

**Lignatec**

## **Ouvrages de protection en bois**

Erosion | glissements de terrain | torrents |  
avalanches



## Table des matières

Cette publication a été soutenue par les partenaires suivants:

### Soutien financier principal

Office fédéral de l'environnement OFEV  
Plan d'action Bois

### Soutien financier

Fondation de prévention des établissements cantonaux d'assurance FP

### Autres soutien

ecorisQ  
Entrepreneurs Forestiers Suisse EFS  
Spécialistes des dangers naturels FAN  
Société suisse des ingénieurs et architectes SIA, Société Spécialisée Forêt SSF

### Patronage

Société suisse des ingénieurs et des architectes SIA

### Partenaires de projet

Haute école spécialisée bernoise BFH,  
Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires HAFL  
Universität für Bodenkultur Wien BOKU  
WSL- Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF  
Centre pour le génie forestier Fobatec

### Partenaires industriels

Caprez Ingenieure AG, Silvaplana  
Castagnostyle GmbH, Taverne  
fim – Kompetenz für Forst,  
Landwirtschaft und Garten, Uetendorf  
Forst Aletsch, Fieschertal  
Lindner Suisse GmbH, Wattwil

<b>Page</b>	<b>4</b>	<b>Avant-propos</b>
	<b>5</b>	<b>1</b>
		<b>Introduction</b>
		1.1 De la prévention à la gestion intégrée des risques
		1.2 Mesures dans le cadre de la gestion intégrée des risques
		1.3 Des arbres en travers au génie biologique
	<b>9</b>	<b>Pérennité du matériau bois</b>
		2.1 Généralité
		2.2 Dégradation biologique du bois
		2.3 Classe d'emploi (CE)
		2.4 Influences externes et internes sur la pérennité du bois
		2.5 Essences durables et disponibilité dans les forêts suisses
		2.6 Critères d'utilisation du bois pour les ouvrages de protection
		2.7 Exemple de barrages de torrent en escalier
	<b>14</b>	<b>3</b>
		<b>Approches normatives et lignes directrices pour la conception d'ouvrages de protection en bois rond</b>
		3.1 Généralités
		3.2 Bases normatives
		3.3 Normes pour la détermination des actions
		3.4 Normes pour la vérification des états limite type 1 et type 3
		3.5 Normes pour la vérification de l'état limite de type 2
	<b>17</b>	<b>4</b>
		<b>Le bois comme protection contre l'érosion</b>
		4.1 Processus et actions
		4.2 Aperçu et fonctions des ouvrages contre l'érosion
		4.3 Construction et utilisation d'ouvrages anti-érosion en bois
	<b>22</b>	<b>5</b>
		<b>Le bois dans la protection contre les glissements de terrain</b>
		5.1 Processus et actions
		5.2 Aperçu et fonction des ouvrages de protection contre les glissements de terrain
		5.3 Construction et utilisation d'ouvrages de stabilisation en bois
		5.4 Limites de l'utilisation des ouvrages en bois
		5.5 Effet complémentaire des mesures de génie biologique
	<b>33</b>	<b>6</b>
		<b>Le bois dans l'aménagement des torrents</b>
		6.1 Processus et actions
		6.2 Vue d'ensemble et fonction des barrages
		6.3 Construction et utilisation des barrages en bois
		6.4 Construction d'ouvrages longitudinaux en bois
		6.5 Limites de l'utilisation d'ouvrages en bois dans la protection des torrents
	<b>43</b>	<b>7</b>
		<b>Le bois dans la protection contre les avalanches et les mouvements de neige</b>
		7.1 Processus et actions
		7.2 Vue d'ensemble et fonction des ouvrages paravalanches
		7.3 Construction et utilisation de paravalanches en bois
		7.4 Palissades à neige soufflée
		7.5 Limites de l'utilisation des ouvrages en bois

---

**Auteurs**

Luuk Dorren, Prof. Dr., BFH-HAFL  
(chap. 1)  
 Willy Eyer, Dipl.-Ing. ETH, (chap. 9)  
 Stefan Margreth, Dipl.-Ing. ETH, SLF  
(chap. 3/7)  
 Gunther Ratsch, MSc Ing. BFH, Lignum  
(chap. 3)  
 Christian Rickli, Dipl.-Ing. ETH, WSL  
(chap. 2)  
 Massimiliano Schwarz, Dr., BFH-HAFL  
(chap. 4/5)  
 Jürgen Suda, Dipl. Ing. Dr. rer. nat.,  
 BOKU (chap. 3/6)  
 Magdalena Von Der Thannen,  
 Dipl.-Ing. Dr. techn., BOKU (chap. 8)

---

**Relecture technique**

Willy Eyer, Dipl.-Ing. ETH,  
 Franz Thalmann, Förster HF

---

**Coordination**

Gunther Ratsch, MSc Ing. BFH,  
 Lignum, Zurich (Rédacteur responsable)  
 Hervé Bader, Dipl.-Ing. ETH, Fobatec  
 Walter Krättli, Bsc Forstwirtschaft BFH,  
 Fobatec

---

**Traduction**

Lucie Mériageux, Denis Pflug,  
 Cedotec-Lignum,  
 Le Mont-sur-Lausanne  
 Hervé Bader, Fobatec

---

**Image de couverture**

Râteliers en bois comme paravalanches  
 temporaires, Forst Aletsch  
 (C. Pfammatter, Viège)

<b>52</b>	<b>8</b>	<b>Ouvrages de protection et durabilité</b>
	8.1	Introduction
	8.2	Normes et données de base
	8.3	Bilan écologique des ouvrages d'aménagement de torrent – étude de cas
	8.4	Résultats
	8.5	Conclusions
<b>60</b>	<b>9</b>	<b>Résumé</b>
	9.1	Avantages de l'utilisation du bois pour les ouvrages de protection
	9.2	Limite de l'utilisation du bois pour les ouvrages de protection
	9.3	Considérations générales sur l'utilisation du bois
<b>64</b>	<b>10</b>	<b>Partenaires</b>
<b>65</b>	<b>11</b>	<b>Littérature</b>

## Avant-propos

---

En Suisse, les dangers naturels représentent une menace importante pour les personnes, les biens et l'environnement. Il s'agit notamment des risques gravitationnels (p. ex. crues, glissements de terrain, avalanches) et des événements météorologiques (p. ex. tempêtes et grêle). Les risques directs liés aux dangers naturels météorologiques et gravitaires vont augmenter en raison du changement climatique, mais aussi de l'extension constante des zones bâties et de leur densité croissante. Des périodes de pluie intense entraînant des crues locales ou des éboulements et de l'érosion sont de plus en plus probables, mais aussi des avalanches de glissement dues à des changements de température.

La Suisse dispose d'une longue tradition dans la construction d'ouvrages de protection. Il n'est donc pas surprenant que la protection suisse contre les avalanches, et donc le vaste savoir-faire en matière d'utilisation du bois à cette fin, soit inscrite au patrimoine culturel mondial de l'UNESCO. L'inscription sur la liste a eu lieu en 2018 et souligne l'interaction entre le savoir traditionnel, la technologie et la culture populaire.

La construction d'ouvrages de protection en bois s'est perfectionnée au fil des siècles et a été réalisée avec des essences présentes localement.

Dans la forêt suisse, outre les essences souvent utilisées comme l'épicéa et le sapin, on trouve aussi des espèces telles que le mélèze et le châtaignier qui, en raison de leur durabilité naturelle, conviennent en particulier aux ouvrages de protection. Le bois permet également d'élaborer des produits innovants tels que les non-tissés en laine de bois, qui peuvent être utilisés pour la lutte contre l'érosion.

Au cours des dernières décennies outre le bois, des matériaux tels que l'acier, le béton ou les matières synthétiques ont souvent été utilisés pour les ouvrages de protection. En raison de leurs propriétés spécifiques, ces matériaux sont adaptés aux ouvrages de protection. Il est recommandé de choisir un matériau qui réponde de manière optimale à toutes les exigences techniques, en fonction de l'application, de l'événement attendu et de la durée d'utilisation souhaitée. Les ouvrages de protection en bois rond sont toujours convaincants en termes de durabilité, surtout lorsque des ressources locales sont mises en œuvre et qu'ils sont associés à des mesures de génie biologique.

Le présent Lignatec a pour objectif de décrire de façon synthétique l'utilisation du bois dans les ouvrages de protection contre l'érosion, les glissements de terrain et les avalanches ainsi que les barrages de torrents, et de faire connaître les constructions éprouvées et leurs applications. C'est pourquoi cette publication s'adresse non seulement aux spécialistes de la technique de construction forestière, mais aussi aux planificateurs de la prévention des dangers naturels ainsi qu'aux personnes intéressées par la construction en bois.

Lignum tient à remercier tous les auteurs et partenaires qui ont contribué à la réussite de cette édition de Lignatec.

*Gunther Ratsch, Lignum technique*  
*Rédacteur responsable*

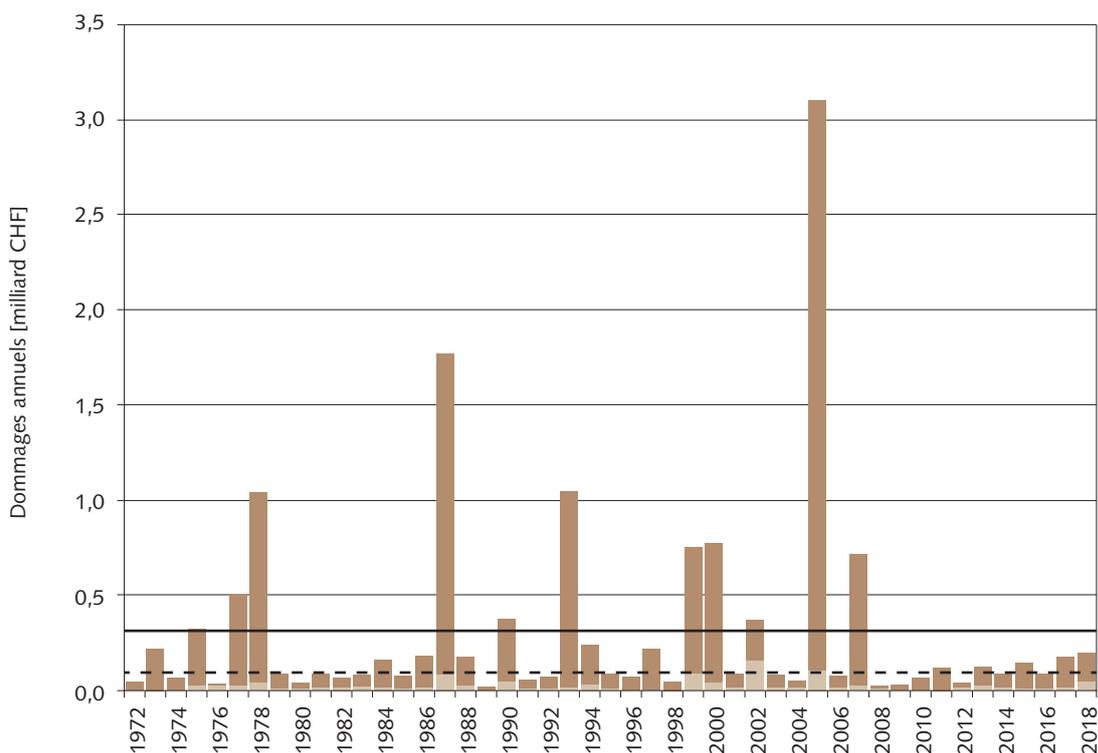
# 1 Introduction

Dans toute la Suisse, les dangers naturels gravitationnels (p.ex. glissements de terrain, laves torrentielles, crues ainsi que chutes de pierres et avalanches) entraînent des dommages annuels d'environ 100 à 300 millions de CHF (cf. figure 1). [1] A cela s'ajoutent les dommages causés par les dangers naturels météorologiques/climatologiques (p.ex. grêle et tempêtes) et tectoniques (p.ex.

séismes). Comme l'espace à bâtir est utilisé de manière toujours plus intensive et que les valeurs matérielles ne cessent de croître, les dommages dus aux dangers naturels gravitationnels ont considérablement augmenté entre 1972 et 2007. Depuis un peu plus de 20 ans, on essaie donc de faire face aux effets des dangers naturels à l'aide de la gestion intégrée des risques. [2]

Figure 1  
Evolution du montant annuel des dommages causés par les crues, les laves torrentielles, les processus de glissement et de chutes de 1972 à 2018 (correction de l'inflation, base 2018). La moyenne arithmétique (traitillé, 306 millions de CHF) et la médiane (trait plein, 96 millions de CHF), calculées sur la période représentée sont indiquées par des lignes horizontales.

■ inondations/  
laves torrentielles  
■ processus de chute/  
glissements de terrain



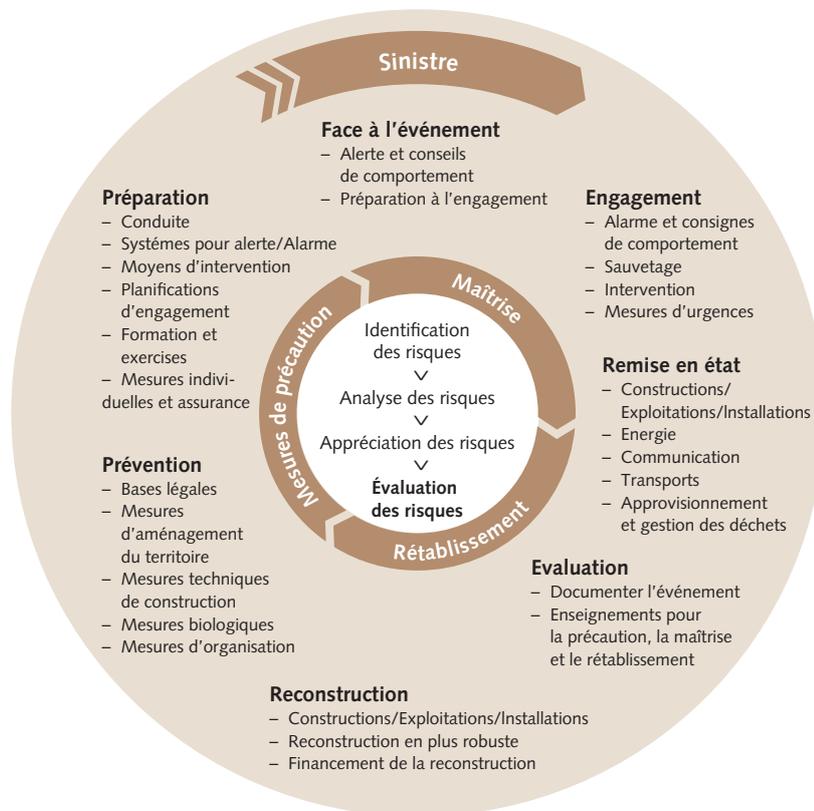
## 1.1 De la prévention à la gestion intégrée des risques

Bien que les bases des cadastres et des cartographies des dangers naturels existent depuis longtemps [3], nombreux étaient ceux qui, jusque dans les années 1980, pensaient que les ouvrages de protection suffisaient à maîtriser les dangers naturels gravitationnels. Si ces ouvrages permettent en général de réduire le risque lié aux dangers naturels, ils n'offrent pas une protection absolue et peuvent même avoir dans des cas exceptionnels des conséquences négatives. En effet, les ouvrages de protection ne peuvent pas être dimensionnés pour des événements extrêmes ou pour des dangers naturels simultanés, ce qui peut conduire à des réactions en chaîne, par exemple lorsque de fortes pluies et des glissements de terrain apportent beaucoup de sédiments et de bois dans les cours d'eau, entraînant ainsi des obstructions et des inondations inattendues.

Alors qu'auparavant, un événement était immédiatement suivi de la défense contre les dommages, de la remise en état et, le cas échéant, de nouveaux

aménagement, une approche plus globale doit être mise en œuvre aujourd'hui avec la gestion intégrée des risques (cf. figure 2). La gestion intégrée des risques considère tous les dangers naturels, mesure les risques en appliquant des échelles comparables, traite tous les risques de manière comparable, implique tous les protagonistes et intéressés et envisage les mesures à mettre en œuvre en tenant compte de tous les aspects du développement durable. La gestion intégrée des risques comprend les éléments suivants: la prévention, l'événement proprement dit, la gestion de ce dernier et le rétablissement. Sur la base d'une analyse des dangers et d'une évaluation des risques, les mesures préventives doivent empêcher les décès et limiter les dommages matériels dus aux phénomènes naturels. En outre, la prévoyance garantit la manière de procéder en cas de crise si, malgré les mesures préventives, il n'est pas possible d'atteindre un niveau de sécurité suffisant.

Figure 2  
Modèle simplifié  
de la gestion intégrée  
des risques.



## 1.2 Mesures dans le cadre de la gestion intégrée des risques

Les mesures prises dans le cadre de la gestion intégrée des risques peuvent être classées dans les domaines suivants :

- aménagement du territoire
- mesures biologiques
- mesures techniques de construction
- mesures organisationnelles

En principe, la première chose à faire au moyen de l'aménagement du territoire est d'éviter les zones menacées ou de ne pas augmenter le risque existant. Dans de nombreux cas, cela n'est pas possible dans un pays comme la Suisse. Les mesures qui s'appliquent alors à grande échelle sont les mesures biologiques. La plupart d'entre elles concernent les forêts de protection, mais les mesures de génie biologique en font également partie, à l'exemple des ouvrages de stabilisation en bois combinés à des reboisements.

Selon l'inventaire forestier national suisse IFN [4], environ un tiers du territoire suisse est recouvert de forêts, soit 1,32 million d'hectares, dont 49 % sont des forêts de protection. La forêt constitue donc

une infrastructure verte de grande envergure qui joue un rôle important de protection contre les dangers naturels. [5] Les forêts peuvent prévenir les départs d'avalanches et les glissements de terrain peu profonds, mais aussi protéger contre les effets des chutes de pierres. En outre, la forêt réduit l'érosion des berges, de la surface des versants à proximité des torrents et diminue ainsi également les risques de laves torrentielles. En fonction de la répartition spatiale et temporelle, de la durée et de l'intensité des précipitations, ainsi que de la taille du bassin versant, les forêts peuvent réduire aussi bien la probabilité d'occurrence que l'intensité des crues. La forêt contribue ainsi en de nombreux endroits à réduire les risques de dangers naturels à un niveau supportable. Grâce à la combinaison avec la forêt protectrice, les mesures techniques visant à couvrir des exigences de protection plus élevées sont souvent moins coûteuses (frais d'installation ou d'entretien moins élevés). A certains endroits, les mesures techniques n'ont de sens qu'en raison de la protection supplémentaire offerte par la forêt. [6]

Figure 3

Arbres en travers et souches hautes dans une forêt de protection contre les chutes de pierres, dans le canton du Jura.



Dans le cadre de la gestion de la forêt protectrice, on travaille souvent avec des troncs abattus en travers de la pente et en laissant des souches hautes (voir figure 3). Cela doit permettre d'éviter que l'effet protecteur de la forêt ne se réduise sur plusieurs années en raison d'interventions sylvicoles. Lors de telles interventions, des arbres sont généralement abattus pour diverses raisons (p. ex. pour favoriser le rajeunissement ou améliorer la structure du peuplement); par la suite, le nombre de tiges (mesure de la densité d'un peuplement forestier) diminue. Différents travaux scientifiques ont montré que les arbres en travers ont un effet protecteur modéré à important (voir à ce sujet [7] et [8] concernant les chutes de pierres ou [9] et le chapitre 7 concernant les avalanches). L'efficacité

effective de la forêt protectrice, y compris les arbres transversaux et les souches hautes, est surtout déterminée par la longueur de la pente boisée et la quantité de bois à terre ou sur pied (surface terrière ou nombre de tiges et diamètre moyen des tiges) (voir p. ex. [10]).

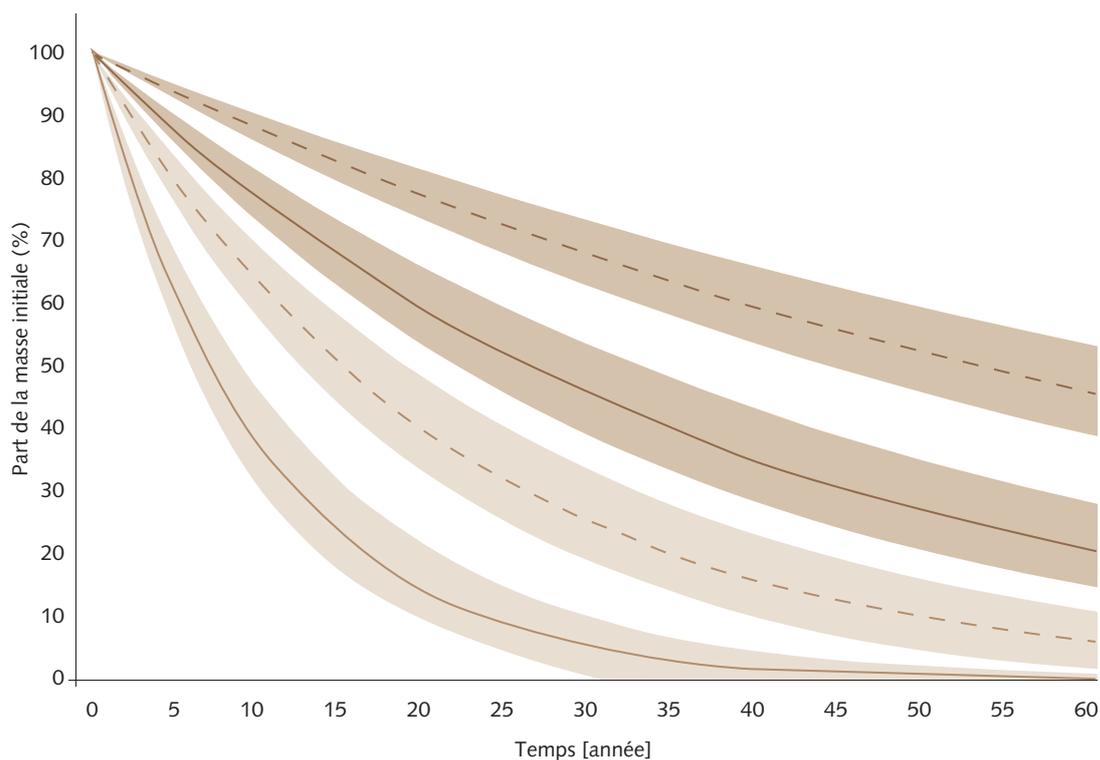
L'un des défis de la gestion des forêts de protection est la durée d'utilisation des arbres en travers, qui est déterminée par la pérennité du bois. Le chapitre 2 aborde en détail cette thématique. Plusieurs travaux de recherche ([11] et [12]) indiquent que la décomposition naturelle du bois en fonction de l'essence, de la température annuelle moyenne (TAM) ainsi que de l'humidité du site entraîne une diminution exponentielle de la densité et de la résistance, et donc une réduction de l'effet protecteur. Comme le montre la figure 4, un tronc de hêtre peut déjà avoir perdu près de 40 % de sa masse initiale cinq ans après l'abattage. Pour un tronc d'épicéa, ce chiffre serait d'environ 15 %.

Il est évident que la forêt seule n'est pas partout en mesure de réduire le risque de danger naturel à un niveau acceptable. Ceci en premier lieu parce que le périmètre de danger n'est pas suffisamment boisé (p. ex. dans les couloirs d'avalanches actifs et les couloirs de laves torrentielles) ou parce que son efficacité est localement trop faible, voire nulle (p. ex. en cas d'inondations le long de grands fleuves). C'est à ces endroits que le troisième type de mesures, les mesures techniques de construc-

Figure 4

Décomposition des troncs de hêtres et d'épicéas au fil du temps pour les sites frais et plus chauds, y compris la plage de dispersion = température annuelle moyenne (graphique basé sur les données de [11] et [12]).

- hêtre (TAM < 0°C)
- hêtre (TAM = 12°C)
- épicéa (TAM < 0°C)
- épicéa (TAM = 12°C)



tion, entrent en jeu. Des exemples connus sont les digues fluviales, les collecteurs de sédiments ou les filets pare-pierres. Bien que l'on travaille souvent avec du béton, de l'acier, des blocs et de la terre, les ouvrages en bois jouent également un rôle important. Des exemples connus sont les paravalanches en bois, les palissades contre les chutes de pierres et bien d'autres, qui sont présentés en détail dans les chapitres suivants. Dans la gestion actuelle des dangers naturels basée sur le risque, le rapport coût-efficacité d'une mesure de protection doit être vérifié avant sa réalisation. Ce dernier s'exprime par le rapport entre l'utilité d'une mesure (la réduction annuelle du risque) et les coûts annuels de la mesure (le total des coûts de construction et d'entretien divisé par la durée d'utilisation de la mesure). Pour les mesures techniques classiques (ouvrages de protection construits avec du béton, de l'acier, des blocs et des matériaux terreux), le rapport coût-

efficacité n'est pas toujours assuré en raison des coûts de construction élevés. Les dispositifs réalisés avec du bois sont certes généralement liés à des coûts de construction plus faibles, mais aussi à une durée d'utilisation plus courte. La question du rapport coût-efficacité doit donc être examinée de cas en cas.

Si le rapport coût-efficacité des mesures techniques de construction est insuffisant, des mesures organisationnelles peuvent réduire les risques. Il peut s'agir par exemple de surveiller le processus de danger en combinaison avec la fermeture de routes et l'évacuation de zones résidentielles. D'autres exemples sont les mesures de protection des objets telles que les éléments de barrage constitués de tuyaux remplis d'eau le long des rivières, le déclenchement artificiel d'avalanches ou le dynamitage de paquets de roches surveillés par exemple par radar.

### 1.3 Des arbres en travers au génie biologique

Lorsque l'on envisage de faire face aux dangers naturels avec du bois, on entre dans différents domaines spécialisés, dans lesquels diverses définitions et termes sont utilisés. Par exemple, un arbre couché en travers doit-il être considéré comme un ouvrage? Il ressort d'une note de la division Droit de l'Office fédéral de l'environnement OFEV de 2021 concernant les questions de responsabilité s'appliquant aux arbres transversaux dans les forêts protectrices, qu'ils ne constituent en principe pas des ouvrages au sens de l'art. 58 du Code des obligations, dans la mesure où ils sont – comme c'est souvent le cas dans la pratique – simplement adossés aux souches. Ce n'est que lorsqu'ils présentent un lien fixe direct ou indirect avec le sol grâce à l'intervention active de l'homme qu'ils peuvent être qualifiés d'ouvrages. Pour des raisons de proportionnalité et d'acceptabilité, des intervalles plus étendus de contrôle simplifiés pour les arbres transversaux par rapport aux ouvrages de protection techniques et architecturaux classiques semblent adéquats et conformes à l'objectif.

Les ouvrages construits en bois tels que les trépiers, les caissons en bois ou les ouvrages de soutènement peuvent être définis comme des mesures

de protection temporaires. De telles constructions en bois, où le bois agit comme un matériau inerte, sont aussi souvent combinées avec des mesures de génie biologique. En fait, le génie biologique ne prend en compte que les matériaux de construction vivants, c'est-à-dire les semences, les plantes, les parties de plantes et les associations végétales. [13] Le génie biologique fait partie du «génie écologique» (également appelé «éco-ingénierie» au niveau international). Cette approche consiste à concevoir, construire et exploiter des écosystèmes pour certaines applications. Il s'agit donc de gérer des écosystèmes à l'aide de méthodes basées sur l'ingénierie, l'écosystème étant constitué d'une communauté de vie d'organismes et de leur environnement inanimé. Dans ce sens, la gestion des forêts de protection mais aussi les ouvrages de soutènement en bois combinés à des reboisements peuvent être considérés comme de l'éco-ingénierie. De telles mesures d'éco-ingénierie sont aujourd'hui définies dans le contexte international comme des solutions basées sur les écosystèmes ou la nature pour la réduction des risques de dangers naturels (voir [14]). Cette thématique profite actuellement d'un intérêt marqué dans le monde entier.

## 2 Pérennité du matériau bois

### 2.1 Généralité

Différentes influences environnementales limitent l'utilisation du bois dans la construction extérieure: les sollicitations mécaniques, les effets climatiques, mais aussi les êtres vivants tels que les rongeurs et les insectes, les bactéries et les champignons. Les champignons lignivores, qui sont responsables de la diminution de la substance du bois, sont particulièrement importants pour sa dégradation biologique. Pour que les ouvrages de protection en bois

conserver leur fonctionnalité à long terme, il est nécessaire d'offrir aux champignons lignivores des conditions de vie aussi défavorables que possible. Il est en outre important d'utiliser des essences de bois présentant une durabilité naturelle élevée. Les informations suivantes sont pour la plupart tirées de la publication «Le bois utilisé pour la correction des torrents, la consolidation des pentes et la stabilisation des ravins». [15]

### 2.2 Dégradation biologique du bois

Le bois est composé de 41 à 50 % de cellulose et, selon le type de bois, de 25 à 40 % d'hémicellulose et de 18 à 32 % de lignine. Parmi les micro-organismes capables de séparer et de dégrader ces éléments, on trouve d'une part des bactéries et d'autre part différents champignons qui dégradent le bois: pourriture molle, pourriture brune et pourriture blanche, ainsi que des moisissures et des champignons du bleuissement qui ne dégradent pas le bois. Les conditions importantes pour la décomposition du bois sont l'oxygène et l'eau. Une règle de

base veut que le bois puisse être conservé pendant une longue période soit à l'état saturé d'eau, soit à l'état sec avec une humidité du bois < 20 % (pour le bois utilisé à sec). Outre la disponibilité de l'eau, la température fait partie des facteurs importants qui influencent l'activité des champignons: la température minimale se situe au point de congélation, l'optimum se situe entre 20 et 40 °C selon l'espèce de champignon. L'ampleur de la dégradation dépend en outre de la durée d'exposition à des conditions défavorables.

### 2.3 Classe d'emploi (CE)

En fonction de l'exposition à l'humidité et de la situation d'utilisation, les éléments de construction en bois peuvent être répartis en Suisse en quatre classes d'emploi selon la norme SN EN 335 [16], dont deux sont pertinentes pour les ouvrages de protection en bois rond (CE3 et CE4) (cf. tableau 1). La répartition des éléments de construction en bois en classes d'emploi sert à choisir une essence appropriée. Ainsi, les éléments de construction en

bois utilisés à l'extérieur en contact avec le terrain (humidité du bois constamment supérieure à 20 %) sont classés dans la classe d'emploi 4. Les recommandations formulées dans les Tables pour la construction en bois 1 [17] concernant l'utilisation de certaines essences de bois dans les classes d'emploi correspondantes ne sont que partiellement applicables aux ouvrages de protection en rondins.

### 2.4 Influences externes et internes sur la pérennité du bois

La durabilité (pérennité) peut être définie comme la résistance naturelle du bois face aux organismes qui le détruisent. [18] Outre les insectes, il convient de mentionner en particulier les champignons. La durabilité dépend dans une large mesure de la présence ou de l'absence de certaines substances dans le bois (tanins, par ex.). [19] Le bois de cœur de couleur (duramen différencié) présente notamment une durabilité accrue grâce aux métabolites secondaires incrustés dans les parois cellulaires. L'aubier des différentes essences ne diffère que très peu à cet égard; il est généralement peu résistant (voir tableau 2). La règle empirique suivante peut être retenue pour l'ordre de résistance aux champignons décroissante:

1. bois de cœur des essences de feuillus avec duramen différencié (il existe des exceptions, par ex. le frêne, l'orme)
2. bois de cœur des essences de résineux avec duramen différencié
3. essences sans duramen différencié

Pour de nombreux ouvrages de protection – surtout dans les torrents et pour les stabilisations de versants – les essences de bois facilement disponibles tels que l'épicéa et le sapin sont souvent mises en œuvre. Comme ces essences ne comptent pas parmi les plus durables, il convient, lors de leur utilisation, d'accorder une grande importance à la durée d'utilisation requise des ouvrages, à la pro-

Tableau 1  
Classes d'emploi  
pertinentes en Suisse pour  
le bois mis en œuvre et  
possibilités d'occurrence  
des agents biologiques  
selon SN EN 335 [16] et  
[17].

Classe d'emploi	Usage général		Teneur en eau du bois <sup>2)</sup>	Occurrence des agents biologiques <sup>3)</sup>
1 <sup>1)</sup>	À l'intérieur, au sec		sec, constamment inférieure à 20 %	rarement insectes xylophages
2 <sup>1)</sup>	À l'intérieur <sup>4)</sup> , ou sous abri, non exposé aux intempéries. Possibilité de condensation d'eau		parfois supérieure à 20 %	comme classe d'emploi 1 champignons de discoloration
3.1	À l'extérieur, au-dessus du sol, exposé aux intempéries	Conditions d'humidification courtes <sup>5)</sup>	parfois à souvent supérieure à 20 %	comme classe d'emploi 2 champignons lignivores (pourriture brune/blanche)
3.2		Conditions d'humidification prolongées <sup>6)</sup>	souvent à très souvent supérieure à 20 %	comme classe d'emploi 2 champignons lignivores (pourriture brune/blanche)
4	À l'extérieur, en contact avec le sol et/ou l'eau douce		constamment supérieure 20 %	comme classe d'emploi 3 champignons lignivores (pourriture molle) bactéries

<sup>1)</sup> Les classes d'emploi 1 et 2 ne sont pas pertinentes pour des ouvrages de protection.

<sup>2)</sup> Les termes «parfois», «souvent», «très souvent» et «constamment» traduisent une sollicitation croissante, sans que des données chiffrées soient fournies en raison des variables d'influence très diverses.

<sup>3)</sup> La protection contre les agents énumérés n'est pas nécessaire dans tous les cas. Ils ne sont en effet pas présents dans toutes les conditions d'utilisation et dans toutes les situations géographiques, certains agents ne sont pas économiquement significatifs ou ne sont pas capables d'infester certains produits en bois en raison des conditions dans lesquelles se trouvent ces produits.

<sup>4)</sup> Si des conditions de forte humidification régulière sont à prévoir dans les applications intérieures, par exemple dans les zones humides et dans les caves non ventilées (en raison d'éclaboussures ou de condensation élevée), la situation doit être affectée à la classe d'emploi correspondante 3.1 ou 3.2.

<sup>5)</sup> L'eau ne peut pas s'accumuler. Le bois ou le produit en bois ne reste pas longtemps humide.

<sup>6)</sup> Les éléments de construction où des dépôts de saleté, de terre, de feuilles, etc. sont susceptibles de s'accumuler sur plusieurs mois et les éléments de construction soumis à une contrainte particulière doivent être classés dans la classe d'emploi 4.

tection constructive du bois (voir aussi [20]) ainsi qu'à l'évaluation de l'état et à l'entretien. Différents auteurs estiment que les résineux à cernes étroits sont plus durables ([21], [15]). La formation des cernes est influencée par les conditions de croissance auxquelles un arbre est exposé. Ces conditions sont notamment la station, la position sociologique dans le peuplement, l'âge de l'arbre ainsi que les mesures sylvicoles.

La disponibilité en eau et en nutriments de la station est déterminante, mais d'autres facteurs tels que le climat, l'altitude, l'exposition et la durée de la période de végétation jouent également un rôle important. Pour simplifier, plus les conditions de vie sont défavorables pour l'arbre, plus il se développe lentement et plus les cernes sont étroits. On peut

donc s'attendre à trouver du bois à cernes étroits par exemple en altitude, mais aussi chez des arbres dominés ainsi que sur des sites à croissance modérée ou faible. Outre le choix d'une essence appropriée, la sélection ciblée des arbres lors de la coupe permettrait donc en principe de fournir un matériau de construction aussi optimal que possible pour les ouvrages de protection en bois. Il convient donc de souligner que la question de la durabilité du bois utilisé pour la construction peut être complétée par la prise en compte de la répartition des cernes et que des efforts de recherche supplémentaires sont nécessaires sur ce thème. [22]

La question se pose souvent de savoir si le bois doit être écorcé avant sa mise en œuvre pour les mesures de protection. Dans la protection contre les

avalanches et les glissements de neige, on utilise en général du bois écorcé. Pour la protection contre les inondations, le bois peut être utilisé avec ou sans écorce. Cependant, selon une étude à long terme sur des barrages à caissons en bois d'épicéa et de

sapin, le bois écorcé a tendance à être comparative-ment moins durable. [27] On suppose que l'écorçage mécanique, qui entraîne des blessures du corps du bois, est préjudiciable.

Tableau 2  
Durabilité naturelle des essences de bois indigènes selon SN EN 350 [23] avec une classification de la durée d'utilisation selon [19].

Durée d'utilisation <sup>1)</sup>	Nom commercial	Abréviation selon EN 13556	Nom scientifique	Champignons <sup>2)</sup>	Anobium <sup>3)</sup> (capricorne)
15–25 ans	robinier	ROPS	Robinia pseudoacacia	DC 1–2	DC D
	châtaignier	CTST	Castanea sativa	DC 2	DC D
	if	TXBC	Taxus baccata	DC 2	DC D
	chêne	QCXE	Quercus robur	DC 2–4	DC D
10–15 ans	mélèze	LADC	Larix decidua	DC 3–4	DC D
	douglas	PSMN	Pseudotsuga menziesii	DC 3–4	DC D
	pin sylvestre	PNSY	Pinus sylvestris	DC 3–4	DC D
5–10 ans	épicéa	PCAB	Picea abies	DC 4	DC S
	sapin blanc	ABAL	Abies alba	DC 4	DC S
	orme	ULGL	Ulmus glabra	DC 4	DC S
	frêne	FXEX	Fraxinus excelsior	DC 5	DC S
	peuplier	PONG	Populus alba	DC 5	DC S
< 5 ans	<i>aubier</i>			DC 5	DC S
	aulne blanc	ALIN	Alnus incana	DC 5	DC D
	hêtre	FASY	Fagus sylvatica	DC 5	DC S
	charme	CPBT	Carpinus betulus	DC 5	–
	bouleau	BTXX	Betula pendula	DC 5	DC D
	érable sycomore	ACPS	Acer pseudoplatanus	DC 5	DC D
	saule	SAXX	Salix spp.	DC 5	–

<sup>1)</sup> Durabilité de quelques essences de bois indigènes, réparties en classes sur la base de la durée d'utilisation approximative de barres de bois de 5 × 5 cm en contact avec le sol (d'après Findlay 1962 [24], dans Bosshard 1984 [19])

<sup>2)</sup> Durabilité naturelle DC vis-à-vis des champignons: DC 1 = très durable à DC 5 = non durable selon SN EN 350

<sup>3)</sup> Durabilité naturelle DC vis-à-vis des insectes: DC D = duramen durable, DC S = duramen non durable selon SN EN 350

Figure 5 (gauche)  
Pour le bois rond de châtaignier, il convient de vérifier la disponibilité (sections, longueurs).



Figure 6 (droite)  
Paravalanches en châtaignier.



## 2.5 Essences durables et disponibilité dans les forêts suisses

Selon le tableau 2, quatre essences de bois indigènes appartiennent à la classe de durabilité 2 (durable): robinier, châtaignier, if et chêne. Il convient de relever que le robinier ne représente qu'environ 0,1 % de la forêt suisse (IFN [4]). La part du chêne dans l'ensemble des arbres en Suisse est de 2 %, celle du châtaignier de 1 %. Si l'on considère la répartition régionale, la part du châtaignier est de 15 % au sud des Alpes et celle du chêne de 5 % sur

le Plateau central. [25] Des bois tels que le mélèze avec une part de 5,5 %, le douglas avec une part de 0,3 % et le pin avec une part de 2,7 % peuvent également être comptés parmi les essences de bois durables. [4] Dans une optique de durabilité (voir chapitre 8), il est recommandé d'utiliser autant que possible du bois régional afin de minimiser les distances de transport.

## 2.6 Critères d'utilisation du bois pour les ouvrages de protection

La dégradation du bois ou la diminution de sa résistance due aux champignons lignivores peut être limitée soit par stockage humide (retrait de l'oxygène) soit par séchage (retrait de l'eau). La durabilité (pérennité) peut également être augmentée par imprégnation, bien que de nos jours pour des raisons écologiques, le bois imprégné ne soit plus guère utilisé pour les ouvrages de protection. La dégradation du bois est particulièrement rapide dans des conditions d'humidité variable avec présence d'oxygène, par exemple dans la zone de transition air/sol.

Les ouvrages de protection en bois sont utilisés dans différentes situations:

- pour la stabilisation des pentes et l'assainissement des glissements de terrain (voir chapitres 4 et 5)
- pour la protection contre les crues dans les bassins versants des torrents (voir chapitre 6)
- pour la protection contre les avalanches et les glissements de neige (voir chapitre 7)

En fonction de leur utilisation, les conditions environnementales sur le site de l'ouvrage sont très différentes. Alors que pour les ouvrages de protection contre les avalanches et les glissements de neige, on recherche des conditions aussi sèches que possible pour une longue durée de vie, les efforts dans le domaine de l'aménagement des cours d'eau doivent être axés sur une humidité du bois élevée en permanence. Les éléments de construction situés dans des conditions d'humidité variables sont particulièrement menacés et doivent être protégés en conséquence. Dans les mesures de protection contre les avalanches et les glissements de neige,

elles règnent surtout dans les zones de transition, par exemple entre les piliers et le sol et dans le cas des barrages de torrents, ce sont les ailes de barrage et les encastresments latéraux qui ne sont pas en contact permanent avec l'eau. De la même manière, on peut s'attendre à une plus longue durée d'utilisation du bois dans les sols à gley saturés d'eau en permanence que dans les sols à humidité variable comme les pseudogleys. Pour les ouvrages en bois dans les torrents, outre la saturation en eau, l'altitude et l'exposition se sont avérées être des facteurs importants: sur les ouvrages situés à basse altitude et dans les régions exposées au sud, la perte de résistance a progressé plus rapidement ([15], [26]). Pour réguler le climat ou pour se protéger d'un assèchement temporaire, il est recommandé d'ombrager les ouvrages en plantant une végétation riveraine. Dans les ouvrages de stabilisation des pentes, il faudrait si possible recouvrir entièrement les ouvrages de matériaux terreux et les végétaliser. Pour les éléments de construction pour lesquels une couverture n'est pas possible, il faut s'attendre à une durée d'utilisation réduite.

Dans de bonnes conditions, les mesures de protection en bois peuvent remplir leur fonction à long terme. Des barrages de torrents de 75 ans dont l'état général était satisfaisant ont été identifiés à Plaffeien FR voire des exemplaires âgés de 100 ans à Gams SG. [15], [26] Pour une durée d'utilisation étendue, la seule utilisation d'une essence durable n'est pas suffisante, il convient aussi que la construction, la conception et la qualité de fabrication soient appropriées, que les sollicitations mécaniques n'atteignent pas des niveaux critiques et, surtout, que l'entretien et la surveillance des ouvrages soient assurés.

## 2.7 Exemple de barrages de torrent en escalier

Les indications des chapitres précédents sont illustrées par l'exemple d'une étude de l'Institut fédéral de recherches WSL sur les barrages de torrents en bois: à Hergiswil NW, un escalier de barrage composé de 15 barrages à caissons en bois à double paroi a été construit en 1996. L'état des ouvrages est depuis lors régulièrement documenté. Trois ans après l'achèvement des travaux, les premières fructifications de champignons de pourriture ont été observées sur les barrages. Au cours des années suivantes, d'autres champignons sont apparus, en particulier dans la zone de fixation du bois longitudinal supérieur, et au fil du temps, il a été possible de distinguer au total 18 espèces de champignons différentes.

La résistance du bois a été régulièrement évaluée à l'aide d'un procédé qualitatif. La profondeur de pénétration d'un tournevis a servi de critère de test. Les premiers endroits présentant un début de décomposition du bois ont été découverts cinq ans après la construction. Après dix ans, des secteurs dégradés ont été observés sur environ la moitié des barrages, et lors du dernier relevé en novembre 2020, soit 24 ans après la construction, tous les barrages étaient touchés par des pourritures locales. La résistance du bois était bien plus souvent réduite dans les zones périphériques à humidité variable des ouvrages que dans les zones d'écoulement constamment baignées. D'une manière générale, les pourritures se sont principalement produites dans la partie supérieure (voir figure 7). En revanche, la base du barrage, saturée d'eau, est restée pratiquement exempte de pourriture. Lors d'éventuelles mesures de remise en état, les couches inférieures pourraient donc être laissées comme fondation et les couches supérieures plus fortement dégradées pourraient être remplacées. Dans l'ensemble, on constate qu'après 24 ans, tous les ouvrages étaient encore parfaitement fonctionnels malgré les signes de dégradation locale du bois. Seul un léger affaissement des parties latérales du barrage a été observé sur un ouvrage.

Figure 7  
Barrage de torrent en bois âgé de 24 ans (Hergiswil NW) avec début de décomposition du bois dans la zone à humidité variable à droite sous l'atterrissement et l'aile du barrage.



## 3 **Approches normatives et lignes directrices pour la conception d'ouvrages de protection en bois rond**

### 3.1 Généralités

Dans la pratique, les structures en bois abordées dans la présente documentation sont généralement construites sur la base de schémas types de construction avec des spécifications constructives concernant les dimensions des éléments de la structure (voir à ce sujet les chapitres 4, 5, 6 et 7).

Pour les ouvrages qui se situent en marge des conceptions réglementaires ou qui sont construits dans des zones géotechniques sensibles, la sécurité structurale devrait être vérifiée spécialement. Il peut également être nécessaire de dimensionner les éléments de la structure porteuse lors du développement de nouveaux schémas types de construction ou de l'optimisation de schémas existants. Les ouvrages de protection en rondins (barrages, parois de soutènement, ouvrages de stabilisation de pentes) font partie des ouvrages en contact avec le sol. C'est pourquoi il faut tenir compte, lors du dimensionnement, d'un contrôle de la stabilité globale, du sol de fondation et des éléments de la structure porteuse. Dans la technique de construction forestière, les notions de sécurité structurale externe et interne se sont également généralisées sur le modèle de la norme SIA 267. [28] Selon la norme SIA 260 «Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses» [29], quatre états limites doivent être considérés pour la vérification de la sécurité structurale:

- Type 1 – concerne la stabilité d'ensemble (sécurité structurale externe). En termes de stabilité globale ou de sécurité structurale externe, les conditions de défaillance dans le terrain environnant sont prises en compte. Ceux-ci incluent la vérification du basculement, renversement et du glissement.
- Type 2 – concerne la résistance ultime de la structure ou d'un de ses éléments (sécurité structurale interne). La sécurité structurale interne prend en compte les conditions de défaillance de la structure porteuse en bois. Il s'agit notamment de la défaillance due à la rupture, aux déformations excessives, à la transformation de la structure porteuse en un mécanisme ou à la perte de stabilité (p. ex. vérification des sollicitations de flexion et de cisaillement ou vérification de la stabilité des barres en compression). En outre, les assemblages et les moyens de liaison doivent être dimensionnés.
- Type 3 – concerne la résistance ultime du sol de fondation (glissement de terrain, rupture de talus, rupture de sol). Dans le cas de constructions sur des talus, il faut par exemple vérifier la résistance au cisaillement du sol suite à des actions horizontales et verticales.
- Type 4 – concerne la résistance à la fatigue de la structure ou d'un de ses éléments. Cet aspect n'a pas d'importance pour la vérification des ouvrages de protection en bois rond.

### 3.2 Bases normatives

La norme SIA 260 [29] définit les aspects relatifs à l'exécution, à l'utilisation et à la maintenance des structures porteuses. Comme les ouvrages de protection en rondins sont des structures porteuses qui présentent certaines particularités, les normes sur les structures porteuses doivent être appliquées par analogie (cf. norme SIA 260 chiffres 0.1.3 et 0.1.4). [29] La durée d'utilisation des ouvrages de protection en bois rond doit être déterminée en fonction du projet.

Les données relatives aux états limites de service ne sont pas traitées, car elles n'ont qu'une importance secondaire pour les ouvrages de protection en bois rond. Les normes pertinentes pour la détermination des actions et le dimensionnement pour la Suisse sont détaillées ci-après. En l'absence de bases normatives, il est fait référence à des normes étrangères.

### 3.3 Normes pour la détermination des actions

Pour le dimensionnement des ouvrages de protection en bois rond, il convient de déterminer les actions permanentes et variables en tenant compte des états limites avec les coefficients de charge correspondants (cf. norme SIA 260 tableau 1 [29]). Pour le dimensionnement des ouvrages de protection en bois rond des classes d'ouvrage I et II (p. ex. ouvrages de soutènement ou talus à proximité de voies de communication importante), on peut renoncer à prendre en compte l'action accidentelle sismique, en tenant compte des restrictions selon la norme SIA 267 chiffre 7.2.3. [28]

#### 3.3.1 Ouvrages de soutènement et aménagements des versants

Pour les ouvrages de soutènement et les ouvrages de stabilisation des versants, les sollicitations dues aux poussées des terres et aux charges superficielles peuvent être extraites de la norme SIA 261 «Actions sur les structures porteuses». [30] Selon la norme SIA 261/1 «Actions sur les structures porteuses – Spécifications complémentaires» [31], les actions dues aux dangers naturels gravitaires doivent être déterminées à l'aide des recommandations et des directives de la Confédération en vigueur, au moyen de cartes de dangers et d'intensité. Si aucune information n'est disponible, les actions doivent être déterminées avec l'aide d'un spécialiste (cf. norme SIA 261/1 chiffre 2). D'autres indications figurent dans les documents «Le bois utilisé pour la correction des torrents, la consolidation des versants et la stabilisation des ravins» [15] et «Stabilisation des versants et corrections des torrents». [32]

### 3.4 Normes pour la vérification des états limites type 1 et type 3

Les bases du dimensionnement géotechnique des ouvrages de soutènement et des ouvrages de stabilisation des versants (modèles de structure et de dimensionnement) sont illustrées dans la norme SIA 267 «Géotechnique». [28] Les données relatives au dimensionnement des fondations des paravalanches (ancrages, micropieux, dalles de compression) se trouvent dans la directive technique «Constructions d'ouvrages paravalanches dans la

#### 3.3.2 Barrages de torrents

Il n'existe pas de bases normatives détaillées en Suisse pour le dimensionnement des barrages de torrents. La vérification de la sécurité structurale extérieure suit la procédure de dimensionnement habituelle pour les ouvrages de soutènement selon la norme SIA 267. [28] Les documents [15] et [32] donnent des indications sur le dimensionnement et l'exécution.

Dans les normes autrichiennes, on trouve des modèles d'action concernant les sollicitations dues aux torrents, et notamment dans la règle technique ONR 24801 [33] sur les actions statiques et dynamiques.

#### 3.3.3 Ouvrages paravalanches

Pour le dimensionnement des ouvrages paravalanches, on trouve des modèles d'action pour la pression statique due au manteau neigeux glissant et rampant dans la directive technique «Constructions d'ouvrages paravalanches dans la zone de décrochement». [34] Les modèles d'action ont été développés en premier lieu pour le dimensionnement des ouvrages de soutènement. Pour le dimensionnement des mesures de protection contre le glissement de la neige, les formules de calcul doivent être adaptées en conséquence, en tenant compte notamment de l'influence des effets de bord. Les modèles qui y figurent ont été repris dans la norme ONR 24805. [35]

zone de décrochement» [34] et dans la norme ONR 24806 «Protection technique permanente contre les avalanches – Conception et dimensionnement». [36] Les fondations des paravalanches en bois sont généralement réalisées sur la base de l'expérience, sans vérification statique, conformément au «Guide de construction pour des ouvrages temporaires paravalanches et de protection contre le glissement de la neige». [37]

### 3.5 Normes pour la vérification de l'état limite de type 2

La norme SIA 265 «Construction en bois» [38] et la norme SIA 265/1 «Construction en bois – Spécifications complémentaires» [39] permettent de vérifier la sécurité structurale interne.

Pour le dimensionnement des ouvrages de protection en bois rond, une classification du matériau disponible dans une classe de résistance est la condition de base pour une vérification adéquate de la sécurité structurale des éléments de construction. La norme SIA 265/1, tableau 5 [39], contient des critères pour le classement visuel des bois ronds et la classification dans l'une des trois classes de résistance qui en découle. Deux classes de résistance (C16 et C24) sont représentées pour les résineux et une classe de résistance (D30) pour les feuillus. Lors du choix du bois rond, il faut faire particulièrement attention au bois de réaction, aux fibres obliques, aux déformations et aux nœuds, qui réduisent la résistance. Les dommages mécaniques qui peuvent survenir lors de l'abattage, du transport ou de la transformation ont également une influence sur la résistance et constituent en outre des foyers d'infection privilégiés pour les champignons.

Les propriétés caractéristiques et les valeurs de dimensionnement des bois ronds triés visuellement se trouvent par analogie dans le tableau 8 de la norme SIA 265. [38] Les propriétés et valeurs de dimensionnement qui y sont présentées se réfèrent à une humidité moyenne du bois de 12 %. Comme l'humidité du bois a une influence marquée sur les propriétés de résistance, les valeurs de dimensionnement doivent être réduites en cas d'humidité du bois plus élevée en les multipliant par le coefficient adéquat. Pour les situations de dimensionnement accidentelles, les valeurs de dimensionnement des éléments de construction en bois peuvent être augmentées, conformément à la norme SIA 265, chiffre 2.2.6 [38], par un coefficient tenant compte de la durée de l'action.

Le processus naturel de dégradation du bois modifie la section efficace au fil du temps. Comme ces processus de dégradation dépendent fortement de l'essence de bois, de son utilisation et du macro- et

microclimat environnant, il est difficile d'estimer la section efficace à prendre en compte dans le calcul. Le choix de dimensions plus importantes, voire un surdimensionnement, peut compenser les incertitudes, mais des dimensions de section trop importantes peuvent aussi entraîner un séchage retardé. Il est utile de se référer à l'expérience acquise lors de projets d'endiguement dans des conditions environnementales similaires. Selon le cas, les règles de base de la protection constructive du bois doivent être respectées, comme la protection des surfaces en bois de bout et l'évitement de l'eau stagnante sur les éléments de construction.

Des indications sur la détermination des caractéristiques géométriques des bois ronds (surfaces de section, moments de résistance, moments d'inertie, rayons de giration) et des résistances au flambement pour les bois résineux de la classe de résistance C16/C24 se trouvent dans les Tables de construction en bois 1. [17]

La directive technique «Paravalanches dans les zones de rupture» [34] donne des indications sur l'étude et le dimensionnement des paravalanches en bois. La règle technique autrichienne ONR 24802 [40] peut être utile pour la conception, le dimensionnement et la construction des ouvrages de protection des torrents. Cette règle technique contient des directives générales pour la construction de barrages, mais pas d'explications spécifiques pour les ouvrages en bois. Des indications sur le dimensionnement des constructions en bois dans les ouvrages de protection dans les torrents, les pentes et les ravins sont également disponibles dans [15].

#### 3.5.1 Dimensionnement des moyens d'assemblage

Pour le dimensionnement des moyens d'assemblage en forme de tige (clous, vis, boulons), il convient d'appliquer la norme SIA 265. [38] La vérification des éléments en acier sera effectuée selon la norme SIA 263. [41]

## 4 Le bois comme protection contre l'érosion

### 4.1 Processus et actions

L'érosion est un processus par lequel un matériau meuble ou altéré est déplacé par des forces externes. Sont considérés comme tels les effets du mouvement de l'eau, des solides, de l'air ou d'une combinaison de ceux-ci sur la surface de contact. Ce chapitre traite spécifiquement de l'érosion du sol par les précipitations ou l'écoulement d'eau. Dans ce cadre, cinq formes différentes d'érosion du sol peuvent être définies.

#### **Erosion par éclaboussures** (splash erosion)

C'est le stade initial de l'érosion du sol, qui résulte de la force exercée lors de l'impact des gouttes de pluie sur les agrégats du sol (splash effect). [42] L'énergie des gouttes de pluie peut être ponctuellement beaucoup plus élevée que celle de l'eau de ruissellement et ainsi détacher de l'agrégat sol des particules (matière minérale ou organique) qui ne seraient autrement pas érodées par le ruissellement de l'eau. [43]

#### **Erosion superficielle diffuse** (interrill erosion)

Ce terme décrit la mobilisation et le transport de particules de sol par le ruissellement de l'eau en surface à une petite échelle spatiale. Comme l'énergie le ruissellement est limitée, ce processus transporte surtout des matériaux qui ont déjà été mobilisés par l'érosion par éclaboussures et qui restent en suspension dans l'eau (matière organique fine, fractions d'argile et de limon). Après accumulation, les fractions de sable et de gravier peuvent également être déplacées, en fonction de la déclivité de la pente, sous forme de processus de type coulée de boue (en anglais «soil slumps»).

#### **Erosion concentrée en rigoles** (rill erosion)

Ce processus se caractérise par une action continue de l'eau avec un ruissellement concentré sur une longue période (par exemple pendant un épisode de précipitations). Ce processus peut combiner un transport continu de sédiments et des processus irréguliers de type coulée de boue.

#### **Erosion concentrée en ravines** (gully erosion)

Si la profondeur d'érosion est supérieure à 0,3 m, il se forme alors une ravine (en anglais «gully») dans laquelle les effets érosifs sont plus importants que dans les rigoles en raison du débit spécifique plus élevé, mais sont causés par les mêmes processus.

#### **Erosion souterraine** (pipe erosion)

Lorsque le ruissellement est principalement souterrain, l'érosion hydraulique peut entraîner la formation de grands tubes dits «de courant». Ceux-ci peuvent s'effondrer et provoquer un affaissement en surface. [44]

L'effet des mesures sur un processus donné peut être différencié en fonction de l'impact spatial. [45] On distingue ainsi un effet dans la «zone de contribution» (par exemple la réduction du débit d'eau provenant de la surface contributive du bassin versant), dans la «zone de processus» (par exemple la réduction de la force érosive de l'eau par l'aplanissement du terrain dans la zone où se produit l'érosion) et dans la «zone de sortie» (par exemple la construction d'un piège à sédiments dans la zone de transit ou de dépôt inférieure).

### 4.2 Aperçu et fonctions des ouvrages contre l'érosion

L'application des ouvrages de protection contre les processus d'érosion superficielle peut être divisée en quatre types dans la zone dite «de processus» [45]:

- Protection des particules de sol: en recouvrant le sol de matériaux résistants et/ou d'une couverture végétale dense, il est possible de réduire l'énergie cinétique des gouttes de pluie et d'éliminer ainsi l'effet de l'érosion par éclaboussures.
- Augmentation de la rugosité: réduit la vitesse de ruissellement et augmente l'infiltration.
- Aplanissement du terrain: la construction de seuils en bois ou de terrasses (bermes) permet de réduire localement la pente, ce qui diminue la force d'entraînement de l'eau et la composante motrice du poids des particules de sol. La fonction de ces mesures correspond en partie à celle des barrages dans les torrents (voir chapitre 6).
- Évacuation des eaux de surface: l'accumulation et l'évacuation ciblées de l'eau réduisent l'infiltration dans des couches plus profondes ou l'écoulement naturel dans des zones critiques. Comme de telles mesures peuvent favoriser la formation d'un ruissellement concentré et donc l'apparition d'une érosion en rigoles et en ravines, il est nécessaire, selon la situation, de sécuriser le lit en conséquence.

### 4.3 Construction et utilisation d'ouvrages anti-érosion en bois

#### 4.3.1 Nattes de protection non tissées en laine de bois

Les nattes de protection réduisent l'érosion due aux gouttes de pluie, l'érosion de surface et la formation d'érosion en rigoles. Selon le standard suisse de la laine de bois, on entend par laine de bois des fibres de bois d'une épaisseur de 0,1 à 0,25 mm et d'une largeur de 1,3 à 8 mm. Les filaments de laine de bois peuvent mesurer jusqu'à 500 mm de long et sont matelassés avec un filet en polypropylène ou en fibres naturelles biodégradables. Une production de filets en fibres naturelles locales (suisse) à base de cellulose est également en phase de test. Il existe différents non-tissés en laine de bois de ce type, la recette individuelle du mélange d'essences jouant un rôle important pour la durabilité, la résistance et la stabilité de la laine de bois (le frêne est par exemple moins durable que le sapin et l'épicéa). L'utilisation d'essences telles que le robinier, le châtaignier et le mélèze a également déjà été testée et mise en œuvre. Il n'existe pas de critères de dimensionnement pour l'installation de non-tissés anti-érosion; celle-ci se fait selon les instructions de pose du fabricant. Il est important que les nattes soient

posées avec un chevauchement et sans tension. Les tensions dues au poids propre entre les points de fixation ne doivent pas être supérieures à la résistance à la traction du non-tissé. [46] Pendant la mise en place, il est important d'éviter la formation d'espaces vides entre la natte et le sol (cf. figure 8). Pour ce faire, les non-tissés peuvent être fixés au sol à l'aide de boutures de saule (espèces les mieux adaptées) d'un diamètre de 3 à 5 cm et d'une longueur de 30 à 50 cm, ou à l'aide d'attaches en bois de hêtre suisse ou d'attaches en acier pour les sols pierreux. Selon la situation, on utilisera les semences appropriées pour la végétalisation avant ou après l'installation de la natte. La vocation des non-tissés est de prendre le relais de la végétation pendant la phase d'implantation et d'assurer une protection (2 à 3 périodes de végétation selon les sites). Grâce à leur excellente capacité de rétention d'eau, au bon écoulement de surface et aux niches entre les fibres, les nattes de laine de bois favorisent le microclimat (humidité, température) pour une installation rapide de la végétation et réduisent le risque d'érosion.

Figure 8  
Protection contre l'érosion  
avec des nattes en laine  
de bois.



Les avantages généraux des nattes en laine de bois sont la protection immédiate de la surface du sol, la facilité de manipulation et la dégradation complète des non-tissés. De plus, les nattes en laine de bois sont fabriquées à partir de bois locaux – certifiés par le Label Bois Suisse. Elles constituent une alter-

native durable aux variantes de fibres naturelles importées (coco, jute), et garantissent qu'aucun organisme exotique indésirable n'est introduit. Le résultat est un écobilan convaincant.

#### 4.3.2 Terrasses (bermes)

Les terrasses sont aménagées pour réduire la pente d'un versant sur de grandes zones et pour concentrer les parties abruptes sur de petits secteurs. L'aplanissement permet de réduire la force d'entraînement de l'eau qui s'écoule et donc de diminuer l'érosion de surface. Le principe de dimensionnement est le même que pour les barrages de torrents, la pente limite servant de critère pour la réduction du taux d'érosion. Ces mesures ne sont pas destinées à stabiliser les glissements de terrain, par contre elles ont l'avantage d'augmenter l'humidité du sol et de favoriser ainsi l'établissement de la végétation sur les sites sèchards.

Les terrasses peuvent être aménagées avec différentes structures en bois (cf. figures 9 et 10), le plus souvent avec des rondins de bois fixés et ancrés (environ 30 cm de large et 2,5 cm d'épaisseur) ou des caissons en bois à simple paroi (cf. chapitre 5.3.3). Les terrasses avec caissons en bois peuvent être aménagées sur plusieurs mètres de long, avec des hauteurs allant jusqu'à 2 mètres. Les caissons en

bois à simple paroi plus hauts deviennent instables avec le temps et ne peuvent pas être maintenus par la végétation. Les seuils en rondins de bois ont une hauteur maximale de 50 cm, une longueur de 2 à 3 m et sont disposés en quinconce dans la pente. Dans la mesure du possible, ces structures devraient être combinées avec des mesures de végétalisation et des arbustes, dont les racines assumeront idéalement la fonction de protection après la décomposition des ouvrages. Les pieux (cf. figure 11) peuvent être réalisés en rondins d'environ 1,3 m de long ou en boutures de saule. Ils doivent être placés au quart extérieur de la longueur du seuil ou des planches, afin de réduire les déformations ou le risque de destruction (contraintes de flexion). Le nombre de terrasses nécessaires dépend du sol en place et de la pente initiale. Ces mesures sont les plus efficaces pour des déclivités comprises entre 30° et 40°. La progression des travaux se fait de manière analogue à l'aménagement de torrents, de bas en haut.

Figure 9 (gauche)  
Terrasse avec caissons de bois décomposé à simple paroi combinée à une rigole d'évacuation de l'eau à Arieschbach GR.

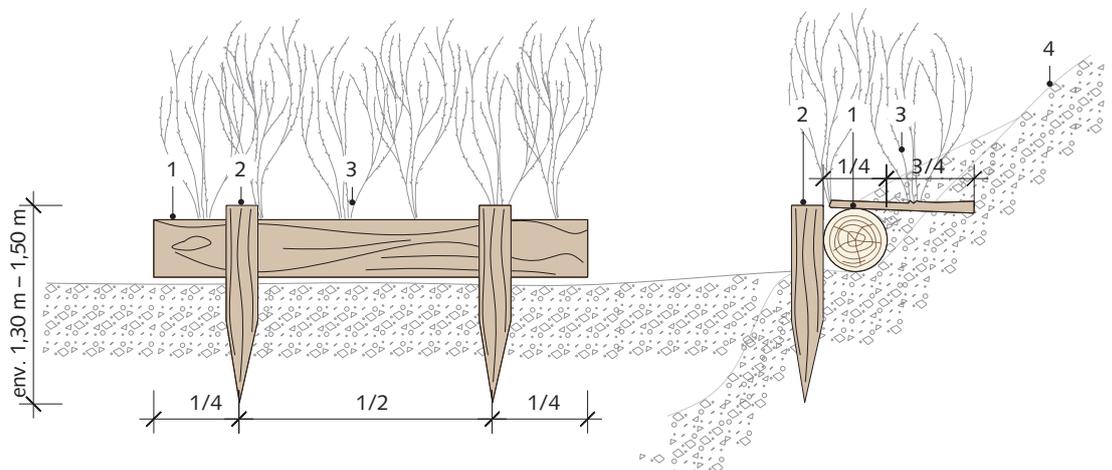


Figure 10 (droite)  
Terrasses végétalisées avec seuils en rondins.



Figure 11  
Recommandations pour la construction de seuils en rondins de bois.

- 1 seuil en rondin  
(d = 300 mm,  
longueur 2–3 m)
- 2 pieux, d = 200 mm
- 3 boutures de saule
- 4 pente 30° à 40°



#### 4.3.3 Caniveaux ouverts (caniveaux d'évacuation de l'eau)

Les mesures de dérivation de l'eau assurent l'écoulement ciblé et rapide de l'eau de pluie, de l'eau de fonte ainsi que de l'eau de source ou de nappe captée et protègent contre l'érosion du lit et l'érosion latérale (érosion en ravines). En outre, l'évacuation de l'eau augmente la résistance du sol (cohésion apparente plus élevée et pression interstitielle plus faible).

La forme du caniveau ouvert peut varier (voir [47]) et devrait présenter une faible rugosité et un petit rapport entre la circonférence et la section, afin d'améliorer l'efficacité hydraulique. Les caniveaux en forme de V (voir figure 12) et les caniveaux rectangulaires (voir figure 13) sont les plus courants. Le dimensionnement de la section d'écoulement s'effectue selon l'approche de Strickler pour un événement pluvieux centennal. [47] Il faut tenir compte du fait que des conditions turbulentes règnent souvent et qu'une marge de sécurité supplémentaire est donc nécessaire pour le dimensionnement. L'effet de l'absorption d'air par l'eau, qui augmente le volume d'écoulement doit également être considéré. Pour les petites profondeurs d'écoulement (inférieures à 1 m), un supplément de sécurité de 1,5 peut être utilisé pour prendre en considération ces effets. Il convient d'appliquer en outre

une marge de sécurité de 2 pour la capacité d'écoulement afin que les effets des embâcles ou des sédiments ne limitent pas trop la capacité d'évacuation de l'eau.

Lors du dimensionnement, il faut également tenir compte de la courbure du sens d'écoulement afin d'éviter les fuites latérales. Dans les endroits problématiques où l'eau peut déborder, il convient d'installer des planches de bord. Dans le cas de coudes convexes, il convient d'éviter des différences de pente de plus de 5 % afin de ne pas créer de vagues trop fortes. Le chevauchement au niveau des différents segments de caniveau (joint d'about) devrait pouvoir coulisser librement et être assez long (environ 25 cm) afin d'empêcher le reflux (infiltration) d'eau. [47]

L'adaptation aux déformations de la pente et l'utilisation de matériaux locaux sont les grands avantages de telles constructions en bois. Elles sont cependant vulnérables aux dommages causés par la pression de la neige ou les chutes de pierres. C'est pourquoi elles nécessitent des contrôles et des travaux d'entretien réguliers. Sans entretien, les rigoles ouvertes peuvent même être contre-productives, car elles concentrent l'écoulement. Un caniveau défectueux favorise l'infiltration de l'eau dans le corps du glissement et l'érosion en ravines.

Figure 12 (gauche et centre)  
Exemples de construction d'un caniveau en V.



Figure 13 (droite)  
Caniveau rectangulaire.

#### 4.3.4 Fascines de bois mort

Les fascines de bois mort (constituées de troncs, de branches ou de restes de sciage et de dosses) servent au drainage et à l'évacuation souterraine des eaux de versant provenant de sols argileux et limoneux (cf. figures 14 et 15). Grâce aux voies d'écoulement préférentielles le long des branches et des troncs, la perméabilité moyenne du sol parallèlement à la pente est fortement augmentée, ce qui réduit l'infiltration de l'eau. Parallèlement, le bois encastré empêche l'apparition d'une érosion souterraine qui pourrait sinon se produire dans le cas de tranchées ouvertes.

Le piquetage de l'évacuation des eaux est adapté au terrain. Les dimensions des fossés dépendent de l'écoulement; ils ont généralement une profondeur de 0,5 à 2 mètres. Une fois les fossés creusés, les fascines sont mises en place. Il est important de s'assurer que les fascines aient une grande surface de contact avec le fond de la tranchée afin qu'elles puissent remplir leur fonction et qu'il n'y ait pas

d'érosion du fond. Pour cela, la fascine doit être bien compactée et éventuellement recouverte d'une couche de matériau d'excavation. La partie la plus basse de la fascine, au pied de la pente, ne devrait pas avoir d'effet filtrant afin d'éviter tout colmatage. L'eau peut être captée au pied du versant dans des puits de collecte contrôlés ou des fossés ouverts. Il est nécessaire de construire des points de décantation pour les sédiments (collecteurs de boue) avant d'acheminer l'eau plus loin.

Le fait d'utiliser des matériaux locaux et biodégradables permet d'obtenir une construction écologique. L'inconvénient réside surtout dans la difficulté de contrôler sa fonctionnalité (p.ex. si une érosion souterraine se produit). Dans les pentes où surviennent de fortes déformations, l'efficacité de ces mesures peut rapidement diminuer. En combinaison avec des dispositifs de génie biologique (boutures ou fascines vivantes), cette mesure peut être efficace et simple du point de vue logistique.

Figure 14 (gauche)  
Construction d'un drainage avec des fascines de bois mort.

Figure 15 (droite)  
Drainage terminé avec des fascines de bois mort.



## 5 Le bois dans la protection contre les glissements de terrain

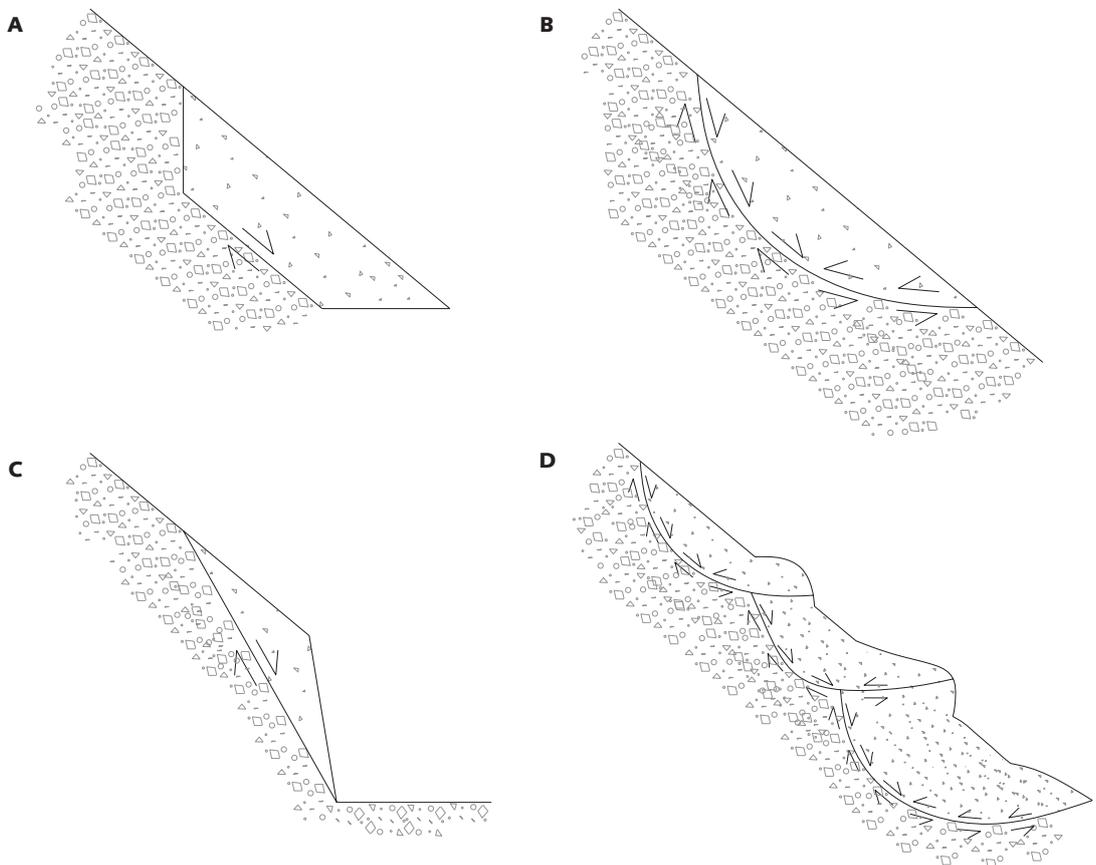
### 5.1 Processus et actions

Les glissements sont des processus gravitaires par lesquels des paquets entiers de matériaux meubles sont mobilisés. Pour une classification plus simple, on peut distinguer les glissements peu profonds (avec horizon de glissement < 2 m), les glissements moyennement profonds (avec horizon > 2 m et < 10 m) et les glissements profonds (avec horizon > 10 m). Les glissements de faible profondeur se produisent normalement sous forme de mouvements de translation spontanés (la surface de cisaillement est parallèle à la pente) et peuvent, en cas de forte liquéfaction, se transformer en coulées de

boue de versant (non canalisées) ou en laves torrentielles (canalisées) (cf. figure 16A). Les instabilités de pentes qui résultent d'une modification de la géométrie du terrain et des conditions de charge (par exemple lors de la construction d'une route) (cf. figure 16C) peuvent se produire sous forme de mouvements de translation ou de rotation en fonction du matériau du sol. Les glissements profonds se présentent généralement sous forme de mouvements de rotation (cf. figure 16B) ou de corps de glissement complexes avec des mouvements différentiels (cf. figure 16D).

Figure 16  
Représentation conceptuelle des mécanismes de glissement possibles.

- A** Glissement de translation avec surface de glissement linéaire
- B** Glissement de rotation avec surface de glissement circulaire
- C** Glissement de translation après modification du terrain (portion de terrain actif)
- D** Glissement complexe avec mouvements différentiels



L'analyse des facteurs qui conduisent à des processus de glissement est importante pour définir les mesures adéquates. On distingue la disposition de base, la disposition variable et les facteurs déclencheurs. La disposition de base comprend des aspects tels que la pente, la géologie et l'exposition, qui ne changent pas beaucoup à long terme. La disposition variable comprend l'état de la végétation (ou le renforcement des racines) et les pro-

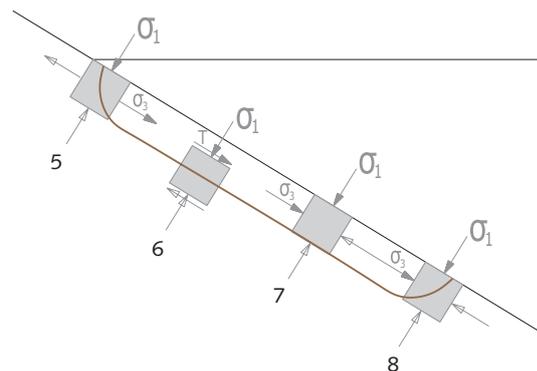
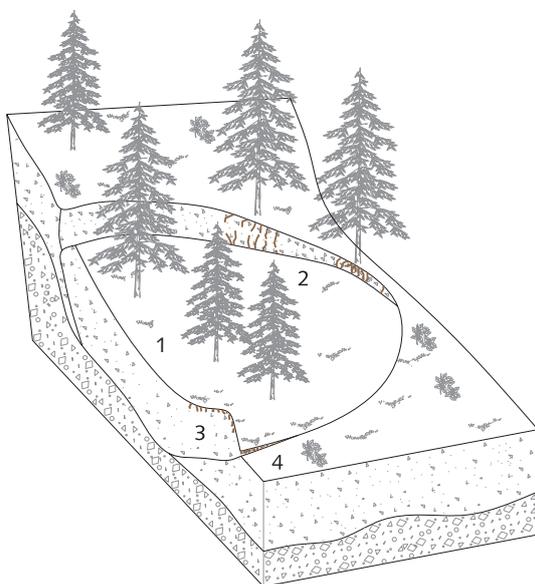
priétés du sol (p.ex. l'humidité, la répartition de la fraction limoneuse/argileuse, l'épaisseur du sol), qui peuvent changer à moyen terme. Les facteurs déclencheurs sont des événements à court terme; dans la plupart des cas, il s'agit de l'augmentation de la pression interstitielle due à de fortes précipitations ou à un ruissellement d'eau concentré (résultant par exemple du drainage des routes ou de défauts dans les conduites d'eau).

Pour mieux évaluer l'effet des mesures, il est important d'analyser les phases d'activation des forces de résistance dans les constructions pendant la formation d'un glissement (cf. figure 17). Dans une première phase, la résistance au cisaillement du sol est principalement activée le long de la surface de cisaillement locale (point 1 de la figure 17). Dans la deuxième phase, des résistances latérales à la traction sont également mobilisées dans la zone de rupture supérieure du glissement (point 2 de la figure 17). Dans la troisième phase, dès que la

majeure partie de la résistance latérale à la traction a été épuisée, ce sont principalement des forces de compression qui agissent dans la zone de rupture inférieure (point 4 sur la figure 17). Pendant cette phase, le renforcement du corps du glissement, par exemple par un treillage en bois, peut jouer un rôle important (point 3 de la figure 17). En outre, d'autres éléments de construction tels que les caissons en bois ou les seuils en bois contrent cette sollicitation par une résistance à la compression (force passive de compression de la terre).

Figure 17  
Représentation schématique des contraintes de résistance mobilisées pendant la formation d'un glissement de terrain peu profond.

- 1 contrainte de cisaillement
- 2 contrainte de traction sur la partie supérieure de l'arête de rupture
- 3 contrainte de compression parallèle à la pente
- 4 contrainte de compression de la partie inférieure de l'arête de rupture
- 5 renforcement latéral des racines face à la traction
- 6 renforcement basal des racines
- 7 rigidification du corps de glissement
- 8 renforcement latéral des racines face à la pression



## 5.2 Aperçu et fonction des ouvrages de protection contre les glissements de terrain

Pour la stabilisation des pentes menacées de glissement, il faut en principe distinguer trois types d'ouvrages :

### Ouvrages de soutènement

On entend par là les structures qui soutiennent et rigidifient partiellement les masses en glissement. Les pentes glissantes sont stabilisées par la transmission de forces (pression ou cisaillement ou une combinaison de ces mécanismes). Dans ce contexte, il est important de caractériser au mieux les mécanismes des processus de glissement afin de définir la structure adéquate et sa fonction. Par exemple, les treillages agissent comme des raidisseurs de la masse glissante dans le cas de glissements transla-

tionnels peu profonds avec des longueurs <20 m et un pied de pente stable, la grande partie des forces est reportée sous la forme de pression au pied de la pente. Si la longueur du glissement de translation peu profond est trop importante, il est possible d'utiliser un caisson en bois pour reporter les forces de pression dans les zones stables soit en fondant le caisson en dessous du glissement ou sur le côté du corps du glissement.

### Ouvrages de retenue

De tels ouvrages nécessitent des ancrages afin de transférer les forces de résistance stabilisatrices des zones plus profondes et plus stables vers le corps du glissement à stabiliser.

### Mesures d'évacuation de l'eau

Ils ont un effet stabilisateur en réduisant la pression interstitielle de l'eau dans le corps du glissement et éventuellement en maintenant la cohésion apparente (à l'état non saturé).

Tous les types d'ouvrages mentionnés doivent être considérés comme des ouvrages temporaires dont la durabilité est fortement limitée et qui doivent

toujours être réalisés en combinaison avec des mesures d'aménagement vivant. Dans un tel contexte, il faut toujours partir du principe que l'ouvrage perdra son efficacité à court ou moyen terme. Dans la mesure du possible, on évitera d'utiliser des matériaux de construction artificiels (PVC, tôles, béton, fer, etc.).

## 5.3 Construction et utilisation d'ouvrages de stabilisation en bois

### 5.3.1 Seuils avec ancrage à câble

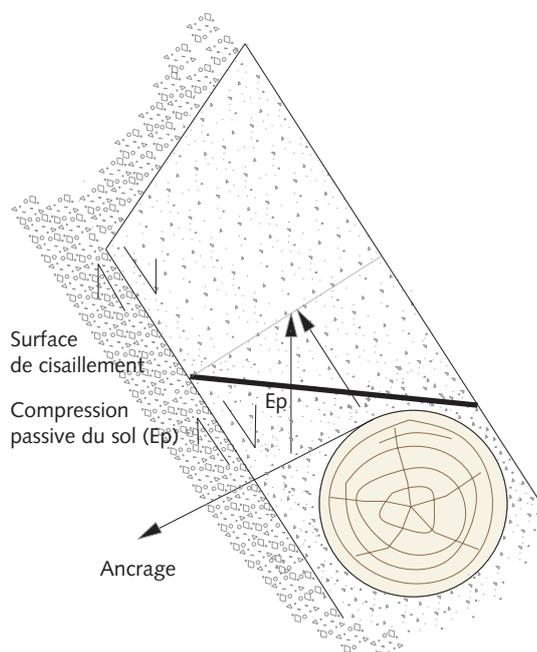
Les seuils en bois ancrés peuvent être utilisés pour soutenir ponctuellement des glissements de terrain peu profonds. Les forces de pression du corps du glissement potentiel agissent sur les seuils et sont transmises au sous-sol par l'ancrage. La résistance maximale, qui a un effet stabilisateur parallèle à la pente, correspond à la force de pression passive de la terre. [48] Les fondations (ancrages ou chevilles) transmettent une partie des forces de résistance dans le sous-sol stable sous l'effet de la traction ou du cisaillement/de la flexion. La force de compression passive maximale du sol peut servir de critère pour le dimensionnement des distances entre les seuils. Les forces de compression latérales des couches de sol instables (qui sont proportionnelles à la distance entre les seuils) ne doivent pas être supérieures à la composante parallèle à la pente de la force passive de compression du sol (cf. figure 18).

Si le matériau terreux entre les seuils n'est pas rigidifié par l'utilisation d'aménagements végétalisés, il faut s'attendre à des fissures dues à un tassement du matériau terreux. Cela pourrait à son tour favoriser l'infiltration de l'écoulement de surface et provoquer une augmentation de la pression interstitielle (ou une diminution de la cohésion apparente) dans le corps du glissement, réduisant ainsi l'effet des mesures.

Pour la construction de seuils ancrés, on utilise de simples rondins d'une longueur de 3 à 5 m et d'un diamètre d'au moins 20 cm (voir figure 19). Les troncs sont ancrés dans le sol stable à l'aide de chevilles ou de câbles d'acier (par exemple ancres pour matériaux meubles) et sont recouverts dans le corps du glissement potentiel. Le nombre d'ancrages dépend de la dimension des troncs et de la capacité de charge de chaque ancrage. Lors de l'exécution, les travaux se font en principe de bas en haut. Cela permet en outre d'utiliser les matériaux d'excavation de l'ouvrage supérieur pour le remblayage du seuil inférieur. Cette mesure est particulièrement avantageuse dans les terrains pentus et difficiles d'accès.

Figure 18

Esquisse de l'effet des seuils en bois contre les glissements de terrain peu profonds (surface en pointillé), qui activent la compression passive du sol.



### 5.3.2 Treillages en bois (armature en bois)

Les treillages sont des constructions en grille qui augmentent la rigidité d'une masse potentiellement glissante et stabilisent la pente en répartissant les forces de pression au pied de la pente. Pour remplir cette fonction, les treillages doivent être intégrés dans la masse potentiellement glissante et ne doivent pas seulement se trouver à la surface. Ce type de mesure n'est pas adapté à la stabilisation de glissements rotatifs ou de mouvements profonds. Les treillages sont souvent construits de manière complémentaire aux caissons en bois afin de dévier les forces de pression sur la surface et de les transmettre ponctuellement au pied de la pente ou dans un sous-sol stable.

Figure 19 (gauche)  
Construction de seuils en bois avec ancrage arrière pour stabiliser un talus.



Figure 20 (droite)  
Construction d'un treillage pour stabiliser une pente.

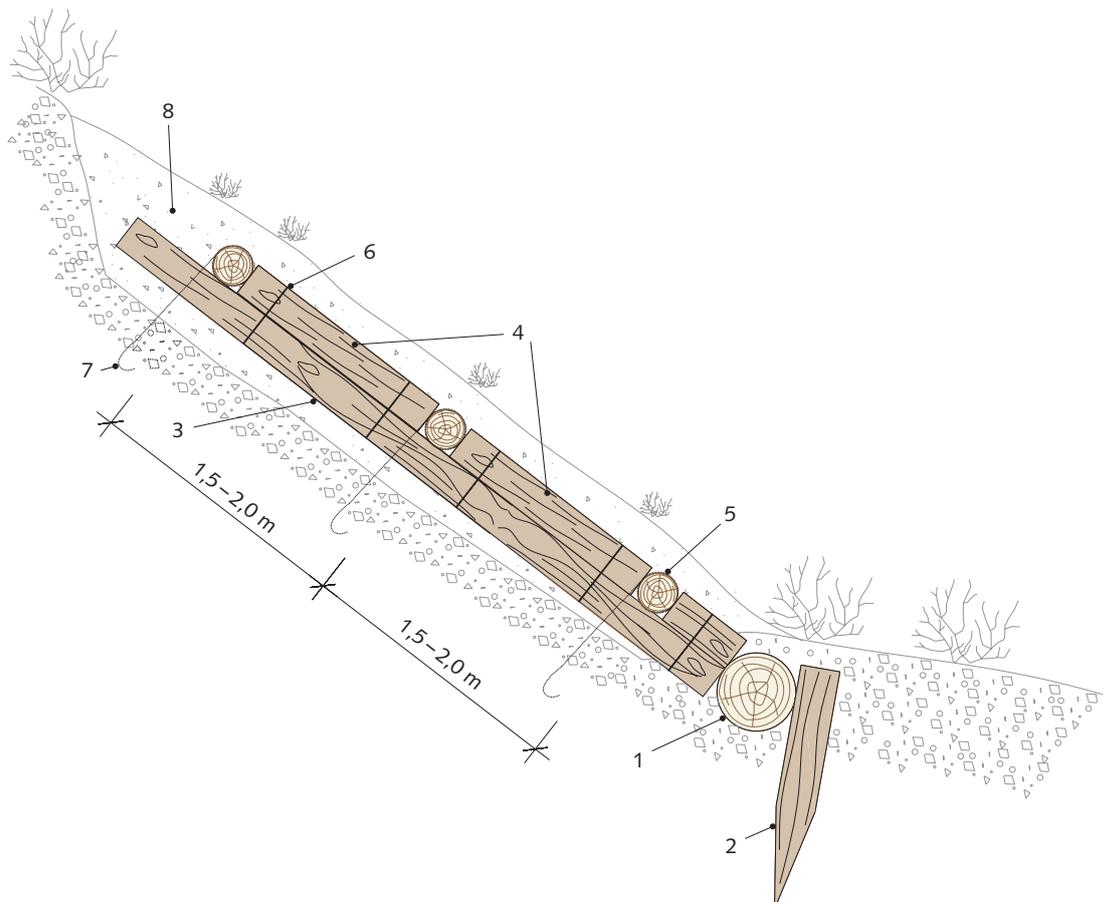


La construction est réalisée sur la base de matériel vivant (pour les petites dimensions [49]) ou en rondins d'un diamètre d'environ 10–30 cm (voir figure 20). Il est possible d'insérer des troncs co-

niques dans la ligne de pente (longrines), avec le plus grand diamètre au pied de la pente. L'écart des longrines et des traverses doit être de 1,5 m à 2 m (jusqu'à 3 m maximum). Les traverses sont

Figure 21  
Schéma de principe d'un treillage.

- 1 seuil de fondation  
d = env. 400 mm
- 2 pieux,  
d = env. 200 mm,  
L = env. 1,0–1,5 m
- 3 longrines inférieures,  
d'une pièce, tous les  
1,5 à 2,0 m,  
d = env. 200–300 mm
- 4 bois de calage,  
constituées de  
plusieurs pièces,  
d = env. 200 mm
- 5 traverse en 1 pièce,  
d = 200 mm
- 6 fers à béton,  
d = 12–18 mm
- 7 ancrage, profondeur  
1,5 m–3,0 m
- 8 recouvrement complet  
avec des matériaux  
terreux



soutenues par des troncs courts dans la ligne de pente (bois de calage). Plusieurs couches de bois longitudinaux et transversaux peuvent être posées, selon l'épaisseur de la masse potentiellement glissante, mais en général deux (cf. figure 21). Pendant la construction, il est possible d'ajouter des lits de plants et plançons lors du remplissage avec de la terre ou d'installer ultérieurement des boutures et/ou un semis. En cas d'utilisation de matériel vivant, les travaux doivent être effectués pendant la période de repos de la végétation (novembre à mars). L'utilisation de matériel vivant assure en même temps la reprise à long terme de la fonction stabilisatrice par les racines et protège après peu de temps contre l'érosion de surface (voir aussi [50] et [51]). Les treillages jusqu'à environ 15 m de longueur et avec un bon ancrage du pied peuvent être construits sans ancrage arrière. Pour les talus plus longs ou les pentes raides (supérieures à l'angle de frottement du matériau à partir duquel la pression du sol est active), la grille de talus doit être fixée dans le sol stable à l'aide de chevilles, de fers d'armature ou d'ancrages (p. ex. ancrages à expansion ou à basculement avec tiges ou câbles en acier). Les treillages ne devraient pas être construits avec une pente supérieure à 60°. Surtout dans les talus raides, le matériau de remplissage doit être bien stabilisé, de préférence avec des matériaux vivants (boutures ou plantation en racines nues) ou exceptionnellement avec des géotextiles. Un ancrage arrière insuffisant, un mauvais chevauchement des traverses et une sécurisation insuffisante du pied sont les principales causes de dommages à ce type de constructions en bois.

### 5.3.3 Caisson en bois (paroi Krainer)

Les caissons en bois conviennent à la consolidation ponctuelle de versants et de pentes ainsi qu'à l'assainissement de petites zones endommagées. Le principe de base de la construction de caissons en bois pour le soutènement de pentes correspond à celui des barrages dans l'aménagement des torrents et dans ce cas également, on distingue les constructions à simple et à double paroi (voir figure 35). Les caissons en bois à simple paroi sont sensibles au basculement et ne sont donc utilisés que pour des constructions jusqu'à environ 1–2 m de hauteur. Il est important d'assurer un bon ancrage des traverses dans le sol. Les caissons en bois à double paroi ne devraient pas dépasser une hauteur maximale de 5 m. [52]

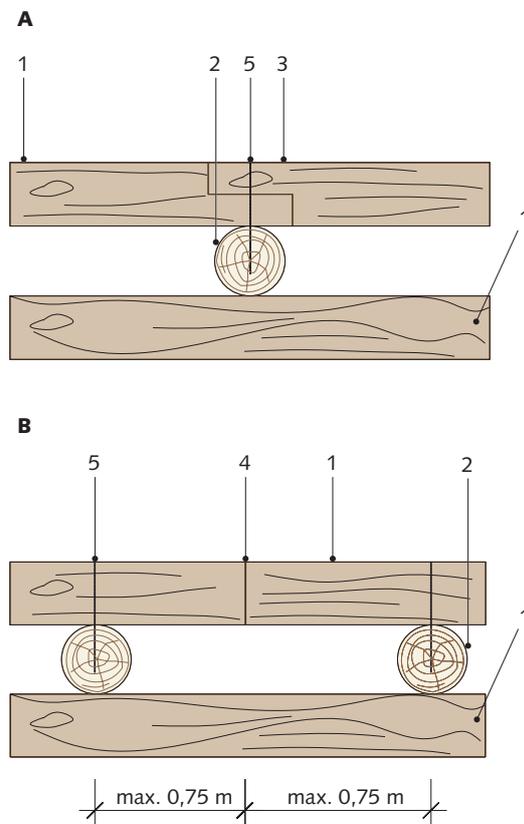
Ces constructions agissent soit contre la pression active du terrain (talus raides), soit comme stabilisation ponctuelle de mouvements peu profonds (pentes glissantes), généralement en combinaison avec des treillages. La fonction des caissons en bois

est de dériver les forces agissant en amont au-dessus des fondations vers le sous-sol stable ou vers des zones latérales stables. La structure en bois et le matériau de remplissage forment une construction composite et, d'un point de vue statique, un ouvrage-poids relativement stable. Les vérifications de la sécurité structurale externe sont effectuées en conséquence. La vérification de la sécurité structurale interne est en revanche complexe et n'est pas attestée par calcul. Au lieu de cela, on applique des règles constructives simples basées sur l'expérience. L'action de la pression interstitielle devrait être complètement éliminée par le drainage. Ces constructions agissent par leur propre poids (murs poids) ou en combinaison avec des ancrages. Il est important de veiller à ce que le poids supplémentaire de l'ouvrage ne provoque pas de rupture du sol ou d'instabilité en profondeur. Si possible, ces constructions sont également intégrées latéralement dans un terrain stable.

La construction se compose de longrines (bois longitudinaux) posées parallèlement à la pente ou à la courbe de niveau, ainsi que des traverses (pinces, bois transversaux) perpendiculaires aux longrines. Les traverses peuvent être agencées de manière superposée ou alternée avec des distances de 1 à 3 mètres. La disposition alternée des traverses garantit une meilleure rigidité de la construction. Le diamètre des éléments de construction devrait être choisi selon l'utilisation de manière à ce que la flexion des différents éléments n'affecte pas l'aptitude au service de la construction (si elle est exigée) et que les critères de sécurité structurale interne soient remplis (contraintes de traction, de compression et de compression transversale, voir norme SIA 265 [38]). Dans la mesure du possible, il convient d'utiliser des diamètres supérieurs à 25 cm afin d'augmenter la durabilité (pérennité) de la construction. [22] La longueur des longrines devrait être aussi grande que possible afin de réduire les points faibles de la construction. L'écartement entre les longrines ne devrait pas dépasser 3 mètres. Pour réduire la déformation de la construction due à la décomposition du bois, l'aubier peut, selon l'essence, être enlevé au point de contact des bois, de sorte que le bois repose cœur contre cœur. L'assemblage entre les longrines posées bout à bout est préférable (voir figure 22), car cette variante est plus durable et plus facile à construire. L'appui sur des pinces à une distance maximale de 0,75 m de chaque côté de la jointure est important. Celle-ci peut être fixée en plus avec des clameaux (diamètre 10–20 mm) ou au moyen d'un doublage vissé en continu. [15] En revanche, l'assemblage mi-bois est plus coûteux et sensible à la décomposition du bois.

Figure 22  
Illustration de l'assemblage de longrines.

- A** A mi-bois  
(non recommandé)  
**B** Bout à bout
- 1 longrine  
2 traverse (pince)  
3 assemblage mi-bois  
4 assemblage bout à bout  
5 clous (fers à béton)

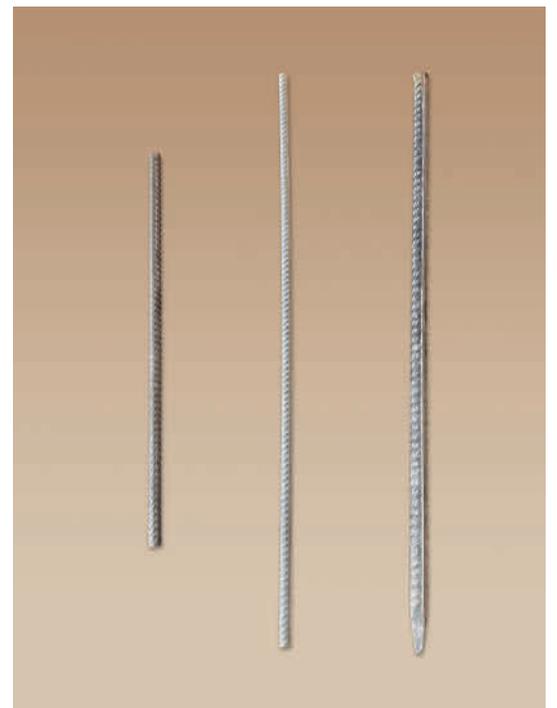
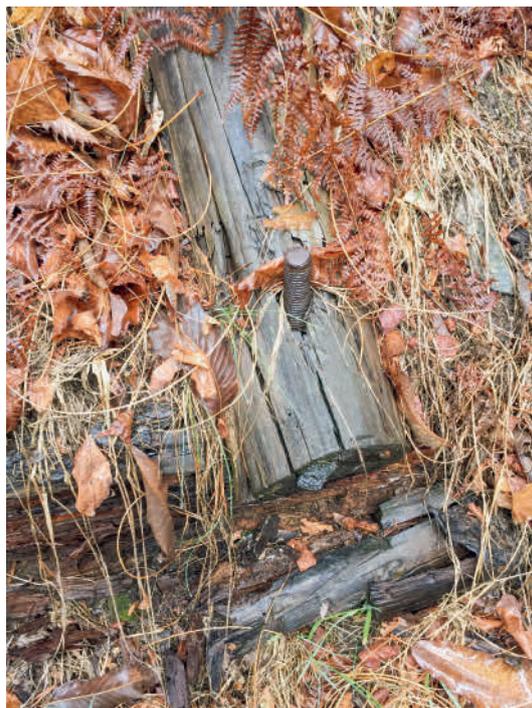


Les liaisons entre les longrines et traverses sont généralement réalisées avec des fers à béton (acier d'armature B500B, cf. figure 23) d'un diamètre de 12 à 18 mm et d'une longueur supérieure au double du diamètre du bois. Ces points de jonction sont particulièrement vulnérables aux processus de dégradation du bois. La libération de fer par les clous favorise la croissance des champignons [22], c'est pourquoi il est recommandé d'utiliser des clous galvanisés à tête si possible (cf. figure 24). [20] Afin de réduire les dégâts dans le bois, il est également recommandé de pré-percer les trous avant d'enfoncer les clous. Toutefois, le diamètre de perçage doit être inférieur au diamètre du clou afin de ne pas supprimer l'effet de friction. Pour réduire la friction entre le bois et le clou lors de l'enfoncement, les clous peuvent être trempés dans une huile biodégradable. Sans pré-perçage, les clous pointus ont tendance à suivre les cernes annuels; surtout pour le bois inférieur. De plus, le bois se fend plus facilement.

Le dimensionnement de la construction doit satisfaire à la sécurité extérieure contre le fluage ou la pression active du terrain (sécurité contre le basculement, le glissement et la rupture de terrain selon les normes SIA 260, 261, 267), ainsi qu'aux critères de sécurité structurale interne (norme SIA 265). L'aptitude au service, garantie par l'utilisation de diamètres de bois suffisamment grands, est remplie dans la pratique pour les constructions décrites.

Figure 23 (gauche)  
Assemblage des longrines et traverses avec des fers d'armature.

Figure 24 (droite)  
Clous bruts et galvanisés. Même en cas d'utilisation de clous pointus, il est conseillé de pré-percer.



Lors de l'exécution, les fondations sont creusées jusqu'au sous-sol stable, généralement avec une pelle-araignée équipée d'un treuil. Après l'excavation et pendant la construction, il faut sécuriser temporairement le talus en cas de fouilles profondes (par exemple avec un étau ou avec un godet de pelleteuse et un grillage métallique). La première chose à faire est de poser la rangée inférieure de longrines. Selon la situation, la fondation peut être inclinée d'environ 5 à 15° vers l'arrière afin d'augmenter la sécurité contre le glissement de la construction.

Si lors de la fondation le sous-sol n'est pas suffisamment stable contre le glissement, la rangée inférieure peut être ancrée (par exemple avec des ancrages expansifs, à tête basculante, ou de type homme mort) ou être stabilisée avec des rails de chemin de fer battus. [20]

Il est important de veiller à ce que la construction soit bien drainée. Cela peut être assuré par l'utilisation d'un matériau de remplissage perméable ou favorisé par l'installation d'un drainage derrière la première rangée de longrines côté amont. Après le montage d'une rangée de longrines et d'une rangée de traverses, le matériau de remplissage est compacté ou, en cas d'utilisation de boutures ou de plants à racines nues simplement pressé (pour favoriser l'enracinement).

Si le matériau de remplissage a tendance à s'éroder, l'espacement entre les longrines doit être fermé par l'intérieur à l'aide de pierres (cf. figures 25 et 27) ou de bois de remplissage (cf. figure 26) (on peut éventuellement ajouter un géotextile ou des cordons de laine de mouton). Les têtes extérieures des traverses peuvent être sciées à la fin, en laissant au moins 20 cm depuis les longrines, afin d'éviter qu'elles ne se fendent.

Figure 25 (gauche)  
Remplissage avec  
des pierres.



Figure 26 (droite)  
Remplissage avec  
des rondins.



Les rondins doivent être mis en place à l'état le plus frais possible et maintenus humides. L'ombrage par des plantes ou une couverture avec des matériaux terreux est bénéfique pour la durabilité. L'effet de la couverture dépend fortement de la nature et de la perméabilité du sol. Dans les sols argileux, où les caissons en bois sont installés dans des conditions réductrices permanentes, le bois peut durer exceptionnellement longtemps (plus de 100 ans). Dans ces conditions, il ne faut toutefois pas s'attendre à

une action complémentaire des racines dans les horizons plus profonds du sol. En revanche, l'installation de caissons en bois dans des horizons de sol perméables et biologiquement actifs favorise la dégradation rapide du bois, mais l'action de la végétation peut alors assumer plus efficacement la fonction stabilisatrice. Si les caissons en bois ne sont pas recouverts, il faut s'attendre à ce que la construction présente des signes de décomposition après quelques années.

Figure 27  
Exemple d'un caisson  
en bois d'environ 30 ans  
avec remplissage de  
pierres, aménagé pour  
stabiliser un talus routier.



L'avantage des caissons en bois est l'élasticité de la structure, qui s'adapte bien aux déformations de la pente et aux processus de tassement. Le faible poids, inférieur à celui des constructions en béton ou en pierre réduit le risque d'affaissement du sol. De plus, les caissons en bois sont moins chers que d'autres constructions (en béton par exemple), surtout grâce à l'utilisation de matériaux locaux (voir chapitre 8). La logistique pour le chantier est aussi souvent plus simple que pour d'autres types de construction, l'expérience de l'équipe de construction locale étant un facteur décisif. Un autre avantage de ces constructions réside dans le fait qu'elles ne nécessitent pas de déconstruction.

#### 5.4 Limites de l'utilisation des ouvrages en bois

Les restrictions à l'utilisation du bois dans les ouvrages de stabilisation des pentes sont principalement dues à des aspects de sécurité structurale, d'aptitude au service et de durabilité.

En ce qui concerne la sécurité structurale des constructions en bois, les limites de construction sont données par la sécurité structurale interne et externe. Pour la sécurité structurale interne des caissons en bois, il convient de prêter une attention particulière à la contrainte de compression transversale dans la zone des assemblages entre les longrines et les traverses (pincés). Dans ce cas, la résistance admissible à la compression perpendiculaire au fil peut être un facteur limitant et conditionne la hauteur des caissons en bois. Un autre aspect limitant de la sécurité structurale interne des ouvrages en bois (p.ex. caissons) est la sollicitation due à la charge linéaire ou à la pression du matériau de remplissage (p.ex. pression au repos du remplissage de sol). Celle-ci concerne aussi bien la sécurité structurale interne des éléments de construction en bois que des liaisons. En ce qui concerne la sécurité structurale externe, il faut tenir compte du fait que les constructions en bois présentent un poids propre plus faible que les ouvrages en béton, par exemple. Cet aspect peut être limitant, surtout pour les ouvrages qui doivent être stabilisés uni-

quement par leur propre poids (p.ex. ouvrage poids). Un autre facteur défavorable est la déclivité du terrain, de sorte que les ouvrages de soutènement ne peuvent être construits que difficilement ou à grands frais, surtout en raison du volume important de déblais nécessaires pour leurs fondations. Dans ce cas, des solutions telles que les ouvrages ancrés (comme des parois ancrées) s'imposent.

L'aptitude au service des ouvrages est définie par les déformations qu'ils peuvent subir sous l'effet de sollicitations extérieures ou de leur propre poids. Pour les constructions en bois destinées à la stabilisation des pentes, les déformations ne posent généralement pas de problème. Cependant, dans le cas des constructions utilisées pour stabiliser les talus des chemins forestiers (cf. figure 28), ces déformations peuvent devenir limitantes pour la fonctionnalité (notamment pour les ouvrages situés en aval et soumis à de fortes contraintes provenant de la sollicitation du trafic).

Comme mentionné au chapitre 2, la durabilité du bois dépend de nombreux facteurs et doit être évaluée au cas par cas. Compte tenu des grandes incertitudes liées à la prédiction de la durabilité, il est important de planifier un contrôle et un entretien des ouvrages en bois et de combiner leur construction avec des mesures de génie biologique. En général, on peut considérer que les constructions en bois destinées à la stabilisation des pentes ont une durée de vie de 10 à 30 ans. La figure 29 et la figure 30 montrent un caisson en bois âgé d'environ 30 ans, qui se trouve à la limite d'utilisation de ce type d'ouvrage: Le bois est pourri et en partie comprimé par son propre poids. Il n'y a pas suffisamment de végétation pour assurer la fonction stabilisatrice.

Il existe également des limites liées à l'entretien nécessaire. Plus les conditions sont difficiles, plus les travaux d'entretien sont coûteux et doivent être effectués sur plusieurs années avec une intensité croissante.

Figure 28  
Stabilisation de talus  
d'un chemin forestier.



Figure 29 (gauche)  
Caissons en bois à double paroi présentant des signes de défaillance en termes de sécurité structurale après environ 30 ans. Une construction moins raide et des plantations seraient probablement plus efficaces.



Figure 30 (droite)  
Sections de rondins pourries et comprimées des traverses du caisson en bois.



### 5.5 Effet complémentaire des mesures de génie biologique

En raison de leur durabilité limitée, les constructions en bois doivent généralement être considérées comme des mesures temporaires, même dans les ouvrages de stabilisation de versants. Dans la plupart des cas, les fonctions de ces constructions peuvent être compensées par l'ajout de végétation et de ses effets.

Le recouvrement de la végétation permet, quelques semaines à quelques mois (pour les plantes herbacées) après les travaux, de réduire fortement l'effet érosion par éclaboussures (splash-érosion). De plus, la formation d'un réseau racinaire proche de la surface (quelques centimètres de profondeur) assure une stabilité accrue des particules de sol (protec-

tion contre l'érosion superficielle diffuse et l'érosion concentrée en rigoles (interrill- et rill-érosion). L'augmentation de la rugosité par la végétation réduit la vitesse d'écoulement et favorise l'infiltration de l'eau, qui à son tour favorise l'établissement de la végétation. Tous ces effets réduisent l'érosion de surface et l'érosion concentrée en ravines (voir chapitre 4). La figure 31 montre l'évolution de la végétation dans le temps sur un versant avec des constructions en bois pour la protection contre l'érosion de surface et l'érosion par ruissellement (terrasses, caniveaux d'évacuation des eaux, barrages en bois).

Figure 31  
Evolution temporelle de la végétation sur un versant stabilisé avec du bois à Arieschbach, GR.  
gauche: 1998, centre: 2005, droite: 2017.



Grâce à la croissance des arbustes et des arbres, les effets mécaniques de la végétation s'étendent avec le temps, la dynamique de renforcement des racines étant particulièrement importante pour stabiliser les glissements de terrain peu profonds. La dynamique du renforcement racinaire varie en fonction du site et des essences d'arbres, mais sur les sites favorables, elle peut prendre le relais des effets stabilisateurs des ouvrages en bois en l'espace de 20 à 30 ans. [53] L'interaction entre la diminution de la fonction des ouvrages en bois et l'augmentation de l'effet des racines est représentée de manière conceptuelle dans la figure 32. Celle-ci montre comment la durée de la fonction peut être influencée par le dimensionnement des structures en bois (diamètre et espacement des longrines, essence de bois) et comme, dans le même temps, la croissance et la structure de la végétation déterminent l'augmentation du renforcement des racines. Dans le cas

de mesures de génie biologique, la quantification de l'évolution dans le temps du renforcement racinaire est un paramètre important pour l'évaluation de la fonctionnalité à long terme des ouvrages de stabilisation des versants et pour une analyse quantitative des avantages et des coûts. [54]

L'effet de la végétation sur le régime hydrique a en outre un effet stabilisateur sur de nombreux processus de pente, comme l'évapotranspiration (augmentation de la cohésion apparente pendant les périodes de sécheresse) ou la formation de voies d'écoulement préférentielles drainantes parallèles à la pente (analogues aux fascines). Le choix des essences peut également influencer l'état chimique du sol. En particulier, la composition de la litière peut agir sur l'activité biologique dans le terrain et ainsi modifier les processus de formation du sol qui, finalement, peuvent avoir un effet positif sur la stabilité de la pente.

Figure 32  
Représentation conceptuelle de l'interaction temporelle entre les ouvrages en bois (en diminution) et le renforcement des racines (en augmentation).

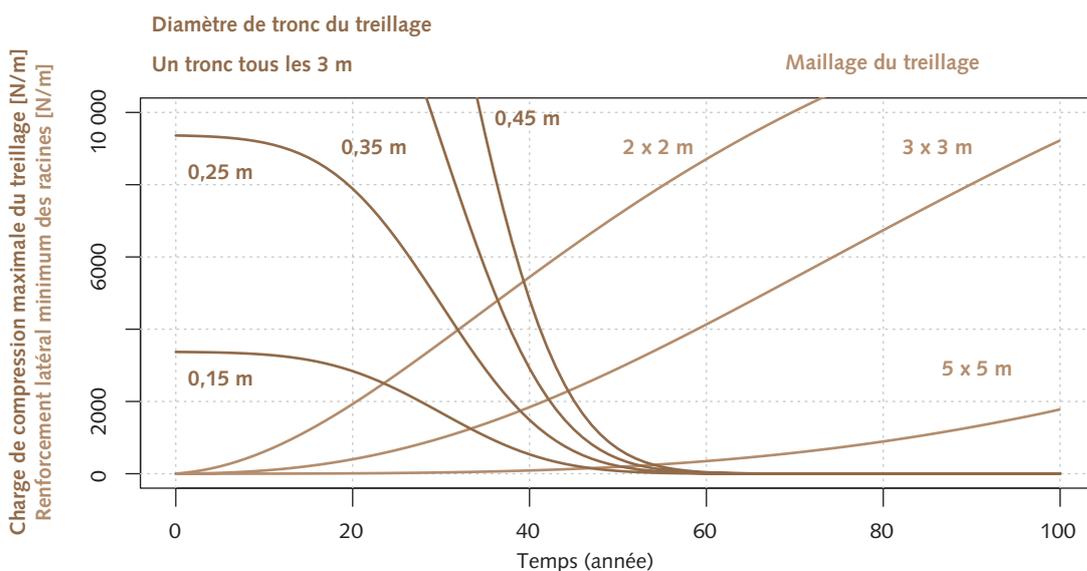


Photo 2011 (gauche)  
Construction de treillage avec un diamètre de tronc de 15 cm et un espacement entre les bois de 2 x 2 m.



Photo 2015 (droite)  
Développement de la végétation après quatre ans.



L'estimation de la profondeur d'enracinement possible est souvent un aspect décisif pour la mise en œuvre réussie et le succès à long terme de mesures de génie biologique. Celle-ci dépend généralement des espèces d'arbres, du type de sol et du climat. C'est surtout la variation temporelle de la teneur en eau du sol qui est un facteur important pour la répartition des racines. [55] Dans les sols perméables, les racines peuvent atteindre quelques mètres de profondeur si les horizons supérieurs restent secs. En revanche, lorsque les horizons proches de la surface sont humides, les systèmes racinaires ont tendance à se développer à faible profondeur. Les horizons de sol saturés en permanence et contenant de l'argile sont limitants pour la croissance des racines (pseudogley et gley). Les caissons en bois recouverts peuvent présenter une pérennité élevée dans ces sols (jusqu'à 100 ans, voir aussi le chapitre 2), mais il ne faut pas s'attendre à ce que les

racines puissent suppléer à leur fonction. Pour les constructions qui stabilisent les premiers 1 à 2 m de profondeur dans un sol perméable, la durabilité du bois est fortement réduite, alors que l'action de la végétation peut assumer la fonction stabilisatrice dans des conditions appropriées. Les propriétés chimiques du sol (p.ex. le pH), les conditions de lumière et la neige sont d'autres facteurs importants qui peuvent être décisifs pour l'établissement de la couverture végétale. L'influence de l'abrutissement doit également être prise en compte et éventuellement limitée par des mesures supplémentaires (p.ex. par des clôtures). En outre, l'influence des néophytes envahissantes devrait également être prise en compte par des mesures d'entretien des constructions (p.ex. reboisement avec des essences compétitives ou élimination des espèces indésirées).

## 6 Le bois dans l'aménagement des torrents

Le bois est principalement utilisé dans les ouvrages de correction des torrents sous forme de bois rond pour la sécurisation du lit (ouvrages transversaux)

et la protection des berges (ouvrages longitudinaux).

### 6.1 Processus et actions

Les ouvrages susmentionnés agissent contre les forces érosives des processus d'écoulement dans les ruisseaux et les torrents (voir chapitre 6.2). Ils sont soumis aux pressions de la terre et de l'eau. Pour les barrages, la pression d'eau est prise en compte depuis le bord inférieur de l'ouvrage jusqu'à la surface du niveau d'eau déterminant. Comme les barrages en bois sont perméables, la pression statique de l'eau est atténuée. Les ailes qui dépassent du lit du ruisseau à côté de la section d'écoulement subissent en outre des pressions d'eau dynamiques sur toutes les parties exposées au courant. La sollicitation au-dessus du lit du cours d'eau dépend de la hauteur d'écoulement, de la densité du processus d'écoulement et de la vitesse.

Pour définir de manière standardisée les caractéristiques de l'écoulement (processus d'écoulement), on distingue dans [56] trois groupes de processus d'écoulement (écoulement de crue, transport de matériaux solides et lave torrentielle) cf. tableau 3. Les paramètres indiqués sont des valeurs indicatives. Les écoulements de crue peuvent se produire quelle que soit la pente du lit, mais ils sont particu-

lièrement fréquents dans les tronçons de ruisseau peu pentus (pente du lit inférieure à 2 %). Dans les tronçons plus raides (généralement des torrents), ce sont principalement des processus d'écoulement avec une proportion plus élevée de matières solides qui se produisent, le processus de dimensionnement étant ici déterminé non seulement par la quantité d'eau disponible, mais aussi par les foyers de matières solides mobilisables (lit du ruisseau, affleurements latéraux, masses de glissement, etc). Celui-ci ne peut donc être défini que par une analyse approfondie du bassin versant du torrent. Les vitesses d'écoulement pour le calcul des pressions d'eau dynamiques sont tirées de simulations d'écoulement. A titre indicatif, des vitesses allant jusqu'à 2 m/s apparaissent pour les débits de crue et les tronçons peu profonds (pente du lit inférieure à 2 %); dans les tronçons d'écoulement raides (jusqu'à 10 %), des vitesses d'écoulement moyennes allant jusqu'à 5 m/s sont possibles. Pour plus de détails sur les actions et la procédure à suivre pour un éventuel dimensionnement d'un barrage, voir [57], [58], [32] et [40].

Tableau 3  
Groupes standardisés de processus d'écoulement et paramètres importants selon [56] et [33].

Paramètres du processus	Processus d'écoulement				
	écoulement de crue	transport de matériaux solides		lave torrentielle	
		fluviale	torrentiel	pierreuse	boueuse
Densité $\rho$ , en kg/m <sup>3</sup>	1000	1000–1300	1300–1700	1700–2000	2000–2300
Vitesse moyenne en fonction du processus, en m/s	Détermination selon le modèle hydraulique. Souvent 0–5		3–5	3–6	5–10

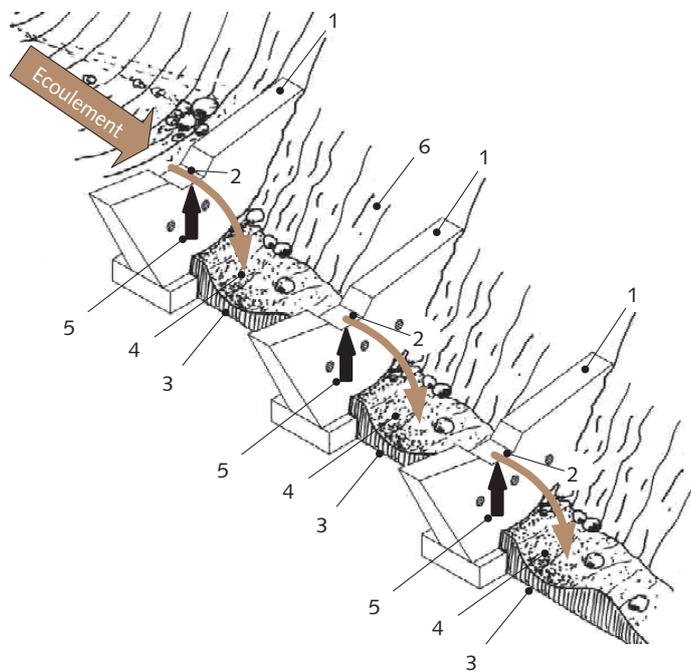
## 6.2 Vue d'ensemble et fonction des barrages

Les barrages (ouvrages transversaux) remplissent la fonction de stabilisation/consolidation (selon [56]). La stabilisation comprend toutes les mesures qui servent à assurer le lit et les berges, y compris les pentes latérales, dans leur position actuelle et à les protéger contre l'érosion latérale et le surcreusement (figures 33 et 43). L'étagement du lit du torrent à l'aide de barrages réduit la pente du lit et permet la formation de chutes ce qui entraîne une diminution de la vitesse d'écoulement et une réduction de l'énergie du processus d'écoulement. La capacité de transport des sédiments est réduite, ce

qui entraîne soit une diminution de la capacité d'érosion, soit un dépôt temporaire (sédimentation) des matières solides transportées. Ces relations influencent l'angle de sédimentation (voir figure 34). Si, en même temps, le relèvement du fond du lit au moyen de barrages améliore la stabilité des versants latéraux, on parle de consolidation. Les barrages de consolidation en bois peuvent être utilisés en cas d'écoulement de crue et, avec une construction appropriée, également en cas de transport de matériaux solides.

Figure 33  
Schéma de principe  
de la fonction stabilisatrice  
par barrages en escaliers.

- 1 ouvrage transversal (barrage)
- 2 chute
- 3 bassin d'affouillement
- 4 destruction d'énergie
- 5 point fixe de la hauteur du lit
- 6 stabilisation de pentes



## 6.3 Construction et utilisation des barrages en bois

### 6.3.1 Règles générales de construction des barrages en bois

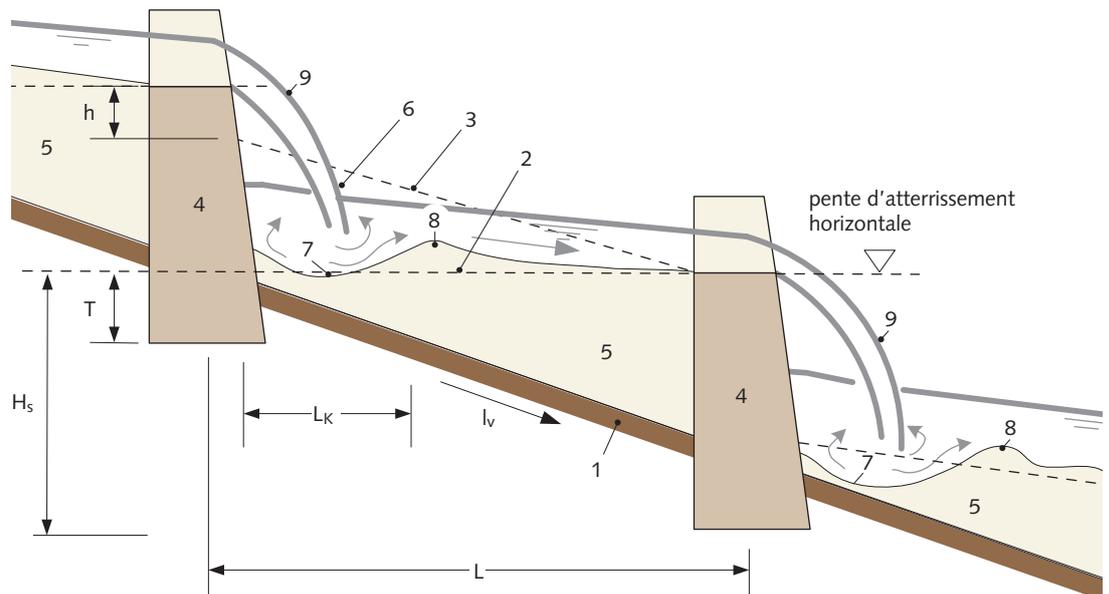
Les barrages (ouvrages transversaux) doivent être disposés à angle droit par rapport au sens d'écoulement. Les sections d'écoulement sont dimensionnées en fonction du débit hydraulique. Pour des raisons de stabilité, ces dernières ne doivent pas être submergées par le débit de dimensionnement. Pour y contribuer, il est recommandé dans [56] de concevoir la couronne des ailes avec une pente d'au moins 10 % en cas d'écoulement de crue ou de transport solide fluviatile et d'au moins 15 % en cas de transport solide de type lave torrentielle, mais en tous les cas pas avec une pente inférieure à la pente d'atterrissement maximale pour le tronçon de torrent considéré.

Dans la plupart des cas, les barrages en bois sont aménagés en escaliers (série d'ouvrages transversaux disposés régulièrement) (figures 33 et 43). Par rapport à la pente du torrent non aménagé, une pente plus faible s'établit entre les barrages d'un escalier. Cette pente d'atterrissement dépend de la composition granulométrique du lit du ruisseau et du type de processus d'écoulement. La pente d'atterrissement peut être calculée selon [32], p. 32 et suivantes.

Lors de la conception de l'escalier (cf. figure 34), il faut trouver un optimum entre la hauteur  $H_s$  des ouvrages et la distance  $L$  entre ces derniers. La distance  $L$  entre les barrages doit correspondre au moins à la longueur du bassin d'affouillement  $L_k$  (chute). La longueur du bassin d'affouillement peut

Figure 34  
Coupe longitudinale  
d'ouvrages en escalier.

- 1 lit original
- 2 pente d'atterrissement minimale
- 3 pente d'atterrissement maximale
- 4 barrage en bois (schématique)
- 5 zone d'atterrissement
- 6 destruction d'énergie
- 7 bassin d'affouillement
- 8 bourrelet de matériaux
- 9 chute depuis l'arrête de déversement



être calculée selon des règles hydrauliques (p. ex. parabole de projection). Des indications sur ce calcul figurent dans [32] et [59]. La hauteur de barrage requise résulte de l'intersection entre le lit initial et la pente d'atterrissement minimale supposée entre les barrages. A partir de ce point d'intersection, le barrage doit être fondé à une profondeur de 1 à 1,5 m (T). Une hypothèse sécuritaire est celle d'une pente d'atterrissement horizontale. Par la suite, la pente d'atterrissement maximale possible doit être estimée. La section d'écoulement du barrage situé en amont doit dépasser d'au moins 50 cm (h) la pente d'atterrissement maximale, sinon une concentration de l'écoulement ne peut plus être garantie.

### 6.3.2 Construction des caissons en bois

Un caisson en bois est constitué de bois longitudinaux (longrines) et transversaux (traverses ou pinces) reliés entre eux (voir figures 35 et 38). Le volume formé par ce caisson est comblé de matériau de remplissage. Ce dernier augmente le poids propre de la construction et génère ainsi un moment de rotation contraire aux effets des pressions de la terre et de l'eau. Ces constructions agissent ainsi comme un mur ou un barrage poids. Dans le cas d'ouvrage à double parois, lorsque les assemblages des longrines sont décalées et que l'ancrage du barrage dans les flancs latéraux est suffisamment résistant, le caisson en bois peut également exercer un effet porteur horizontal.

En général, on utilise des longrines d'un diamètre de 20 à 50 cm, principalement des essences résineuses prélevées à proximité immédiate du lieu de construction. Dans des cas exceptionnels, on utilise pour des raisons de durabilité, des bois ayant poussé plus loin, comme le mélèze ou le douglas. Les longrines et traverses doivent être reliées entre elles aux points de jonction de manière solide, ce qui peut être réalisé selon [32] au moyen de vis, de tiges filetées avec des écrous des deux côtés ou plus couramment au moyen de fer à béton B500B. Les fers à béton ont une longueur de 0,6 à 1 m. Ici, un pré-perçage partiel est effectué et le fer est ensuite enfoncé à l'aide d'un marteau hydraulique. Le pré-perçage permet d'éviter que le bois ne se fende, la durée d'utilisation d'une construction en bois dépendant essentiellement de la qualité des différents assemblages.

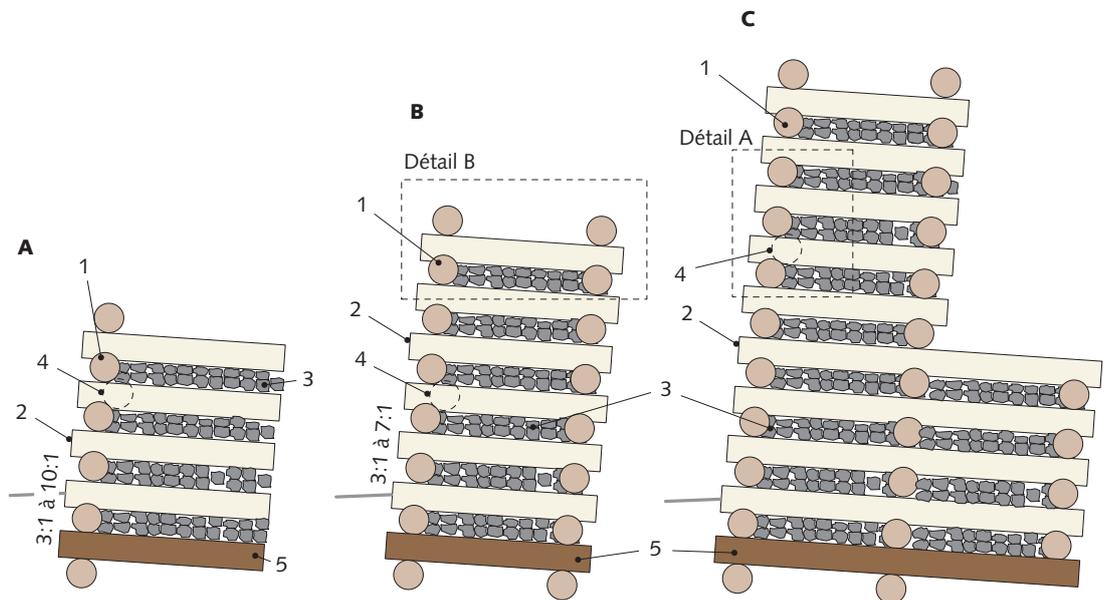
Comme une partie de la contrainte de cisaillement est absorbée par le frottement dû à la pression verticale, chaque bois posé doit appuyer sans basculer et être relié à chaque point d'intersection avec les bois sous-jacents par un clou. Une recommandation issue de la pratique est de n'entailer que la face inférieure des traverses, et ce uniquement en cas de nécessité. La profondeur maximale de l'entaille ne doit pas dépasser  $\frac{1}{4}$  du diamètre de la pince. En effet, toute blessure des fibres du bois constitue un affaiblissement mécanique et une porte d'entrée supplémentaire pour les champignons lignivores. D'une manière générale, il est important que l'assemblage de toutes les pièces de bois soit adéquat et conforme aux règles de l'art.

Figure 35  
Types de construction  
courants de caissons  
en bois.

- A** simple paroi  
**B** double paroi  
**C** triple paroi

Détail A voir figure 36,  
Détail B voir figure 41

- 1 longrine  
2 traverse (pince)  
3 remplissage  
4 bourrage  
5 platelage



Les assemblages des longrines doivent être aussi simples que possible (voir figure 22). Il est préférable de disposer une traverse à gauche et à droite de l'assemblage. Pour les barrages, selon [32], les traverses devraient être superposées au moins dans la zone de la section d'écoulement, afin de minimiser la surface d'attaque des pierres charriées (voir figure 37).

Selon le nombre d'alignées de longrines, on distingue des caissons en bois à une, deux ou trois parois (cf. figure 35). Les hauteurs de construction usuelles sont résumées au chapitre 6.5.

Les constructions à simple paroi sont constituées de longrines ancrées dans le sol à l'aide de traverses (voir figure 35 A). Les barrages simples avec longrines, sécurisés au moyen de pieux verticaux enfoncés ne se sont pas révélés particulièrement durables dans la pratique. Les barrages sont conçus avec un fruit allant de 3:1 jusqu'à 10:1.

Le caisson en bois à double paroi se compose de deux alignées de longrines parallèles, reliées par des traverses (pinces) (cf. figure 35 B). Selon [32], un fruit jusqu'à 7:1 est statiquement raisonnable. Les constructions à simple et double paroi présentent souvent une largeur de base de 2 m pour une hauteur jusqu'au bord inférieur de la section d'écoulement de 2–3 m. Les plus grandes hauteurs d'ouvrage sont atteintes avec des caissons en bois à triples parois (cf. figure 35 C). Si l'on aménage un fruit de 3:1 à 5:1, on obtient une humidification optimale de la face extérieure par l'écoulement d'eau, ce qui permet d'augmenter la durabilité de l'ouvrage.

Les vues de faces des barrages sont représentées sur la figure 37 en fonction du type d'aile. Elles sont valables pour tous les types de caissons en bois représentés ci-dessus.

Dans la pratique, les barrages en bois sont plutôt utilisés dans les zones difficiles d'accès, car le bois est facile à transporter. La forme linéaire des torrents facilite l'utilisation de câble-grue (blondin), dans la mesure où l'aménagement d'une ligne de câble permet généralement de desservir plusieurs barrages. Aujourd'hui, la construction s'effectue le plus souvent au moyen d'une pelle-araignée équipée d'un treuil à câble. En raison de la courte durée de construction, les barrages en bois sont également utilisés comme mesures d'urgence après des événements.

### 6.3.3 Fondation

Selon [15], les caissons en bois doivent être fondés sur une surface d'appui régulière et résistante, perpendiculaire au caisson à aménager. La première couche de longrines y est posée. Pour augmenter la robustesse, un platelage peut être construit. Celui-ci est constitué de rondins serrés les uns contre les autres et repose, côté aval, sur une longrine. Un tel platelage empêche le lessivage du contenu du caisson en bois et réduit considérablement le risque d'érosion interne. Dans le cas d'un sol plutôt cohésif et d'un matériau de remplissage contenant de l'argile/du limon en combinaison avec des blocs appropriés, il est également possible de renoncer au platelage.

### 6.3.4 Sécurisation de l'avant-seuil

En raison du terrain souvent escarpé, qui laisse trop peu de place pour la formation d'un bassin d'affouillement, l'avant-seuil doit être sécurisé dans de nombreux cas. Pour les barrages en bois, il est courant de sécuriser le lit par des blocs de pierres (cf. figure 38), avec un pré-seuil, un platelage prolongé côté aval (cf. figure 43) ou une armature en bois avec remplissage en pierres. Les affouillements peuvent être délimités latéralement par des caissons de bois (cf. figure 43) ou par des enrochements.

### 6.3.5 Remblayage et bourrage

Un caisson en bois vide présente une très faible rigidité, car les points de liaison constituent des articulations d'un point de vue statique. Le système n'acquiert la rigidité nécessaire qu'en le remplissant avec des matériaux grossiers ou/et les matériaux d'excavation (s'il convient). Dans l'idéal, les voies d'écoulement possibles à travers le barrage sont bloquées par une barrière de matériau argileux. En cas de risque de lessivage de l'ouvrage, il est également possible de boucher les fissures en y insérant des tresses de laine de mouton.

Le bourrage d'un caisson en bois peut être réalisé à partir d'inserts en bois ou en pierre (voir figures 36 et 38). L'avantage d'un remplissage en pierre réside

dans sa plus grande rigidité et dans sa durée d'utilisation plus longue. Les pierres sont placées de manière qu'elles ne puissent pas tomber (cf. figure 36 A). Selon [15], la première couche doit être constituée de pierres qui peuvent se caler dans l'ouverture. Selon [15], l'idéal serait de monter un mur continu en pierres derrière les pierres de bourrage. Comme le bourrage en pierres implique un travail manuel conséquent, cette méthode n'est plus guère utilisée pour des raisons de coûts.

Le bourrage en long peut se faire de deux manières (cf. figures 36 B, 36 C et 38). Dans la première variante, on utilise des rondins du même diamètre que les ouvertures à combler (voir figure 36 B). Ces rondins sont cloués sur les longrines. Dans la deuxième variante, on utilise des rondins d'un diamètre plus grand que celui des ouvertures à fermer et on les place de manière à les caler par l'arrière dans l'ouverture (voir figure 36 C). Dans ce cas, le clouage est nettement moins important, mais les rondins insérés peuvent se déplacer en cas de tassement ultérieur. En cas de risque de lessivage de l'ouvrage, le colmatage des fentes avec des tresses de laine de mouton est plus simple que la mise en place d'un géotextile. Une autre variante est le remplissage avec des fourrons parallèle aux traverses (voir figure 36 D, «système gruyérien»).

Figure 36  
Bourrage du caisson.  
Détail A de la figure 35.

- A** Bourrage avec pierres  
**B et C** Variantes bourrage avec rondins en long  
**D** Bourrage avec rondins et quartiers (fourrons) en travers selon le «système gruyérien»

- 1 longrine  
2 traverse  
3 pierres  
4 rondin  
5 mur en pierre sèche  
6 remplissage  
7 rondins ou quartiers (fourrons)

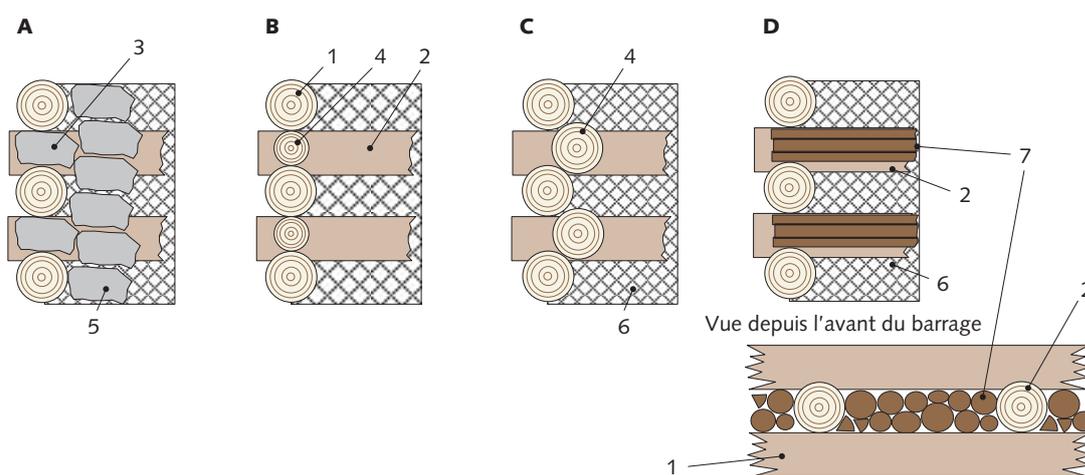
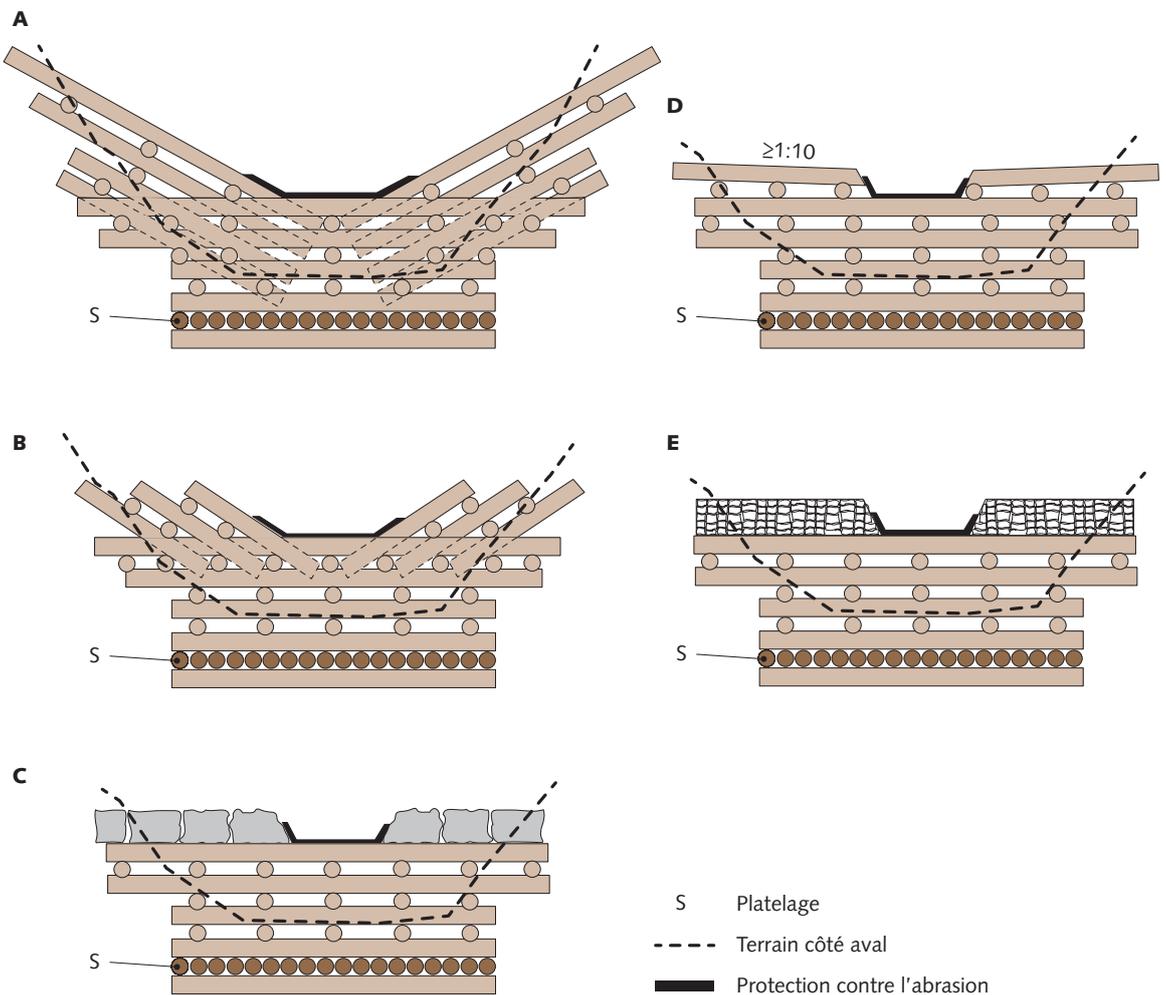


Figure 37  
Formation des ailes des barrages. Vues des seuils côté aval.

- A et B** Ailes encastrées  
**C** Ailes en blocs  
**D** Ailes en bois  
**E** Ailes en gabions



### 6.3.6 Ailes de barrages

Pour centrer l'écoulement au milieu du cours d'eau, il faut aménager une section d'écoulement à l'aide d'ailes de barrage (cf. figure 37). Ces dernières peuvent être conçues de différentes manières.

Dans la pratique actuelle, ce sont surtout des ailes en bois qui sont aménagées. Elles sont souvent construites sous forme de caissons en bois (voir figure 37 A, B, D et figure 39). Pour augmenter la résistance, les ailes peuvent être prolongées un peu en amont. Il est également possible de les relier au seuil situé au-dessus. Les ailes encastrées pratiquées en Autriche offrent une plus grande résistance au cisaillement (modèle recommandé pour les cours d'eau à caractère torrentiel). Dans ce cas, comme le montrent la figure 37 A et B et la figure 39 B et D, les rondins des ailes sont insérés

entre les longrines et les traverses du corps du barrage. Dans le cas de cours d'eau plus étroits, les ailes peuvent également être réalisées comme indiqué sur la figure 37 D.

Pour contrer le problème de la durée de vie réduite des structures en bois dans la zone de contact avec le sol, les ailes peuvent être réalisées avec des gabions (cf. figure 37 E) ou des blocs (cf. figure 37 C et figure 38, gauche). Dans ce cas, il convient de noter qu'ils peuvent être plus facilement désolidarisés du barrage par le courant en raison de leur moins bonne liaison avec le corps du barrage.

Les ailes du barrage respectivement les longrines devraient être ancrées latéralement de 1,2 à 1,5 m (voir au moins 2 m en cas de transport de matériaux solides par le torrent).

Figure 38

Gauche: Barrage avec ailes en bloc et bourrage en bois. Droite: Barrage avec ailes en bois et protection contre l'affouillement avec blocs.



Figure 39

Exemples de réalisations autrichiennes.

- A** Barrage-caisson avec ailes en bois
- B** Avec ailes encastrées
- C** Platelage en rondins pour la section d'écoulement
- D** Barrage caisson à triples parois



Les barrages à caissons en bois à triples parois, comme le montre la figure 39 D, sont des ouvrages extrêmes destinés à des utilisations particulières. Dans ce cas, une construction en bois a été choisie, car les pentes glissaient encore dans la zone de l'ouvrage au moment de la construction. Ce n'est qu'après la stabilisation des pentes, dans un délai d'environ 20 à 30 ans (ce qui correspond à peu près à la durée d'utilisation du barrage en bois), qu'un

ouvrage en béton sera aménagé devant le barrage en bois. L'utilisation de bois calibré, comme illustré à la figure 39, n'est pas courante en Suisse. Les avantages de l'utilisation de bois calibré sont un montage plus simple et une précision d'ajustement ou une meilleure régularité de l'ouvrage. Les coûts supplémentaires de façonnage et de transport constituent les principaux désavantages.

### 6.3.7 Section d'écoulement (déversoir)

Le bord inférieur de la section d'écoulement devrait être horizontal pour assurer une humidification régulière de la face avant du barrage. Les sections d'écoulement des barrages en bois sont soumises à l'abrasion même en cas de charriage occasionnel (cf. figure 40). Pour augmenter la durée d'utilisation, les sections d'écoulement peuvent être équipées d'une protection contre l'abrasion. La protection contre l'abrasion la plus courante est celle réalisée avec un platelage de rondins (cf. figure 39, 41 A et 42). La face supérieure du caisson peut également être pavée avec des pierres plates (voir

figures 40 et 41 B). Un géotextile tiré vers l'amont peut être installé en dessous. Comme la longrine n'est pas protégée dans cette variante, une deuxième longrine devrait être placée sur le bord avant (cf. figure 41 B). La couronne de la section d'écoulement peut également être recouverte de pierres taillées (ou d'éléments en béton, figure 41 C). Pour tous les recouvrements, il est important qu'ils ne dépassent pas les longrines du côté aval, sinon ils empêchent l'humidification durable de la face avant du barrage.

Figure 40  
Bourrage avec des pierres:  
barrage après usure due  
à une lave torrentielle.



Figure 41  
Construction de la section  
d'écoulement. Détail B  
de la figure 35.

**A** Platelage en rondins

**B** Pavage avec pierres plates

**C** Pierres de couronne taillées

1 longrine

2 traverse (pinçe)

3 platelage avec rondins

4 pierres plates

5 pierres de couronne

6 prolongation du  
platelage en rondins

7 géotextile

8 matériaux remblayés

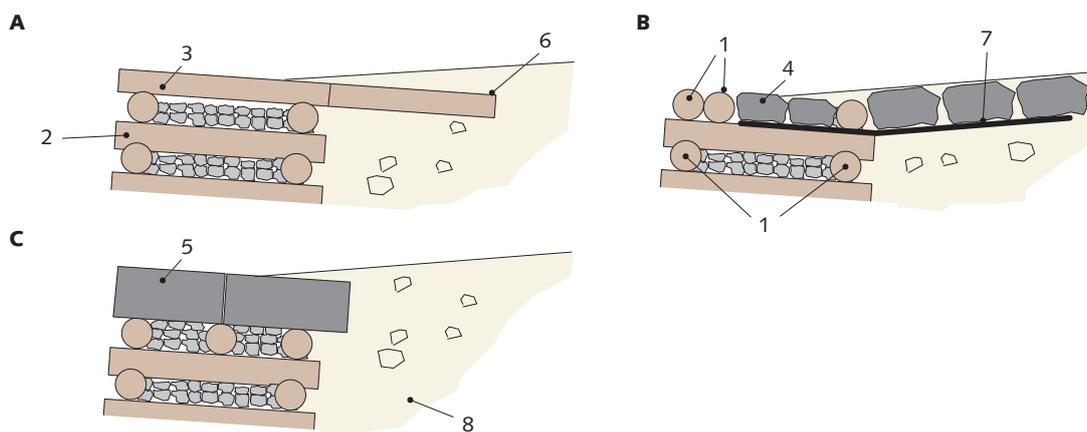


Figure 42

Exécution de la section d'écoulement avec un platelage en bois. La structure débordante (rondins) protège bien les bois sous-jacents contre l'abrasion, mais cela entraîne une moins bonne humidification, ce qui peut conduire à une humidité du bois défavorable en termes de dégradation biologique (champignons).



### 6.3.8 Exécutions en cas de sollicitation élevée

En règle générale, les barrages en bois ne sont pas stables en cas de laves torrentielles. C'est pourquoi on utilise souvent d'autres matériaux de construction. Des mesures ciblées permettent toutefois d'augmenter sensiblement la résistance des ouvrages en bois face au transport de matériaux solides de type lave torrentielle. En général, il faut éviter les parties saillantes dans la zone d'écou-

lement (voir figure 40). En outre, en cas de processus d'écoulement avec une proportion élevée de matières solides, il est impératif de sécuriser l'avant-seuil (cf. chapitre 6.3.4). Les barrages qui sont reliés latéralement par les ailes et par le fond par la protection contre l'affouillement, sont particulièrement résistants (barrages reliés en escalier, cf. figure 43). Il convient d'utiliser des ailes encastrées (cf. chapitre 6.3.6). Il est important que les ailes s'encastrent sans transition dans les ouvrages latéraux et ne dépassent pas. Les sections d'écoulement recouvertes d'un platelage en rondins se sont avérées très résistantes, surtout lorsqu'on les prolonge en amont et qu'on les relie au barrage supérieur. Selon [32], on peut ainsi obtenir un ancrage arrière supplémentaire. Une telle solution n'entre pas en ligne de compte lorsqu'il faut s'attendre à des tassements de terrain importants. Avec ce type de construction, il faut être conscient que les travaux d'entretien ultérieurs seront plus compliqués, car les pièces de bois reliées entre elles sont difficiles à remplacer.

Figure 43

Barrages reliés en escalier.



## 6.4 Construction d'ouvrages longitudinaux en bois

La construction d'ouvrages longitudinaux (ouvrages de protection des berges) suit les mêmes exigences que celles résumées au chapitre 5.3.3. Toutefois, il faut toujours recourir au bourrage (cf. chapitre 6.3.5) entre les longrines ou utiliser un matériau de remplissage largement résistant à l'érosion en combinaison avec une plantation. Au fond

de l'ouvrage, il est recommandé de réaliser un platelage en rondins selon le chapitre 6.3.3, comme pour les barrages. Les ouvrages de protection des berges doivent être fondés à 1 m de profondeur sous le lit moyen du cours d'eau. Des caissons en bois à une ou deux parois sont utilisés (cf. chapitre 6.3.2).

---

### 6.5 Limites de l'utilisation d'ouvrages en bois dans la protection des torrents

La géométrie se définit par la largeur du barrage (largeur du torrent) et la hauteur du barrage. Les hauteurs maximales possibles des ouvrages transversaux et longitudinaux varient en fonction du type de construction des caissons en bois. Les barrages à simple paroi peuvent atteindre une hauteur de construction de 1,5 m, voire 2 m dans des conditions optimales. Les caissons en bois à doubles parois peuvent atteindre une hauteur de 4 m s'ils sont construits avec soin, et de 5 m dans des conditions particulièrement favorables. Afin de minimiser les effets d'une défaillance du barrage, les hauteurs d'ouvrage doivent être maintenues aussi basses que possible.

Les largeurs maximales sont déterminées par les longueurs de tronc disponibles. Les barrages en bois à simple paroi sont limités par ces longueurs.

Pour les systèmes à doubles ou triples parois, les assemblages peuvent être décalés entre côté aval et amont du caisson.

Les conditions environnementales favorables aux barrages en bois sont des sites ombragés, humides/mouillés en permanence. Dans les zones fréquemment ensoleillées et qui s'assèchent régulièrement, les constructions en bois ont une durée d'utilisation assez courte (souvent quelques années seulement). En outre, la zone de transition sol-air (zone à humidité variable) limite toujours la durée d'utilisation, car il y règne généralement des conditions ambiantes optimales pour la croissance des champignons (voir également le chapitre 2). L'expérience montre en outre que les barrages en bois ne sont pas adaptés aux sols sableux et sensibles à l'érosion.

## 7 Le bois dans la protection contre les avalanches et les mouvements de neige

Dans la protection contre les avalanches, le bois est utilisé en particulier pour les ouvrages de soutènement temporaires ainsi que pour les mesures de protection contre les glissements de neige (pieux,

trépieds et seuils en bois). En outre, le bois est utilisé dans les ouvrages de protection contre les congères et, de manière isolée, dans les ouvrages de déviation.

### 7.1 Processus et actions

Les avalanches sont des mouvements de masse rapides qui se produisent dans les montagnes où le manteau neigeux est saisonnier. Au cours de l'histoire, les catastrophes causées par les avalanches ont régulièrement fait des victimes. Elles ont marqué l'occupation des espaces montagnards, par l'abandon des zones dangereuses ou la construction d'ouvrages paravalanches (cf. figure 44). Les avalanches se produisent lorsqu'une plaque de neige entière se détache sur une grande surface et se fragmente en différentes plaques plus ou moins grandes qui restent en contact avec le sol pendant leur déplacement. Selon la nature de la neige et la topographie, la partie coulante ou poudreuse d'une avalanche domine. Typiquement, les zones de départ d'avalanche sont inclinées de 30 à 50°. La taille d'une avalanche peut être très variable: elle peut comprendre un glissement d'un volume de 100 m<sup>3</sup> jusqu'à une avalanche extrêmement grande d'un volume de plusieurs centaines de milliers de m<sup>3</sup> ainsi que des distances d'écoulement de plusieurs kilomètres. Les masses de neige qui se sont détachées atteignent des vitesses de 10 à 40 m/s après un court laps de temps. La densité d'une avalanche coulante est similaire à celle du manteau neigeux naturel et s'élève à environ 300 kg/m<sup>3</sup>. Les facteurs de prédisposition aux avalanches sont généralement de fortes chutes de neige par temps venteux ou des périodes de redoux. La pression d'une ava-

lanche dépend du type de neige, du volume et de la vitesse. Les grandes avalanches peuvent exercer des pressions dynamiques de plus de 100 kN/m<sup>2</sup> et provoquer de grandes destructions. [60]

Le glissement de neige est en revanche un mouvement lent et continu de l'ensemble du manteau neigeux sur des pentes lisses et fortement ensoleillées avec une inclinaison d'au moins 15°. Il se forme souvent des arêtes de rupture typiques, appelées gueules de baleine (cf. figure 45). Une surface de sol lisse et un sol non gelé favorisent le glissement de la neige. La plupart du temps, la présence d'une couche humide entre le sol et le manteau neigeux va favoriser le glissement. Si les surfaces agricoles en pente ne sont pas suffisamment entretenues, les herbes longues peuvent favoriser les glissements de neige. Lorsqu'un objet tel qu'un bâtiment se trouve dans le manteau neigeux glissant, les mouvements du manteau neigeux y sont localement freinés et des forces de pression statique de la neige, généralement inférieures à 20 kN/m<sup>2</sup>, apparaissent. Le glissement de neige peut entraîner des avalanches de glissement, un glissement rapide de l'ensemble du manteau neigeux. Les avalanches de glissement représentent un danger difficilement prévisible, par exemple pour les voies de communication. En raison du changement climatique, les glissements de neige et les avalanches de glissement seront plus fréquents à l'avenir.

Figure 44 (gauche)  
Dépôts d'une avalanche de neige mouillée en janvier 2018.



Figure 45 (droite)  
Le mouvement lent et parallèle à la pente du manteau neigeux a entraîné la formation de fissures de glissement (gueules de baleine).



## 7.2 Vue d'ensemble et fonction des ouvrages paravalanches

Les paravalanches en bois sont surtout utilisés comme ouvrages de soutènement temporaires et comme mesures de protection contre les glissements de neige. Le bois est également utilisé pour les ouvrages de protection contre les congères et, plus rarement, pour l'aménagement de coins paravalanches. Les ouvrages en bois sous forme de palissades à neige ou de pieux ont été construits il y a 150 ans déjà et font partie des premières mesures techniques de protection dans les zones de décrochement des avalanches. Aujourd'hui, il existe en Suisse plus de 200 km d'ouvrages paravalanches temporaires en bois. Un paravalanche doit stabiliser le manteau neigeux de manière à empêcher autant que possible le déclenchement d'avalanches et à ralentir et stopper les petites avalanches qui ne peuvent jamais être totalement évitées (cf. figure 46). Au début de la construction d'ouvrages paravalanches, la structure porteuse était souvent en acier et les poutres du râtelier étaient en rondins. Les ouvrages de soutènement temporaires sont si

possible combinés avec des reboisements, l'objectif étant que la forêt puisse reprendre la fonction de protection à la fin de la durée de vie prévue pour les ouvrages, soit après 30 à 50 ans. Par rapport aux ouvrages paravalanches permanents en acier, les paravalanches en bois présentent l'avantage de faciliter l'entretien ultérieur de la forêt et de ne pas nécessiter de démontage. En raison de leur durée d'utilisation et de leur hauteur limitée, les ouvrages paravalanches temporaires sont principalement mis en œuvre dans les zones de décrochement situées en dessous de la limite de la forêt. D'autres lieux d'utilisation typiques sont les petites zones de déclenchement dans les secteurs d'habitation ou au-dessus des axes de circulation, les zones de tempête ainsi que les grandes surfaces de rajeunissement dans les zones de décrochement boisées. Si les exigences statiques sont plus élevées ou si l'apparition d'un reboisement est moins probable, on recourt également aux ouvrages combinés bois-acier.

Figure 46 (gauche)  
Râteliers en bois dans  
une zone d'afforestation.



Figure 47 (droite)  
Trépieds dans une pente  
à glissements de neige  
à proximité d'une zone  
d'habitation.



Le bois s'est imposé comme matériau de construction pour les mesures de protection contre les glissements de neige (cf. figure 47). L'acier ou l'aluminium n'y sont utilisés qu'exceptionnellement. Les mesures de protection contre les glissements de neige augmentent la rugosité du terrain afin que le manteau neigeux s'imbrique mieux dans le sol et ne glisse plus. Les mesures utilisées sont des pieux, des seuils ainsi que des trépieds. En raison de leurs dimensions plus petites que celles des ouvrages paravalanches, ces mesures dissociées ne produisent qu'un effet de protection local. Pour qu'elles soient efficaces, elles doivent donc être installées de manière surfacique. Sinon, les mesures peuvent être surchargées et détruites. Les mesures de protection contre les glissements de neige peuvent également être combinées avec des paravalanches temporaires, en particulier sur les sites où les jeunes plants ont besoin d'une protection supplémentaire. Les lieux d'intervention fréquents

sont, outre les surfaces de reboisement, les pentes soumises aux glissements de neige situées au-dessus des voies de communication, des pistes de ski ou des zones d'habitation.

Les ouvrages de protection contre la neige soufflée influencent le lieu de dépôt et la répartition des masses de neige transportées par le vent (cf. figure 48). Les palissades à neige soufflée, qui sont souvent des constructions purement en bois, sont utilisées pour protéger les axes de circulation contre les congères ou pour réduire les hauteurs de neige dans les zones de décrochement d'avalanches.

Pour des raisons de protection du paysage ou lorsque les effets des avalanches sont faibles, un coin paravalanche peut être construit en bois (cf. figure 49) ou sous forme de construction combinée bois-acier. Un coin paravalanche dévie l'avalanche qui s'écoule à gauche et à droite de l'objet à protéger.

Figure 48 (gauche)  
Palissade à neige soufflée  
composée d'éléments  
en bois de 5 m de long.



Figure 49 (droite)  
Un coin paravalanche  
construit en bois protège  
un bâtiment d'habitation.



### 7.3 Construction et utilisation de paravalanches en bois

Pour une conception optimale des paravalanches en bois, la première étape consiste à identifier le problème d'avalanche ou de glissement de neige, les causes possibles et les conséquences pour les personnes et les biens. Sur cette base, le besoin d'action et l'objectif de protection sont définis. Les points importants pour le choix des mesures possibles et l'évaluation de leur faisabilité sont la hauteur de neige, la topographie, la végétation, la déclivité, la rugosité du sol, les conditions de croissance de la végétation et le sol de fondation. Il est également important d'évaluer le rapport coût-efficacité. Une étude préliminaire ou un projet de construction est élaboré sur la base de ces informations. Les ouvrages non imprégnés sont réalisés avec des essences à duramen différencié comme le châtaignier, le robinier ou le chêne. Dans les sites à bonne croissance, on peut également utiliser le mélèze. Le bois d'épicéa et de sapin devrait être imprégné, ce qui n'est plus pratiqué pour des raisons environnementales.

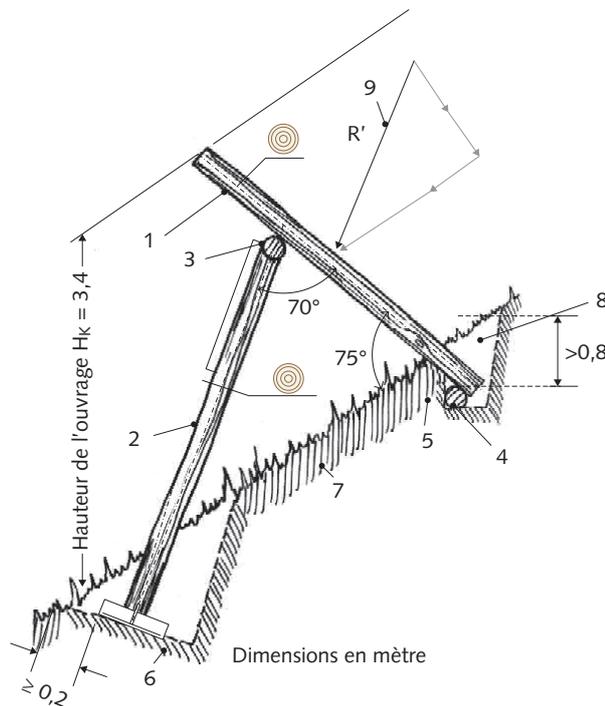
#### 7.3.1 Ouvrages paravalanches temporaires

En Suisse, on utilise le plus souvent le système des râteliers avec les chevrons disposés perpendiculairement à la ligne de niveau. Le tablier transmet la pression de la neige agissant parallèlement à la pente sur le seuil en amont et sur la longrine et les piliers en aval (cf. figures 50 et 51). Afin d'augmenter la stabilité latérale des ouvrages, une contre-fiche, est installée entre la longrine et chaque pilier. Les différents éléments en bois rond sont cloués. Les râteliers en bois sont généralement construits en tant qu'ouvrages individuels d'une largeur de 4 mètres. Le système de râtelier est préféré au système de claie, parce que l'ancrage amont du seuil est plus facile sur toute la largeur de l'ouvrage, que les chevrons inclinés sont moins sujets à la

pourriture et que les jeunes arbres subissent moins de dommages dus à leur déformation lors de la croissance à travers le tablier. L'inclinaison optimale du tablier par rapport à la perpendiculaire à la ligne de pente est de  $15^\circ$  et l'angle entre le pilier et le tablier est de  $70^\circ$ . Si le tablier est plus incliné, les forces d'ancrage en amont sont trop importantes. Les râteliers en bois peuvent soutenir un manteau neigeux sur une hauteur maximale de 3,4 mètres. Des instructions de construction et des plans d'ouvrage sont disponibles pour la construction de paravalanches en bois dans [37]. Celles-ci indiquent les dimensions des éléments de construction nécessaires selon la directive technique [34] en fonction de la hauteur de neige et de la pente. Une vérification spécifique au projet de la sécurité structurale interne et externe n'est en général pas effectuée. La résistance des râteliers en bois standard est basée sur un facteur de glissement de 1,8. Le facteur de glissement décrit la rugosité du sol et influence fortement l'ampleur de la pression de la neige. [34] En cas de faible rugosité du terrain et de facteurs de glissement plus élevés, il est recommandé de construire des mesures supplémentaires de protection contre les glissements de neige telles que des trépiéds entre les rangées d'ouvrages. Pour une hauteur de neige de 3,4 m et une pente de  $45^\circ$ , le diamètre minimum des chevrons du tablier au bord de l'ouvrage (champ terminal) est de 20 cm pour 3,30 m de long, le diamètre de la longrine est de 27 cm et celui du seuil de 20 cm (cf. figure 50). Les piliers de 5 m de long doivent présenter quant à eux un diamètre de 24 cm. Il convient de noter qu'une taille inutilement grande des éléments de construction est préjudiciable à la durée d'utilisation en termes d'humidité du bois (champignons). La réalisation des fondations des râteliers en bois est très importante pour une longue durée d'utilisation. Il existe différentes variantes en fonction du sol. Dans

Figure 50  
Schéma de principe du  
râtelier bois de type SLF  
avec ancrage par seuil  
recouvert.

- 1 chevron: rondin  
(d = 20 cm,  
L = 330 cm)
- 2 pilier: rondin  
(d = 24 cm,  
L = 500 cm)
- 3 longrine: rondin  
(d = 27 cm,  
L = 400 cm)
- 4 seuil: rondin  
(d = 20 cm,  
L = 400 cm)
- 5 appui amont
- 6 appui aval
- 7 terrain meuble
- 8 remblayage de terre
- 9 pression de neige  
résultante



les sols peu profonds, le seuil est ancré dans la roche au moyen de câbles d'ancrage. Dans les terrains meubles denses, on dispose le seuil en excavation remplie (voir figure 50), dans laquelle il est enterré à environ 80 cm de profondeur selon le principe de l'ancrage «homme mort». Dans les sols non menacés par l'érosion, le seuil peut également être installé à découvert, sécurisé par des pieux. Le pilier quant à lui est posé sur une plaque en acier ou en béton équipée d'un goujon en acier. La plaque est posée à au moins 20 cm de profondeur dans le terrain naturel. Les ouvrages temporaires en bois sont planifiés et répartis de la même manière que les ouvrages de paravalanches permanents. [34]

La distance entre les paravalanches dans la ligne de pente dépend en particulier de la hauteur de l'ouvrage et de la déclivité. Pour une pente de 35° et une hauteur d'ouvrage  $H_k$  de 3,4 m, la distance entre les ouvrages parallèles à la pente est de 24 m environ. Si la distance entre les ouvrages est trop grande, des dommages peuvent survenir en raison de la pression de la neige. Il est important que les ouvrages amonts soient construits juste en dessous des lignes de décrochement des avalanches. Dans les terrains ouverts et réguliers, la disposition continue des ouvrages a fait ses preuves (cf. figure 51). En combinaison avec des reboisements et des mesures sylvicoles, on peut attendre des paravalanches temporaires en bois un effet similaire à celui des ouvrages permanents en acier. Pour cela, il faut que les qualités du bois répondent aux exigences de la durée d'utilisation requise localement et que la jeune forêt puisse assumer les fonctions de protection après cette période. Les râteliers en bois constituent alors une mesure de stabilisation simple et économique.

Figure 51  
Râteliers en bois de type  
SLF en combinaison avec  
des reboisements comme  
protection pour un axe  
de circulation.



### 7.3.2 Mesures de protection contre les glissements de neige

Les mesures de protection contre les glissements de neige sont généralement conçues sur la base de valeurs empiriques sans vérification statique. Des

instructions de construction sont disponibles pour réaliser le projet. [37] Les mesures les plus importantes sont présentées ci-dessous.

#### 7.3.2.1 Pieux

Des pieux en bois isolés sont enfoncés dans le sol selon un agencement en triangle, manuellement ou mécaniquement (voir figures 52 et 53). Les distances dans la ligne de pente varient entre 90 cm (pente de 45°) et 2 m maximum (pente de 30°). Le diamètre nécessaire des pieux est de 10 cm pour les rondins et de 16 cm pour les demi-rondins. La hauteur des pieux au-dessus du sol est de 30 à 50 cm. Le rapport idéal entre la profondeur de battage et la longueur de dépassement du pieu

au-dessus du sol est de 2:1. Dans les sols denses, la profondeur minimale de battage est de 60 cm et dans les sols meubles de 80 à 100 cm. Si la profondeur d'enfoncement est trop faible, les pieux risquent d'être renversés et arrachés sous l'effet de la pression de la neige. Les pieux ont fait leurs preuves non seulement pour la protection des jeunes arbres, mais aussi pour empêcher les glissements de neige sur les talus de route courts et raides.

Figure 52

Schéma de principe de la mise en place de pieux. Selon la pente du terrain, l'espacement varie entre 90 cm (45°) et 200 cm (30°).

- 1 rondin  
(d = 10–15 cm,  
L = 90–150 cm)
- 2 demi-rondin  
(d = min. 16 cm,  
L = 90–150 cm)

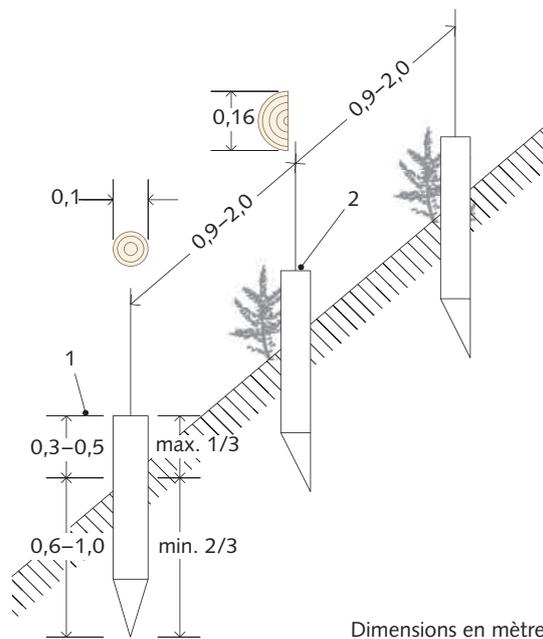


Figure 53

Pieux destinés à protéger une route contre les glissements de neige; il est important que le rapport d'enfoncement des pieux soit de 2:1 dans le sol.



## 7.3.2.2 Trépieds

Le trépied (Ogi-bock en allemand), est la mesure de protection contre les glissements de neige la plus fréquemment utilisée en Suisse, où plusieurs dizaines de milliers de trépieds ont déjà été implantés. Dans le cadre de reboisements, le trépied protège les jeunes plants non seulement contre les glissements de neige, mais aussi efficacement contre les reptations de la neige à l'âge du fourré et du perchis. Il induit en outre la fonte précoce autour des poteaux de bois, ce qui permet de prolonger la période de végétation pour les jeunes plants. Les trépieds sont constitués de deux rondins croisés, disposés en V, d'environ 2 m de long et d'un diamètre de 10 à 14 cm. En amont un seuil ancré, selon les conditions du sol, par des barres d'armature, des pieux ou des câbles, assure la stabilité de l'ouvrage. Côté aval, les rondins sont posés sur un pilier d'un diamètre de 12 à 15 cm qui est fondé sur

une petite dalle de fondation en béton ou en acier (voir figures 54 et 55). Les trépieds sont disposés selon une trame de 1,5 à 2,0 m entre les piliers. Pour des stabilisations de surface, on installe environ 500 à 750 trépieds par hectare en fonction de la déclivité. Les trépieds ont une hauteur d'environ 1,5 m. Si les trépieds sont trop enneigés (cas de surcharge), le support peut s'enfoncer dans le sol ou le porte-à-faux des rondins peut se rompre. Les pentes soumises au glissement de la neige en dessous de la limite de la forêt sont le lieu idéal d'implantation. Pour les pentes dont l'inclinaison est inférieure à 35° environ, les trépieds peuvent également être disposés en collectif avec le reboisement. Il est important que les trépieds soient positionnés avec soin sur les bords de la zone concernée afin d'éviter les dégâts dus à la surcharge marginale de la neige.

Figure 54  
Schéma de principe  
des trépieds avec ancrage  
à seuils ou à pieux.

- A** Trépied avec ancrage par pieux  
**B** Trépied avec ancrage par seuil
- 1 support: rondin (d = 10–14 cm, L = 200 cm)
  - 2 pilier: rondin (d = 12–15 cm, L = 220 cm)
  - 3 seuil: rondin (d = 16–20 cm, L = 200 cm)
  - 4 pieu d'ancrage: demi-rondins (d = 16 cm, L = 80 cm)
  - 5 ancrage avec câble hélicoïdal d = 7,5 mm
  - 6 plaque de base en pierre, en métal ou en béton (25/25/10)
  - 7 roche
  - 8 terrain meuble (sol)

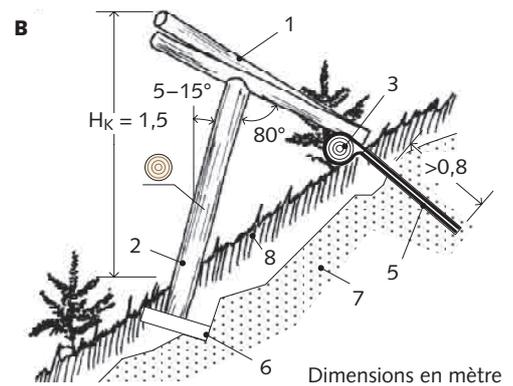
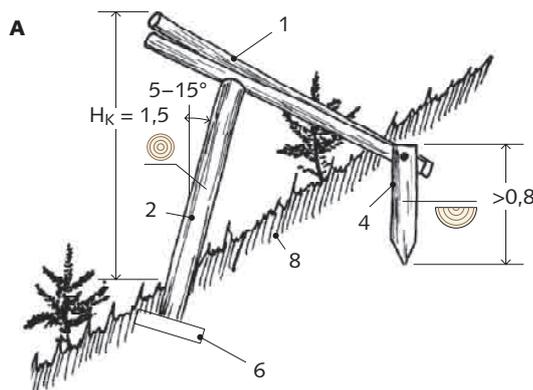


Figure 55  
Des trépieds avec une  
traverse en amont  
protègent les jeunes plants  
contre les glissements et  
la reptation de neige.

## 7.3.2.3 Seuils

Un seuil en bois se compose d'un rondin de 4 m de long et de 30 cm de diamètre, fixé par des boucles à deux ancrages à câble (cf. figures 56 et 57). Dans la roche, la longueur d'ancrage doit être d'au moins 0,8 m et, dans les terrains meubles, d'environ 3 m selon la densité du sol en place. Pour fixer les seuils dans les terrains meubles, on utilise parfois, à la place des ancrages à câble, des ancrages à basculement, ou des sabots en acier fixés par des tiges d'ancrages. La distance entre les seuils dans la ligne de pente varie entre 3 m et 5 m en fonction de la déclivité. Les seuils sont posés en quinconce. Les endroits idéaux pour la pose sont la roche affleurante ou les sols peu profonds. Dans les sols peu

résistants et sensibles à l'érosion, les coûts d'ancrage élevés peuvent rendre la pose de seuils trop onéreuse. En comparaison avec les trépieds et les pieux, les seuils en bois sont beaucoup plus robustes et peuvent donc être installés dans des zones de haute altitude avec de grandes hauteurs de neige. Au fil du temps, les seuils en bois peuvent s'enfoncer dans le sol et perdre ainsi de leur hauteur d'action. Cela peut être évité en plaçant les seuils en bois sur deux traverses rondes de 1,5 m de long ou en dégagant périodiquement les seuils. Ces dernières années, les seuils en bois sont de plus en plus utilisés pour protéger les pistes de ski contre les avalanches de glissement.

Figure 56

Schéma de principe pour les seuils en bois. Les seuils sont ancrés directement dans la roche à l'aide de deux câbles.

- 1 seuil (d = 30 cm, L = 400 cm)
- 2 ancrage à câble hélicoïdal (zingé) d = 11 mm
- 3 mortier d'ancrage
- 4 roche dure
- 5 terrain meuble (sol)

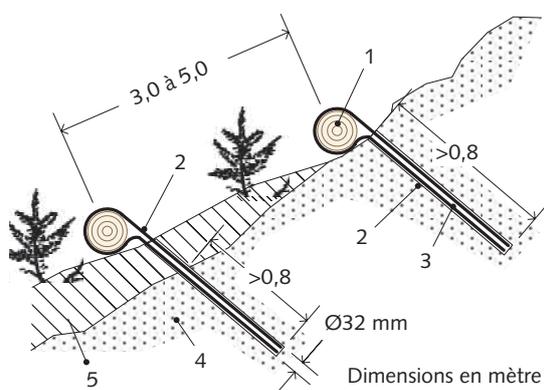


Figure 57

Seuils en bois fixés avec deux ancrages de câble. L'avantage de l'ancrage par câble est que les seuils peuvent être si besoin remplacés plus facilement.



#### 7.4 Palissades à neige soufflée

Au cours des 20 dernières années, différentes palissades à neige soufflée constituées d'éléments en bois autoportants de 5 m de long ont été utilisées avec succès dans le canton des Grisons (cf. figure 59). Cette construction a été développée aux États-Unis il y a plus de 50 ans [61] et y est souvent utilisée pour protéger les axes de circulation. La construction en bois se compose de trois poutres de 4 m de haut inclinées à 15°, chacune soutenue par deux appuis et vissée à deux planches de base. Des planches de 5 m de long et de 15 cm de haut sont vissées sur les poutres inclinées à des intervalles de 15 cm afin que le taux de remplissage de la clôture soit de 50 %. Il est important qu'il y ait un espace entre la planche la plus basse et le sol, dont la hauteur correspond à au moins 10 % de la hauteur de la palissade. Cette ouverture proche du sol

créé un effet de buse local et empêche la clôture de se couvrir de neige prématurément. Afin de garantir la stabilité latérale, trois planches supplémentaires sont installées en diagonale pour former des contreventements. Les différents éléments sont fixés à l'aide de six ancrages. L'avantage de cette construction en bois est qu'elle peut être construite par une équipe forestière et que, si nécessaire, elle peut être déplacée relativement facilement sur le terrain. La distance entre la clôture et la zone de décrochement des avalanches ou l'axe de circulation à protéger devrait être de 15 à 20 fois la hauteur de la palissade (voir figure 58). Avant la construction, une étude approfondie des conditions de vent et de neige dans la zone du projet est nécessaire. L'idéal est que le site d'implantation soit plat.

Figure 58

Schéma de principe d'une palissade à neige soufflée qui protège un ouvrage paravalanche contre les grandes accumulations de neige. La palissade à neige soufflée a pour effet que les masses de neige se déposent avant le paravalanche. La distance entre la palissade à neige et la zone à protéger doit être égale à 15–20 fois la hauteur de la palissade.

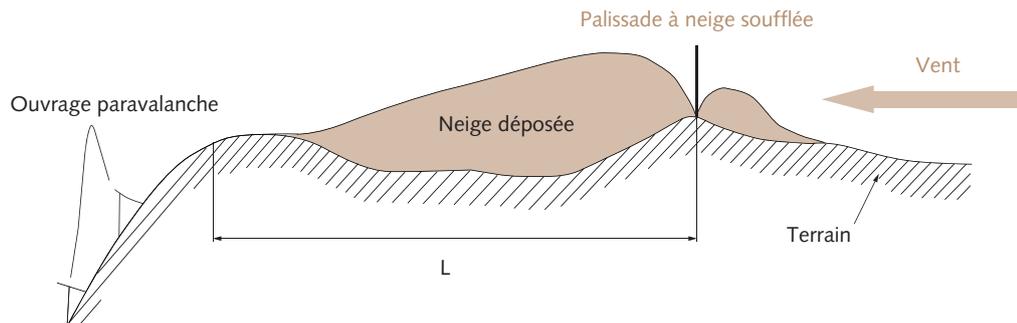


Figure 59

Palissade à neige soufflée composée d'éléments en bois. Un important dépôt de neige s'est formé sous le vent de la clôture (à gauche sur la photo).



### 7.5 Limites de l'utilisation des ouvrages en bois

Les principaux inconvénients du bois par rapport à l'acier sont sa durabilité réduite (voir figure 60) et sa résistance moindre. Dans la zone de transition sol/air en particulier, la pourriture peut entraîner une rupture prématurée des éléments en bois. La résistance du bois permet une construction économique d'ouvrages de soutènement temporaires jusqu'à une hauteur d'ouvrage de 3,4 m environ. Des hauteurs d'ouvrage plus importantes impliqueraient des éléments de construction trop lourds et des sections trop importantes. Les ouvrages tem-

poraires tels que les râteliers en bois sont judicieux sur les sites où la croissance de la forêt est possible. Si cela n'est pas possible pendant la durée d'utilisation des ouvrages en bois, la mise en œuvre d'ouvrages en acier peut s'avérer plus économique en fonction de l'objectif de protection. Il convient de renoncer à l'utilisation de râteliers en bois dans les endroits très enneigés, dans les situations où les conditions de croissance sont mauvaises et en particulier au-dessus de la limite de la forêt. En règle générale, les ouvrages en bois ne sont pas fondés avec des micropieux forés et des ancrages. Leur utilisation est donc limitée aux sols présentant des conditions de fondation moyennes à bonnes. Les mesures de protection contre les glissements de neige comme les trépieds ou les pieux doivent être installées en dessous de la limite de la forêt, car ils sont plus sensibles aux dégâts que les seuils en bois en cas de hauteurs de neige importantes. Dans les pentes soumises au glissement de la neige utilisées par l'agriculture, les mesures de protection ne sont souvent pas souhaitées, car l'exploitation serait rendue plus difficile voire impossible. Toutes les mesures de protection contre les glissements de neige ne fonctionnent que si elles sont installées de manière surfacique.

Figure 60  
Élément pourri et cassé  
sur une claie combinée  
bois-acier.



## 8 Ouvrages de protection et durabilité

Ce chapitre analyse les ouvrages de protection en bois dans le contexte de la durabilité sur la base d'un écobilan établi pour un cas concret en Autriche. Il est important de préciser que cet exemple ne peut pas être considéré comme représentatif

d'autres ouvrages/chantiers. Il convient donc d'évaluer et de calculer séparément chaque ouvrage avec ses conditions initiales spécifiques, ainsi que les détails de la construction, de l'utilisation et de la phase de fin de service.

### 8.1 Introduction

Le terme de durabilité a été inventé par le forestier Hans Carl von Carlowitz en 1713, lorsqu'il a décrit le triangle formé par l'équilibre écologique, la sécurité économique et la justice sociale. Son ouvrage *«Sylvicultura Oeconomica»*, dans lequel il préconisait l'utilisation durable du bois, a été reconnu dans toute l'Europe. [62] Le principe de durabilité ou de développement durable a donc été appliqué, à partir du domaine forestier, à de nombreuses questions environnementales pour devenir fondamental dans tous les secteurs de l'économie et de la société. C'est ce que montre également la définition classique donnée par la Commission Brundtland en 1987: «Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la possibilité, pour les générations à venir, de pouvoir répondre à leurs propres besoins». [63]

Aujourd'hui, le «développement durable» est décrit par le «modèle des trois cercles», qui a été développé dans le sillage de la Conférence de Rio (Conférence mondiale des Nations unies sur l'environnement et le développement à Rio de Janeiro en 1992). Un développement durable vise donc une utilisation mesurée des ressources (environnement, écologie), une société solidaire (social) et le bien-être économique (économie). Les trois cercles – écologie, social et économie – doivent être pris en compte, et se recoupent en grande partie.

Selon ce concept, diverses méthodes ont été développées pour évaluer la durabilité des produits et des services et constituent ainsi un outil d'aide à la décision en la matière. L'une de ces méthodes est l'analyse du cycle de vie (ACV, anglais: Life Cycle Assessment, LCA). Une ACV peut être appliquée à différents systèmes, des produits spécifiques à des entreprises multinationales voire à des industries entières (SN EN ISO 14040 [64]). Les impacts écologiques sont évalués en premier lieu. Les aspects sociaux et économiques de la durabilité sont actuellement encore couverts par des méthodes dis-

tinctes mais apparentées – ACVsocial (sLCA) et Life-Cycle Costing (LCC).

La Conférence suisse de coordination des services de la construction et des immeubles des maîtres d'ouvrage publics, KBOB, met à la disposition du secteur de la construction, par le biais du groupe spécialisé dans la construction durable, des chiffres relatifs à l'écobilan des matériaux de construction. Les valeurs se basent sur les flux de matières et d'énergie spécifiques au secteur, ce qui permet d'établir de manière simplifiée trois indicateurs environnementaux. Il s'agit de l'énergie primaire (subdivisée en renouvelable et non renouvelable), des émissions de gaz à effet de serre (GES-E) et des unités de charge écologique (ou écopoints; UCE = UBP). Dans cette méthode de calcul, la fabrication du produit, les transports et la déconstruction ou l'élimination sont pris en compte. La phase d'utilisation des matériaux de construction, c'est-à-dire la période allant de l'installation au remplacement ou à la déconstruction, n'est en revanche pas considérée. Les valeurs mises à disposition pour les matériaux de construction en bois ne peuvent être utilisées que de manière limitée pour l'utilisation d'une ACV des ouvrages de protection. En effet, ces valeurs pour le bois concernent par exemple le bois de construction scié et séché, et intègrent ainsi des processus qu'il n'y a pas lieu de considérer pour la construction d'ouvrages de protection en bois rond.

Ce chapitre présente un exemple en Autriche. Il compare les impacts environnementaux à l'aide de deux catégories d'impact, les émissions de gaz à effet de serre (GES) [t CO<sub>2</sub>-éq.] et l'énergie primaire (EP) [GJ], qui résultent de la construction de barrages en bois ou en béton dans un bassin versant de torrent. L'accent est mis sur les impacts environnementaux écologiques, les impacts économiques et sociaux ne sont pas pris en compte dans cette étude. [65]

## 8.2 Normes et données de base

Les normes SN EN ISO 14040 [64] et SN EN ISO 14044 [66] sont disponibles comme guide pour la réalisation des écobilans. Ces normes définissent les principes, les conditions ainsi que les exigences d'un écobilan. Un écobilan se réfère aux aspects environnementaux et aux impacts environnementaux potentiels au cours du cycle de vie d'un produit, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à l'élimination finale, en passant par la production, l'utilisation, le traitement des déchets et le recyclage. [64]

Différents logiciels et bases de données sont disponibles pour établir un écobilan. Dans cette étude de cas, le logiciel OpenLCA (version 1.4.2) et la base de données suisse Ecoinvent (version 2.2, publiée en 2007) [67] ont été utilisés. Les jeux de données provenant de Suisse ont été spécialement adaptés pour les matériaux produits en Autriche. La consommation de carburant ainsi que les émissions des engins de chantier ont été déterminées, faute de données autrichiennes, à l'aide de la banque de données suisse Non-Road [68] pour l'année 2015.

## 8.3 Bilan écologique des ouvrages d'aménagement de torrent – étude de cas

L'étude de cas choisie est un ouvrage de régulation d'un torrent situé dans la province de Carinthie, en Autriche.

L'exemple examine quatre barrages en béton coulé sur place (voir figure 61), qui servent à stabiliser les versants du torrent et un glissement de terrain. Les ouvrages transversaux considérés présentent une hauteur de chute de 2,5 à 4,5 mètres. Les avant-champs sont constitués d'enrochements grossiers pour la réalisation desquels des blocs erratiques ont été enrobés de béton coulé sur place. Cet exemple est calculé en cinq variantes. La variante B1 correspond à la réalisation effective en béton. La variante B2 se base, à titre de comparaison, sur des distances de transport supérieures aux distances effectives. La base de l'évaluation des variantes en béton est le rapport de construction de l'ouvrage effectif.

La variante H1 correspond à des ouvrages fictifs réalisés en bois sur la base des dimensions des ouvrages en béton. La variante H2 se base sur des distances de transport plus importantes et la variante H3 se base sur des distances de transport réalistes en cas d'utilisation de bois régional. Le calcul des variantes en bois se base sur le rapport de construction d'un ouvrage similaire réalisé à proximité (voir figure 62) pour lequel on a utilisé du bois de robinier provenant de Roumanie. Les avant-champs des barrages sont réalisés sous forme d'enrochements grossiers, pour lesquels des blocs ont été déposés sur un lit de béton de centrale.

Figure 61 (gauche)  
Barrages en béton  
construits dans le Mauer-  
bodenbach datant  
de 2006/2007 [65].



Figure 62 (droite)  
Barrages en bois dans  
le Jagdhüttengraben  
datant de 2003 [65].



Le tableau 4 ci-dessous présente un extrait des principaux matériaux de construction et appareils utilisés dans l'étude de cas. Dans la norme SN EN ISO 14040 [64], une telle compilation est appelée «inventaire».

Tableau 4  
Extrait de l'inventaire [65].

Matériau/Maschine	Unité	Variante béton (B1, B2)	Variante bois (H1, H2, H3)
Béton dur	t	1,38	–
Ciment CEM II/32,5 N (portland)	t	262,38	–
Gravier à béton 0/22	t	1.512,62	–
Balast	t	–	1.254,60
Gravier	t	62,40	62,40
Acier d'armature	t	8,64	–
Bois rond diamètre moyen > 24 cm	m <sup>3</sup>	5,87	178,87
Clou en acier d'armature	kg	24,80	1.114,8
Camion + grue	h	100,50	155,50
Pelle sur chenilles	h	312,50	293,00
Pelle-araignée	h	4,50	441,50
Dumper sur chenilles	h	216,00	–
Véhicule léger	h	26,00	26,00

Le tableau 5 présente un extrait des transports de tous les matériaux avec les distances pour les deux variantes de construction en béton avec une fabrication du béton sur place (B1, B2) et les trois variantes de construction en bois (H1, H2, H3). Pour la construction en béton, la distance moyenne de transport par camion est de 66 km (variante B1) et de 135 km (variante B2). Pour la construction en bois, la distance moyenne de transport par camion est de 54 km (variante H1), 114 km (variante H2) et 45 km (variante H3).

Tableau 5 Distances de transport de l'étude de cas – Extrait [65].

Objet du transport	Moyen de transport	Variantes béton		Variantes bois		
		B1 distance de transport effective [km]	B2 distance de transport majorée [km]	H1 distance de transport effective [km]	H2 distance de transport majorée [km]	H3 distance de transport lors d'utilisation de bois régional [km]
Ciment	Camion	138	200	–	–	–
Gravier	Camion	32	100	32	100	32
Balast	Camion	–	–	18	100	18
Acier d'armature	Camion	130	300	130	300	130
Bois rond mélèze	Camion	28	100	–	–	28
Bois rond robinier	Camion	–	–	69	100	–
Bois rond robinier	Train	–	–	500	1500	–
Autre petit matériel	Benne	69	100	69	100	69
Pelle araignée	Camion	38	100	38	100	38
Dumper	Camion	69	100	–	–	–
Mélangeur 500lt	Camion	69	100	–	–	–
Alimentation en ciment	Camion	69	100	–	–	–
Bétonnière	Camion	69	100	–	–	–
Container	Camion	69	100	69	100	69

Par ailleurs, la durée d'utilisation attendue et les mesures de conservation ou d'entretien à adopter ont été extraites des directives en la matière du service autrichien de contrôle des torrents et des avalanches. [69] Pour les ouvrages en béton armé, la directive suppose une durée d'utilisation de 80 ans et un taux d'entretien annuel de 0,2 % des coûts de construction. Dans l'écobilan, le taux de maintenance a été considéré comme un pourcentage annuel de l'énergie ou des émissions liées à la fabrication de l'ouvrage. Selon cette directive, les constructions en bois sont supposées avoir une durée d'utilisation de 40 ans et un taux de mainte-

nance de 0,5 %. Les enrochements grossiers, qui sont nécessaires pour protéger les ouvrages transversaux en amont, sont indiqués avec une durée d'utilisation de 40 ans et un taux d'entretien annuel de 1 % des coûts de construction. Si la protection assurée par les ouvrages est toujours nécessaire après l'expiration de leur durée d'utilisation, ils sont reconstruits (généralement simplement doublés afin d'économiser les coûts de démantèlement). En Autriche, lorsque la fonction de protection des ouvrages n'est plus nécessaire, les ouvrages sont généralement simplement laissés sur place en dépôt.

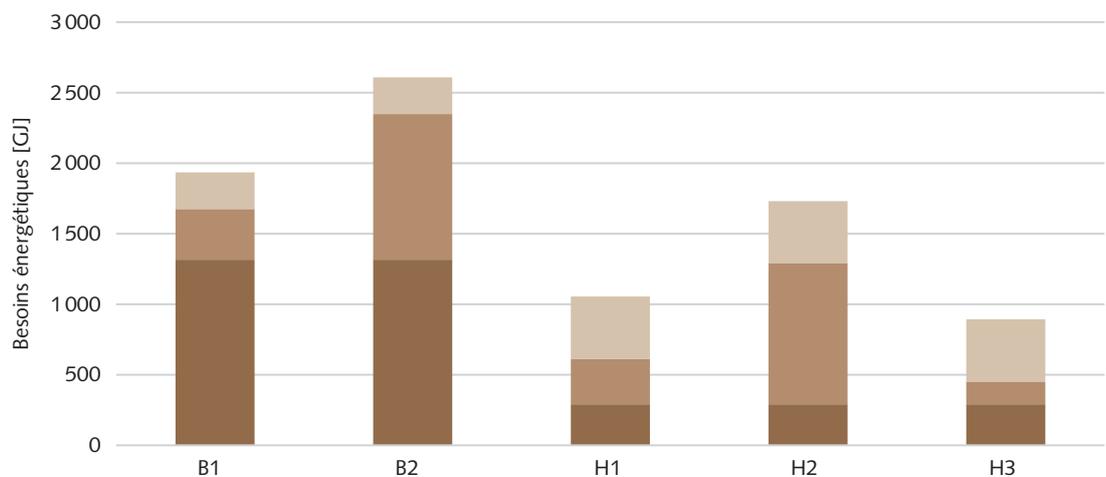
## 8.4 Résultats

Les résultats de la phase de construction pour les variantes B1 et H1 montrent, en ce qui concerne les besoins énergétiques, que pour la variante béton, c'est surtout la fabrication du béton sur le chantier qui est prépondérante (voir figure 63), alors que pour la variante bois, les transports et l'utilisation de machines jouent un rôle important. L'énergie primaire totale de l'ouvrage transversal en béton

est de 1.935 GJ et celle de l'ouvrage transversal en bois de 990 GJ. Le besoin énergétique total pour la construction des ouvrages en béton est ainsi environ deux fois plus élevé que celui des ouvrages en bois. L'utilisation de bois régional (H3) permet en outre d'améliorer la consommation d'énergie de 11 % par rapport à la variante initiale H1.

Figure 63  
Besoins énergétiques de la phase de construction pour les variantes exécutées en béton B1 et en bois H1 (distances de transport effectives), ainsi que les variantes avec des distances de transport supérieures (B2 et H2) et la variante H3 avec des distances de transport réduites en raison de l'utilisation de bois régional [65].

- Utilisations des machines
- Transport sur le chantier
- Production des matériaux

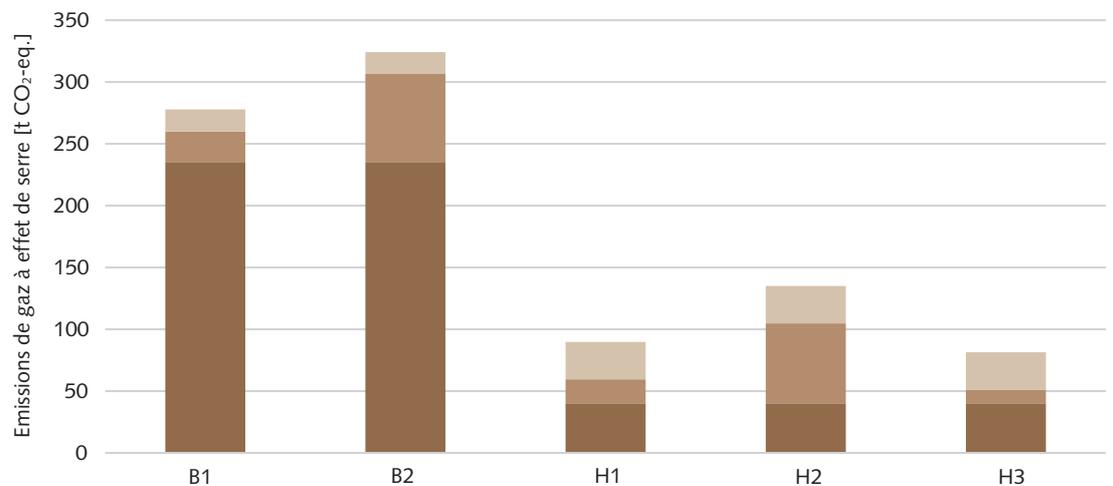


En ce qui concerne les gaz à effet de serre, les résultats de la phase de construction des variantes B1 et H1 (cf. figure 64) montrent que, dans le cas des barrages en béton, c'est la fabrication du béton coulé sur place qui est prépondérante. Pour la variante en bois, les transports et l'utilisation de machines sur le chantier jouent un rôle important. Les émissions totales de GES des ouvrages en béton s'élèvent à 278 t CO<sub>2</sub>-éq. et celles des ouvrages en bois à 87 t CO<sub>2</sub>-éq. Contrairement à l'énergie primaire, les émissions de GES des ouvrages en béton sont donc environ trois fois plus élevées que

celles des ouvrages en bois. Toutefois, en ce qui concerne l'utilisation des machines sur le chantier, les émissions de la construction en bois sont supérieures de 12 t eq. CO<sub>2</sub> à celles de la construction en béton. L'influence des distances de transport sur l'impact en CO<sub>2</sub> peut être lue à travers les variantes B2 (17 % d'émissions de GES plus élevées par rapport à B1) et H2 (56 % d'émissions de GES plus élevées par rapport à H1). Ce résultat montre que le niveau des émissions de gaz à effet de serre dépend en grande partie des distances de transport des matériaux de construction jusque sur le chantier.

Figure 64  
Émissions de gaz à effet de serre de la phase de construction pour les variantes exécutées en béton B1 et en bois H1 (distances de transport effectives), ainsi que les variantes avec des distances de transport supérieures (B2 et H2) et la variante H3 avec des distances de transport réduites en raison de l'utilisation de bois régional [65].

- Utilisation des machines
- Transport sur le chantier
- Production des matériaux

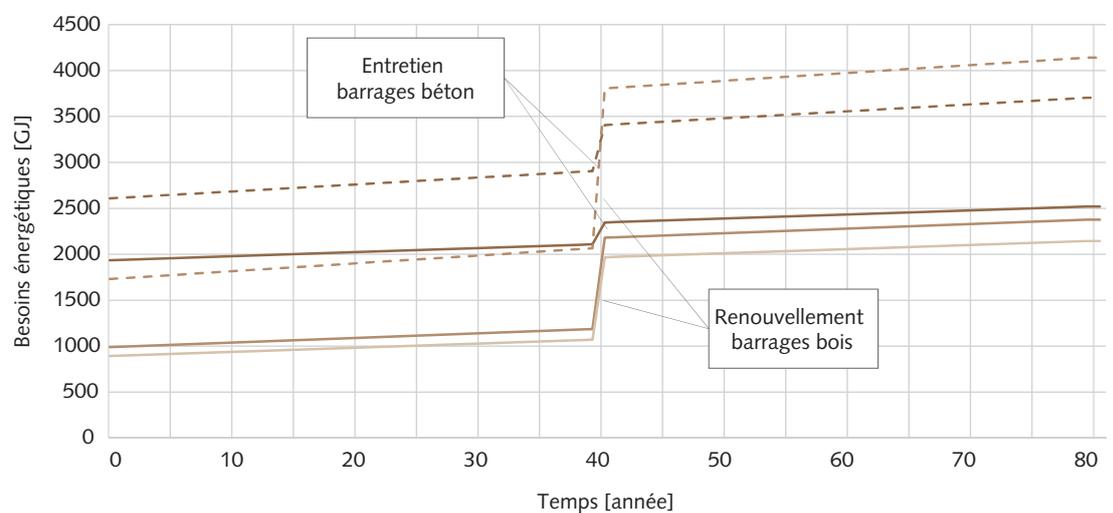


La construction de la variante H1 permet d'économiser une énergie de 945 GJ par rapport à la variante B1. En tenant compte de l'ensemble de la durée d'utilisation (période considérée de 80 ans, avec entretien (béton) ou nouvelle construction (bois) après 40 ans, et abandon après 80 ans), au cours duquel les structures en bois devraient être renouvelées une fois, les deux variantes présentent

des besoins énergétiques similaires bien que favorables aux solutions H1 et H3 (voir figure 65). La variante H2, est la seule variante en bois qui présente un bilan supérieur de 436 GJ après 80 ans à celui de l'ouvrage en béton B2 en raison des distances de transport supérieures. Encore une fois, l'importance du choix d'un matériau de proximité est mise en exergue.

Figure 65  
Besoins énergétiques sur 80 ans des variantes B1 béton et H1 bois (distances de transport effectives) ainsi que des variantes B2 et H2 (distances de transport supérieures) et de la variante H3 avec des distances de transport réduites en raison de l'utilisation du bois régional [65].

- Variante B1
- Variante H1
- Variante B2
- Variante H2
- Variante H3

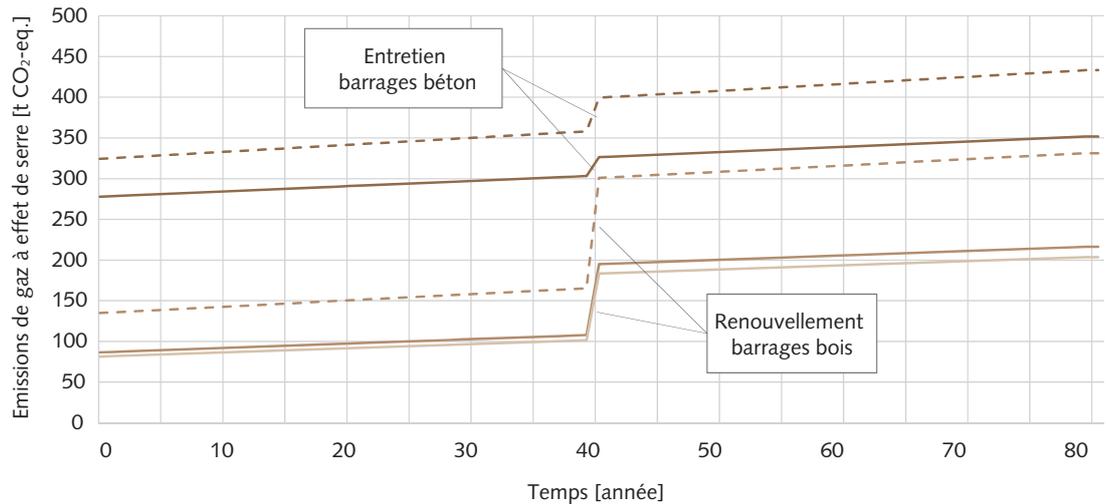


En comparant les variantes B1 et H1, on obtient, après la construction des ouvrages, un écart de bilan des gaz à effet de serre de 192 t CO<sub>2</sub>-éq. en faveur de la réalisation en bois. A la fin de la période considérée de 80 ans, la différence est encore de 135 t CO<sub>2</sub>-éq. (cf. figure 66). Une comparaison des variantes B2 et H2 montre qu'après 80 ans, la diffé-

rence de 189 t CO<sub>2</sub>-éq. favorable à la structure bois passe à 102 t CO<sub>2</sub>-éq. L'avantage en termes d'émissions des constructions en bois par rapport aux constructions en béton est encore manifeste malgré les hypothèses retenues sur l'ensemble de la durée d'utilisation (ouvrage bois renouvelé et béton non déconstruit).

Figure 66  
Emissions de gaz à effet de serre sur 80 ans des variantes béton B1 et bois H1 (distances de transport effectives) ainsi que des variantes B2 et H2 (distances de transport supérieures) et de la variante H3 avec des distances de transport réduites en raison de l'utilisation de bois régional [65].

- Variante B1
- Variante H1
- - Variante B2
- - Variante H2
- Variante H3



## 8.5 Conclusions

L'étude de cas montre que les ouvrages en bois sont la plupart du temps plus «écologiques» que ceux en béton. Les différentes variantes illustrent clairement que dans la phase de construction, les ouvrages en bois présentent un meilleur bilan énergétique que leur homologues en béton. Si l'on tient compte de l'ensemble de la durée d'utilisation, les ouvrages en béton ne présentent un bilan en énergie primaire favorable que lorsque l'on prend en compte les distances de transport les plus longues pour les ouvrages en bois. Il convient de rappeler ici la durée d'utilisation supposée de 40 ans pour les structures en bois (même si, comme le montre cette documentation, une durée d'utilisation nettement supérieure est possible dans des conditions favorables) et le fait que les ouvrages en béton ne sont pas démantelés dans cette comparaison. En ce qui concerne le potentiel d'effet de serre, les barrages en bois présentent un avantage même en cas de distances de transport plus élevées, y compris en considérant l'ensemble du cycle de vie.

C'est pourquoi il est recommandé, lors de la création d'ouvrages de protection en bois rond, d'accorder une attention particulière à la régionalité du matériau et aux distances de transport réduites

qui en découlent. Les essences durables, comme le châtaignier ou le mélèze, qui se prêtent à la construction d'ouvrages de protection, poussent également dans les forêts suisses. L'analyse du cycle de vie permet de déterminer quantitativement les «différences écologiques». En se basant sur ces résultats, il est possible d'optimiser les processus de chantier, les méthodes de travail, l'utilisation des matériaux et des machines, indépendamment du matériau de construction.

Lors de la réalisation d'ouvrages de protection en interaction avec les techniques de génie biologique, l'écobilan peut présenter des résultats encore meilleurs. D'une part, parce que l'utilisation de matériel végétal régional ou adapté au site est de toute façon avantageuse et, d'autre part, parce que la végétation (en tant que matériau de construction vivant) séquestre également du CO<sub>2</sub> pendant la phase d'utilisation et a donc une influence positive sur le bilan global. [70] [71]

Un argument supplémentaire en faveur de l'utilisation du bois ou de matériaux végétaux vivants est l'aspect esthétique. Une construction en matériaux naturels et adaptés au site s'intègre mieux dans le paysage et peut même ne plus être perçue comme

telle après quelques années. En revanche, les constructions en béton seront toujours reconnaissables comme des corps étrangers ou des objets créés par l'homme dans la nature. Une analyse du cycle de vie peut être utilisée comme instrument de pilotage pour les décisions

de planification et d'exécution lors de la construction d'ouvrages de protection et peut ainsi être mise à profit pour minimiser les impacts environnementaux. Elle est parfaitement appropriée pour contribuer activement à la concrétisation de stratégies d'adaptation au changement climatique.

Figure 67  
Ouvrages dans la commune de Plaffeien. Certains barrages ont été construits entre 1940 et 1945 et sont donc toujours en place depuis plus de 75 ans.



## 9 Résumé

Les indications du présent chapitre reprennent des arguments qui sont déjà en partie développés dans les précédentes sections. Elles ont un caractère général et ne sont pas applicables en soi à

chaque situation. Les avantages et les limites de l'utilisation du bois nécessitent, selon les circonstances, une analyse plus approfondie.

### 9.1 Avantages de l'utilisation du bois pour les ouvrages de protection

D'un point de vue écologique, le bois et les rondins en particulier sont des produits naturels qui sont directement liés à une gestion durable des forêts. La croissance de l'arbre produit de l'oxygène grâce à la photosynthèse et fixe le CO<sub>2</sub> dans le bois; plus tard, le bois est à nouveau décomposé dans un cycle naturel. Le bois rond en tant que matériau de construction est donc positif en ce qui concerne les gaz à effet de serre ayant une incidence sur le climat, grâce à la séquestration de CO<sub>2</sub> dans le bois utilisé, et largement neutre à long terme (en cas d'utilisation de ressources locales).

Lors d'une utilisation locale, la préparation, le stockage, le transport et la construction d'un ouvrage en bois nécessitent nettement moins d'énergie et conduisent à des émissions plus faibles que les autres matériaux de construction.

Les risques environnementaux liés à la présence de substances étrangères et toxiques sont exclus pour le bois non traité par rapport aux autres matériaux de construction. En outre, il est possible de renoncer en grande partie à l'introduction de matériaux de construction supplémentaires, à l'exception des moyens de fixation en métal (vis, clous, plaques, etc.). Ces points sont importants et devraient toujours être pris en compte dans l'optique du démantèlement et de la lutte contre la dissémination de substances toxiques et de déchets dans la nature. Les aspects écologiques favorables ainsi que les aspects esthétiques, comme l'intégration dans le paysage, peuvent réduire les éventuelles réticences de la population et des milieux environnementaux lors des procédures d'autorisation.

D'un point de vue économique, le bois en grumes non transformé est peu coûteux, en particulier lorsqu'il est utilisé à proximité du lieu d'abattage. Utilisé localement et de manière appropriée, il permet de trouver des solutions économiques. La plupart du temps, il n'est pas nécessaire de procéder ultérieurement à une déconstruction et aux dépenses qui y sont liées.

La logistique pour le chantier est généralement plus simple et sur les terrains impraticables, il peut s'agir du matériau de construction optimal.

Les ouvrages de protection contre les dangers naturels appartiennent en grande partie aux prérogatives des pouvoirs publics. Les communes ou éventuellement les coopératives sont donc directement concernées en tant qu'organismes responsables de projets. Ces organismes disposent souvent de propriétés forestières et peuvent, le cas échéant, fournir eux-mêmes le bois sous forme de prestations propres.

D'un point de vue social, la valeur ajoutée des projets impliquant l'utilisation de bois se situe davantage au niveau local et régional. L'intervention d'équipes de construction ou de groupes forestiers de proximité, voire du personnel des organismes responsables eux-mêmes, peut préserver et promouvoir le savoir-faire local, sans oublier la sensibilisation de la population à l'existence des dangers naturels et des ouvrages de protection. La prévention des risques, par exemple au niveau de l'aménagement du territoire, peut ainsi être facilitée.

Figure 68  
Arbres abattus en travers  
comme mesure simple  
de protection contre  
les chutes de pierres.



D'un point de vue technique, le bois est idéalement utilisé chaque fois que la fonction des ouvrages peut être reprise par la végétation naissante après leur décomposition. C'est typiquement le cas pour les ouvrages paravalanches en dessous de la limite de la forêt ou pour les ouvrages de protection contre les glissements de terrain et l'érosion. Le bois enterré peut augmenter l'humidité et la qualité du sol et ainsi favoriser la végétalisation et le développement des racines. Il est également possible que, pour d'autres raisons, une durée de vie limitée soit acceptée ou même recherchée dans des cas particuliers.

Le poids spécifique plus faible du bois (en comparaison 2 à 4 fois inférieur à celui des matériaux terreux ou du béton et des blocs) facilite son transport et rend son utilisation particulièrement adaptée aux terrains de mauvaise qualité et sensibles au glissement. Les ouvrages en bois ont tendance à être flexibles et élastiques; les déformations lentes des pentes et les tassements n'entraînent pas immédiatement la défaillance de l'ouvrage.

Le bois est aisé à façonner, les dimensions des différents éléments de construction peuvent être adaptées en permanence à la situation au fur et à mesure de l'avancement des travaux.

Lors de la conception, les exigences en matière de dimensionnement et de calcul sont généralement simplifiées. Dans de nombreux cas, il est possible de miser dès le départ sur un surdimensionnement, car s'il n'est pas nécessaire d'économiser sur le matériau de construction, il faut tenir compte du vieillissement du bois et de l'évolution de ses pro-

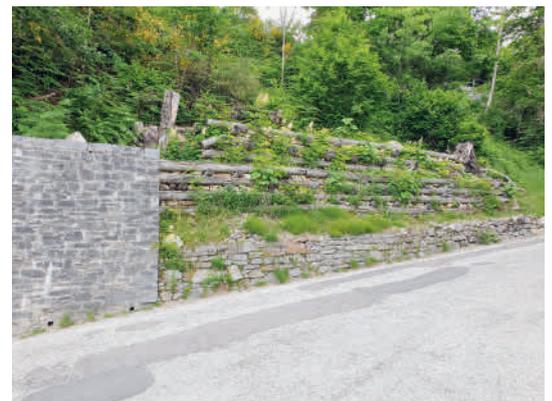
priétés. Il est en outre possible de se baser sur des valeurs empiriques.

Du point de vue de l'entretien, il faut retenir que les avantages déjà mentionnés ci-dessus sont également valables tout au long de la durée d'utilisation. Par rapport à des matériaux de construction tels que l'acier ou le béton, il convient toutefois de prévoir et d'accepter des frais de contrôle et d'entretien légèrement plus élevés.

C'est surtout lors de la construction de barrages de torrents que des opérations d'entretien importantes peuvent se révéler nécessaires. Le remplacement de certains éléments peut alors s'avérer difficile ou coûteux. Il est donc préférable de concentrer les travaux d'entretien sur les points problématiques qui apparaissent ponctuellement et qui peuvent être facilement remis en état. A la fin de leur durée d'utilisation, il faut alors prévoir le cas échéant le remplacement des ouvrages.

Dans le cas des ouvrages de protection contre les glissements et l'érosion combinés au génie biologique, l'entretien peut être largement supprimé. De plus, l'entretien ultérieur de la forêt et de la végétation est plus simple. Pour la sécurisation des lits par des canaux d'évacuation des eaux (et aussi pour les fascines), l'entretien est en principe minime grâce à l'état humide du bois. Pour les paravalanches et les ouvrages contre le glissement de la neige, l'entretien se limite au contrôle et à l'éventuel remplacement de certains éléments ou ouvrages après des hivers très enneigés. Dans la plupart des cas, il n'est pas nécessaire de procéder à un démantèlement à la fin de la durée d'utilisation.

Figure 69 (gauche) et Figure 70 (droite)  
Caissons en bois de stabilisation des versants parfaitement intégrés grâce à leur végétalisation.



## 9.2 Limite de l'utilisation du bois pour les ouvrages de protection

C'est précisément parce qu'il s'agit d'un matériau de construction naturel susceptible de se décomposer que la durée de vie des ouvrages de protection en bois en plein air est limitée par la diminution de la résistance et de la capacité portante au fil du temps. Comme mentionné dans la présente publication, la durée de vie et d'utilisation des ouvrages de protection en bois est cependant variable en fonction de leur exposition. Selon les circonstances, leur fonctionnalité peut être compromise au bout de dix ans, mais elle peut aussi atteindre 100 ans. La planification et l'exécution correctes de tels ouvrages jouent donc un rôle central sur ce point. En raison de son hétérogénéité et de sa durée de vie limitée, le bois est parfois un matériau difficile à utiliser dans la gestion des risques naturels. Souvent, le dimensionnement des ouvrages de protection en bois rond se fait de manière empirique. Comment peut-on apporter les preuves requises de la sécurité structurale et de l'aptitude au service? Comment gérer les incertitudes liées à l'utilisation du bois? Des travaux de recherche, des publications et des projets intéressants visant à améliorer l'acceptation de l'utilisation du bois dans les ouvrages de protec-

tion ont permis d'améliorer sensiblement cette situation au cours des 20 dernières années (voir également le chapitre 3 de la présente publication). La gestion de telles incertitudes n'est pas toujours facile, même pour les matériaux de construction tels que le béton armé ou la maçonnerie. Pour ne citer que quelques exemples: la catastrophe de Gondo (VS) en 2000 après la défaillance d'un mur de soutènement, des barrages en béton submergés ou détruits dans des torrents, le démantèlement d'anciennes canalisations de cours d'eau et de protections de berges après le changement de paradigme dans la construction hydraulique, le remplacement nécessaire de paravalanches permanents en raison de problèmes de fondations (pergélisol) démontrent clairement que nous ne construisons pas pour l'éternité. De plus, des changements dans les processus ou dans les approches de prévention (p.ex. réduction accrue des risques du côté des dommages potentiels, adaptation des objectifs de protection) peuvent modifier de manière déterminante la durée de vie et d'utilisation nécessaire des ouvrages de protection contre les dangers naturels.

Figure 71 (gauche)  
Une couverture complète peut considérablement augmenter la durée d'utilisation, même des essences moins durables comme l'épicéa.



Figure 72 (droite)  
Les essences durables comme le châtaignier augmentent également la durée d'utilisation des ouvrages.



### 9.3 Considérations générales sur l'utilisation du bois

Des informations détaillées sur les critères de choix sont disponibles dans les différents chapitres de cette publication, en particulier dans les sections «Limites de l'utilisation des ouvrages en bois». Lors de la planification d'un projet concret, ce choix devrait se faire sur la base d'un examen objectif. Les aspects suivants peuvent aider à faire ce choix.

- Un ou plusieurs avantages (principalement de nature écologique et économique) offerts par l'utilisation du bois sont-ils pertinents dans le cas présent?
- La construction en bois s'intègre-t-elle dans son environnement?

- Peut-on accepter une durée d'utilisation limitée et un éventuel remplacement ultérieur?
- L'ouvrage peut-il présenter une capacité de charge réduite au fil du temps?
- La végétation peut-elle jouer un rôle stabilisateur à moyen et à long terme?
- Les risques en cas de défaillance de l'ouvrage sont-ils limités ou acceptables?

Si les réponses à ces questions sont largement positives, l'utilisation du bois est étayée et se révèle pleinement justifiée.

Figure 73 (gauche)

Caissons en bois pour la protection contre l'érosion des berges avec de la laine de bois et des boutures de saule comme bourrage.



Figure 74 (droite)

Des trépieds et un mur de protection contre les chutes de pierres en bois sécurisent une infrastructure.



## 10 Partenaires



**Caprez Ingenieure AG**  
Via vers Mulins 19  
7513 Silvaplana  
Tél. +41 81 838 77 00  
www.caprez-ing.ch  
silvaplana@caprez-ing.ch

La société Caprez Ingenieure AG, fondée en 1963, est aujourd'hui représentée par 16 sites entre Zurich et St-Moritz. Les filiales agissent de manière autonome et sont ancrées dans le tissu local. Parallèlement, l'entreprise profite du transfert permanent de connaissances entre elles. C'est notamment le cas dans ses domaines de compétence forêts, environnement et dangers naturels.



**Castagnostyle Sagl**  
Al Dosso  
6807 Taverner  
Tél. +41 79 132 31 30  
verkauf@castagnostyle.ch  
www.castagnostyle.ch

Castagnostyle, le rendez-vous des professionnels du bois de châtaignier - Nos compétences sont le commerce du bois, l'exploitation forestière, les constructions, les aires de jeux, la protection de la nature, etc. L'entreprise fait partie d'un groupe d'entreprises forestières et se trouve au milieu des meilleures zones de croissance du châtaignier de Suisse. Nous employons des professionnels du bois et formons des apprentis forestiers-bûcherons.



Kompetenz für  
Forst-, Landwirtschaft und Garten

**fim**  
Bruno Brunner  
Glütschbachstrasse 3  
3661 Uetendorf  
Tél. +41 33 345 04 75  
info@fim-uetendorf.ch  
www.fim-uetendorf.ch

En tant que fournisseur, l'entreprise fim est le premier point de contact pour l'industrie forestière. Elle dispose d'un vaste assortiment des marques Caravaggi, Maxwald, AMR et d'un vaste magasin Stihl, où il est possible de fouiller dans toute la gamme de ce fabricant.



**Forst Aletsch**  
Alt Chirchwäg 59  
3984 Fieschertal  
Tél. +41 27 971 30 07  
info@forstaletsch.ch  
www.forstaletsch.ch

Nous misons sur le bois de nos forêts: pour la protection contre les dangers naturels, nous l'utilisons pour construire des trépieds et sécuriser les versants. Nous soutenons les communes pour la remise en état et l'entretien des chemins de randonnée. Nous utilisons également du bois local pour les rigoles transversales, les ponts, les passerelles, les escaliers et les clôtures.

La majeure partie de notre bois est destinée aux scieries et à l'industrie du bois. Le reste est transformé en objets pratiques tels que des tables, des bancs, des bacs à fleurs et des fontaines, ainsi qu'en équipements de jeux individuels, voire en grandes aires de jeux et en parcs d'accrobranche.



**Lindner Suisse GmbH**  
Bleikenstrasse 98  
9630 Wattwil  
Tél. +41 71 987 61 51  
holzwohle@lindner.ch  
www.lindner.ch

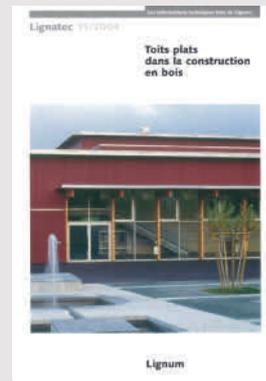
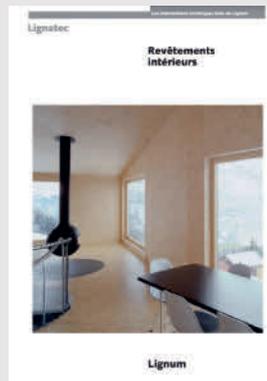
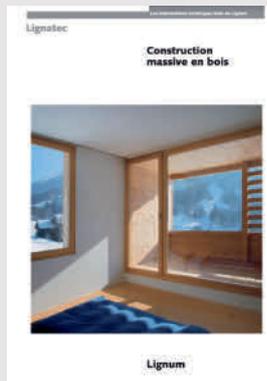
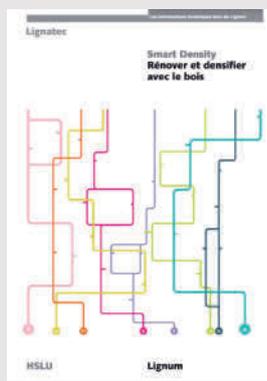
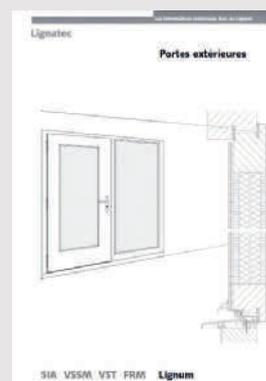
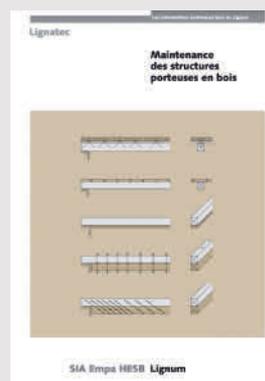
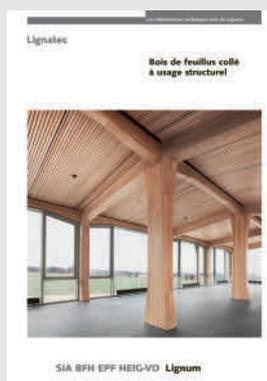
Depuis 1920, Lindner Suisse Sàrl développe et produit des articles spéciaux à partir de laine de bois selon la recette et les standards suisses sur la base de bois suisse certifié. Sa compétence s'étend de la construction d'infrastructures, l'horticulture et l'aménagement paysager à l'aménagement hydraulique, la protection contre l'érosion et le drainage. D'autres débouchés sont l'hygiène animale, les allume-feu ou les matériaux d'emballage. Dans ce domaine Lindner Suisse, qui fabrique des chips de remplissage de haute qualité, est l'interlocuteur pour un assortiment d'emballages adapté à vos besoins.

## 11 Littérature

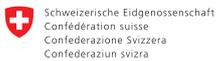
- [1] Andres, N., Badoux, A. (2019): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 2018. *Eau Energie Air*, 111. année, volume 1, p. 29–38
- [2] PLANAT (2004): Sécurité contre les dangers naturels – Concept et Stratégie. PLANAT 1/2004, p. 40
- [3] Margreth, S., Schweizer, J. (2018): Coaz – Pionier der schweizerischen Lawinenforschung. *Bündner Wald* 71: p. 72–79
- [4] Brändli, Urs-Beat; Abegg, Meinrad; Allgaier Leuch, Barbara (2020). Inventaire forestier national suisse. Résultats du quatrième inventaire 2009–2017. Birmensdorf, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL; Berne, Office fédéral de l'environnement
- [5] Losey, S., Wehrli, A. (2013): Forêt protectrice en Suisse – Du projet SilvaProtect-CH à la forêt protectrice harmonisée (PDF, 2 MB, 11.02.2013). Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne, p. 29
- [6] Thali, U. (2006): Schutzwirkung des Waldes anhand des Felssturz-Ereignisses «Wilerwald», Gurtellen, vom 31. Mai 2006. Altdorf: Kanton Uri, Bericht Schweiz Nationalstrassen N2, p. 21
- [7] Olmedo, I., Bourrier, F., Bertrand, D., Berger, F., Limam, A. (2018): Dynamic analysis of wooden rockfall protection structures subjected to impact loading using a discrete element model. *Eur. J. Environ. Civil Eng.* 24, p. 1430–1449
- [8] Ringenbach, A., Stihl, E., Bühler, Y., Bebi, P., Bartelt, P., Ringling, A., Christen, M., Lu, G., Stoffel, A., Kistler, M., Degonda, S., Simmler, K., Mader, D., Caviezel, A. (2021): Full scale experiments to examine the role of deadwood on rockfall dynamics in forests, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/nhess-2021-319>, in review, 2021
- [9] Ammann, M. (2006): Schutzwirkung abgestorbener Bäume gegen Naturgefahren. ETH Diss. Nr. 16638, p. 190
- [10] Dorren, L., Berger, F., Fehner, M., Huber, M., Kühne, K., Métral, R., Sandri, A., Schwitler, R., Thormann, J., Wasser, B. (2015): Das neue nais-Anforderungsprofil Steinschlag. *Journal Forestier Suisse* 166 (1), p. 16–23
- [11] Bigot, C. (2014): Cinématique de décomposition et rôle de protection pare-pierres du bois mort: le cas des rémanents. Diss. Université de Grenoble, p. 216
- [12] Hararuk, O., Kurz, W.A., Didon, M. (2020): Dynamics of dead wood decay in Swiss forests. *For. Ecosyst.* 7, p. 36
- [13] Begemann, W., Schliecht, H.M. (1986): Ingenieurbiologie. Handbuch zum naturnahen Wasser- und Erdbau. Bauverlag, p. 216
- [14] Moos, C., Bebi, P., Schwarz, M., Stoffel, M., Sudmeier-Rieux, K., Dorren, L. (2018): Ecosystem-based disaster risk reduction in mountains. *Earth-Science Reviews* 177, p. 497–513
- [15] Böll, A., Gerber W., Graf F., Rickli, C. (1999): Holzkonstruktionen im Wildbach-, Hang- und Rensenverbau. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft
- [16] Norme SN EN 335 (2013): Durabilité du bois et des matériaux à base de bois – Classes d'emploi: définitions, application au bois massif et aux matériaux à base de bois. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich
- [17] Lignum (2021): Tables pour la construction en bois 1 – Manuel pour le dimensionnement, Zurich
- [18] Butin, H. (1983): Krankheiten der Wald- und Parkbäume. Leitfaden zum Bestimmen von Baumkrankheiten. Georg Thieme Verlag, New York
- [19] Bosshard, H.H. (1984): Holzkunde. Band 3: Zur Biologie, Physik und Chemie des Holzes. 2. Aufl., Birkhäuser Verlag
- [20] Florineth, F. (2014): Langjährige Hangsicherung durch bepflanzte Holzkrainerwände in Südtirol. *Ingenieurbiologie* 3/14
- [21] Meierhofer, U.A., Zumoberhaus, M. (1992): Holzkonstruktionen im Wanderwegbau. Band 153, BUWAL
- [22] Nötzli, K. (2002): Ursachen und Dynamik von Fäulen an Holzkonstruktionen im Wildbachverbau. Dissertation der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich Nr. 14974
- [23] Norme SN EN 350 (2016): Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois – Méthodes d'essai et de classification de la durabilité vis-à-vis des agents biologiques du bois et des matériaux dérivés du bois. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich
- [24] Findlay, W.P.K. (1962): The preservation of timber. Adam & Charles Black, London
- [25] Lignum (2021): Lignatec 33, Bois de feuillus collé à usage structurel, Zurich
- [26] Nötzli, K., Böll, A., Graf, F., Sieber, T.N., Holdenrieder, O. (2008): Influence of decay fungi, construction characteristics, and environmental conditions on the quality of wooden check-dams. *Forest Products Journal*, 58 (4), p. 72–79
- [27] Rickli, C., Graf, F. (2014): Wildbachsperren aus Fichte und Tanne: Festigkeit und Pilzbefall in den ersten Jahren. *Journal Forestier Suisse*, 165 (4), p. 79–86
- [28] Norme SIA 267 (2013): Géotechnique. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich
- [29] Norme SIA 260 (2013): Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich
- [30] Norme SIA 261 (2020): Actions sur les structures porteuses. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich
- [31] Norme SIA 261/1 (2020): Actions sur les structures porteuses – Spécifications complémentaires. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich
- [32] Böll, A. (1997): Wildbach- und Hangverbau. Rapport de l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage, N° 343
- [33] Technische Regel ONR 24801 (2013): Schutzbauwerke der Wildbachverbauung – Statische und dynamische Einwirkungen; Austrian Standards International – Standardisierung und Innovation, Vienne
- [34] Margreth, S. (2007): Construction d'ouvrages paravalanches dans la zone de décrochement. Aide à l'exécution: directive technique. L'environnement pratique no 0704. Office fédéral de l'environnement Berne, WSL Institut Fédéral pour l'étude de la Neige et des Avalanches ENA, Davos
- [35] Technische Regel ONR 24805 (2010): Permanenter technischer Lawinenschutz – Benennungen und Definitionen sowie statische und dynamische Einwirkungen. Austrian Standards International, Vienne
- [36] Technische Regel ONR 24806 (2011): Permanenter technischer Lawinenschutz – Bemessung und konstruktive Ausgestaltung. Austrian Standards International, Vienne
- [37] Leuenberger, Franz (2003): Bauanleitung Gleitschneeschutz und temporärer Stützverbau. Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF, Davos
- [38] Norme SIA 265 (2021): Construction en bois. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich
- [39] Norme SIA 265/1 (2018): Construction en bois – Spécifications complémentaires. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich
- [40] Technische Regel ONR 24802 (2011): Schutzbauwerke der Wildbachverbauung – Projektierung, Bemessung und konstruktive Durchbildung. Austrian Standards International, Vienne
- [41] Norme SIA 263 (2003): Construction en acier. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich

- [42] Fernández-Raga, M., Palencia, C., Keesstra, S., Jordán, A., Fraile, R., Angulo-Martínez, M., Cerdà, A. (2017): Splash erosion. A review with unanswered questions. *Earth-Science Reviews*, 171, p. 463–477
- [43] Ziegler, A. D., Sutherland, R. A., Giambelluca, T. W. (2000): Partitioning total erosion on unpaved roads into splash and hydraulic components: The roles of interstorm surface preparation and dynamic erodibility. *Water Resources Research*, 36 (9), 2787-27
- [44] Bernatek-Jakiel, A., Poesen, J. (2018): Subsurface erosion by soil piping: significance and research needs. *Earth-Science Reviews*, 185, Oct. 2018, p. 1107–1128
- [45] Schwarz, M., Poesen, J., Rey, F., Holbling, D., Phillips, C. (2020): Bio-physical performance of erosion and sediment control/mitigation techniques – an international comparison to common practices in New Zealand. LC3891
- [46] Lifa, I. (2014): Entwicklung und Anwendung von naturbessener Holzwolle für die Hangsicherung. *Génie biologique* 3/14
- [47] Zeller, J., Trümpler, J. (1984): Rutschungsentwässerung. Birmensdorf, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage
- [48] Cislighi, A., Cohen, D., Gasser, E., Bischetti, G. B., Schwarz, M. (2019): Field measurements of passive earth forces in steep, shallow, landslide-prone areas. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124, p. 838–866. <https://doi.org/10.1029/2017JF>
- [49] Gray, D. H., Sotir, R. B. (1996): *Biotechnical and soil bio-engineering slope stabilization: a practical guide for erosion control*. John Wiley & Sons
- [50] Schwarz, M., Giadrossich, F., Cohen, D. (2013): Modeling root reinforcement using a root-failure Weibull survival function. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, p. 4367–4377
- [51] Schwarz, M., Rist, A., Cohen, D., Giadrossich, F., Egorov, P., Büttner, D., Stolz, M., Thormann, J.-J. (2015): Root reinforcement of soils under compression. *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 120, p. 2103–2120, doi:10.1002/2015JF003632
- [52] Florin, F. (2004): *Pflanzen statt Beton. Handbuch zur Ingenieurbio-logie und Vegetationstechnik*. Berlin/Hannover, Patzer Verlag
- [53] Flepp, G., Robyr, R., Scotti, R., Giadrossich, F., Conedera, M., Vacchiano, G., Fischer, C., Ammann, P., May, D., Schwarz M. (2021): Temporal Dynamics of Root Reinforcement in European Spruce Forests. *Forests* 12 (6):815, <https://doi.org/10.3390/f12060815>
- [54] Bischetti, G. B., De Cesare, G., Mickovski, S. B., Rauch, H. P., Schwarz, M., Stangl, R. (2021): Design and temporal issues in Soil Bioengineering structures for the stabilisation of shallow soil movements. *Ecological Engineering*, 169, 106309
- [55] Tron, S., Perona, P., Gorla, L., Schwarz, M., Laio, F., Ridolfi, L. (2015): The signature of randomness in riparian plant root distributions. *Geophysical Research Letters*, 42 (17), S. 7098–7106
- [56] Technische Regel ONR 24800 (2009): *Schutzbauwerke der Wildbachverbauung – Begriffe und ihre Definition sowie Klassifizierung*. Austrian Standards International – Standardisierung und Innovation, Vienne
- [57] Bergmeister, K., Suda, J., Hübl, J., Rudolf-Miklau, F. (2009): *Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren. Grundlagen, Entwurf und Bemessung, Beispiele*. Ernst & Sohn, Berlin
- [58] Suda, J., Bergmeister, K. (2020): *Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren*. In: Bergmeister, K., Wörner, J.-D., Fingerloos, F. (Hrsg.), *Betonkalender 2020*, p. 501–724; Ernst & Sohn Verlag, Berlin
- [59] Angerholzer, F. (1913): Über die Länge des Vorfeldes bei Querwerken in Wildbächen. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen*, 39, p. 504–509
- [60] Rudolf-Miklau, F., Sauermoser, S. (2011): *Handbuch Technischer Lawinenschutz*. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin
- [61] Tabler, R. (2003): *Controlling Blowing and Drifting Snow with Snow Fences and Road Design. Final Report NCHRP Project 20-7 (147)*, Tabler & Associates, Laramie, Wyoming
- [62] von Carlowitz, H. C. (1713): *Sylvicultura Oeconomica*, Johann Friedrich Braun Verlag, Leipzig
- [63] WECD – World Commission on Environment and Development (1987): *Our common Future*. Oxford University Press
- [64] Norme SN EN ISO 14040/A1:2021 (2021): *Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre (ISO 14040:2006/Amd 1:2020). Amendement A1*. Association Suisse de Normalisation, Winterthour
- [65] Von der Thannen, M., Paratscha, R., Smutny, R., Strauss, A., Hufnagl, H., Lampalzer, T., Rauch, H. P. (2018): Zur Ökobilanz von Schutzbauwerken. Ein Fallbeispiel mit Varianten. In: *Wildbach- und Lawinenverbau. Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions-, und Steinschlagschutz*. 82. Jg. H. 182, p. 282–303. Bregenz, Verein der Diplomingenieure der Wildbach- und Lawinenverbauung Österreichs
- [66] Norme SN EN ISO 14044:2006 (2006): *Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices (ISO 14044:2006)*. Association Suisse de Normalisation, Winterthour
- [67] Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Doka, G., Dones, R., Heck, T., Hellweg, S., Hischier, R., Nemecek, T., Rebitzer, G., Spielmann, M. (2005): The ecoinvent database: overview and methodological framework. *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 10, p. 3–9
- [68] OFEV (2015): *Online Non-Road-Datenbank*, Office fédéral de l'environnement OFEV, <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/zustand/non-road-datenbank.html>, dernière consultation le 22.03.2018
- [69] BMLFUW (2006): *Richtlinien für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung und Priorisierung von Massnahmen der Wildbach- und Lawinenverbauung gemäss § 3 Abs. 2 Z 3 Wasserbautenförderungsgesetz 1985. Teil I: Kosten-Nutzen-Untersuchung (KNU) und standardisierte Nutzenuntersuchung*. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Sektion Forstwesen, Vienne
- [70] von der Thannen, M., Hoerbinger, S., Paratscha, R., Smutny, R., Lampalzer, T., Strauss, A., Rauch, H. P. (2017): Development of an environmental life cycle assessment model for soil bioengineering constructions. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2017.1369460>
- [71] von der Thannen, M., Hoerbinger, S., Muellebner, C., Biber, H., Rauch, H. P. (2021): Case study of a water bioengineering construction site in Austria. *Ecological aspects and application of an environmental life cycle assessment model*. *Int. J. Energy Environ., Eng.* 12, p. 599–609. <https://doi.org/10.1007/s40095-021-00419-8>

# Disponibles dans la série Lignatec



# Impressum



Office fédéral de l'environnement OFEV  
Plan d'action bois



## Lignatec

Les informations techniques bois de Lignum

## Editeur

Lignum, Economie suisse du bois, Zurich  
Sandra Bulet, Directrice

## Soutien principal

Office fédéral de l'environnement OFEV, Plan d'action Bois

## Soutien financier

Fondation de prévention des établissements cantonaux  
d'assurance

## Coordination

Gunther Ratsch, MSc Ing. BFH, Lignum, Zurich  
Hervé Bader, Dipl.-Ing. ETH, Fobatec  
Walter Krättli, Bsc Forstwirtschaft BFH, Fobatec

## Traduction

Lucie Mérigaux, Denis Pflug, Cedotec-Lignum,  
Le Mont-sur-Lausanne, Hervé Bader, Fobatec

## Illustrations

Image de couverture: Forst Aletsch (C. Pfammatter, Viège); 1, 7:  
WSL; 2: BABS; 3: L. Dorren; 5, 6, 25, 26, 72: Castagnostyle;  
8: Lindner Suisse; 9, 12 gauche, 20, 23, 27, 29, 30, 31, 32:  
M. Schwarz; 10: D. Polster; 12 droit, 13, 14, 15, 19: Amt für  
Wald und Naturgefahren des Kantons Graubünden; 28, 42, 74:  
Forst Aletsch (C. Pfammatter); 31 gauche: Archiv Forstbetrieb  
Madrisa; 33, 34, 35, 36, 37, 38 gauche, 39 D, 40, 41: J. Suda;  
39 A, B, C, 43: Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und  
Lawinenverbauung; 44, 45, 46, 47, 48, 50, 51, 52, 54, 55,  
56, 57, 59, 60: S. Margreth; 49: WEU-AWN-NGA Bern; 53:  
P. Diener; 24, 38 droite, 67, 69, 71: Fobatec

## Mise en page et réalisation

bido-graphic GmbH, Muttenz

## Administration/distribution

Lignum, Zurich

## Impression

Kalt Medien AG, Zoug

Lignatec traite des questions techniques relatives à l'utilisation du bois et des matériaux dérivés. Lignatec s'adresse aux planificateurs, ingénieurs, architectes ainsi qu'aux transformateurs et utilisateurs du bois. Lignatec est utilisé dans la formation à tous les niveaux. Un classeur est disponible auprès de Lignum.

Les membres de Lignum reçoivent Lignatec gratuitement.  
Exemplaires supplémentaires pour les membres CHF 15.–  
Exemplaires pour non membre CHF 35.–  
Classeur vide CHF 10.–  
Sous réserve de modification de prix

Le copyright de cette documentation est propriété de Lignum, Economie suisse du bois, Zurich. Toute reproduction de la publication ou de parties de celles-ci, la mise à disposition du contenu sur Internet et la reprise dans des banques de données n'est autorisée qu'avec l'accord exprès et écrit de l'éditeur.

## Exclusion de responsabilité

La présente publication a été produite avec le plus grand soin et selon les meilleures connaissances. Les éditeurs et les auteurs ne répondent pas de dommages pouvant résulter de l'utilisation et de l'application de cette publication.

## LIGNUM

Economie suisse du bois  
Chemin de Budron H6, 1052 Le Mont-sur-Lausanne  
Tél. 021 652 62 22, Fax 021 652 93 41  
info@lignum.ch  
www.lignum.ch

## Lignatec 34/2022

## Ouvrages de protection en bois

Parution juillet 2022

ISSN 1421-0312