).
- PEFC (Hrsg.) 2008: PEFC Schweiz, Standards für die Waldbewirtschaftung. 35 p.
- Richard F., Lüscher P. 1983/87: Physikalische Eigenschaften von Böden der Schweiz. Lokalförmungen Bd. 3 und Bd. 4. Eidg. Anst. forstl. Versuchswes. Sonderserie.
- Ruef A., Peyer K. 1996: Manuel Cartographie des sols forestiers. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP). Berne, 123 p.

- Schack-Kirchner H., Fenner P.T., Hildebrand E.E. 2007: Different responses in bulk density and saturated hydraulic conductivity to soil deformation by logging machinery on a Ferrasol under native forest, *Soil Use Management*, 23: 286–293.
- Schack-Kirchner H., Hildebrand E.E. 2009: Wie lässt sich das «Verformungsexperiment» in unseren Waldböden stoppen? In: Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Universität Freiburg; Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (Hrsg.): *Walderschliessung und Bodenschutz: Bodenverformung, Erosion, Hochwasserschutz. Berichte Freiburger Forstliche Forschung, Heft 79: 1–9.*
- Schmider P., Winter D., Lüscher P. 2003: *Wälder im Kanton Thurgau. Waldgesellschaften, Waldstandorte, Waldbau. Mit einer Übersichtskarte 1:50 000.* Kanton Thurgau, Departement für Bau und Umwelt, Forstamt (Hrsg.). Thurgauische Naturforschende Gesellschaft, Frauenfeld. 268 p.
- Schnürr-Putz S., Baath E., Guggenberger G., Drake H.L., Küsel K. 2006: Compaction of forest soil by logging machinery favours occurrence of prokaryotes, *FEMS Microbiol. Ecol.* 58: 503–516.
- Schwyzler A., Keller M. 2009: Résultats du troisième Inventaire forestier national IFN3: Les dégâts dans la forêt suisse. *La Forêt* 09: 18–21.
- Shestak C.J., Busse M.D. 2005: Compaction alters physical but not biological indices of soil health, *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 236–246.
- Spjevak S., Thees O. 2009a: Konzeptionelle Überlegungen zum Management des physikalischen Bodenschutzes bei der Holzernte. In: Thees O., Lemm R. (Hrsg) 2009: *Management zukunftsfähige Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente.* Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf und vdf Hochschulverlag Zürich. 816 p.
- Spjevak S., Thees O., Lüscher P. 2009b: Modellgestützte Bestimmung des Nutzens von Forstmaschinenausrüstungen für den physikalischen Bodenschutz. In: Thees O., Lemm R. (Hrsg) 2009: *Management zukunftsfähige Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente.* Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL; Zürich, vdf Hochschulverlag. 816 p.
- Staatsbetrieb Sachsenforst 2006: *Holzerntetechnologien – Richtlinie zur Anwendung im Staatswald des Freistaates Sachsen.* 45 p.
- Standard Soil Color Charts 1994: *Revised Standard Soil Color Charts according to the Munsell system (Munsell Color Company Inc., Baltimore).* Soil color book 08.11. Eijkelcamp Agrisearch Equipment.
- Steubing B. 2013: Die Ökobilanz der energetischen Holzverwertung: Faktoren für einen hohen ökologischen Nutzen. *Journal forestier suisse.* 164, 12: 408–419.
- Teepe R., Brumme R., Beese F., Ludwig B. 2004: Nitrous oxide emission and methane consumption following compaction of forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 605–611.
- Thees O., Lemm R. (Hrsg) 2009: *Management zukunftsfähige Waldnutzung. Grundlagen, Methoden und Instrumente.* Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL; Zürich, vdf Hochschulverlag. 816 p.
- ThüringenForst 2008: *Bodenschutz und Holzernte.* 25 p.
- ThüringenForst 2009: *Bodenschutz und Walderschliessung – Leitfaden für den Praktiker.* 32 p.
- Tschannen P. 1999: *Kommentar zum Umweltschutzgesetz. Erläuterungen zum Bodenschutz (Art. 33–35).* Hrsg. Vereinigung für Umweltrecht und Helen Keller, 2. Auflage, Zürich.
- USchadG 2007: *Umweltschadensgesetz Deutschland.*
- von Rohr G., Margreth S., Hauert C. 2013: *Bodeninformationen für die Waldwirtschaft im Kanton Solothurn.* In: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL (Hrsg.): *Forum für Wissen 2013. Bodenschutz im Wald: Ziele – Konflikte – Umsetzung.* WSL Ber. 6. 116 p.
- Walther L., Zimmermann S., Blaser P., Luster J., Lüscher P. 2004: *Waldböden der Schweiz. Band 1, Grundlagen und Region Jura.* Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Bern, Hep-Verlag. 768 p.
- Wardle D.A., Yeates G.W., Nicholson K.S., Bonner K.I., Watson R.N. 1999: Response of soil microbial biomass dynamics, activity and plant litter decomposition to agricultural intensification over a seven-year period, *Soil Biol. Biochem.* 31: 1707–1720.
- Weise G. 2008: *Entwicklung und Einsatz von Forstreifen.* LWF aktuell, 67: 24–27.
- [www.agr.bfs.admin.ch](http://www.agr.bfs.admin.ch), état 21.07.09
- [www.fsc-schweiz.ch](http://www.fsc-schweiz.ch), état 24.07.09
- [www.pefc.ch](http://www.pefc.ch), état 24.07.09
- [www.umweltbundesamt.at/umweltschutz/boden/boschuinternat](http://www.umweltbundesamt.at/umweltschutz/boden/boschuinternat), état 24.07.09
- Ziesak M. 2004: *Entwicklung eines Informationssystems zum bodenschonenden Forstmaschineneinsatz.* Dissertation der TU München, [www.deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv](http://www.deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv) Auskünfte zu ProFor: Martin Ziesak, HAFL Zollikofen.
- Zimmermann S., Luster J., Blaser P., Walther L., Lüscher P. 2006: *Waldböden der Schweiz Band 3. Regionen Mittelland und Voralpen.* Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. Bern, Hep Verlag. 848 p.
- Zimmermann S., Frey B., Pascal N., Hartmann A. 2009: *Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre in unterschiedlich stark verdichteten Fahrspuren.* BGS Jahrestagung, Abstract. 50 p.

# > Répertoire

## Figures

<b>Fig. 1</b> Conditions influençant la protection des sols dans la gestion forestière	10	<b>Fig. 16</b> Podzol	37
<b>Fig. 2</b> Proposition de stratégie pour la protection des sols contre les atteintes physiques	16	<b>Fig. 17</b> Pseudogley	38
<b>Fig. 3</b> Présentation des différentes propriétés granulométriques (teneur en silt) de la couche sous-jacente du sol de la parcelle d'essai de Messen-Junkholz	20	<b>Fig. 18</b> Stagnogley	38
<b>Fig. 4</b> Représentation schématique de la structure du sol	31	<b>Fig. 19</b> Gley	38
<b>Fig. 5</b> Formes d'humus typiques et tendances évolutives liées à l'activité sylvicole	33	<b>Fig. 20</b> Triangle des textures avec les classes utilisées par l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage	40
<b>Fig. 6</b> Mull	34	<b>Fig. 21</b> Teneur moyenne en argile des horizons minéraux des 95 profils étudiés dans la publication sur les forestiers de Suisse	41
<b>Fig. 7</b> Moder	34	<b>Fig. 22</b> Structure particulière	42
<b>Fig. 8</b> Humus brut	34	<b>Fig. 23</b> Structure en agrégats	42
<b>Fig. 9</b> Aperçu simplifié du développement du sol	35	<b>Fig. 24</b> Structure cohérente	42
<b>Fig. 10</b> Sol brut rocheux	36	<b>Fig. 25</b> Concrétions de manganèse	44
<b>Fig. 11</b> Ranker	36	<b>Fig. 26</b> Taches de rouille (de quelques mm à quelques cm)	44
<b>Fig. 12</b> Régosol	36	<b>Fig. 27</b> Marmorisation	44
<b>Fig. 13</b> Rendzine	36	<b>Fig. 28</b> Décoloration hydromorphe	45
<b>Fig. 14</b> Sol brun	37	<b>Fig. 29</b> Couleurs de réduction	45
<b>Fig. 15</b> Sol brun lessivé	37	<b>Fig. 30</b> Influence de certaines caractéristiques du sol sur le risque de compaction	47
		<b>Fig. 31</b> Courbe de désorption typique pour les sols sableux et les sols argileux	50
		<b>Fig. 32</b> Courbes de désorption de sols forestiers typiques de la Suisse	51

<b>Fig. 33</b> Évolution annuelle de la teneur en eau [% <sub>v</sub> ] dans différents types d'ornières, mesurée avec une sonde TDR (parcelle test d'Ermatingen)	51	<b>Fig. 46</b> Illustration montrant le principe des essais de circulation avec un engin forestier	76
<b>Fig. 34</b> Types d'ornières comme indicateurs pour l'évaluation de l'impact écologique de modifications du sol	54	<b>Fig. 47</b> Détail du plan d'essai à Heitere-Säget (canton de Berne), avec les types d'ornières qui se sont formées suite à l'arrosage ciblé et au passage du véhicule	77
<b>Fig. 35</b> Évaluation d'une perturbation écologique du sol causée par la circulation de véhicules en forêt	57	<b>Fig. 48</b> Densité apparente du sol de référence non perturbé par comparaison avec les types d'ornières 1 à 3 aux profondeurs de 5–10 cm et 15–20 cm sur la surface d'essai de Heitere-Säget	79
<b>Fig. 36</b> Valeurs moyennes de préconsolidation pour les différents types d'ornières dans la couche supérieure (0–15 cm) et la couche sous-jacente (20–35 cm) du sol	59	<b>Fig. 49</b> Conductivité hydraulique à saturation du sol de référence non perturbé par comparaison avec les types d'ornières 1 à 3 aux profondeurs de 5–10 cm et 15–20 cm sur la surface d'essai de Heitere-Säget	80
<b>Fig. 37</b> Relations entre dégâts structurels causés par le passage de véhicules, fonctions du sol et composition des structures de populations bactériennes	63	<b>Fig. 50</b> Porosité totale du sol de référence non perturbé par comparaison avec les types d'ornières 1 à 3 aux profondeurs de 5–10 cm et 15–20 cm sur la surface d'essai de Heitere-Säget	81
<b>Fig. 38</b> Ornières sur la parcelle d'essai de Messen-Junkholz classées par types d'ornières	66	<b>Fig. 51</b> Formation des pores grossiers dans la matrice du sol sous les types d'ornières 1 à 3 par comparaison avec le sol de référence non perturbé	82
<b>Fig. 39</b> Carte de la sensibilité à la compaction de la couche sous-jacente du sol pour la parcelle d'essai de Messen-Junkholz	67	<b>Fig. 52</b> Une contrainte mécanique a des répercussions profondes dans le sol	83
<b>Fig. 40</b> Seuils critiques de teneur en eau du sol pour la parcelle d'essai de Messen-Junkholz, calculés avec le système d'information ProFor pour un porteur forestier, classe de charge utile 10 tonnes	68	<b>Fig. 53</b> Croissance en hauteur des aulnes glutineux sur la parcelle de Messen-Brunenthal, canton de Soleure (2003–2010)	84
<b>Fig. 41</b> Ornières sur la parcelle d'essai d'Ermatingen-Hohrain classées par types d'ornières	69	<b>Fig. 54</b> Exemple de répartition des racines dans les ornières avec aulnes et compost dans un profil creusé directement au pied du tronc sur la parcelle de Messen-Brunenthal, canton de Soleure	85
<b>Fig. 42</b> Ornières sur la parcelle d'essai de Heitere-Bruucherer classées par types d'ornières	70	<b>Fig. 55</b> Masse racinaire des racines d'aulnes à différentes profondeurs (poids sec par dm <sup>3</sup> de sol) sur la parcelle de Messen-Brunenthal, canton de Soleure	85
<b>Fig. 43</b> Détail de la parcelle d'essai d'Unteriberg-Schlegwald	72	<b>Fig. 56</b> Macroporosité aux profondeurs de 20–30 cm et de 40–50 cm dans les différents traitements de la surface de Messen-Brunenthal, canton de Soleure	86
<b>Fig. 44</b> Traces de frottement de type 3 sur une arête du terrain	73		
<b>Fig. 45</b> Typologie des ornières et part de surface empruntée par les véhicules sur les parcelles d'essai de Habsbourg (à gauche) et de Brüttelen (à droite)	75		

<b>Fig. 57</b> Conductivité à l'air aux profondeurs de 20–30 cm et 40–50 cm dans les différents traitements de la surface de Messen-Brunenthal, canton de Soleure	87	<b>Fig. 70</b> Porteur équipé d'un treuil de halage	119
<b>Fig. 58</b> Intégration de la protection des sols dans les processus de l'exploitation du bois relevant de l'entreprise et des autorités	89	<b>Fig. 71</b> Représentation schématique de l'effet d'un tapis de branches par rapport à la réduction de la pression	125
<b>Fig. 59</b> Séquence de formation d'un cours donné dans le canton d'Argovie	94	<b>Fig. 72</b> Coûts supplémentaires du bois exploité avec des semi-chenilles Bogie (BB)	131
<b>Fig. 60</b> Détail d'une carte du risque de compaction avec desserte fine adaptée en conséquence du canton d'Argovie. Données cartographiques: AGIS	97	<b>Fig. 73</b> Clé de détermination de l'hydromorphie d'un sol	146
<b>Fig. 61</b> Teneur en eau sur les layons de débardage calculée avec ProFor pour une récolteuse EcoLog 580C	98	<b>Fig. 74</b> Arbre décisionnel pour évaluer la sensibilité des sols à la compaction dans le canton de Soleure	151
<b>Fig. 62</b> Les layons existants doivent être intégrés le mieux possible dans la nouvelle planification afin de réduire au minimum la part de surface parcourue par les engins	100	<b>Tableaux</b>	
<b>Fig. 63</b> Masques de saisie de ProFor pour le sol (à gauche) et les engins utilisés (à droite)	107	<b>Tab. 1</b> Valeurs indicatives et seuils d'intervention pour la protection des sols contre les atteintes physiques en forêt proposées par la Société suisse de pédologie SSP	17
<b>Fig. 64</b> Lors du passage du véhicule, des forces verticales et horizontales agissent sur le sol	110	<b>Tab. 2</b> Ornières relevées dans les forêts suisses selon l'Inventaire forestier national IFN3	27
<b>Fig. 65</b> La pression dans les zones de contact des engins forestiers se situe en général dans une fourchette de 200 à 500 kPa (20 à 50 tonnes/m <sup>2</sup> )	111	<b>Tab. 3</b> Classement de la pierrosité d'après le groupe de travail sur la cartographie des stations (1996)	39
<b>Fig. 66</b> Ornières causées par le passage d'un véhicule avec des pneus gonflés à des pressions différentes du côté gauche et du côté droit. Essai mené dans la forêt domaniale de Habsbourg (canton d'Argovie) en septembre 2010	113	<b>Tab. 4</b> Classement des teneurs en matière organique selon Ruef et Peyer (1996)	46
<b>Fig. 67</b> Porteur forestier avec différentes semi-chenilles Bogie	115	<b>Tab. 5</b> Caractéristiques des ornières, justification des mesures et lien avec la définition de la fertilité	55
<b>Fig. 68</b> Récolteuse Valmet X3 «Snake» et Ecolog 570D Soft Track équipées de châssis sur chenilles indépendantes à suspension oscillante	117	<b>Tab. 6</b> Critères de distinction des trois types d'ornières	56
<b>Fig. 69</b> Pneus avec profil de traction (à gauche) pour tracteur de débardage et avec profil «soft» (à droite) pour récolteuse et porteur forestier	118	<b>Tab. 7</b> Aperçu des parcelles d'essai du Plateau suisse et des Préalpes	65
		<b>Tab. 8</b> Aperçu des réserves Lothar	74
		<b>Tab. 9</b> Acteurs de la récolte du bois en Suisse et répartition des responsabilités dans le domaine de la protection des sols contre les atteintes physiques	92

<b>Tab. 10</b> Proposition de distances entre les layons en fonction de la sensibilité du sol à la compaction	101
<b>Tab. 11</b> Possibilités de réglementation de la protection physique des sols lors de la récolte du bois dans les contrats entre le mandant et le mandataire	106
<b>Tab. 12</b> Évaluation de la charge par roue pour des engins forestiers, base d'évaluation pour les tests du KWF validant l'utilisation de récolteuses (état en 2011)	112
<b>Tab. 13</b> Principes régissant le choix et la mise en œuvre des processus de travail et des engins	121
<b>Tab. 14</b> Aperçu des mesures ayant des répercussions financières dans le cadre de la protection physique des sols	130
<b>Tab. 15</b> Détermination des formes d'humus terrestres selon l'Arbeitskreis Standortskartierung (1996) et Frehner et al. (2005)	143
<b>Tab. 16</b> Terminologie utilisée pour désigner les horizons pédologiques	144
<b>Tab. 17</b> Clé de détermination de la répartition granulométrique (évaluation sur le terrain)	145
<b>Tab. 18</b> Valeurs selon le code des couleurs de Munsell (Standard Soil Color Charts 1994) pour des échantillons de sol humides	147
<b>Tab. 19</b> Parcelles d'essais	147
<b>Tab. 20</b> Sites destinés à la formation	148
<b>Tab. 21</b> Essais de circulation	148
<b>Tab. 22</b> Réserves Lothar (projet de régénération)	148
<b>Tab. 23</b> Cours de formation initiale et de formation continue réalisés dans le domaine de la protection des sols contre les atteintes physiques	149

## > Glossaire

Les désignations usuelles des horizons pédologiques sont indiquées à l'annexe A4, et les principaux types de sols se rencontrant en Suisse sont présentés sous le point 3.2.4, raison pour laquelle ces données ne figurent pas dans le glossaire.

### **limite de plasticité**

Teneur en eau du sol au point de transition entre l'état semi-solide et l'état malléable.

### **nature du sol**

Classement de la → terre fine en fonction de la répartition des fractions granulométriques argile, silt et sable.

### **agrégats du sol**

Produit de processus biologiques, physiques ou chimico-physiques agissant sur les particules minérales du sol.

Suivant leur forme, les agrégats peuvent créer p. ex. des structures grumeleuses, polyédriques ou compactes en blocs. Les pores plus grossiers entre les agrégats jouent un rôle important pour l'aération, l'infiltration d'eau et la pénétration des racines.

### **sensibilité du sol au passage de véhicules**

Sensibilité du sol à des changements ayant un impact écologique résultant du passage de véhicules.

La sensibilité dépend de l'état actuel d'humidité du sol et donc en grande partie de l'évolution des conditions météorologiques. Les autres données suivantes jouent un rôle: répartition granulométrique, teneur en matériaux pierreux, présence de caractéristiques d'hydromorphie, teneur en matière organique et pente.

### **profil pédologique**

Coupe transversale d'un sol depuis la surface jusqu'à la roche-mère.

On peut en général reconnaître une succession de couches (horizons).

### **texture du sol**

Caractéristique constante d'un sol exprimant la répartition en % des fractions minérales argile, silt et sable.

### **type de sol**

Classement de sols présentant des similitudes au niveau de leur genèse, leurs horizons, leur teneur en eau, leurs propriétés chimiques et minéralogiques.

### **compaction du sol**

Processus de réduction du volume total du sol par compression ou affaissement.

La compaction entraîne une augmentation de la part de substance solide, le volume des pores diminue et la distribution du diamètre des pores se modifie.

### **accord sectoriel**

Instrument de la politique environnementale introduit en 1995 dans la loi sur la protection de l'environnement (art. 41a LPE), par lequel les membres d'une branche économique fixent sur une base volontaire des droits et des obligations réciproques.

### **terre fine**

Fraction du sol d'un diamètre inférieur à 2 mm.

### **pores fins**

Pores d'un diamètre inférieur à 0,2 µm.

L'eau présente dans les pores fins est retenue si fortement que la plupart des plantes ne peuvent pas l'utiliser.

### **limite de liquidité**

Teneur en eau du sol au point de transition entre l'état malléable et l'état liquide.

### **porosité totale (volume des pores)**

Proportion volumétrique des espaces vides dans un élément de volume représentant la somme des pores fins, moyens et grossiers.

En général, l'augmentation du volume des pores s'accompagne d'une diminution de la granulométrie.

### **pores grossiers**

Pores d'une diamètre supérieur à 50 µm.

Les pores grossiers remplissent d'importantes fonctions pour le drainage, l'aération et la croissance des racines.

### **matière organique**

Ensemble des parties végétales mortes et des produits résultant de leur décomposition et de leur transformation.

### **répartition granulométrique**

Description de la composition en % des fractions granulométriques de la → terre fine (argile, silt et sable).

La répartition granulométrique est aussi appelée → nature du sol ou → texture. Elle est à la base du classement de la nature du sol au moyen de triangles des textures.

### **pores moyens**

Pores d'un diamètre compris entre 0,2 et 50 µm.

Les pores moyens ont la capacité d'emmagasiner l'eau capillaire disponible pour les plantes. Les mycéliums de champignons, les radicelles et les bactéries importants pour l'activité biologique du sol peuvent s'y développer.

### **degré d'hydromorphie**

Profondeur et intensité des signes d'hydromorphie.

### **déformation élastique**

Modification non permanente, la structure du sol étant en grande partie préservée dans son état initial.

**déformation plastique**

Déformation conduisant à une transformation permanente de la surface du sol.

**déformation viscoplastique**

Déformation plastique accompagnée d'un écoulement visqueux entraînant une transformation complète de la structure du sol.

**précompaction**

Mesure de la sensibilité du sol à la compaction.

La précompaction indique l'intensité des contraintes déjà exercées sur le sol et celles qu'il peut encore subir sans être davantage compacté.

**régime hydrique**

Variation des apports et des pertes en eau.

L'évolution des conditions météorologiques en cours d'année entraîne une évolution caractéristique des apports et des pertes en eau dans le sol désignée sous le terme de régime hydrique. Ces variations dépendent des facteurs climatiques, mais aussi des propriétés du sol et de la situation hydrologique.