

## Protection physique des sols en forêt

### Protection des sols lors de l'utilisation d'engins forestiers

Peter Lüscher, Fritz Frutig, Stéphane Sciacca, Sandra Spjevak et Oliver Thees



Le sol est une ressource non renouvelable, et c'est pourquoi sa protection en tant qu'élément de base vital pour les générations futures revêt une signification toute particulière. Les sols forestiers sont également soumis à des menaces toujours plus nombreuses d'origine humaine et des risques apparaissent en particulier lors de l'utilisation d'engins forestiers pour la récolte du bois. Des perturbations à long terme de la fertilité des sols peuvent survenir. Elles ont des conséquences néfastes sur les fonctions et prestations fournies par la forêt ainsi que sur son exploitation durable. C'est pour toutes ces raisons que la protection physique des sols est inscrite dans la Loi sur la protection de l'environnement.

### Problématique

Des sols sains sont la condition préalable à la conservation, dans son ensemble, de la durabilité en forêt. Ils représentent un système d'une grande capacité d'autoconservation garantissant ainsi l'accomplissement de leurs différentes fonctions. Le passage dans de mauvaises conditions d'engins sur des sols forestiers naturels provoque, pour la majorité des sols des forêts suisses, des ornières dont les perturbations profondes et durables entravent les fonctions du sol. Une réduction du volume des pores et des liaisons entre eux diminue la capacité des sols à transporter l'eau et l'air, dont l'approvisionnement est vital pour les racines et par conséquent

Fig 1. Le passage d'engins forestiers sur les sols en forêt cause des compactations et des déformations du sol. L'objectif de la protection physique des sols est de diminuer ces perturbations au moyen de différentes mesures.

indispensable pour la fertilité des sols. Une réduction de la fertilité des sols entravera les rendements de la production de bois, dont le maintien est dans le propre intérêt des propriétaires forestiers. D'autres prestations environnementales de la forêt d'intérêt général pour la société, telles que la protection du climat et la protection de la qualité de l'eau potable, sont également menacées.

Le poids élevé des engins forestiers implique une charge par roue très importante augmentant le risque de dégâts durant les activités de récolte du bois. Le rajeunissement naturel en est entravé dans sa germination et sa croissance racinaire. L'exploitation durable de la ressource bois implique, pour des raisons économiques, l'emploi de processus efficaces de travail, lesquels entrent en conflit avec les exigences en sols forestiers sains avancées pour des raisons de durabilité. Cette problématique attire de plus en plus l'attention sur le plan politique, comme dans le cadre du programme forestier suisse 2004, mais il existe encore des déficits dans l'application des dispositions légales et dans la mise en pratique des connaissances scientifiques les plus récentes.

Cette Notice pour le praticien propose une vue d'ensemble des bases de pédologie et des mesures à prendre dans le cadre de la protection physique des sols en forêt. Elle est destinée à informer et sensibiliser les acteurs de la pratique et à favoriser l'application des dispositions légales. Cette notice est structurée comme suit:

Problématique

Dispositions légales

Qu'est-ce qu'un sol?

Fonctions du sol

Structure du sol

Modifications du sol sous l'effet de contraintes mécaniques

Les responsabilités dans la protection physique des sols

Mesures concernant la planification de la récolte du bois

Mesures concernant la technique des engins

Mesures concernant l'exécution des travaux

Mesures de régénération

Aspects économiques

Ceci devrait être résolu de manière à ce que la ressource, que représentent les sols forestiers, soit ménagée préventivement tout en conservant une capacité de production de bois concurrentielle. Le défi réside dans le développement d'un système de gestion de la qualité répondant aux exigences de durabilité destiné à être introduit au niveau de l'entreprise et de l'administration.

## Dispositions légales

La protection des sols est définie dans la Loi suisse sur la protection de l'environnement à travers la conservation durable de la fertilité du sol (art. 1 LPE). Appliqué à la forêt, cela signifie que la capacité de conservation d'une forêt, en tant que biocénose typique pour sa station, doit être garantie de manière durable par le rajeunissement naturel. Sur la base de l'Ordonnance sur les atteintes portées au sol (art. 2 OSol), cela signifie également que la croissance racinaire d'essences forestières adaptées à la station ne peut être restreinte que par des limites naturelles. L'activité biologique du sol doit aussi permettre la décomposition sans entrave des débris végétaux en fonction de conditions de station données. Lorsque le sol est exploité, les véhicules, les machines et les outils doivent être choisis et utilisés en tenant compte de son état d'humidité, afin de prévenir les compactations qui pourraient menacer la fertilité du sol à long terme (art. 6 OSol). La législation suisse sur les forêts prévoit également que les cantons prennent les mesures nécessaires pour prévenir les dégâts aux forêts en réduisant les charges physiques sur le sol. Selon l'Ordonnance sur les forêts, on entend par dégâts aux forêts, les dégâts mettant en danger la conservation de la forêt et plus particulièrement les charges physiques sur le sol (art. 28 OFo). Les cantons doivent de surcroît, selon la Loi fédérale sur les forêts, édicter les prescriptions nécessaires en matière d'aménagement et de gestion en tenant compte des exigences d'une sylviculture proche de la nature (art. 20 LFo). Toute personne qui, lors de la récolte du bois, manquera à sa responsabilité, même par négligence, en intervenant de telle manière que les sols soient durablement compactés, agira à l'encontre de la Loi. Cette infraction pénale est sanctionnée au sens de l'article 61 de la LPE.

## Qu'est-ce qu'un sol?

Les sols forment la couche superficielle de la croûte terrestre, dont l'épaisseur va de la surface du sol jusqu'à la roche mère. Le sol est le résultat d'une altération des roches et d'une transformation de la matière organique par les nombreux êtres vivants. Il est composé de constituants solides, minéraux et organiques, aux propriétés spécifiques et de vides ou pores occupés par de l'eau et de l'air. Les pores remplis d'air et d'eau permettent 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.

## Fonctions du sol

### Le sol en tant que milieu pour les plantes

Les sols servent de lieu de croissance aux plantes offrant 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 enfin la base de la production dans la foresterie comme dans l'agriculture.

### Le sol en tant que tampon et filtre

Les sols possèdent un fort pouvoir 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 à long terme dans le sol et de revenir ensuite dans la biosphère à travers le cycle des éléments nutritifs.

### Le sol en tant qu'habitat

Les sols représentent un habitat pour 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. En outre, ces organismes 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 intense des vers de terre est aussi à l'origine de la formation de complexes argilo-humiques, ainsi que d'autres types de structures favorables dans le sol.

## Structure du sol

### Horizons humifères et formes d'humus

Les débris végétaux frais sont transformés de manière plus ou moins rapide par les organismes du sol en fonction du degré d'activité biologique. Ceci donne lieu à différents niveaux de décomposition décrits comme horizons humifères: l'horizon L constitué entièrement de litière fraîche non transformée, l'horizon Of où les débris végétaux sont fragmentés et fermentés et enfin l'horizon Oh dans lequel la matière organique est, dans son ensemble, déjà décomposée en humines.

Les formes d'humus sont définies sur la base de la succession de ces horizons et de leur épaisseur (Fig. 2). Le Mull est le résultat d'une décomposition rapide des débris végétaux et de l'incorporation profonde de la matière organique transformée dans la matière minérale fine. Le Mor ou humus brut se distingue par des horizons humifères épais et par une faible incorporation dans les horizons

minéraux inférieurs, reflétant une activité biologique du sol limitée. La forme d'humus Moder représente quant à elle une forme intermédiaire.

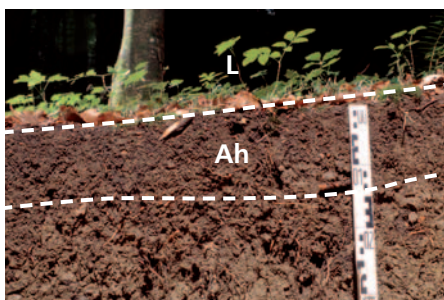
La forme d'humus est un indicateur de la capacité de transformation des éléments nutritifs dans le sol de surface et par conséquent de son degré d'activité biologique pour une station donnée. Des perturbations y bloqueront la transformation et la mise à disposition des éléments nutritifs ce qui, dans le cas de perturbations graves, menacera la fonction de lit de germination de ces horizons du sol pour le rajeunissement naturel en forêt. Les formes d'humus nous donnent ainsi de premières indications sur la sensibilité des sols au passage d'engins.

### Horizons minéraux

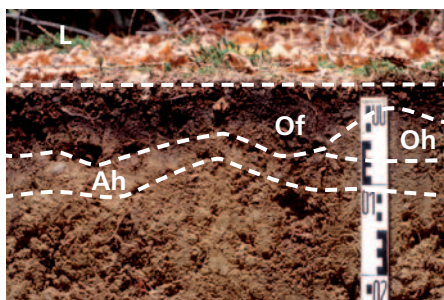
Les horizons minéraux sont divisés en trois groupes, les horizons supérieurs ou sol de surface (horizons A), les horizons sous-jacents appelés horizons inférieurs ou sous-sol (horizons B) et la roche mère (horizons C) se situant en-dessous. Les horizons A, B et C sont constitués principalement de composants minéraux. Dans les horizons supérieurs appelés horizons organo-minéraux, de la matière organique est mélangée à la matière minérale. Plus il y a de matière organique dans les horizons supérieurs, plus les sols seront sensibles à la compaction et par conséquent au passage d'engins. La compaction a des répercussions jusqu'aux horizons du sous-sol, dont la capacité de régénération est limitée.

### Caractéristiques d'hydromorphie

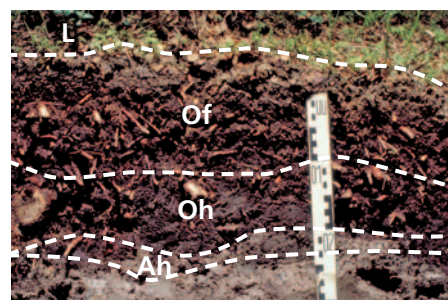
Une conductivité faible et changeante de l'eau et de l'air dans les pores provoque des processus de réduction et d'oxydation, dont les caractéristiques sont visibles dans les sols (Fig. 3). La profondeur de leur apparition ainsi que leur expression nous donnent des indications sur l'état d'aération de l'espace racinaire, plus particulièrement sur son état d'hydromorphie. La durée des phases de saturation hydrique, accompagnées de problèmes d'aération, est à l'origine de l'apparition de différentes formes d'hydromorphie plus ou moins marquées. Le niveau le plus faible est caractérisé par des concrétions de manganèse prenant la forme de petites taches de couleur violet foncé à noir, tandis que l'apparition de colorations rouge pâle (marmorisation) indiquera des horizons influencés par la présence d'une nappe perchée. La présence de taches diffuses de couleur rouille de taille variable (du mm au cm) indique quant à elle des problèmes d'aération moyens, alors qu'un manque permanent d'oxygène dans le sol se distinguera par l'apparition de grandes taches gris-bleu, là où les pores du sol sont en permanence saturés d'eau (Fig. 4). Un enracinement est pratiquement exclu dans de telles conditions de saturation. Cette perméabilité limitée, à l'origine de l'apparition d'une nappe perchée, peut être due au passage d'engins, mais peut également apparaître naturellement dans les horizons du sous-sol.



La forme d'humus **Mull (L/Ah)** est déterminée par une intense activité biologique accompagnée d'une dégradation rapide de la litière fraîche et d'un mélange intime de la matière organique et de la matière minérale fine (processus durant en moyenne de un à deux ans). Ce type de sols de surface est généralement bien approvisionné en éléments nutritifs et possède grâce à sa structure granulaire un régime optimal d'eau et d'air.



Le **Moder (L/Of/[Oh]/Ah)** se forme principalement soit dans les forêts de feuillus et de résineux à faible strate herbacée avec des sols de surface relativement pauvres en éléments nutritifs, soit là où les conditions climatiques sont froides et humides (état de développement entre le Mull et le Mor).



Le **Mor ou humus brut (L/Of/Oh/Ah)** est une forme d'humus typique des sols de surface extrêmement pauvres en éléments nutritifs, à granulométrie grossière et sous une couverture végétale produisant de la litière coriace difficilement décomposable. Des forêts de résineux denses, avec peu de lumière, sans aucune strate herbacée ou en présence d'arbustes nains, favorisent la formation de cette forme d'humus de la même manière qu'un climat froid et humide. Les différents horizons humifères sont clairement différenciables.

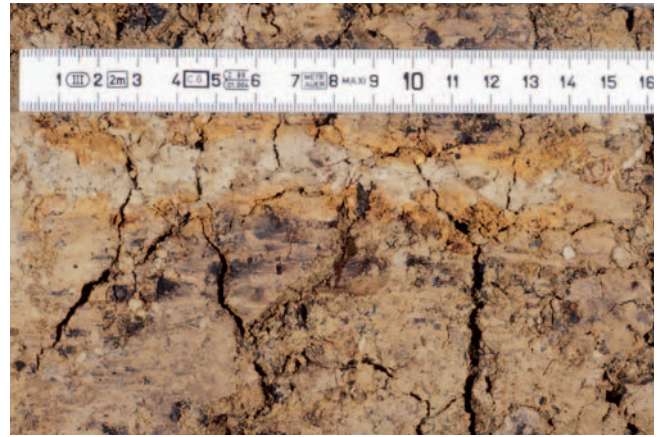
Fig. 2. Formes d'humus typiques en forêt. Pour protéger le sol forestier, il est important de connaître sa structure. Les formes d'humus nous donnent des indications sur la sensibilité des sols au passage d'engins et sur leur capacité de régénération.





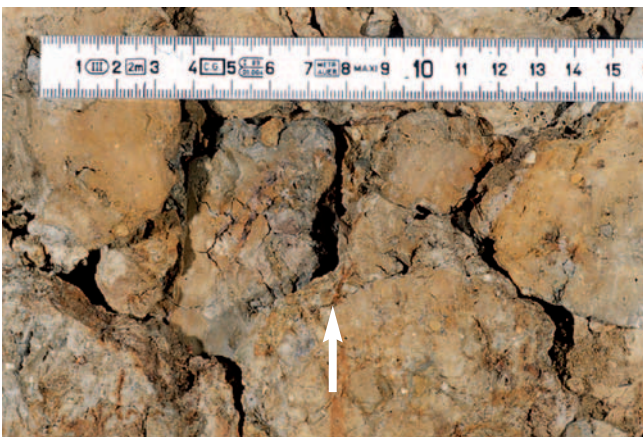
#### Concrétions de manganèse

Les petites taches violet foncé à noir caractérisent le niveau d'hydromorphie le plus faible.



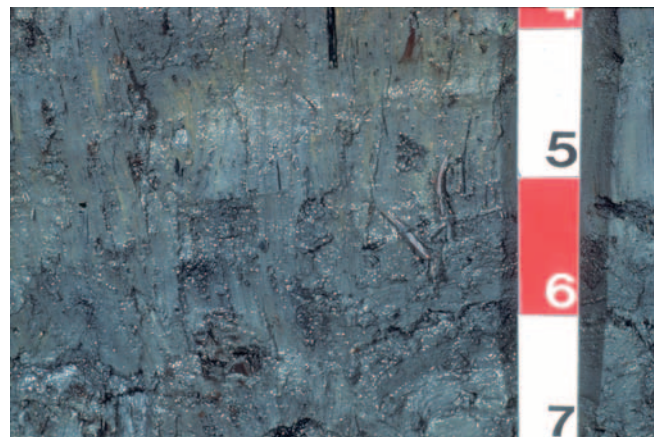
#### Marmorisations / colorations rouge pâle

Ces colorations de petites dimensions sont composées d'une alternance de zones pâles et de zones couleur rouille due à des variations locales de la densité.



#### Taches de rouille

Les taches de rouille diffuses indiquent des problèmes d'aération de moyenne durée.



#### Couleurs de réduction

Les couleurs de réduction gris-bleu apparaissent là où les pores du sol sont constamment saturés d'eau.

Fig. 3. Les caractéristiques d'hydromorphie donnent des indications sur l'état d'aération du sol. Les causes à l'origine d'une perméabilité limitée à l'eau peuvent être liées au passage d'engins, mais également à des conditions naturelles dans les horizons du sous-sol.



Fig. 4. Ornière avec caractéristiques d'hydromorphie. Les couleurs de réduction (gris-bleu) et les taches couleur rouille indiquent une aération limitée du sol. Le passage d'engins est à l'origine de la réduction du volume des pores et de l'interruption des connections entre eux.

### Modifications du sol sous l'effet de contraintes mécaniques

Le passage d'engins forestiers provoque une compaction et une déformation du sol entraînant une perturbation de ses fonctions. Le volume des pores et leur continuité diminuent, touchant principalement les pores larges responsables de l'infiltration de l'eau et de l'aération de l'espace racinaire (Fig. 5). Les conditions de vie pour les racines et la faune du sol se dégradent. La compaction et le régime défavorable de l'air et de l'eau dans le sol empêchent les racines d'y accéder et de l'exploiter de façon optimale. Les processus de régénération naturelle ne seront en mesure d'apporter que des améliorations très lentes.

## Types d'ornièrre – Indicateurs dans la gestion de la protection des sols

Les modifications causées dans le sol par le passage d'engins peuvent être mises en relation avec l'apparence extérieure des ornières. Une typologie des ornières a été élaborée pour l'application pratique de la protection physique des sols (Fig. 6). Ces types d'ornièrre sont fondés sur les connaissances scientifiques actuelles des relations entre l'apparence extérieure d'une ornière et la fonctionnalité du sol. Sur cette base, un type d'ornièrre a été défini, dont l'apparition est un signal sans équivoque de la présence d'un dégât écologique dans le système sol (type d'ornièrre 3). Ceci représente un critère simple pour le travail pratique en forêt, auquel les acteurs peuvent se fier: les travaux devront être suspendus dès l'apparition du type d'ornièrre 3.

Le type d'ornièrre 1 est caractérisé par une pression exercée sur les horizons humifères, lesquels prennent la forme des empreintes de roues, et par une profondeur de l'ornièrre inférieure à 10 cm. Le type d'ornièrre 2 se situe dans le domaine de la déformation plastique et présente une profondeur plus importante, généralement inférieure à 10 cm atteignant l'horizon A (horizon de cou-

Avant le passage d'engins



Après le passage d'engins



Affaissement

Cisaillement

Pétrissage, malaxage

Fig. 5. Le passage d'engins provoque des modifications dans le sol. L'affaissement du sol entraîne une réduction du volume des pores larges. Les pores du sol sont, dans le cas d'un cisaillement, décalés les uns par rapport aux autres et ne communiquent plus entre eux. Pétrissage/malaxage signifie que la structure du sol est complètement détruite (Source: TOBIAS *et al.* 1999, modifié).

leur foncée de mélange organo-minéral). Des bourrelets latéraux naissants issus des horizons supérieurs (horizons A) sont également possibles. Le type d'ornièrre 3 (Fig. 7) est défini par un ensemble de trois caractéristiques qui doivent toutes être remplies: profondeur de l'ornièrre le plus souvent supérieure à 10 cm, atteignant les horizons du sous-sol et présence marquée de bour-

relets latéraux. A noter que le type d'ornièrre 3 a non seulement des répercussions plus profondes que les types 1 et 2, mais également des répercussions plus importantes latéralement.

Le relevé des types d'ornièrre le long des layons de la desserte de détail permet de juger de la qualité du travail et, le cas échéant, de prendre les mesures qui s'imposent (voir également Fig. 11).

Teneur en eau des sols ...

Type d'ornièrre 1

profondeur inférieure à 10 cm

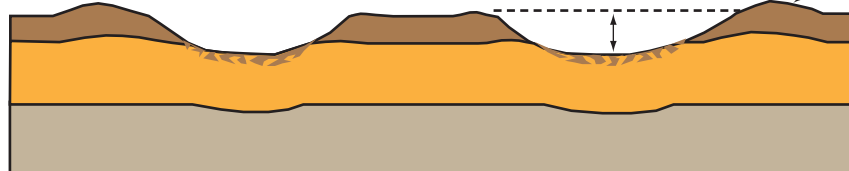


horizons humifères  
sol de surface  
sous-sol

... inférieure ou égale à la limite de plasticité

Type d'ornièrre 2

profondeur le plus souvent inférieure à 10 cm

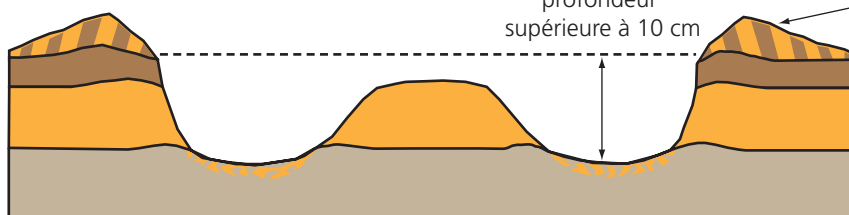


présence partielle de bourrelets latéraux dus aux pressions latérales  
horizons humifères  
sol de surface  
sous-sol

... entre la limite de plasticité et la limite de liquidité

Type d'ornièrre 3

profondeur supérieure à 10 cm



présence de bourrelets latéraux provoqués par la fluidification du sol  
horizons humifères  
sol de surface  
sous-sol

... supérieure ou égale à la limite de liquidité

Fig. 6. Typologie visuelle des ornières en fonction des modifications causées dans le sol.





Fig. 7. L'ornière de type 3 provoque une perturbation durable de la fertilité des sols et représente par conséquent un dégât écologique.

### Sensibilité des sols au passage d'engins

La sensibilité d'un sol à la compaction et à la déformation dépend de sa teneur actuelle en eau au moment du passage et par conséquent de l'évolution des conditions climatiques. D'autres facteurs jouent également un rôle: la composition granulométrique, la fraction grossière (teneur en matériaux pierreux), la présence de caractéristiques d'hydromorphie (voir Fig. 3), le taux de matière organique et la pente. Plus la teneur en eau du sol augmente et plus les forces de frottement entre les particules du sol diminuent, réduisant ainsi sa portance. En règle générale, il est nécessaire sur des sols perméables (par ex. sols sablonneux), d'attendre trois jours sans pluie après des précipitations d'intensité moyenne pour pouvoir circuler à nouveau avec des engins tout en préservant les sols. Des sols à granulométrie grossière (avec des pores larges) et/ou à teneur élevée en matériaux pierreux présentent un faible taux de matière organique dans les horizons supérieurs sont peu sensibles ou ne le sont pas du tout. Des sols à granulométrie fine et/ou à faible teneur en matériaux pierreux avec un taux élevé en matière organique dans les horizons supérieurs présentent, quant à eux, un risque potentiellement plus élevé. La sensibilité des sols s'accroît également avec l'augmentation de la pente, tandis que des sols gelés seront peu sensibles au passage d'en-

gins. La figure 8 montre de quelle manière différentes caractéristiques des sols influencent leur sensibilité à la compaction. Les caractéristiques techniques de l'engin utilisé (poids, types de pneus...) détermineront également si un sol est praticable ou non dans des conditions données.

Les conséquences du passage d'engins sont non seulement présentes dans les horizons supérieurs du sol, mais également plus en profondeur. La compaction des horizons du sous-sol est avant tout provoquée par une charge par roue élevée. Des investigations au moyen d'un instrument mesurant la résistance à

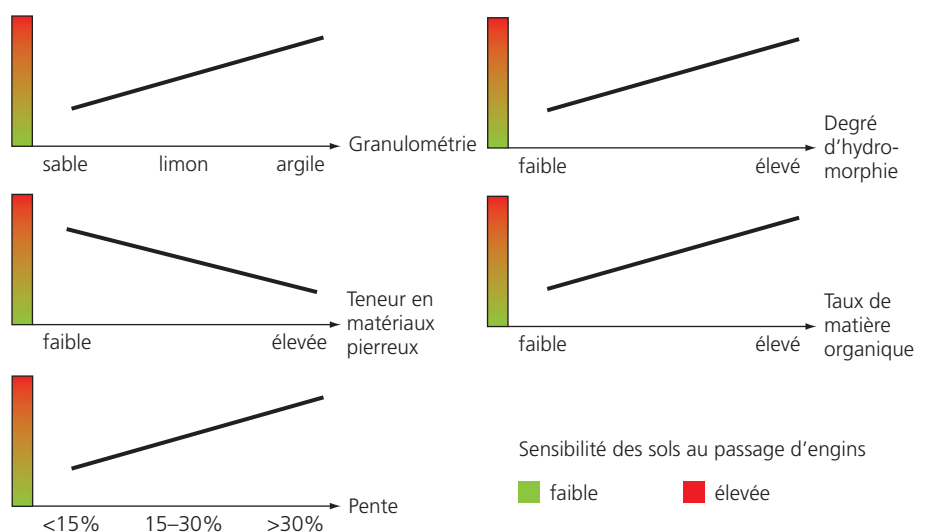


Fig. 8. Influence de certaines caractéristiques du sol et de la pente sur la sensibilité au passage d'engins.

la pénétration du sol, ont mis en évidence un accroissement de la résistance jusqu'à 70–80 cm de profondeur (Fig. 9).

### Les responsabilités dans la protection physique des sols

De nombreux acteurs sont responsables de l'application de la protection physique des sols (Fig. 10): le propriétaire forestier, l'exploitation forestière, l'entrepreneur forestier et le service forestier cantonal. Il incombe au service cantonal de la protection des sols, en tant qu'organe d'exécution, de vérifier le respect des dispositions légales. L'OFEV, l'Institut de recherche WSL et les centres de formation offrent leur soutien dans le domaine de l'application.

**Propriétaire forestier:** Il porte, selon la Loi, la responsabilité de la protection des sols en forêt. Il est en outre dans son intérêt économique que la fertilité du sol soit conservée durablement.

**Chef d'exploitation:** C'est en général une exploitation forestière qui assure la gestion des forêts publiques. Le chef d'exploitation porte à peu près à lui seul la responsabilité de la protection des sols dans la phase de planification, alors qu'il agit en collaboration avec les différents acteurs concernés lors de la réalisation des travaux (récolte du bois). Il est également responsable, dans le cadre de la protection des sols, du contrôle final des travaux de récolte.

**Entrepreneur forestier:** Dans les cas où un entrepreneur forestier est mandaté pour la récolte du bois, il est responsable de l'exécution des travaux

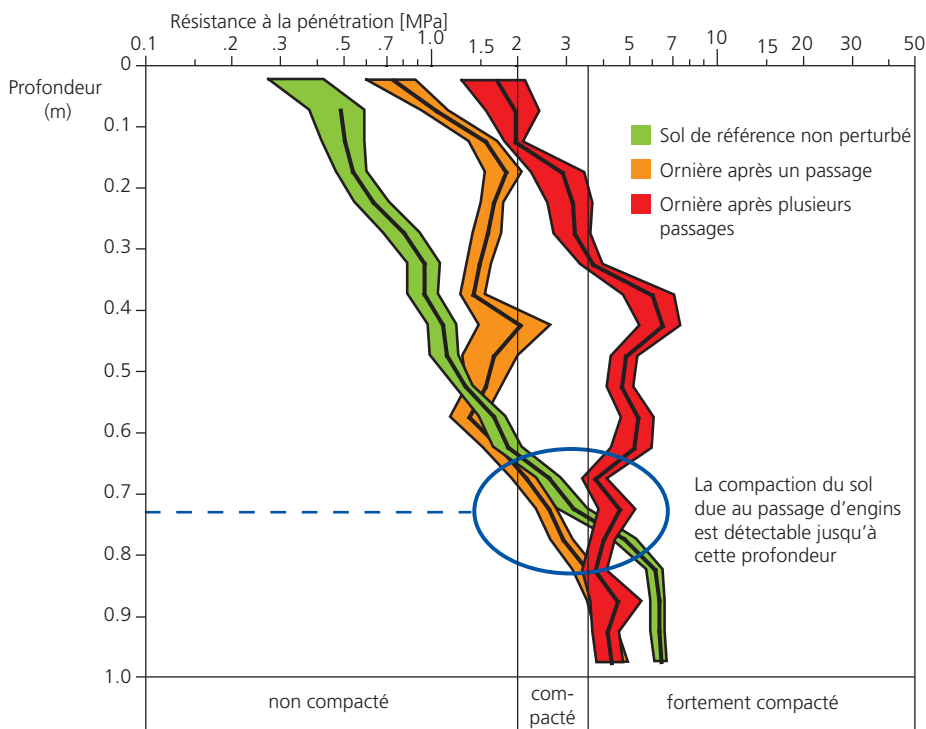


Fig. 9. Une contrainte mécanique a des répercussions profondes dans le sol. La compaction du sol peut être déterminée grâce à une sonde mesurant la résistance du sol à la pénétration. Un sol de référence non perturbé est comparé à une ornière réalisée après un seul passage et à une ornière réalisée après plusieurs passages dans des conditions homogènes de teneur en eau du sol sur toute la profondeur de la zone de mesure.

Phases	Acteurs	Tâches					
		propriétaire forestier <sup>1</sup>	chef d'exploitation <sup>2</sup>	entrepreneur forestier	conducteur d'engins	service forestier <sup>2</sup>	service de la protection des sols
planification	planification d'entreprise	x	x			x	
	planification annuelle	x	x			x	
	planification des dessertes de détail		x				
	planning et planification des capacités		x				
pilotage et exécution	choix des procédés et des engins		x	x			
	appel d'offres/conclusion du contrat		x	x			
	détermination de l'état du sol <sup>3</sup>		x		x		
	contrôle à la fin des travaux		x	x	x		
surveillance au niveau de l'entreprise	appréciation des ornières		x				
surveillance au niveau du canton <sup>4</sup>	choix des mesures à prendre		x				
	contrôle					(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> En ce qui concerne la détermination de l'état du sol, la prise de décision de rouler ou non a lieu avant chaque intervention avec des engins.

<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.

Fig. 10. La protection physique des sols est de la responsabilité de tous les acteurs prenant part à l'exploitation de la forêt. Cette figure montre comment les tâches sont réparties. Les responsabilités décrites ci-dessus ne sont pas valables pour tous les cas particuliers.

dans le respect des dispositions légales et du cahier des charges contractuel concernant la protection des sols. Les entrepreneurs forestiers, en tant que vecteur de la mécanisation dans la récolte du bois, ont une responsabilité particulière en matière de protection des sols.

**Conducteur d'engins:** Le conducteur d'engins, travaillant soit pour l'exploitation forestière soit pour l'entrepreneur forestier, est un acteur décisif dans la mise en œuvre de la protection des sols. Il est directement responsable de la qualité du travail effectué en déterminant l'état du sol avant et pendant les travaux, c'est-à-dire en définissant si le passage d'engins est possible tout en préservant les sols.

**Service forestier:** Le service forestier cantonal agit pour 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 compétent responsable de faire respecter les dispositions légales et sert d'interlocuteur pour les questions s'y rapportant. Ces tâches peuvent être déléguées au service forestier.

Afin que tous les acteurs puissent remplir leurs responsabilités, il est indispensable de les sensibiliser et de les former. La protection physique des sols devrait être intégrée dans les objectifs et les stratégies de tous ces acteurs. Les mesures destinées à réduire les atteintes portées au sol doivent être prises à différents niveaux: la planification de la récolte du bois, la technique des engins et l'exécution des travaux.

## Mesures concernant la planification de la récolte du bois

### Planification systématique de la desserte de détail

La desserte de détail (layons de débarquement, pistes pour engins forestiers et lignes de câblage) est à planifier pour chaque unité que l'on nomme unité de la desserte de détail et non, comme c'est encore régulièrement le cas aujourd'hui, pour chaque coupe de bois. Cette planification est à entreprendre au plus tard lorsqu'une intervention doit avoir lieu dans un peuplement à l'intérieur d'une unité de la desserte de détail. En règle



générale, la délimitation d'une unité de la desserte de détail se fait selon le principe que le débardage du bois ne sera pas effectué au-delà des limites de cette unité. Ces limites sont le plus souvent des routes forestières, mais peuvent également être des cours d'eau, des falaises ou des lisières. Une desserte de détail bien planifiée aide à maintenir le plus bas possible la part de la surface forestière parcourue et à limiter le risque de perturbations des sols sur la desserte préalablement fixée. En forêt privée où les parcelles sont souvent petites, la desserte de détail devrait être planifiée au-delà des limites de propriété, ce qui nécessite une intense activité de conseil.

Dans le passé, et particulièrement après des tempêtes, les forêts ont souvent été parcourues avec des engins sans planification des dessertes, avec pour conséquences des modifications de la structure du sol. Du point de vue de la protection des sols, les layons de débardage déjà existants sont à intégrer autant que possible dans les systèmes de dessertes de détails futurs et dans la mesure où cela reste économiquement judicieux, afin de limiter le plus possible la part des surfaces parcourues par des engins. Les documents de base nécessaires à la planification de la desserte de détail sont les cartes topographiques, les cartes des stations et les cartes des sols.

### Documentation de la desserte de détail

Il est plus rapide de retrouver les layons de débardage pour de prochaines interventions, lorsqu'ils sont signalés sur une carte et sur le terrain. La surface parcourue par des engins peut ainsi être minimisée en cas de dégâts dus à des tempêtes, même lorsque certains compromis doivent être trouvés (par exemple lorsqu'il faut contourner des souches d'arbres renversés). Les layons de débardage actuels et ceux qui sont planifiés doivent être marqués sur un plan et sur le terrain de manière à ce qu'ils puissent être retrouvés à tout moment. Ces marquages peuvent être effectués au moyen de sprays de couleur disponibles dans le commerce et devront être périodiquement renouvelés.

### Intégration de la sensibilité des sols à la compaction dans la planification des coupes de bois

La condition préalable à une prise en compte de la sensibilité à la compaction

des sols forestiers est de les classer en conséquence. Ce classement représente une base importante pour le choix des engins et des processus de travail, ainsi que pour la planification des coupes de bois. En règle générale, ce sont les coupes de bois sur les sols les plus sensibles

qui ne pourront être réalisées que lorsque les conditions seront favorables, c'est-à-dire durant les périodes de gel ou par temps sec par exemple. Il serait par exemple possible, dans ces cas-là, d'organiser un système avec deux équipes en tenant compte toutefois des limi-

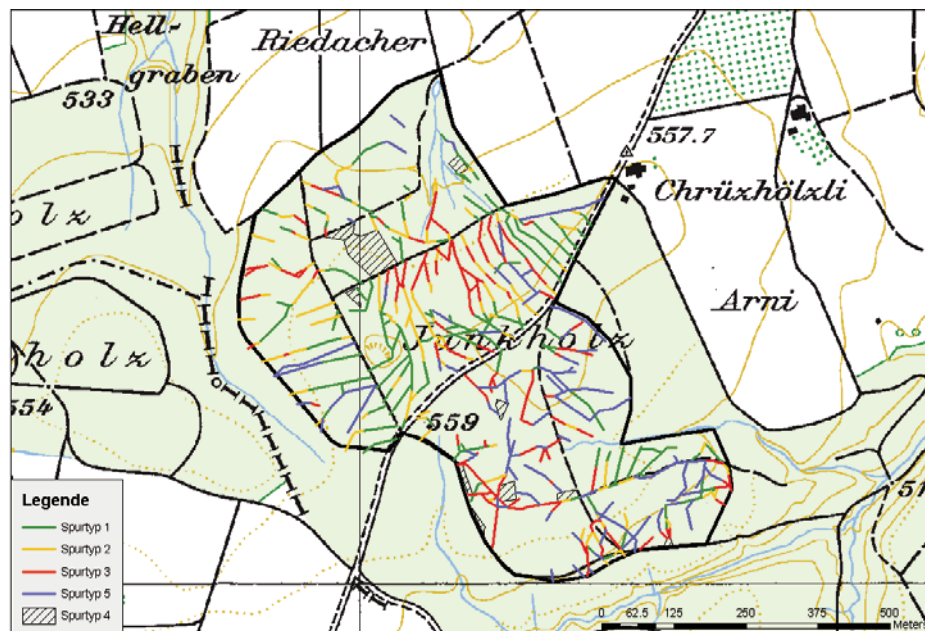


Fig. 11. Cartographie des types d'ornières présents sur une surface forestière du Plateau. Les types d'ornières 1, 2 et 3 sont décrits à la figure 6, le type d'ornière 4 correspond à des perturbations sur une grande surface, tandis que le type d'ornière 5 fait référence à des ornières non classifiables ou supposées. Cette carte nous montre que par le passé la circulation sur les sols forestiers n'était, en de nombreux endroits, pas planifiée. Il est important, à l'avenir, de procéder à une planification systématique de la desserte de détail en intégrant au maximum les layons déjà existants.



Fig. 12. Une planification systématique de la desserte de détail est la condition préalable à une protection efficace des sols en forêt.



tes liées à l'engagement du personnel, aux perturbations sonores le soir et aux difficultés de travail dans l'obscurité. Les coupes de bois sur sols moins sensibles à la compaction offrent quant à elles une plus grande flexibilité. Des surfaces de réserve peuvent selon les cas être également prévues dans des exploitations forestières voisines, ce qui suppose par contre une bonne coordination entre exploitations. Les entrepreneurs forestiers qui obtiennent un certain volume de travail dans une même région auront de surcroît une plus grande flexibilité pour adapter le moment de leurs interventions aux conditions climatiques.

Le fait de pouvoir prévoir des surfaces de réserve dépend de nombreux facteurs et n'est certainement pas possible partout, en particulier dans les régions où les mêmes sols dominent sur de grandes surfaces, induisant des conditions similaires à la même période. Tous les aspects précédemment cités doivent être compris comme une incitation pouvant, suivant les cas, contribuer à une meilleure mise en œuvre de la protection des sols.

### Fixation par écrit des dispositions concernant la protection des sols

Un règlement contraignant doit être inclus dans les contrats avec les entrepreneurs forestiers et dans les contrats de travail avec leur propre personnel en ce qui concerne la protection des sols. Il est conseillé en particulier:

- d'exiger que le passage des engins se fasse uniquement sur les layons de débardage;
- de réglementer l'interruption des travaux en cas d'humidité des sols trop élevée, c'est-à-dire lorsque la limite de liquidité des sols est dépassée et que le type d'ornièrre 3 apparaît;
- de fixer la qualité attendue du résultat des travaux effectués et de s'accorder sur le contrôle final.

### Mesures concernant la technique des engins

#### Diminution de la pression dans les zones de contact

Il est possible de diminuer la pression dans les zones de contact grâce à différentes mesures techniques. La pression moyenne d'une roue dans sa zone de contact peut être déduite théoriquement sur la base de la charge par roue

et de la surface de la zone de pression du pneu sur le sol. La pression dans la zone de contact peut en réalité être jusqu'à trois fois plus élevée. En effet, en roulant et en travaillant sur les layons de débardage, les engins forestiers sont à l'origine de forces dynamiques telles qu'accélération, décélération et vibration, ainsi que de moments de force créés par le travail de la grue ou lors du franchissement d'obstacles.

Ce sont les roues présentant la pression en zone de contact la plus élevée qui sont déterminantes pour la charge exercée sur le sol. Il est par conséquent important de chercher à obtenir une répartition de la masse de l'engin entre l'essieu avant et l'essieu arrière la plus équilibrée possible, ce qui s'avère particulièrement difficile à obtenir dans le cas de porteurs forestiers alternant régulièrement avec des niveaux de charge différents. Dans un tel cas de figure, l'engin en charge aura souvent jusqu'à 60 à 70 % de sa masse reposant sur l'essieu arrière.

La pression dans les zones de contact peut être diminuée principalement de deux manières.

*En diminuant la charge par roue:*

- faible poids total
- nombre de roues le plus élevé possible pour un même poids
- répartition du poids la plus équilibrée possible entre l'avant et l'arrière

*En augmentant la surface de contact:*

- basse pression de gonflage des pneus
- pneus larges
- grand diamètre des roues

Une faible charge maximale par roue, assortie à une basse pression de gonflage des pneus en combinaison avec des pneus larges, représente la mesure la plus efficace pour diminuer la pression dans les zones de contact. La largeur des pneus n'agit, à elle seule, que très peu sur la surface de la zone de contact et par conséquent sur la pression en zone de contact. Des pneus plus larges permettent par contre de réduire davantage la pression de gonflage, augmentant ainsi efficacement la surface de la zone de contact. Plus la pression de gonflage est basse et plus la charge maximale admissible des pneus diminue, raison pour laquelle la pression de gonflage minimale des pneus est plus haute dans le cas de charges par roue élevées que dans le cas de charges par roue faibles. Il sera donc possible de réduire plus fortement la pression de gonflage des pneus pour des engins légers que pour des engins lourds.

Rouler à grande vitesse sur des chaussées à revêtements durs avec des pressions de gonflage faibles conduit à une usure excessive des pneus. Au cas où il serait fréquent d'alterner les longs trajets sur route et les trajets sur layons de



Fig. 13. Ce porteur forestier a été équipé, à des fins de démonstration, de deux types différents de semi-chenille 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, sur terrains plats ou légèrement inclinés.

débardage, la pression de gonflage devrait être régulièrement adaptée aux conditions changeantes d'intervention. Une installation de réglage automatique de la pression de gonflage des pneus représente une solution intéressante, permettant de modifier la pression des pneus depuis la cabine de pilotage tout en roulant lentement. Equiper un engin avec un tel système peut valoir la peine malgré le coût d'investissement élevé. En effet, selon les conditions d'intervention, le nombre de jours d'utilisation dans l'année augmentera, puisqu'il sera possible de travailler dans des conditions d'humidité plus élevée tout en préservant les sols.

Les semi-chenilles Bogie sont un genre de chenilles en acier ou en matière synthétique installées sur les roues d'un essieu tandem (Fig. 13) et servaient à l'origine à améliorer la traction et la sécurité sur des terrains en pente. Un nouveau type de semi-chenilles, appelé semi-chenilles portantes, a ensuite été développé dans le but de préserver les sols. Ces semi-chenilles sont prévues pour les interventions sur les sols dont la portance est mauvaise, en terrains plats ou légèrement pentus. Il est ainsi possible, avec ces semi-chenilles portantes, d'élargir les possibilités d'intervention des engins et d'augmenter leur nombre de jours d'utilisation dans l'année grâce à une dépendance réduite par rapport aux conditions climatiques. Il existe malgré ces avantages également des inconvénients : coûts d'investissement élevés, temps et frais de montage, augmentation du poids de l'engin, dépenses supplémentaires liées au transport des semi-chenilles, augmentation de la consommation de carburant, risques de salir et d'endommager les routes forestières, difficultés de déplacement rapide et simple entre différents lieux d'intervention, phénomènes de projection latérale du sol lors du passage dans les virages et risques de blessures aux racines des arbres en bordure des layons de débardage. Les études scientifiques sur les conséquences des semi-chenilles Bogie sur les sols sont complexes et ne sont pas encore terminées.

Les châssis sur chenilles équipent surtout les récolteuses pour les interventions sur terrains en pente, afin d'améliorer la praticabilité du terrain et plus particulièrement pour les déplacements en montée. Aussi longtemps que ces chenilles restent en contact avec le sol,

la surface de contact est considérablement plus grande que pour des engins comparables équipés de roues et la pression en zone de contact est par conséquent plus faible. Mais comme les layons de débardage présentent souvent un relief accidenté des chenilles longues et rigides n'auront qu'un contact partiel avec le sol, ce qui pourra causer ponctuellement des pressions très élevées dans les zones de contact. Les forces de traction seront donc transmises à une surface de contact réduite, ce qui pourra entraîner des dégâts à la surface du sol. Les changements de direction des engins créeront également d'importantes forces latérales de cisaillement à l'origine de nouvelles blessures au sol. Il est possible de diminuer ces inconvénients au moyen de différentes mesures techniques, comme des châssis sur chenilles munis de roulettes à déplacement vertical permettant une meilleure adaptation des chenilles à la surface du terrain lorsque la rugosité du sol est grande. Une autre solution remplissant le même objectif réside dans l'utilisation d'engins articulés équipés de quatre chenilles individuelles et pendulaires.

Les châssis sur chenilles impliquent généralement un risque élevé de blessures aux racines des arbres en bordure de layons, qui peut être néanmoins diminué en utilisant des chenilles munies d'éléments protecteurs en caoutchouc ou de chenilles en matière synthétique.

#### **Diminuer le patinage**

Les forces de cisaillement créées dans le sol par les pneus d'un engin lorsqu'il se déplace interrompent les connections entre les pores. Les conséquences s'avèrent particulièrement préjudiciables lorsque les roues motrices patinent. Certaines mesures techniques telles que la transmission intégrale de la traction sur toutes les roues, la propulsion hydrostatique, la répartition du poids la plus équilibrée possible, ainsi qu'une pression basse de gonflage des pneus permettent de diminuer ces phénomènes de patinage des roues. Dans le cas de débardage en pente, les trajets en charge devraient avoir lieu en descendant et lorsque la portance du sol devient critique, il serait préférable d'effectuer les trajets à vide en montant tout en empruntant les routes forestières. Il est enfin possible d'éliminer presque complètement les phénomènes de patinage des roues en utilisant ce que l'on appelle un treuil de halage, dont la

vitesse d'enroulement du câble est synchronisée avec la traction.

## **Mesures concernant l'exécution des travaux**

### **Rester sur les layons de débardage avec les engins**

Les engins ne doivent pas quitter les layons de débardage. Le risque est particulièrement élevé avec les tracteurs forestiers équipés d'une grue (ou de pinces) de débardage, avec lesquels la tentation est grande de s'enfoncer dans le peuplement à gauche et à droite du layon pour atteindre, avec la grue, du bois à terre plus éloigné.

### **Maintenir les layons de débardage dans un état praticable**

Les layons de débardage ne sont pas boisés et sont sans constructions. Ils appartiennent à long terme à la surface forestière productive et non aux infrastructures d'équipement comme les routes forestières et les pistes pour engins forestiers. Leur praticabilité peut cependant, dans certains cas, être améliorée grâce à des interventions localisées, comme pour le franchissement de petits cours d'eau au moyen de tuyaux ou de rondins de bois.

Les layons doivent être utilisés avec précaution pour qu'à la fin des travaux de récolte du bois, ils soient toujours en bon état et restent ainsi utilisables pour les prochaines interventions dans le peuplement. Des layons de débardage avec de profondes ornières ont des conséquences négatives sur la productivité et conduisent à une usure plus importante des engins. Il est par conséquent dans le propre intérêt du propriétaire forestier, du service forestier et de l'entrepreneur forestier de prendre soin, même sur le court terme, des layons de débardage.

### **Formation d'un tapis de branches**

Les tapis de branches sur les layons de débardage permettent de répartir les forces de manière plus homogène et ainsi de diminuer leurs répercussions dans le sol (compaction). Cependant, l'efficacité d'un tapis de branches dépendra surtout de sa qualité, les tapis composés de branches de feuillus étant moins efficaces que ceux composés de branches de résineux. Une action très positive du tapis de branches est la protection du sol de surface contre les dégâts dus aux forces de traction des roues.



## Débardage avec charge réduite

La charge utile dans le cas de porteurs forestiers, soit la partie de la charge qui repose sur le véhicule dans le cas de tracteurs de débardage, a une influence prépondérante sur la charge par roue. Plus la charge utile sera grande et plus la charge par roue, et de ce fait la pression dans les zones de contact, sera élevée. Cette dernière peut être réduite efficacement en diminuant la charge utile. «Débarder avec la moitié de la charge» représente une alternative valable à l'arrêt total des travaux lorsque les conditions du sol deviennent critiques. Par contre, circuler à charge réduite signifie également plus de trajets et par conséquent des coûts plus élevés. Cette solution est à prendre en considération si, pendant les travaux de débardage sur l'emplacement d'une coupe de bois, l'humidité des sols, après un épisode de pluie par exemple, augmente de telle manière que le type d'ornièrre 3 apparaît, alors que l'on souhaiterait terminer le travail.

## Interrompre les travaux

Si, au cours d'une coupe de bois, le type d'ornièrre 3 apparaît sur un layon de débardage, cela signifie que l'humidité des sols est trop élevée pour que l'on circule avec l'engin en question.

Il existe, dans ce cas, différentes possibilités d'intervention:

- diminuer la pression en zone de contact grâce à des mesures techniques (diminuer la pression de gonflage des pneus, débardage avec un volume de chargement réduit, installer des semi-chenilles Bogie),
- interrompre les travaux et ne les reprendre que lorsque le sol sera devenu suffisamment sec,
- interrompre les travaux et utiliser les engins sur une surface de réserve. Celle-ci doit être praticable tout en préservant les sols (autre structure du sol, humidité du sol différente) et, dans le cas de contrats de livraison avec délais, être en mesure de livrer les assortiments exigés.

## Mesures de régénération

La plantation d'aulnes glutineux permet, à travers leur enracinement dans les horizons compactés sous les ornières, d'activer la régénération des caractéristiques du sol et de ce fait de ses fonctions. Le rétablissement des fonctions racinaires des sols forestiers compactés sera étudié au cours de prochains travaux de recherche.

## Aspects économiques

Les bénéfices de la protection physique des sols pour l'économie forestière et la société sont à mettre en regard avec ses coûts. La figure 14 présente un aperçu des mesures ayant des répercussions financières sur la base desquelles les coûts ont été estimés. L'accent a été mis sur les mesures liées à l'entreprise, parmi lesquelles il faut distinguer les mesures d'investissement de celles qui concernent chaque coupe de bois individuellement. Les mesures de base au niveau de

### Aperçu des mesures ayant des répercussions financières dans le cadre de la protection des sols

	Investissements supplémentaires	Mesures supplémentaires pour chaque coupe de bois impliquant	
		des coûts fixes	des coûts variables
Planification (exploitation forestière)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– <b>formation continue pour chef d'exploitation</b></li> <li>– cartographie des stations sur la base de la praticabilité des sols</li> <li>– marquage et documentation de la desserte de détail</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– déterminer des surfaces de réserve</li> <li>– évaluation de la performance environnementale concernant la protection des sols<sup>1</sup></li> </ul>	
Pilotage et exécution (exploitation forestière)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– <b>formation continue pour conducteur d'engins</b></li> <li>– logiciel permettant d'apprécier la praticabilité des sols<sup>2</sup></li> <li>– instruments de mesures de la teneur en eau des sols</li> <li>– 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<sup>3</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– <b>appréciation de l'état du sol → décision de rouler ou non</b></li> <li>– interruption des travaux et intervention sur des surfaces de réserves</li> <li>– mesures de régénération</li> <li>– <b>contrôle à la fin des travaux</b><sup>4</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– renoncer partiellement au passage avec des engins → distances de treuillage augmentées au débardage</li> <li>– débarder en réduisant la charge, respectivement avec un engin plus petit</li> <li>– passer d'un système de récolte au sol à un système de récolte par câble<sup>5</sup></li> </ul>
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'ornièrre 3 en fonction des conditions de station.

<sup>2</sup> Il existe des prototypes de ce genre de logiciel, le programme ProFor par exemple.

<sup>3</sup> Le treuil de halage n'a pas été pris en compte pour les calculs relatifs aux équipements supplémentaires.

<sup>4</sup> Seuls les coûts supplémentaires liés à la protection des sols ont été pris en considération pour les calculs relatifs au contrôle final des travaux. Ces coûts supplémentaires comprennent par exemple pour le chef de l'exploitation forestière les points suivants: longer les ornières, les relever, les évaluer, les reporter sur un plan et les numériser.

<sup>5</sup> Mesure coûteuse à prendre en considération au cas par cas.

Fig. 14. Les coûts relatifs à la protection des sols dans le cadre de l'exploitation des forêts dépendent des conditions de station et des conditions au sein de l'entreprise. La limite inférieure des coûts repose sur les mesures de base marquées en gras dans le tableau. Les coûts peuvent augmenter très fortement suivant les cas, en fonction de la nécessité des mesures à prendre.

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. Les coûts minimaux issus de l'application des mesures de base s'élevaient à environ 5 Fr./ha par an ou 0.5 Fr. par m<sup>3</sup>, ce qui représente à peine un pourcent des dépenses moyennes liées à la récolte du bois. Les coûts peuvent néanmoins augmenter très fortement en présence de conditions difficiles et d'exigences élevées. Nos modélisations donnent dans les cas extrêmes des coûts pouvant atteindre les 60 Fr./ha par an ou 6 Fr. par m<sup>3</sup>.

Ces investissements pour la protection des sols garantiront ainsi la conservation durable du sol forestier en tant que base de la production.

## Perspectives

Cette notice pour le praticien présente les aspects écologiques et économiques de la problématique de la protection des sols en forêt, ainsi que les dispositions légales s'y rapportant. Elle donne également des indications concernant les bases de pédologie et la gestion de la protection des sols. Cette notice démontre que la réelle nécessité d'agir à l'interface engin-sol ne peut se concrétiser que si tous les acteurs de la pratique sont impliqués.

Il reste encore toute une série de questions en suspens dans la recherche comme dans la pratique, auxquelles il faut encore répondre, par exemple l'appréciation quantitative de la praticabilité

des sols et la question de la quantité et de l'étendue tolérable de la présence d'ornières dans le cadre de l'exploitation forestière.

A l'avenir, des dépliants seront proposés afin, d'une part, de mieux valoriser l'importance de la protection des sols et de la diversité des exigences qui lui sont posées et, d'autre part, d'appliquer d'éventuelles nouvelles connaissances sur

le sujet. Ces dépliants, disponibles sur Internet en complément de la présente notice, traiteront de thèmes spécifiques et s'adresseront à des groupes d'acteurs particuliers ([www.wsl.ch/notice\\_45](http://www.wsl.ch/notice_45)). Les processus d'information et de sensibilisation pourront ainsi être maintenus en marche et la concrétisation des attentes vis-à-vis de la protection des sols encouragée.

## Informations complémentaires

FREY, B.; LÜSCHER, P., 2008: Mikrobiologische Untersuchungen in Rückegassen. LWF Waldforschung aktuell, Nr. 67/2008, Jg. 15, 5–7.

LÜSCHER, P.; SCIACCA, S.; THEES, O., 2008: Bestrebungen zur Verbesserung des Bodenschutzes in der Schweiz. LWF Waldforschung aktuell, Nr. 67/2008, Jg. 15, 19–21.

SCHACK-KIRCHNER, H.; HILDEBRAND, E.E., 2009: Wie lässt sich das «Verformungsexperiment» in unseren Waldböden stoppen? Freiburger forstliche Forschung, Berichte, Heft 79, 1–9.

Waldböden der Schweiz, Band 1 bis 3

WALTHERT, 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 S.

BLASER, P.; ZIMMERMANN, S.; LUSTER, J.; WALTHERT, L.; LÜSCHER, P., 2005: Waldböden der Schweiz. Band 2. Regionen Alpen und Alpensüdseite. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Bern, Hep Verlag. 920 S.

ZIMMERMANN, S.; LUSTER, J.; BLASER, P.; WALTHERT, L.; LÜSCHER, P., 2006: Waldböden der Schweiz. Band 3. Regionen Mittelland und Voralpen. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Bern, Hep Verlag. 847 S.

Cette notice est le résultat d'une étroite collaboration entre les unités de recherche Sciences du sol et Systèmes de gestion forestière du WSL et du soutien de la division Forêt et de la section Sol de l'OFEV.



Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'environnement OFEV

## Notice pour le praticien ISSN 1012-6554

### Concept

Les résultats de la recherche sont élaborés pour constituer des pôles de savoir et des guides d'action à l'intention des acteurs de la pratique. Cette série s'adresse aux milieux de la foresterie et de la protection de la nature, aux autorités, aux écoles ainsi qu'aux non-initiés.

Les versions allemandes de cette série sont intitulées

### Merkblatt für die Praxis ISSN 1422-2876

Les éditions italiennes paraissent occasionnellement dans le périodique **Sherwood, Foreste ed Alberi Oggi**.

### Pour les dernières parutions, consultez

[http://www.wsl.ch/publications/series/merkblatt/index\\_FR](http://www.wsl.ch/publications/series/merkblatt/index_FR)

## Managing Editor

Dr. Ruth Landolt  
Eidg. Forschungsanstalt WSL  
Zürcherstrasse 111  
CH-8903 Birmensdorf  
E-mail: [ruth.landolt@wsl.ch](mailto:ruth.landolt@wsl.ch)  
[www.wsl.ch/publikationen/](http://www.wsl.ch/publikationen/)

Relecture: Martin Moritz, WSL  
Jenny Sigot Müller, WSL  
Mise en page: Sandra Gurzeler, WSL  
Traduction: Stéphane Sciacca

Impression: Sihldruck AG