
Annexe 1: Dangers naturels

- 1 Introduction
- 2 Avalanches
- 3 Glissements de terrain, érosion, laves torrentielles
- 4 Chutes de pierres
- 5 Processus liés aux cours d'eau

1

1 Introduction

L'érosion du flanc des montagnes (glissements de terrain, laves torrentielles, chutes de pierres) constitue un processus géologique naturel. Même la forêt la plus efficace ne peut fondamentalement l'empêcher d'exister. Mais le boisement peut influencer la rapidité et tempérer l'énergie de ces processus.

Ce manuel est fondé sur l'état actuel des connaissances et de l'expérience. Certaines questions importantes restent sans réponse, car les données scientifiques manquent encore. Et les connaissances acquises doivent être révisées en cas de nouvelles découvertes.

Les documents regroupés ici sont des aides utiles pour examiner et soigner les peuplements forestiers de façon ciblée, en rapport avec les différentes catégories de dangers naturels.

Ces textes **n'ont pas** pour objet:

- ▶ de délimiter des périmètres de forêts protectrices; mais d'aider à fixer les priorités à l'intérieur de telles forêts;
- ▶ d'estimer si c'est la forêt ou, par exemple, les pâturages qui produisent les meilleurs effets en cas de crues et de glissements de terrain; cette problématique est à traiter séparément. Il en va de même pour savoir s'il convient d'augmenter la surface forestière (exemple: reboisements d'altitude contre les avalanches, non-intervention contre l'avancée naturelle de la forêt au détriment d'alpages) afin de lutter ainsi contre les glissements ou le départ d'avalanches).
- ▶ de décider si l'effet protecteur de la forêt à un endroit donné est suffisant ou si des mesures de protection supplémentaires sont nécessaires; ces questions doivent se traiter au cas par cas à l'aide d'analyses complémentaires.

2 Avalanches

- 2.1 Profil d'exigences pour la forêt en rapport avec les avalanches
- 2.2 Formation des avalanches
- 2.3 Forêts de protection contre les avalanches
- 2.4 Effets exercés par la forêt

1

2.1 Profil d'exigences pour la forêt en rapport avec les avalanches

Lieu	Effet potentiel de la forêt	Exigences en fonction du danger naturel profil minimal	Exigences en fonction du danger naturel profil idéal
Zone de déclenchement Forêts résineuses des étages subalpin et haut-montagnard	Grand: - dans les forêts de mélèzes dès 30° (58 %) de déclivité - dans les forêts de résineux à aiguilles persistantes ¹ dès 35° (70 %) de déclivité	Structure horizontale: • Déclivité Longueur des trouées² dans la ligne de pente ≥ 30° (58 %) → < 60 m ≥ 35° (70 %) → < 50 m ≥ 40° (84 %) → < 40 m ≥ 45° (100 %) → < 30 m • Si la longueur de la trouée dépasse les indications ci-dessus, sa largeur doit être < 15 m • Degré de couverture > 50 % • Exigences minimales atteintes (en fonction du type de station)	Structure horizontale • Déclivité Longueur des trouées² dans la ligne de pente ≥ 30° (58 %) → < 50 m ≥ 35° (70 %) → < 40 m ≥ 40° (84 %) → < 30 m ≥ 45° (100 %) → < 25 m • Si la longueur de la trouée dépasse les indications ci-dessus, sa largeur doit être < 15 m • Degré de couverture > 50 % • Exigences minimales atteintes (en fonction du type de station)
	Moyen: dès 35° (70 %) de déclivité	Structure horizontale: • Déclivité Longueur des trouées² dans la ligne de pente ≥ 35° (70 %) → à 50 m ≥ 40° (84 %) → à 40 m ≥ 45° (100 %) → à 30 m • Si la longueur de la trouée dépasse les indications ci-dessus, sa largeur doit être < 5 m • Degré de couverture > 50 % • Exigences minimales atteintes (en fonction du type de station)	Structure horizontale • Déclivité Longueur des trouées² dans la ligne de pente ≥ 35° (70 %) → < 40 m ≥ 40° (84 %) → < 30 m ≥ 45° (100 %) → < 25 m • Si la longueur de la trouée dépasse les indications ci-dessus, sa largeur doit être < 5 m • Degré de couverture > 50 % • Exigences minimales atteintes (en fonction du type de station)
Zone de déclenchement Forêts feuillues et feuillues mélangées des étages montagnards supérieur et inférieur			

En favorisant la rugosité du terrain (p. ex. souches hautes, bois au sol) dans les trouées et en bordure des couloirs d'avalanches, on peut réduire le risque de déclenchement d'avalanches.

Concernant la longueur des trouées dans la ligne de pente, les exigences idéales peuvent être considérées comme identiques aux exigences minimales lorsque la rugosité est suffisante.

¹ Dans les forêts de résineux à feuillage persistant, la présence des couronnes et la rugosité générale du sol font que le déclenchement d'avalanches ne survient qu'à partir de 35° de déclivité. Mais dans les forêts pures de mélèzes, la rugosité du sol est diminuée par la forte présence d'herbes et il faut s'attendre à des déclenchements d'avalanches dès 30°.

²Trouée: ouverture mesurée entre les bords des houppiers (perchis et futaies)

2.2 Formation d'avalanches

Lorsque le terrain est en pente, le manteau neigeux est soumis à des mouvements de reptation, voire de glissement, qui sont fonction des caractéristiques de la zone de contact entre le sol et la neige. Ces mouvements, qui peuvent mener au glissement de toute la couche de neige, sont dépendants de:

- ▶ l'inclinaison du terrain
- ▶ l'épaisseur de la couche de neige
- ▶ la rugosité du sol
- ▶ la texture du manteau neigeux

Les changements locaux de ces facteurs entraînent la formation de zones où s'accroissent les forces de tension, de pression et de cisaillement.

Les **avalanches de plaques** prennent notamment naissance dans les conditions suivantes:

- ▶ déclivité de 30° ou davantage (58%)
- ▶ couches instables et/ou zones de glissement (ex.: couche de givre ou neige consolidée couverte de neige fraîche, surface du sol lisse)
- ▶ manteau neigeux formé de strates continues sans cohésion entre elles
- ▶ neige consolidée

L'action du vent favorise les accumulations locales de neige et la formation de neige consolidée.

Les **avalanches de neige meuble** se forment notamment dans les conditions suivantes:

- ▶ souvent sur des versants dont la déclivité est comprise entre 40° (85 %) et 60° (170 %). Les pentes plus fortes se déchargent de façon continue
- ▶ neige à faible cohésion

Avalanches en forêt

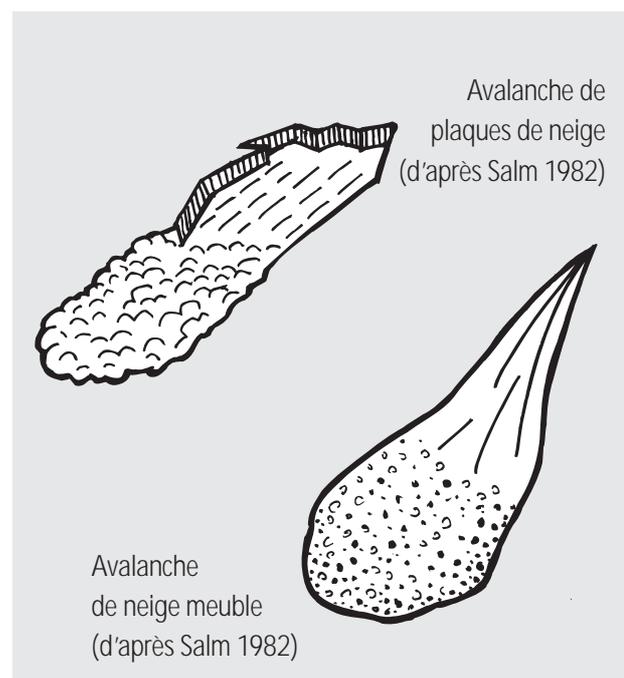
On parle d'avalanches en forêt lorsque la ligne de rupture est située en forêt. La dimension des trouées dans le peuplement est un des principaux facteurs déterminant le volume de neige en mouvement. Aux étages subalpin et haut-montagnard, les trouées à l'intérieur des peuplements font partie intégrante de la structure naturelle. Elles sont d'ailleurs nécessaires à la régénération. Il n'est donc pas possible d'exclure des mouvements du manteau neigeux dans ces zones. C'est

pourquoi seuls les événements susceptibles de provoquer des dégâts à partir du stade du perchis sont considérés comme avalanches en forêt. Les dégâts causés auxrajeunissements et aux fourrés sont dus au glissement, à la reptation et au tassement de la neige plus qu'à l'effet des avalanches.

Les caractéristiques suivantes de la météo et de la neige favorisent le déclenchement d'avalanches en forêt:

- ▶ moins de -4°C, plus de 120 cm de neige dont plus de 80 cm de neige en 2 jours, peu de vent pendant l'épisode neigeux, et un léger réchauffement le jour du déclenchement.
- ▶ moins de -4°C, plus de 60 cm de neige en 3 jours, peu de vent pendant l'épisode neigeux, fort réchauffement le jour du déclenchement
- ▶ plus de 120 cm de neige dont plus de 50 cm de neige fraîche en 3 jours, pluie.

Plus il fait froid et moins il y a de vent pendant qu'il neige et moins il faut de neige fraîche pour provoquer des avalanches en forêt.



Ill. 1: Types d'avalanches

2.3 Forêts de protection contre les avalanches

Les forêts de protection contre les avalanches sont des forêts situées sur des pentes de plus de 30° (58%), ainsi que dans des régions et à des altitudes où les conditions d'enneigement permettent les glissements de grandes plaques de neige ou la formation d'autres types d'avalanches.

À l'étage naturel des forêts résineuses et entre 1 600 et 2 200 m d'altitude, les zones de déclenchement sont fréquemment exposées du nord-est au nord-ouest. C'est à ces endroits que se détachent en général les plaques de neige sèche. La zone de rupture coïncide souvent avec une rupture de pente (variation de pente de 10° au moins).

Les avalanches observées à l'étage des forêts feuillues ou mélangées, donc au-dessous de 1 200 m d'altitude, se déclenchent surtout sur des versants ensoleillés. Il s'agit de glissements de neige ou d'avalanche de neige meuble et humide.

À la limite supérieure de la forêt, les peuplements sont souvent disloqués. Ils occupent des élévations du terrain et

ne peuvent croître dans les combes et les couloirs, en raison des mouvements de la neige et de la longue période d'enneigement.

Les parties supérieures de ces forêts jouent un rôle très important pour la stabilité de l'ensemble des massifs. La régénération n'y est en principe possible qu'à l'abri des vieux arbres. Lorsque ceux-ci font défaut, il est alors nécessaire de recourir à des mesures techniques (trépieds, bermes, pieux, etc.).

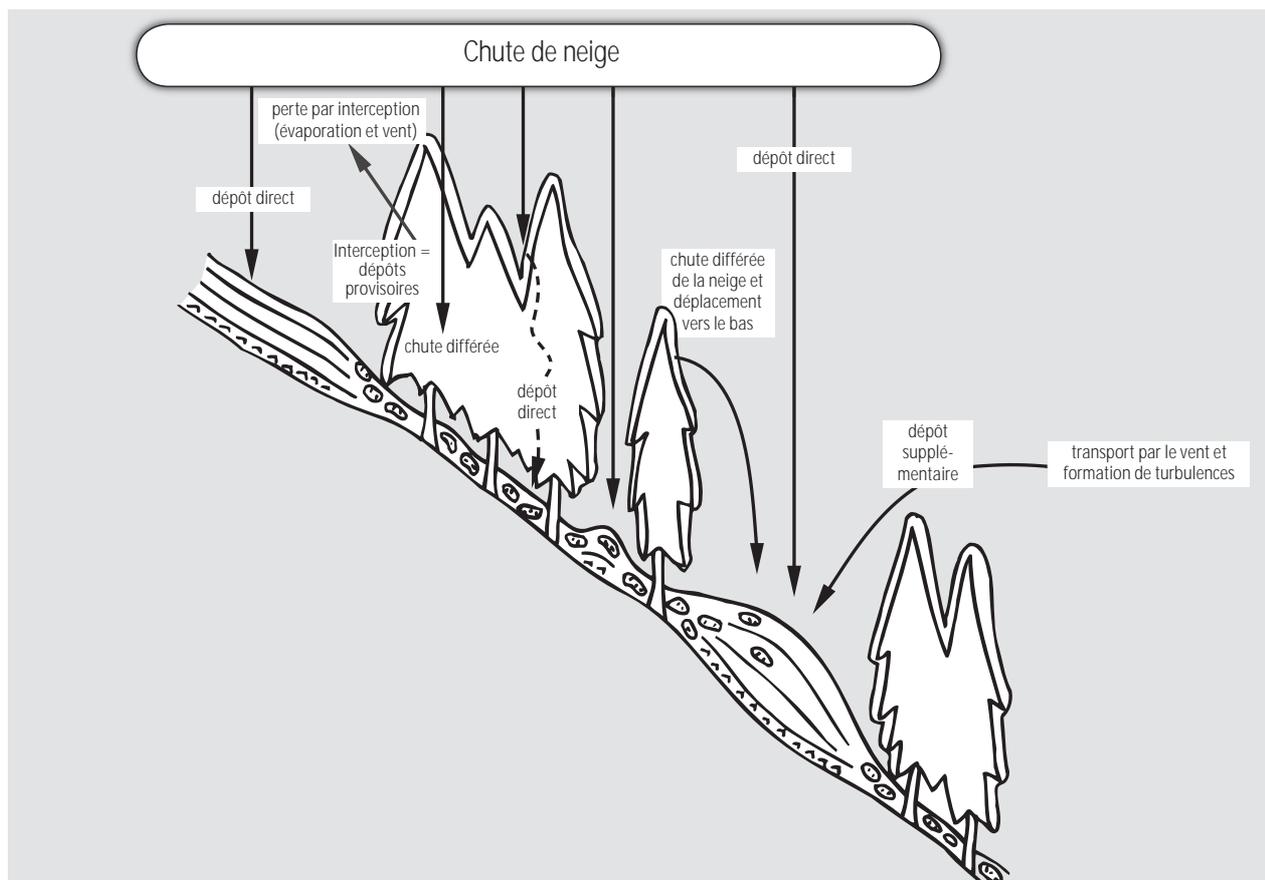
Les conditions prévalant à la limite supérieure du peuplement doivent être intégrées dans les décisions de gestion forestière prises en aval. Dans certains cas, une afforestation de haute altitude peut améliorer la situation. Dans les secteurs proches de la limite supérieure de la forêt, le degré de recouvrement maximum diminue et avec lui les effets protecteurs contre les avalanches. Lorsqu'une zone de déclenchement d'avalanche est située au-dessus de la limite supérieure de la forêt, celle-ci ne peut s'installer en aval qu'aux endroits les plus favorables, par exemple sur les élévations de terrain [cf. photo «Influence de la limite supérieure de la forêt»].



Ill. 2: Forêt de protection contre les avalanches. Sur la gauche de la photo, la forêt reste compacte jusqu'à la hauteur de la crête. La limite supérieure de la forêt se situe au-dessus de cette crête. Au milieu de la photo, la crête dépasse cette limite supérieure, qui est aussi dominée par une zone de déclenchement d'avalanches. La forêt ne colonise plus que les endroits favorables. Cette problématique doit être prise en compte dans la recherche des solutions sylvicoles.

2.4 Effets de la forêt

La forêt influence la structure du manteau neigeux – et par conséquent la formation des avalanches – à travers l'interception, le climat intérieur spécifique, ainsi que par la rugosité du sol accrue par la présence d'arbres, de souches et de bois au sol.



Ill. 3: schéma du processus de dépôt de la neige en forêt (selon Meyer 1987 et Cemagref):

On admet qu'en forêt, la période moyenne de récurrence est de 30 ans, car il faut compter avec une durée de cet ordre pour que les trouées se referment et empêchent le déclenchement d'avalanches. En terrain découvert, on utilise une période de 100 ans pour dimensionner les ouvrages paravalanches.

Facteurs qui limitent

le déclenchement d'avalanches:

- La couche de neige en forêt est plus faible qu'en terrain ouvert en raison du phénomène d'interception. La différence entre la forêt et une zone ouverte est plus prononcée lorsque les chutes de neige sont fai-

bles (70% d'interception) que lorsqu'elles sont fortes (30%). L'interception est plus faible par basses températures. La disposition des couches du manteau neigeux est perturbée en forêt, par exemple par la chute différée de paquets de neige ou par la formation d'entonnoirs autour des souches.

- Le rayonnement est diminué en forêt, notamment dans les forêts de résineux à feuillage persistant: le réchauffement est moins prononcé le jour et le refroidissement moins marqué la nuit qu'en terrain découvert. La forêt génère ainsi un climat particulier qui influence la métamorphose de la neige. Il s'y forme moins de givre

de surface et moins de givre de profondeur. La température plus élevée de la neige renforce sa cohésion. De petites avalanches peuvent se produire en forêt lorsque la neige est humide. Lorsque la surface du sol est lisse, on peut observer des glissements de neige.

- ▶ En forêt, il y a moins de vent et donc moins d'accumulation de neige. Celle-ci peut par contre s'accumuler dans les trouées et en lisière de forêt.
- ▶ La rugosité du terrain forestier y est en général plus élevée qu'en terrain découvert, ce qui diminue les risques liés aux mouvements de la neige.
- ▶ Les fûts et les souches, mais aussi les arbres au sol augmentent la rugosité du terrain et sont autant d'éléments stabilisateurs du manteau neigeux. L'effet stabilisateur des arbres ne suffit en général pas à lui seul pour empêcher le déclenchement d'avalanches. Pour atteindre l'efficacité de constructions paravalanches, le nombre de tiges (DHP > 8 cm) devrait atteindre les valeurs suivantes:
 - sur une pente de 30° (58 %): 500 tiges/ha
 - sur une pente de 40° (84 %): 1'000 tiges/ha.

Facteurs qui favorisent le déclenchement d'avalanches:

- ▶ Il peut se former une couche de givre de surface très durable dans les trouées ombragées et en lisière de forêt. Après une nouvelle chute de neige, cette couche peut devenir un plan de glissement.

Rôle de l'essence et de la structure du peuplement:

La forêt réduit le risque de déclenchement d'avalanches à partir d'une déclivité de 35° (70 %). Mais sur les terrains découverts ou dans les peuplements ouverts de mélèzes, la pente critique est déjà de 30° (58 %).

Les arbres ne produisent un effet que si leur hauteur est au moins le double de celle du manteau neigeux.

Les arbres à feuillage persistant ont une capacité d'interception supérieure à celle des arbres à feuillage caduc, surtout lorsque la température est basse. Sous un peuplement résineux à feuillage persistant, le rayonnement (ondes courtes et moyennes) est réduit jusqu'à une proportion maximale de 90 %. Dans une forêt à feuillage caduc, cette réduction

n'est que de 30 % (cf. recommandations pour la proportion de résineux en fonction du type de station et des associations végétales

Les arbres à feuillage caduc sont efficaces contre le déclenchement d'avalanches lors de petits épisodes neigeux. Mais cette influence est limitée en cas de fortes chutes de neige. À noter que la neige glisse facilement sur une litière de feuilles de hêtre. Il faudrait ainsi maintenir une grande proportion de résineux à feuillage persistant dans les forêts dont l'effet protecteur contre les avalanches est élevé.

Certains arbres et buissons de faible hauteur totalement recouverts de neige (p. ex.: aulnes verts, pins rampants), peuvent favoriser le déclenchement d'avalanches lorsque leurs branches flexibles se redressent soudainement. En outre, la formation de givre de profondeur est souvent prononcée en ces endroits. Lorsque ces peuplements couvrent une grande surface, il se peut que les avalanches y soient un peu moins fréquentes qu'en terrain découvert, mais elles sont par contre de plus grande ampleur.

Les arbres à feuilles caduques bordent souvent les couloirs d'avalanches, lieu où les arbres à feuillage persistant ne peuvent survivre en raison de la prise qu'ils offrent au déplacement de l'air. Dans les Alpes centrales, c'est souvent le mélèze qui occupe ces zones, où le sol brut est par ailleurs favorable à sa régénération. Dans les Préalpes, ce sont l'érable et le hêtre qui occupent ces secteurs. En ces endroits, il ne faut pas chercher à favoriser les arbres à feuilles persistantes.

Les paquets de neige tombant d'arbres dont le départ de la couronne est élevé peuvent déclencher des avalanches. Pour les arbres à longues couronnes (collectifs), ce risque est réduit.

Les arbres de grande taille à grand houppier ont une zone d'influence plus étendue que les petits arbres.

Effet de freinage produit par la forêt

Lorsque l'épaisseur de l'avalanche n'est que de 1 à 2 m, et que seuls les troncs sont mis à contribution, la forêt peut freiner la masse de neige. Par contre, si l'épaisseur et la vitesse de la neige sont plus importantes (p. ex. avalanche de neige poudreuse), la forêt sera détruite. Dans la zone de dépôt, la vitesse de la neige est souvent réduite, si bien que la forêt est mieux en mesure de la freiner et de faire reculer le point d'arrêt de l'avalanche.

Bois mort sur les surfaces de chablis:

Sur la plupart des surfaces de chablis non évacués, le bois constitue au début une protection très efficace contre les mouvements de la neige. Les structures parsemant la surface du sol – troncs et restes de troncs secs sur pied, assiettes racinaires et troncs jonchant le sol – forment un réseau très dense, capable de fixer efficacement la couche de neige. De plus, ces éléments influencent positivement le dépôt de la neige pendant des décennies. Ces bois offrent une bonne sécurité sur les pentes à avalanches typiques (de 30° à 40°) et pour les hauteurs de neige normales dans les zones boisées. Dans les lieux très pentus et dans les endroits où l'enneigement est particulièrement fort, il n'est toutefois pas à exclure que le bois cède sous la charge de la neige et qu'il se mette en mouvement avec elle. Ce danger augmente

par ailleurs avec la progression de la décomposition du bois. Il faut tenir compte de cette réalité dans les endroits où le potentiel de dégât est élevé. Une évacuation totale des bois entraîne dès le départ une forte diminution de l'effet protecteur contre les mouvements de la neige.

On a observé, sur les surfaces «Vivian» situées dans des zones de décrochement potentiel d'avalanches et qui n'avaient pas de rajeunissement, que la plantation permet de gagner au moins 10 ans sur le rajeunissement naturel (nombre et taille des arbres). Il est donc ainsi possible de raccourcir et peut-être même de supprimer la période sans effet protecteur, sachant que cet effet diminue avec la décomposition du bois et augmente avec le développement de la jeune forêt. Une plantation est aussi possible dans les surfaces de chablis non évacués, quoique plus pénible.

Sources: Les données sur les avalanches ont été pour l'essentiel rassemblées par Monika Frehner et Walter Frey, sur les conseils de Peter Bebi (SLF), du comité FAN, du GSM et du CEMA-GREF (Frédéric Berger). **Bibliographie:** Frey, W. (1977), de Quervain, M. (1978), Salm, B. (1978, 1982), Meyer-Grass, M., Imbeck, H. (1985a), Meyer-Grass, M., Imbeck, H. (1985b), Frey, W., Frutiger, H., Good, W. (1987), Imbeck, H., Ott, E. (1987), Meyer-Grass, M. (1987), Meyer-Grass, M., Schneebeli, M. (1992), Frey, W. (1993), Kaltenbrunner, A. (1993), Berger, F. (1997), Munter, W. (1997), Pfister, R. (1997), Frey, W. und Leuenberger, F. (1998), Bebi, P. (2000), Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches (2000), Schwitter, R. (2002), Frey W., Thee P. (2002).

3 Glissements de terrain, érosion, laves torrentielles

- 3.1 Profil d'exigences pour la forêt en rapport avec les glissements de terrain, l'érosion et les laves torrentielles
- 3.2 Glissements de terrain
- 3.3 Érosion superficielle
- 3.4 Laves torrentielles



3.1 Profil d'exigences pour la forêt en rapport avec les glissements de terrain, l'érosion et les laves torrentielles

Lieu	Effet potentiel de la forêt	Exigences en fonction du danger de glissement Profil minimal	Exigences en fonction du danger de glissement Profil idéal
Zone de glissement	Grand: Pour des glissements de faible profondeur (jusqu'à 2 m) et pour des érosions superficielles	Structure horizontale • Trouée max. 6 a, avec régénération assurée max. 12 a ¹ . Structure horizontale • Degré de recouvrement ² permanent ≥ 40% • Exigences minimales remplies (en rapport avec le type de station) Mélange • Dans les types de stations intermédiaires, il faut tendre vers le mélange d'essences adapté à la station la plus humide	Structure horizontale: • Trouée max. 6 a, avec régénération assurée max. 8 a ¹ . Structure horizontale: • Degré de recouvrement ² permanent et structure par petites surfaces ≥ 60% • Exigences idéales remplies (en rapport avec le type de station) Mélange • Dans les types de stations intermédiaires, il faut tendre vers le mélange d'essences adapté à la station la plus humide Éléments contribuant à la stabilité • Pas d'arbres lourds ou menacés d'être renversés par le vent
Zone d'infiltration	Moyen: Pour des glissements moyennement profonds ou profonds (plan de glissement au-dessous de 2 m), pour autant que le régime des eaux puisse être influencé au niveau du plan de glissement	Structure horizontale • Degré de recouvrement ² permanent ≥ 30% • Exigences minimales remplies (en rapport avec le type de station)	Structure horizontale: • Degré de recouvrement ² permanent ≥ 50% • Exigences idéales remplies (en rapport avec la station)
	Faible: Pour des glissements moyennement profonds ou profonds, si le régime des eaux au niveau du plan de glissement ne peut être influencé que faiblement	Régénération • Régénération assurée à long terme	Régénération • Régénération assurée à long terme • Exigences idéales atteintes (en rapport avec le type de station)

¹ Régénération assurée: présence du recrû ou du fourré avec le mélange souhaité. En région subalpine, des surfaces plus grandes sont tolérées pour autant qu'il s'agisse d'ouvertures en fentes (largeur maximale 20 m).

² Degré de recouvrement dès le stade du perchis (donc sans prendre en considération les rajeunissements et les fourrés).

³ Trouée: ouverture mesurée à partir du bord des couronnes (stades du perchis et de la futaie)

3.2 Glissements

Les divers types de glissement se distinguent par la profondeur de leur plan de glissement. En ce qui concerne la contribution potentielle de la forêt, il s'agit de distinguer les glis-

sements superficiels des glissements plus profonds. L'eau qui s'infiltré dans le sol constitue la plupart du temps un important facteur de déclenchement.

Glissements superficiels:

- Profondeur 0-2 m
- Glissements généralement très actifs et de courte durée (quelques minutes à quelques mois)
- Petites surfaces (en général < 0.5 ha)
- Principalement sur des pentes à partir d'environ 25°, mais aussi sur des pentes nettement plus faibles
- Niches d'arrachement d'anciens glissements souvent décelables sur le terrain

Glissements moyennement profonds et profonds:

- Profondeur 2-10 m et > 10 m
- Activité à l'échelle des cm ou des dm / an
- Sur de grandes surfaces (en général > 0.5 ha, jusqu'à plusieurs km²)
- Durée du processus: plusieurs années, voire plusieurs siècles, souvent avec des phases d'activité variable
- Critères de détermination sur le terrain: grandes lèvres dans la zone d'arrachement, arbres penchés ou troncs courbés («cor des Alpes»), fissures dans le sol, racines sous tension, plissements de surface, zones d'infiltration des eaux de surface, zones humides, fissures et déformations sur les routes et les bâtiments

Glissements superficiels



Sachseln OW, 15 août 1997

- Environ 100 m³ de matériel par glissement
- Durée des précipitations 2 heures; glissement en quelques minutes
- Passage à des coulées de boue si le terrain est détrempé

Glissements moyennement profonds et profonds



Sörenberg LU

- Plusieurs millions de m³ de matériel
- En mouvement depuis plus de 100 ans, phases actives en fonction des conditions météorologiques
- Conséquence: laves torrentielles et glissements superficiels

Ill. 4: Exemples

Zones menacées par les glissements

Les zones de glissement (notamment les glissements profonds) sont souvent connues et répertoriées. Les bases d'appréciation les plus importantes sont les suivantes:

- ▶ Carte des dangers / carte synoptique des dangers
- ▶ Carte des sols et des instabilités de terrain (cartographie des aléas naturels)
- ▶ Cadastre / documentation des aléas naturels
- ▶ Carte géologique

Des **glissements superficiels** peuvent naître spontanément en forêt, généralement après l'effondrement d'un peuplement.

La formation et la localisation d'un glissement dépendent d'un grand nombre de facteurs, dont les principaux sont la pente et la composition du matériel mobilisé. La propriété déterminante du matériel meuble est son angle de frottement interne qui correspond à l'inclinaison limite de la pente ou du talus.

Dans le tableau suivant, les matériaux meubles ont été sommairement classés en trois catégories. La valeur indicatrice attribuée à chaque catégorie représente la pente à partir de laquelle il faut s'attendre à des glissements superficiels. La probabilité d'observer des glissements spontanés est donc faible dans les terrains boisés dont l'inclinaison est inférieure aux valeurs indiquées³.

Matériaux meubles	Valeur indicatrice pour la pente critique
1 Sols marneux Sols riches en argile	dès 25° (47%)
2 Sols de composition moyenne, sans signes marqués de saturation en eau	dès 30° (58%)
3 Sols bien drainés Sols avec peu de matériel fin (argile, silice) Sols sablonneux ou graveleux	dès 35° (70%)

³ Des glissements peuvent se produire aussi sur des pentes moins fortes. Il faut notamment se renseigner pour savoir si des événements se sont déjà produits dans le passé.

Influence de la forêt sur le déclenchement de glissements

Glissements superficiels

Ces glissements se situent dans la zone influencée par les racines des arbres. De ce fait, la forêt peut avoir une grande influence sur l'intensité des glissements.

- ▶ Le système racinaire contribue à ancrer le sol (armature mécanique).
- ▶ Le régime des eaux est amélioré par l'interception, la transpiration et la perméabilité accrue du sol.

En maintenant une **structure idéale** du peuplement forestier, il est possible d'améliorer la stabilité du sol et de réduire ainsi la probabilité des glissements. Cependant, même une structure idéale ne peut les empêcher totalement. En outre, il ne faut pas oublier que l'action de la forêt diminue fortement à partir d'une déclivité de 40°.

En se renversant sous l'effet de la tempête, les gros arbres peuvent défoncer le sol, ce qui augmente les risques de glissements et d'érosion de surface.

Par fort vent, le mouvement des arbres peut provoquer des fissures dans le sol.

Glissements moyennement profonds et profonds

Si le rôle direct de la forêt, grâce à l'ancrage du sol par les racines, est essentiel dans le cas de glissements superficiels, son rôle diminue beaucoup lorsqu'il s'agit de glissements moyennement profonds ou profonds. L'importance de la forêt est alors indirecte: le sol constitue un réservoir qui retient l'eau avant qu'elle ne s'infilte vers les zones d'arrachement potentielles. Cet effet devient cependant nul dès l'instant où le sol est saturé d'eau.

Dans le cas de glissements moyennement profonds et profonds, il est possible de définir un périmètre d'infiltration. Cette zone comprend la surface du sol dans laquelle s'infilte l'eau qui aboutit dans la masse en mouvement. Une partie de l'eau est retenue par la capacité de stockage du sol forestier. Souvent, faute de connaître suffisamment les cheminements souterrains de l'eau, il est difficile de cerner la zone d'infiltration avec précision. Dans ce cas, il faut considérer la surface située au-dessus du pied du glissement comme zone d'infiltration effective.

Le poids des arbres n'a pas d'influence sur des glissements moyennement profonds ou profonds; c'est pourquoi une coupe d'allègement n'a pas de sens dans ces cas.

Les arbres instables représentent tout de même un problème aux abords des torrents: lorsqu'ils sont charriés par les hautes eaux, ils risquent de provoquer des engorgements. (cf. profil d'exigences torrents / crues)

Rôle de l'essence

Des essences dont l'enracinement est profond et dense représentent un atout important. Ces arbres ancrent solidement le sol et colonisent l'ensemble du volume susceptible de stocker l'eau.

Sur les sols bien drainés, la plupart des essences remplissent ces conditions sans problème. Par contre, le choix des essences est déterminant sur des sols lourds, compacts et temporairement détrempés.

Les essences suivantes assurent un bon enracinement en profondeur dans ce genre de sols:

Feuillus: frêne, orme, chêne, tremble, aulne glutineux

Résineux: sapin, pin, pin sylvestre

Le sapin, très répandu en forêt naturelle, joue ici un rôle primordial.

Rôle de la structure des peuplements

Pour lutter contre les glissements, il est essentiel que la **colonisation du sol par les racines** soit bien répartie tant en profondeur qu'en densité.

Pour atteindre cet objectif de façon durable, le mieux est de disposer d'un peuplement structuré par **petites surfaces**, dont les **classes d'âges sont variées** et dont le degré de recouvrement est **le plus élevé possible**. On peut admettre que l'étagement du peuplement se reflète dans l'espace racinaire. Ainsi, la régénération peut être assurée durablement et, en cas d'effondrement du peuplement (par exemple à la suite d'un coup de vent), la régénération est déjà prête.

La situation la plus défavorable en matière de glissements est celle de **grandes surfaces déboisées**. En effet, après plusieurs années, l'effet stabilisateur des racines mortes diminue, alors que le nouveau peuplement est encore jeune.

C'est pourquoi les **ouvertures dans le peuplement** devraient être aussi petites que possible, mais suffisantes toutefois pour assurer la régénération.

Les gros arbres susceptibles d'être renversés par le vent peuvent représenter un risque pour la stabilité de la pente. Les sols sont souvent défoncés après les coups de vent. Cela augmente l'infiltration d'eau ainsi que la désa-

grégation des matériaux en profondeur. Cette situation peut entraîner le déclenchement des processus d'érosion et de glissement.

Effets des drainages

Les effets des fossés de drainage peuvent être très divers. La déviation d'eau hors de la zone de glissement peut avoir un effet positif et contribuer à apaiser le glissement. Cependant, le drainage de grandes surfaces entraîne souvent un grand nombre de difficultés:

- ▶ L'entretien des fossés de drainage est très coûteux.
- ▶ Si l'entretien est négligé, les effets du drainage peuvent s'avérer négatifs.
- ▶ C'est justement dans les zones de glissements moyennement profonds et profonds que le danger de dysfonctionnement du système de drainage à la suite d'un glissement est le plus élevé.
- ▶ Lorsqu'ils couvrent de grandes surfaces, les systèmes de drainage peuvent, selon les circonstances, contribuer à amplifier le pic d'écoulement des eaux.
- ▶ Il est souvent impossible d'évacuer l'eau drainée sans charger d'autres zones potentiellement menacées par des glissements.

C'est pour ces raisons qu'il faut examiner très soigneusement et cas par cas l'objectif de chaque drainage et établir un plan d'entretien.

Bois au sol

Le bois abandonné sur le sol dans des zones à glissements représente un problème lorsqu'il peut rejoindre le périmètre d'action d'un torrent (bois flottant). Il peut alors provoquer des occlusions ou s'ajouter aux matériaux des laves torrentielles. (cf. profil d'exigences torrents / crues).

Récolte des bois

Lorsque la récolte du bois ne se fait pas dans les règles de l'art – notamment sur les sols sensibles – il peut en résulter un compactage massif des sols. Les préjudices ainsi causés à l'espace racinaire – qui doit assurer la stabilité du peuplement et la défense contre les glissements – se font sentir pendant des décennies. Les dégâts causés par des méthodes d'exploitation inappropriées peuvent largement dépasser les avantages espérés. La recherche de la méthode d'intervention la moins coûteuse doit toujours aller de pair avec la récolte soignée des bois, respectant le peuplement et

le sol. Cela vaut aussi notamment pour les exploitations de chablis, au cours desquelles des dégâts étendus et durables peuvent se produire.

3.3 Érosion de surface

On entend par «érosion de surface» le transport par l'eau de matériaux meubles situés à la surface du sol (la transition entre les notions d'érosion de surface et de glissement superficiel est continue). Contrairement aux glissements et aux laves torrentielles, cette érosion ne représente aucun potentiel de danger à elle seule. Avec le temps, elle peut par contre conduire à une accumulation de matériaux meubles dans le lit des cours d'eau et ainsi à l'augmentation du volume d'une lave torrentielle. À la longue, l'érosion continue de matériaux fins réduit la capacité de stockage en eau du sol, ainsi que le volume colonisable par les racines. L'érosion est un processus naturel qui ne peut être totalement jugulé. Son action peut cependant être accélérée ou freinée en fonction du type d'utilisation du sol.

L'effet positif de la forêt contre l'érosion est bien connu. Il repose principalement sur l'ancrage du sol par les racines des arbres et de la végétation herbacée. Cela réduit la perte de composants du sol par l'érosion de surface. En outre, une couverture végétale fermée diminue le cours de l'altération et de la déstabilisation des roches meubles et contribue donc à maintenir la résistance au cisaillement et, par là, aux processus de glissement.

Pour empêcher l'érosion de surface, il faut donc surtout assurer la présence d'une **couverture végétale fermée**.

L'état de la forêt ne joue ici qu'un rôle indirect:

- Pour maintenir la couverture végétale fermée, le mieux est d'empêcher les phases d'effondrement du peuplement (dus par exemple au vent). Un étagement du peuplement prend ici toute son importance.

- Des foyers d'érosion de surface sont souvent générés par des glissements. Dans ce sens, les soins aux forêts visant à réduire les risques de glissement constituent aussi une prévention de l'érosion de surface.

3.4 Laves torrentielles

Les laves torrentielles sont constituées d'un mélange d'eau et d'une forte proportion de matériaux solides (30% à 60%) s'écoulant rapidement. Elles se produisent souvent par vagues successives dans le lit des torrents. Les caractéristiques suivantes sont typiques: haute densité, vitesse d'écoulement parfois élevée, forte puissance de charriage (blocs de plusieurs mètres cubes) et grand volume de matériaux solides déplacés.

Les glissements et l'érosion de surface provoquent l'accumulation de matériaux meubles dans le lit des torrents et contribuent ainsi à la formation des laves torrentielles. Celles-ci peuvent aussi prendre naissance sur des pentes instables et produire des coulées de boues.

L'effet de la forêt est de ralentir les processus liés à la déclivité (glissements, érosion de surface) et de retenir une partie des matériaux susceptibles d'être intégrés à la lave torrentielle.

Dans la zone d'atterrissement des laves torrentielles, la forêt peut en outre jouer un certain rôle de ralentissement en favorisant la dispersion et le drainage de la masse en mouvement.

Les laves torrentielles n'apparaissent pas dans le profil d'exigences suivant. Ce sont les processus déclencheurs (glissements et érosion de surface) qu'il s'agit de prendre en considération.

Concernant les éventuelles influences négatives de la forêt (bois flottant), on se reportera au profil d'exigences torrents / crues.

4 Chutes de pierres

4.1 Profil d'exigences pour la forêt en rapport avec les chutes de pierres

4.2 Processus liés aux chutes de pierres

4.3 Zone de déclenchement

4.4 Zone de transit

4.5 Zone d'atterrissement et de dépôt

4.6 Indications complémentaires sur les effets de la forêt

4.1 Profil d'exigences pour la forêt en rapport avec les chutes de pierres

Lieu	Effet potentiel de la forêt	Exigences en fonction du danger profil minimal	Exigences en fonction du danger profil idéal
Zone de déclenchement	Moyen	Éléments stabilisateurs Pas d'arbre instable, ni lourd	
Zone de transit, d'atterrissement et de dépôt	Grand	<p style="text-align: center;">Nombre de tiges et surface terrière</p> <p>Surface terrière cible (≥ 8 cm DHP) et nombre de tiges correspondants par classe de diamètre voir l'outil Internet : http://www.gebirgswald.ch/fr/steinschlag-tool.html</p> <p>L'évaluation doit être effectuée pour toute la zone boisée.</p> <p style="text-align: center;">Pour les trouées¹</p> <ul style="list-style-type: none"> - Distance entre les troncs dans la ligne de pente < 40 m - Pour les ouvertures en fentes > 20 m : souches hautes (env. 1.3 m) et tous les 10 m au moins 2 arbres couchés avec un diamètre \geq taille de la pierre, en biais par rapport à la ligne de pente <p style="text-align: center;">Arbres couchés et souches hautes (env. 1.3 m) comme complément aux arbres sur pied</p>	
		Exigences minimales remplies en fonction du type de station	Exigences idéales remplies en fonction du type de station

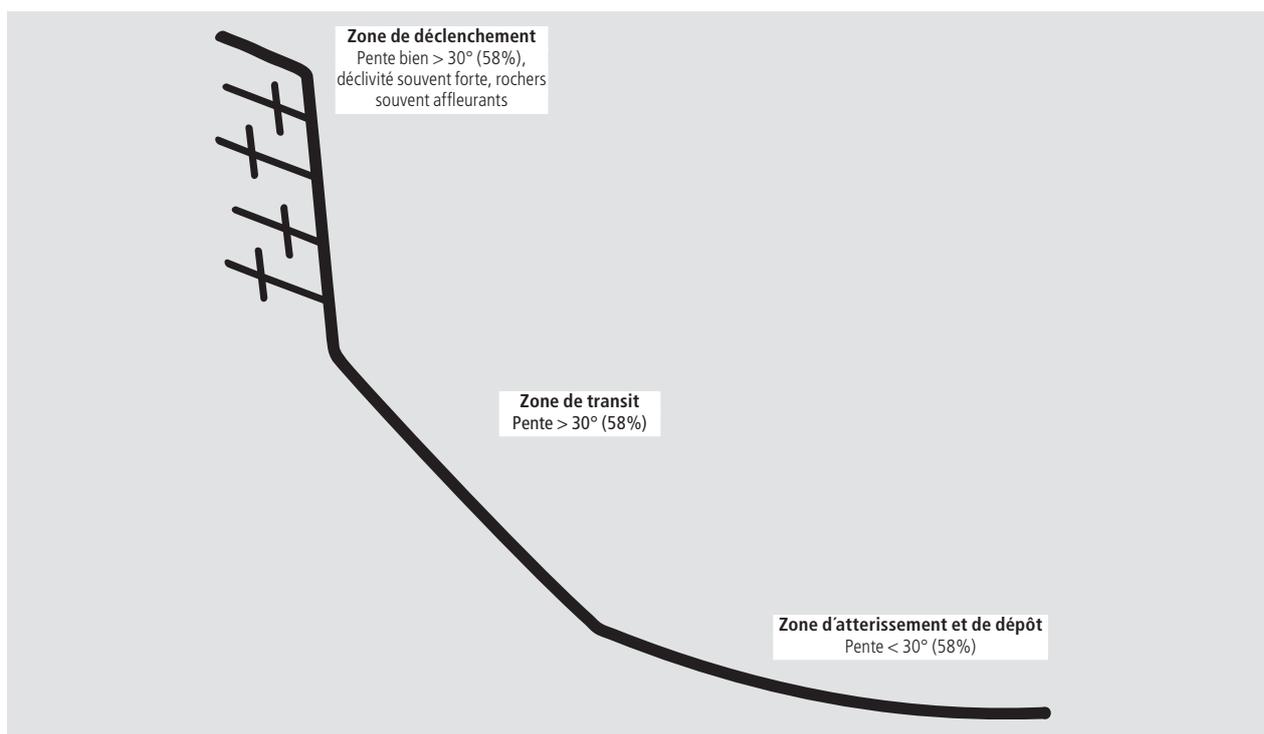
¹ Trouée : distance de tronc à tronc, dans le perchis et dans la futaie

4.2 Processus liés aux chutes de pierres

La notion de chutes de pierres recouvre aussi bien la chute des pierres proprement dite que leurs interactions avec l'environnement. Les pierres roulent, sautent ou glissent, évoluant en types de mouvement qu'il est possible de bien décrire. Durant leur déplacement, les pierres retombent sur le

sol ou heurtent des obstacles, par exemple des arbres ou des ouvrages de protection. Ce faisant, elles perdent de l'énergie.

Les processus liés aux chutes de pierres se déroulent successivement dans trois zones : zone de déclenchement, zone de transit et zone d'atterrissement et de dépôt. Ces zones se recoupent souvent. En plus des chutes de pierres, on observe fréquemment aussi des chutes de glace.



Ill. 5: Schéma du processus

4.3 Zone de déclenchement

Importance dans les processus liés aux chutes de pierres

C'est dans cette zone que les pierres se détachent. Les dimensions et la forme des pierres ainsi que la fréquence des chutes dépendent de la nature de la roche, de sa stratigraphie, de l'exposition et de l'altitude. La (re-)mobilisation des pierres au sol peut occasionner des chutes de pierres sur des pentes > 35°.

Effets de la forêt

Les racines des arbres retiennent les pierres. Mais elles peuvent aussi exercer une action négative en accélérant l'altération des roches par les suintements d'acides orga-

niques produits par les racines et par la litière d'aiguilles. Les racines peuvent également croître dans les fentes et favoriser la dislocation ultérieure des roches sous l'action du gel. L'effet des phénomènes d'altération est plus fort lorsque les couches géologiques sont parallèles à la pente que lorsqu'elles y sont perpendiculaires. Les pierres peuvent se mettre en mouvement lorsque des arbres sont déracinés. Le vent peut agiter si fortement les arbres, notamment quand ils dépassent 20 m de hauteur, que le mouvement des racines disloque les pierres.

Les effets de la forêt dépendent de la géologie, de la topographie, des essences, du poids des arbres, de leur centre de gravité et de leur hauteur.

4.4 Zone de transit

Importance dans les processus liés aux chutes de pierres

Entre 30° (58%) et 35° (70 %) de déclivité, les pierres roulent ou glissent ; au-dessus de 35° (70 %), elles peuvent aussi rebondir. Il est possible de calculer ces mouvements de façon assez précise. Au contact du sol ou des obstacles, les pierres perdent de l'énergie (énergie = masse x vitesse²) et peuvent aussi changer de direction. Aujourd'hui encore, il est difficile de calculer la valeur des déperditions d'énergie. Les pierres peuvent être stoppées par les obstacles, mais elles peuvent aussi se remettre en mouvement par la suite.

Outre la forêt et les ouvrages de protection, les éléments suivants sont aussi en mesure de freiner les pierres :

- ▶ La topographie : dans un relief tourmenté, les pierres sont souvent déviées. Plus la pente est douce et plus la vitesse des pierres est faible.
- ▶ La rugosité du terrain : lorsque les irrégularités du terrain indiquent une dimension proche de celle des pierres, celles-ci sont fortement freinées (pierriers, cônes de déjection)
- ▶ Amortissement : les blocs sont fortement freinés lorsque le sol est meuble

Dans des conditions identiques, les pierres sphériques atteignent des vitesses plus élevées que les pierres anguleuses ou allongées.

Longueur de la zone de transit

L'effet de la forêt peut être efficace à condition que les zones de transit ou d'atterrissement aient une longueur minimale. Pour autant que la zone de transit soit courte (< 75 m), qu'il manque une zone d'atterrissement, que le diamètre des pierres soit faible et que les essences soient appropriées, il peut être recommandé de recourir au taillis, en plus de l'utilisation des francs pieds. Lorsque la zone de transit est longue, le rôle de la forêt est spécialement important à proximité de la zone de déclenchement. Il s'agit en effet de stopper les pierres avant qu'elles ne prennent trop de vitesse. Il faut aussi prendre les chutes de glace en considération, notamment pour une zone de transit courte.

Effets de la forêt

Les impacts avec les arbres freinent les pierres ou les arrêtent provisoirement. Le freinage entraîne aussi une réduction de la hauteur des rebonds. L'effet des arbres dépend de la surface terrière rencontrée par la pierre sur sa trajectoire. Cette surface terrière dépend du nombre de tiges, de la distribution des diamètres et de la longueur boisée. De plus, l'énergie et la taille des pierres sont déterminantes :

- ▶ Les arbres peuvent, selon l'énergie des pierres (qui se calcule en fonction de leur masse et de leur vitesse), être blessés ou cassés. Ces impacts diminuent la vitesse des pierres et donc leur énergie de façon significative.
- ▶ Les arbres de petits diamètres sont écartés par les pierres : l'effet seul de ces arbres est petit. Par contre, ils sont importants pour augmenter la probabilité d'impact et ils peuvent également arrêter des gros blocs, après des impacts sur les arbres de diamètre important. En collectif, ces arbres de petits diamètres peuvent être très efficaces et stopper des pierres avec des énergies faibles (en particulier dans la zone d'atterrissement et de dépôt).
- ▶ Pour des blocs très grands (> 5 m³), la forêt peut également jouer son rôle de protection; bien évidemment, pour une réduction pertinente d'énergie et de risque, une longueur boisée conséquente est requise.
- ▶ Les souches hautes contribuent à freiner ou à stopper les pierres. Dans la forêt protectrice en rapport avec les chutes de pierres, les souches devraient être laissées le plus haut possible (hauteur env. 1.3 m).

Le *degré de protection actuel* de la forêt, calculée par l'outil internet, ne peut pas être appréciée, respectivement évaluée, sans relation avec la réduction du risque requise au niveau de l'enjeu. Par exemple, même un effet de protection faible de la forêt pourrait suffire pour réduire le risque à un niveau acceptable.

Longueur des trouées

Pour le processus des chutes de pierres, le nombre ainsi que la distribution des obstacles sont en générale plus importants que les longueurs des trouées dans la ligne de pente. Ces facteurs sont pris en compte dans la surface terrière et dans le nombre de tiges. Par contre, pour de grandes ouver-

tures en forêt, l'effet de la longueur de la trouée est significatif sur le processus de chutes de pierres. Les pierres peuvent atteindre leur vitesse maximale après un parcours de 40 m déjà et, selon le terrain, franchir de grandes distances en rebondissant. Cela signifie que la forêt située en amont d'une ouverture de plus de 40 m dans la ligne de pente n'a qu'une influence négligeable sur les pierres qui franchissent cette trouée et atteignent la forêt située en aval.

Comme la distance sans obstacle à l'intérieur d'une forêt varie fréquemment sur une petite surface, une longueur maximum de trouée a été définie pour le forestier. Celle-ci devrait toujours rester aussi petite que possible. Toutefois, il est démontré que la longueur maximale de 20 m valable jusqu'à présent ne pouvait être respectée dans tous les cas; en particulier dans des hêtraies en station favorable, il faut des ouvertures plus grandes pour la régénération. En conséquence, des trouées plus grandes que 20 m dans la ligne de pente sont désormais admises, à condition que les mesures d'accompagnement suivantes sont exécutées :

- ▶ La distance maximale de tronc à tronc est de 40 m.
- ▶ Les souches coupées ont une hauteur d'env. 1.3 m.
- ▶ Les arbres couchés sont efficaces : dans la ligne de pente, chaque 10 m au moins 2 arbres couchés avec un diamètre \geq taille de la pierre et idéalement avec un angle d'env. 70° par rapport à la ligne de pente.

4.5 Zone d'atterrissement et de dépôt

Importance dans le processus des chutes de pierres

La vitesse des pierres diminue même en l'absence de collisions avec des obstacles. Alors que les pierres peuvent rouler longtemps sur une pente comprise entre 25° (45%) et 30° (58%), elles s'arrêtent en général rapidement au-dessous de 25° (45%). Les pierres qui s'arrêtent d'elles-mêmes ne se remettent pas en mouvement. Les facteurs qui contribuent à freiner les pierres sont les mêmes que ceux mentionnés dans la zone de transit.

Effet de la forêt

En principe, l'effet des arbres est le même que dans la zone de transit. Un grand nombre d'arbres sur pied et de souches hautes (env. 1.3 m) conduit à de nombreux contacts entre les pierres et les arbres. C'est pourquoi il faut viser les mêmes objectifs forestiers que dans la zone de transit.

4.6 Effet des arbres couchés

Les arbres couchés ont un effet positif, pour autant que ceux-ci ne représentent pas eux-mêmes un danger et qu'il n'y ait pas de grosses accumulations de pierres dans les zones de déclenchement et de transit. Etant donné que dans la zone d'atterrissement le mouvement des pierres passe du rebond au roulement, l'effet des bois au sol est particulièrement efficace.

Le risque de mise en mouvement des arbres couchés augmente avec la déclivité, l'état du bois façonné (écorcé, ébranché) et l'action de la neige. Si ce risque existe, ces arbres doivent être impérativement sécurisés. Cela doit être évalué sur le terrain. Comme tout autre ouvrage de protection, les arbres couchés doivent être périodiquement contrôlés et entretenus. Des pierres dangereuses doivent être éventuellement évacuées ou éclatées de manière contrôlée.

Les arbres couchés augmentent la rugosité du terrain. Les pierres stoppées restent définitivement immobilisées. Cet effet est le plus grand si le diamètre du troncs est égale ou plus grand que la taille de la pierre déterminante. Si les arbres sont déposés en biais (idéalement env. 70°) par rapport à la ligne de pente, les pierres vont être freinées et déviées la plupart du temps. En comparaison avec les arbres couchés perpendiculairement, la probabilité d'impact augmente. Les arbres couchés peuvent aussi protéger le peuplement contre les blessures. Si les arbres sont déposés en biais par rapport à la ligne de pente, ils peuvent contribuer à canaliser les pierres.

Les souches renversées augmentent la rugosité du terrain et leur effet est donc en principe positif. Des problèmes peuvent survenir lorsque ces souches contiennent des pierres d'une certaine dimension. Celles-ci sont libérées lorsque la souche se décompose et peuvent alors devenir une nouvelle source de chutes de pierres (cas fréquents par exemple dans le Jura). Les souches séparées du tronc peuvent en outre se mettre en mouvement. Ce problème peut être pratiquement éliminé si la découpe du tronc est faite à plus de 4 m de la souche.

Les tas de branches améliorent l'effet d'amortissement et améliorent ainsi l'effet protecteur.

4.7 Indications complémentaires sur les effets de la forêt

Soins aux forêts – ouvrages de protection

Des soins sylvicoles ciblés peuvent permettre de remplacer des ouvrages de protection ou du moins de les redimensionner en fonction de la hauteur réduite des rebonds et d'un déploiement d'énergie plus faible.

Pourriture

Les arbres blessés peuvent être attaqués par la pourriture (après un délai de 10 ans environ pour l'épicéa et le hêtre). La pourriture n'attaque pas le bois de recouvrement produit en réaction à une blessure.

Rejets de souche

Si les pierres sont de petite taille, un diamètre de 12 cm suffit déjà à assurer l'effet protecteur dans les zones d'atterrissement et de dépôt, ainsi que dans la zone de transit. Dans ces cas, il peut être indiqué d'utiliser aussi des rejets de souches, si l'on dispose d'essences appropriées et si la longueur de la zone de transit est courte (< 75 m). Les rejets croissent en effet très rapidement au début et atteignent un DHP efficace en peu d'années. Il faut veiller à couper les rejets proprement et très bas, afin que non seulement les tiges, mais aussi les racines puissent se régénérer. Comme dans les trouées, l'intervalle entre les troncs ne doit pas dépasser 20 m dans la ligne de pente, il n'est pas possible d'opérer des coupes de taillis d'un seul tenant. Lors de ces coupes, on doit se limiter à des bandes dont la largeur ne dépasse pas 20 m dans la ligne de pente. L'utilisation des rejets de souche implique un travail de suivi intensif. Il faut exploiter la surface régulièrement et on peut moins compter sur les forces de régulation naturelles qu'on ne le fait dans les peuplements étagés. Le régime du taillis est par conséquent surtout indiqué lorsque la distance entre la zone de déclenchement des chutes de pierres et les enjeux est faible (< 75 m).

Bois mort sur les surfaces de chablis

Le bois qui reste sur les surfaces de chablis non évacuées offre une protection très efficace contre les chutes de pierres. Le relief constitué par les arbres secs sur

le pied, les restes de troncs dressés, les assiettes et les troncs couchés constituent une superstructure haute de plusieurs mètres. Cette rugosité est capable d'empêcher le départ des pierres de petite et moyenne dimensions pendant plusieurs décennies et de stopper celles qui sont en mouvement. Seules les très grosses pierres peuvent, par leur poids, traverser le réseau de bois mort. Le nettoyage de ces surfaces diminue sensiblement leur effet protecteur contre les chutes de pierres.

Topographie

Dans l'analyse des processus de chutes de pierres, il faut tenir compte des particularités topographiques locales. Dans la zone de transit, on peut profiter de petits replats comme zones de dépôt ; à ces endroits, les bois au sol sont très efficaces. A l'inverse, il faut aussi repérer les petites zones de déclenchement (p. ex. : pierriers instables, petits éperons rocheux), ainsi que les micro-couloirs de chutes de pierres.

Sources : Les données concernant les chutes de pierres ont été rassemblées par Luuk Dorren (OFEV), Monika Frehner (ETH) et Werner Gerber (WSL) (révision mars 2014), avec le conseil du Groupe suisse de sylviculture de montagne GSM, Stéphane Losey (OFEV), Frédéric Berger (IRSTEA), Kaspar Zürcher et Jean-Jacques Thormann (HAFL-BFH), ainsi que Markus Huber (WSL).

Publications consultées : Leibundgut (1993), Gsteiger (1995), GWG/FAN-Dokumentation (1998), Dorren et al. (2005), Berger et Dorren (2007).

Processus liés aux cours d'eau

Ce chapitre 5 de l'annexe 1 : dangers naturels a été révisé en 2021.

Chapitres 1-4 voir :

www.bafu.admin.ch/foret-protectrice

5 Processus liés aux cours d'eau

Profil d'exigences pour la forêt en rapport avec les processus liés au cours d'eau⁽¹⁾

Lieu	Effet potentiel de la forêt	Exigences en fonction du danger naturel Profil minimal	Exigences en fonction du danger naturel Profil idéal
Zone d'écoulement des laves torrentielles ou des crues (zone 1)	Grand à très faible	Les responsables des services forestiers et de l'aménagement des cours d'eau définissent ensemble les objectifs et en déduisent des mesures efficaces et proportionnées en orientant celles-ci sur les points faibles pertinents ⁽²⁾ .	
Pente bordant le cours d'eau (zone 2) ⁽³⁾	Grand à faible	Longueur de la trouée : max 30 m dans la ligne de pente ⁽⁴⁾	Longueur de la trouée : max 20 m dans la ligne de pente ⁽⁴⁾
		Taille de la trouée : max. 12 a ⁽⁵⁾	Taille de la trouée : max. 6 a ⁽⁵⁾
		Degré de couverture > 50 % ⁽⁶⁾	Degré de couverture > 60 % ⁽⁶⁾
		Tout au plus, peu d'arbres mobilisables et de bois menacés par les glissements de terrain	Pas d'arbre mobilisable et de bois menacé par les glissements
		Profil d'exigences minimal atteint (en fonction du type de station)	Profil d'exigences idéal atteint (en fonction du type de station)

(1) : Ce profil d'exigences couvre aussi les exigences relatives à l'effet hydrologique de la forêt.

(2) : Les points faibles sont des points ou des secteurs du cours d'eau d'où peut partir un danger. Les points faibles classiques sont : les voûtages trop petits, les rétrécissements, les rayons de courbure trop petits, les obstacles ou les ruptures de pente du profil en long.

(3) : Applicable lorsque les dangers de glissement de terrain et/ou d'avalanche sont déterminants pour la pente bordant le cours d'eau. Le profil d'exigences « chutes de pierres » doit être pris en considération dans des cas exceptionnels seulement.

(4) : Ouverture mesurée entre les bords des houppiers (perchis et futaies) (distance oblique)

(5) : Si utile d'un point de vue écologique pour le rajeunissement, des surfaces plus larges sont admises ; longueur de trouée dans la ligne de pente : 30 m au max. (distance oblique)

(6) : Degré de couverture des perchis et des futaies, trouées incluses.

5.1 Forêt protectrice pertinente pour les cours d'eau

Les forêts qui s'étendent le long de cours d'eau sont des habitats précieux pour la faune et la flore et offrent un espace de détente à la population. Or de nombreux ruisseaux représentent aussi un danger pour la population et les infrastructures lors de laves torrentielles, d'épandages d'alluvions et de crues. Les forêts peuvent constituer une protection efficace contre ces dangers naturels : elles stabilisent les berges, réduisent l'apport de matériaux dans le cours d'eau et augmentent la capacité de rétention d'eau dans le sol. En outre, les soins aux forêts protectrices diminuent l'apport de bois flottant.

Les exigences posées à la forêt protectrice diffèrent selon la position des forêts dans le bassin versant, leur proximité par rapport aux cours d'eau et la nature des processus de dangers naturels. Afin de réaliser les soins aux forêts protectrices de manière optimale eu égard à ces différentes exigences, deux zones sont différenciées (fig. 1) :

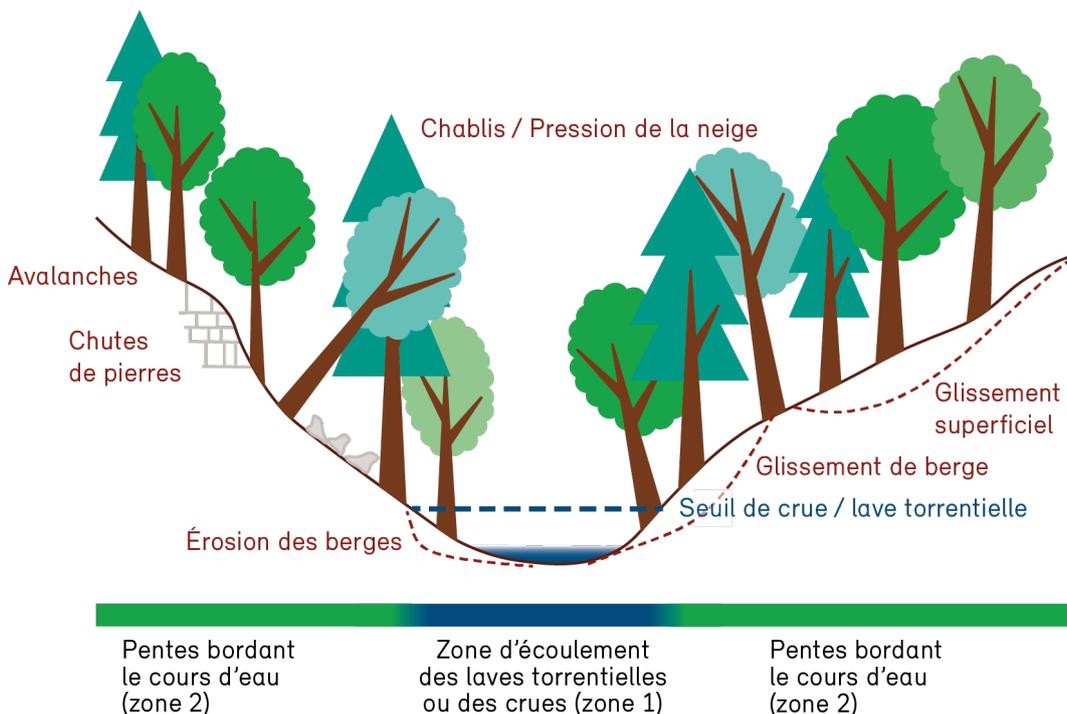
Zone d'écoulement des laves torrentielles ou des crues (zone 1) : zone d'écoulement des laves torrentielles et/ou des crues le long du cours d'eau¹.

Pente bordant le cours d'eau (zone 2) : secteur du bassin versant duquel des matériaux et/ou du bois flottant susceptibles de causer des dommages peuvent être amenés dans la zone d'écoulement des laves torrentielles ou des crues à la suite des processus suivants : érosion, glissements, avalanches, chutes de pierres, chablis et pression de la neige. La pente en bordure du cours d'eau correspond normalement à la forêt protectrice dans le bassin versant, excepté la zone d'écoulement des laves torrentielles ou des crues (zone 1).

¹ Le fait de prendre en considération ou non le processus de lave torrentielle et/ou de crue pour la délimitation de la zone dépend des caractéristiques du bassin versant et doit être décidé localement.

Figure 1 :

Profil transversal de la forêt protectrice liée à un cours d'eau avec la zone d'écoulement des laves torrentielles ou des crues (zone 1) et les pentes bordant le cours d'eau (zone 2). En rouge : processus possibles susceptibles de générer des matériaux ou de bois flottant. Le seuil de crue / lave torrentielle marque la limite entre les zones 1 et 2.



Forêts protectrices pertinentes pour les cours d'eau

Les cantons ont délimité les forêts protectrices pertinentes pour les cours d'eau selon les critères SilvaProtect-CH (Losey & Wehrli 2013).

Dans un premier temps, il s'agissait d'identifier les cours d'eau présentant un potentiel de dommages causés par lave torrentielle ou épandage d'alluvions. Ceux qui présentaient uniquement un danger de crues n'ont pas été pris en considération.

Les surfaces d'où des matériaux et du bois flottant pouvaient être transportés dans un cours d'eau ont été délimitées comme forêts protectrices pertinentes pour les cours d'eau. Les forêts qui ne font qu'influencer positivement le débit (effet hydrologique) ne répondent toutefois pas aux critères de la forêt protectrice définis par SilvaProtect-CH.

5.2 Délimitation des zones

La largeur de la zone d'écoulement (zone 1) varie selon la nature du processus de danger naturel, le relief et l'intensité de l'événement. Ainsi, la limite de la pente bordant le cours d'eau (zone 2) n'est pas définie de manière absolue.

C'est pourquoi les spécialistes de la forêt fixent la limite entre les deux zones en collaboration avec les responsables de l'aménagement des cours d'eau. L'intensité prise en considération correspond à une période de retour de 300 ans environ (HQ300²) ou résulte de l'appréciation locale par les responsables de l'aménagement des cours d'eau.

Limites des zones

Les limites de la zone 1 sont définies sur la base d'une expertise. S'il y a des incertitudes, celles-ci ne sont généralement pas déterminantes pour les décisions sylvicoles : souvent, la profondeur d'écoulement diffère peu entre un événement « HQ100³ » et un événement « HQ300 » dans les cours d'eau situés dans une forêt protectrice. Il est possible de lever l'incertitude en donnant des dimensions généreuses à la zone d'écoulement, à l'exception des lieux où le cours d'eau peut déborder des berges et s'écouler sur de grandes surfaces en cas d'événement ; dans de tels cas, il faut délimiter la zone 1 avec précision.

La limite supérieure de la pente bordant le cours d'eau (zone 2) correspond à la distance maximale de laquelle des processus de dangers naturels peuvent causer des dommages en amenant des matériaux ou du bois flottant dans le cours d'eau. Elle correspond en principe à la limite supérieure définie pour la forêt protectrice liée à un cours d'eau.

Coopération entre les responsables des services forestiers et de l'aménagement des cours d'eau :

Les responsables de l'aménagement des cours d'eau disposent des compétences requises pour évaluer les processus liés aux cours d'eau. En outre, ils sont chargés de la surveillance des processus de lave torrentielle et de crues dans de nombreux cantons.

Les responsables des services forestiers et de l'aménagement des cours d'eau évaluent ensemble le cours d'eau et sa situation en matière de dangers naturels afin d'adapter efficacement les soins aux forêts protectrices sur les pentes bordant des cours d'eau. Ils s'accordent aussi pour formuler les objectifs sylvicoles dans la zone d'écoulement des laves torrentielles ou des crues (zone 1).

La mise en œuvre de cette coopération est du ressort des cantons. Si, idéalement, la discussion entre responsables des services forestiers et de l'aménagement des cours d'eau a lieu pour chaque cours d'eau, il peut aussi être judicieux de caractériser plusieurs cours d'eau représentatifs et de se référer à ces descriptions pour élaborer des mesures sylvicoles relatives à d'autres cours d'eau.

² HQ300 : crues survenant en moyenne une fois tous les 300 ans.

³ HQ100 : crues survenant en moyenne une fois tous les 100 ans.

5.3 Zone d'écoulement de laves torrentielles ou des crues (zone 1)

5.3.1 Fonctions de la forêt dans la zone 1

La fonction première d'une forêt protectrice est la protection contre les dangers naturels. Toutefois, les arbres et le bois mort présents le long des ruisseaux ont aussi d'importantes fonctions écologiques. L'ombre des arbres permet de limiter le réchauffement de l'eau, ce qui est d'autant plus important que la température de l'eau est déterminante pour la survie de nombreux êtres vivants aquatiques. Quant au bois mort, il offre de petits espaces dans les eaux où la faune trouve un abri, un lieu de repos et des sources de nourriture. Par ailleurs, on peut trouver des essences ou associations forestières rares le long des cours d'eau. Enfin, les personnes en quête de détente apprécient souvent le paysage créé par les berges de ruisseau. Il faut prendre ces aspects en considération dans le cadre d'interventions en forêts protectrices, par exemple en impliquant les services compétents de la pêche et de la protection de la nature.

5.3.2 Caractéristiques du cours d'eau et situation en matière de dangers naturels

Les caractéristiques respectives des cours d'eau, des processus de dangers naturels dans le cours d'eau, des points faibles et des biens à protéger déterminent en grande partie de quelle manière une forêt protectrice efficace doit être structurée dans la zone d'écoulement des laves torrentielles ou des crues. C'est pourquoi une évaluation préalable de ces caractéristiques est centrale. Il convient alors de caractériser tant le bassin versant dans son ensemble que les caractéristiques locales de la zone 1 (étapes 1 à 2 dans le tableau 2).

Liste de contrôle

Une liste de contrôle a été élaborée pour aider les responsables dans les soins aux forêts protectrices le long des cours d'eau (tableau 2). Elle montre les étapes possibles d'évaluation afin de définir des exigences pour la forêt protectrice, d'en déduire la nécessité d'intervenir et d'évaluer leur proportionnalité.

La liste de contrôle comprend cinq étapes d'évaluation et tient compte de toute la chaîne de processus, de la surface d'intervention à la mise en danger du bien à protéger. Il est important d'évaluer la situation pour l'ensemble de la forêt protectrice liée au cours d'eau (zones 1 et 2). Toutefois, l'importance d'une étape dépend de la position de la surface d'intervention dans le bassin versant et de la situation locale (voir tableau 2).

Importance de la chaîne de processus

Dans la définition des objectifs sylvicoles, la probabilité que des matériaux et du bois provenant d'un endroit précis puissent provoquer des dommages est déterminante. Ainsi, un arbre qui tombe dans le cours d'eau ne pose problème que s'il est transporté vers des points faibles où il entraînera des dommages. Si, par exemple, un tronçon de dépôts existe entre la surface d'intervention et le point faible, du bois situé en amont ne sera probablement pas dangereux.

Pour définir des objectifs sylvicoles appropriés sur une zone d'intervention, en déduire le besoin d'intervention et évaluer sa proportionnalité, il faut donc impérativement tenir compte de l'ensemble de la chaîne de processus : de l'apport de matériaux et de bois flottant dans la zone d'intervention au danger propre dans les points faibles, en passant par le transport dans le cours d'eau (voir l'étape d'évaluation 2 dans le tableau 2).

Caractéristiques des laves torrentielles et des crues

Les objectifs dépendent fortement de la nature du processus de danger naturel déterminant pour le cours d'eau. Pour que les laves torrentielles se déclenchent, il faut au moins une déclivité de 25 à 30 %. S'il existe des facteurs favorables comme des rétrécissements, du bois flottant ou autre, alors une déclivité de 15 % suffit pour déclencher une lave torrentielle. En dessous d'une déclivité de 10 %, les laves torrentielles ne peuvent en principe plus se déplacer et s'immobilisent. Elles se déplacent aussi lorsque la déclivité se réduit fortement (p. ex. de moitié) à l'endroit d'un pli. Étant donné qu'elles présentent une concentration en matériaux solides, une granulométrie, une densité, un débit de pointe et un débit total plus élevés que ceux d'une crue avec charriage de matériaux, elles provoquent aussi une plus forte érosion. La profondeur d'érosion équivaut à 20 %, voire plus, de la largeur du cours d'eau, tandis qu'elle dépasse rarement 10 % dans le cas d'une crue avec charriage de matériaux. Néanmoins, ces valeurs sont uniquement des valeurs d'expérience, qui doivent être vérifiées localement.

5.3.3 Effet des arbres dans la zone 1

Selon les caractéristiques du bassin versant, des processus de dangers naturels et du peuplement, les arbres ont différents effets en matière de dangers naturels dans la zone 1. La végétation a par exemple les effets positifs suivants :

- Les racines des arbres stabilisent la berge et constituent à ce titre une protection contre l'érosion et les affouillements.
- Le bois présent dans le lit d'un cours d'eau fournit de petites structures et fait ainsi varier les profondeurs et les vitesses d'écoulement.
- Les arbres présents dans la zone d'écoulement des crues ralentissent le débit et peuvent réduire l'érosion et servir à retenir le bois flottant.

Néanmoins, à partir d'une certaine force de courant, les berges boisées ne résistent plus à l'érosion. La force de courant déclenchant l'érosion est appelée contrainte d'entraînement critique. Ce seuil dépend de la nature des matériaux de la berge (répartition granulométrique, p. ex.) et des propriétés de la végétation. La nature du système racinaire et la densité du peuplement jouent ici un rôle important. Étant donné que les matériaux de la berge et les propriétés du peuplement peuvent fortement varier, la contrainte d'entraînement critique est très différente d'une station à l'autre. En tombant dans l'eau, les arbres peuvent agir de manière défavorable lors de dangers naturels :

- Lors d'une crue, les arbres sont transportés sous forme de bois flottant et obstruent l'écoulement dans les endroits de resserrement (ponts, voûtages ou rétrécissements naturels d'un ruisseau).
- L'augmentation du niveau d'eau ainsi provoquée peut entraîner des inondations et des épandages d'alluvions.
- Ces embâcles, lorsqu'ils se rompent, peuvent causer temporairement une forte augmentation du débit.
- Les laves torrentielles peuvent emporter des arbres, ce qui accroît le danger pour la population et les biens matériels.

Lorsqu'un lit ne peut pas donner lieu à une lave torrentielle, l'effet protecteur des arbres l'emporte dans les petits ruisseaux, notamment parce que la capacité de transport de bois flottant est alors très réduite. En l'absence de déclivité, l'effet protecteur de la forêt l'emporte aussi lorsque les lits sont plus larges, à condition que les berges ne puissent pas s'effondrer et que la forêt soit en bon état. Lors de laves torrentielles, les arbres n'ont souvent

qu'un effet stabilisateur si le lit est étroit et si la surface du bassin versant en amont de la parcelle considérée est petite.

Glissements de berge

Les processus hydrauliques du ruisseau peuvent aussi déclencher des glissements à la limite de la pente bordant le cours d'eau (zone 2 ; glissements de berge, voir fig. 1). Les buissons stabilisent généralement bien les 50 premiers centimètres de la surface du sol. Néanmoins, à mesure que la couche de glissement augmente et que la déclivité de la berge s'accroît, l'effet protecteur des arbres diminue et le danger d'apport de bois flottant s'accroît.

Lorsque, en cas d'événement, une berge ou le fond du lit s'érode plus fortement que la zone racinaire principale, le risque d'affouillement et de glissement de berge augmente. Ces processus entraînent souvent un apport de bois flottant et de matériaux.

5.3.4 Gestion du bois jonchant le sol dans la zone 1

La gestion du bois jonchant le sol est réglée à l'annexe 7 (Utilisation du bois sur place). Le bois jonchant le sol dans la zone d'écoulement des laves torrentielles ou des crues doit être évacué s'il présente un danger et si son évacuation est proportionnée. Ces conditions dépendent des caractéristiques du cours d'eau, des points faibles et du bois. Parallèlement, il faut tenir compte de la dynamique fluviale ainsi que des groupes d'intérêts comme les organisations de pêche ou de protection de la nature. Il convient d'évacuer de la zone d'écoulement des laves torrentielles ou des crues autant de bois mort que nécessaire, mais le moins possible (pesée des intérêts entre protection contre les dangers naturels et pêche / protection de la nature).

Le bois évacué de la zone 1 doit être éloigné ou stocké hors de la zone 1. Il faut veiller à ce que le bois stocké ne puisse pas être ramené dans le cours d'eau par des processus comme le glissement de terrain ou le glissement de neige.

Mobilisation et transport de bois flottant

Le fait que le bois flottant soit transporté ou non et, si oui, à partir de quelle hauteur d'eau, dépend du régime d'écoulement, des caractéristiques du cours d'eau et de la forme et de la taille des troncs. Des essais sur modèle hydraulique ont montré que le transport de troncs « lisses » commence dès lors que la profondeur d'écoulement correspond au diamètre du tronc. Quant aux troncs pourvus de branches et aux souches, ils ne sont transportés que si la profondeur d'écoulement est plus importante. Lorsque l'événement donne lieu à un charriage, le seuil de transport est 20 à 30 % plus bas qu'en l'absence de charriage. En cas d'événement, les morceaux de bois flottant dont la longueur est supérieure à la largeur du cours d'eau sont considérés comme non mobilisables lors de processus de crues. Toutefois, ce bois peut devenir transportable ultérieurement par une fragmentation naturelle (poutrissement, p. ex.). Les laves torrentielles peuvent, elles, transporter de longs morceaux de tronc, des souches et même des arbres entiers dans les petits cours d'eau.

Embâcles

La longueur du bois flottant est un facteur important pour la probabilité que se créent des embâcles, les morceaux courts réduisant cette probabilité. Selon les recommandations générales, la longueur du bois flottant potentiel ne devrait pas dépasser la moitié de la largeur du fond du lit. Il faut néanmoins également tenir compte, dans cette évaluation, des caractéristiques des points faibles (p. ex. diamètre du voûtage, caractéristiques des grilles de rétention, distance entre les piles de pont, etc.). Les souches sont cruciales pour les embâcles : la probabilité qu'elles s'accrochent est nettement plus élevée que pour les troncs « lisses ».

Fragmentation du bois

Pour prévenir les embâcles, le bois couché présent dans les cours d'eau est souvent scié. Cependant, les morceaux de bois de même forme ont tendance à se mobiliser en même temps lors d'un événement, ce qui peut entraîner le transport d'un radeau de bois flottant, lequel favorise la formation d'embâcles. En outre, le bois fragmenté est transporté plus loin. C'est pourquoi les responsables doivent évaluer soigneusement les conséquences du sciage sur la situation de dangers. Il peut être plus judicieux de varier la longueur des tronçons sciés ou de stocker le bois à l'extérieur du profil du cours d'eau.

5.3.5 Exigences posées à la forêt protectrice dans la zone 1

Dans la pratique, il est difficile d'évaluer si un arbre précis contribue à la protection ou s'il peut, en prenant la forme de bois flottant, provoquer un danger. Il n'est donc pas possible de définir des exigences de portée générale en ce qui concerne la zone d'écoulement des laves torrentielles ou des crues dans une forêt de protection. Il s'agit plutôt, pour les responsables des services forestiers et de l'aménagement des cours d'eau, d'adapter les objectifs et les mesures à la situation locale. Les exigences sont fonction du danger naturel et du lieu. Il faut tenir compte, en définissant les objectifs et les mesures, de l'ensemble de la chaîne de processus, de l'effet local de l'arbre sur la stabilité de la berge jusqu'aux dommages que cet arbre peut causer. Les mesures sylvicoles renforcent l'effet protecteur des arbres et sa durabilité ; elles réduisent en outre le danger lié au bois flottant.

Exigences en fonction du danger naturel

La situation en matière de dangers naturels détermine en grande partie les exigences posées à la structure de la forêt. Lorsque l'effet stabilisateur des arbres l'emporte dans l'évaluation, des mesures sylvicoles doivent venir le renforcer et le garantir durablement. Ainsi, il peut être judicieux d'améliorer l'enracinement du sol, par exemple en favorisant des essences à enracinement profond ou en visant un diamètre plus large ou un degré de couverture plus élevé. Des arbres stables résistent mieux aux forces qui s'exercent sur eux. C'est pourquoi la stabilité et l'enracinement des arbres sont des critères essentiels pour déterminer s'il faut éliminer un arbre ou non en cas d'intervention.

Si, à l'inverse, le risque de production de bois flottant dangereux est le plus élevé, il convient de le réduire au moyen de mesures sylvicoles. La mesure dans laquelle les arbres peuvent stabiliser la berge dans la zone racinaire principale n'est alors pas le seul paramètre à prendre en considération. Si le cours d'eau présente une tendance à l'érosion linéaire en cas d'événement, c'est-à-dire qu'un affouillement de la berge se produit en dessous de la zone racinaire principale, des arbres peuvent être mobilisés par l'affouillement ou des glissements de berge en dessous du seuil d'effet des racines. Dans ces situations, il est opportun, par exemple, de réduire le diamètre final visé, de favoriser les buissons ou de viser une structure analogue aux lisières entre la zone d'écoulement dans le cours d'eau et la pente bordant celui-ci. Une transition semblable aux lisières est aussi appropriée lorsque des laves torrentielles ou des couloirs d'avalanche parcourent le lit du ruisseau, car elle réduit le volume potentiel de bois flottant tout en stabilisant la berge et en réduisant l'érosion.

Il faut aussi tenir compte du fait que les souches favorisent la formation d'embâcles. Les mesures sylvicoles doivent donc aussi empêcher les souches d'atteindre le cours d'eau et d'être transportées.

Exigences en fonction de la station

Pour garantir durablement la fonction protectrice de la forêt, un mélange d'essences indigènes et adaptées à la station est encouragé, également dans la zone d'écoulement des laves torrentielles ou des crues. Toutefois, les conditions stationnelles diffèrent souvent largement de la forêt environnante. Il n'est donc généralement pas possible de déduire les exigences simplement en se fondant sur la pente bordant le cours d'eau. Il faut les apprécier d'après les conditions spécifiques à la station :

- La zone d'écoulement des laves torrentielles ou des crues est périodiquement inondée et les sols sont fréquemment engorgés.
- Des processus de glissement se produisent en raison de l'érosion des berges et du charriage de matériaux et de bois flottant.
- Des arbres sont exposés à des charges considérables dans la zone affectée par les laves torrentielles et les crues. Ces charges comprennent les inondations, des sols saturés en eau ou à humidité variable ainsi que les effets mécaniques du charriage / bois flottant ou des racines dégagées.

Le plus souvent, ces particularités très localisées ne sont pas indiquées dans la cartographie de la station. Or elles sont essentielles pour définir les objectifs et déduire la nécessité d'intervenir.

5.3.6 Définition d'objectifs sylvicoles clairs dans la zone 1

Les responsables des forêts et de l'aménagement des cours d'eau définissent ensemble l'état visé, soit le profil d'exigences ainsi que les mesures, qui doivent être efficaces et proportionnées. Pour ce faire, ils tiennent compte de la situation en matière de dangers naturels, des caractéristiques du cours d'eau, de l'effet de la végétation et des exigences propres à la station (voir 5.3.2 à 5.3.5). Si d'autres intérêts existent, qui se rapportent à la pêche ou à la protection de la nature par exemple, ils doivent aussi faire partie des décisions. Pour la zone 1 également, les objectifs et les mesures, y compris leur déduction, doivent être documentés de manière claire. Les responsables sont libres de les présenter sous la forme qu'ils souhaitent. La liste de contrôle peut fournir une trame pour la documentation (tableau 2).

Le tableau 1 présente des caractéristiques du peuplement pour lesquelles il est possible de définir des objectifs sylvicoles.

Tableau 1 :

Caractéristiques du peuplement dans la zone d'écoulement des laves torrentielles ou des crues (zone 1) et critères possibles pour lesquels des objectifs sylvicoles peuvent être définis.

Caractéristiques du peuplement et des arbres	Critères possibles
Mélange	Type et degré du mélange
Structure	Degré de couverture, répartition des DHP, diamètre maximal
Stabilité	Coefficient d'élancement, stabilité, gestion des arbres fortement penchés et des racines affouillées
Rajeunissement	Nombre et répartition, essences, gestion de la végétation concurrente (néophytes compris)
Bois mort (debout ou couché)	Diamètre et/ou longueur maximal(e), situation, gestion du bois mort et des souches dans le cours d'eau, gestion des branches, etc.

5.4 Pente bordant le cours d'eau (zone 2)

5.4.1 Effet de la forêt dans la zone 2

Effet sur l'apport de charriage et de bois flottant

Les forêts protectrices sur les pentes bordant des cours d'eau font l'objet d'une délimitation parce qu'elles offrent une protection contre les processus de dangers naturels qui amènent des matériaux et du bois dans les cours d'eau (glissements de terrain, érosion, avalanches, chutes de pierres, voir encadré sous 5.1). Leur délimitation permet de réduire le volume de charriage et de bois flottant susceptible d'être transporté et de causer des dommages lors d'une lave torrentielle ou d'une crue.

L'effet de la forêt sur les glissements de terrain, l'érosion, les avalanches et les chutes de pierres est décrit de manière détaillée dans les profils d'exigences relatifs à chacun de ces dangers naturels (voir « Gestion durable des forêts de protection », annexe 1). Ces explications ne sont donc pas répétées ici.

Effet hydrologique

Les forêts exercent aussi une influence sur le cycle de l'eau. Grâce à leurs feuilles ou aiguilles, les arbres abritent le sol en cas de pluie ou de neige. Ainsi, une partie des précipitations n'atteint pas le sol, mais s'évapore directement (interception). Par le processus de transpiration, les arbres extraient l'eau du sol, augmentant la capacité de celui-ci de retenir l'eau. Les racines des arbres forment dans le sol un système poreux efficace qui améliore l'infiltration et peut réduire l'écoulement de surface.

Ainsi, la forêt augmente la capacité de rétention d'eau par rapport à d'autres formes d'utilisation du sol, mais dans une mesure qui dépend des caractéristiques de la station, de l'état de la forêt, des conditions météorologiques et du déroulement de chaque événement de précipitations.

5.4.2 Exigences posées à la forêt protectrice dans la zone 2

Situation particulière dans les bassins versants

Par rapport aux dangers naturels qui menacent directement la population et les valeurs matérielles, les processus qui se produisent dans les pentes bordant des cours d'eau présentent quelques particularités : lorsqu'ils entraînent du bois et du charriage dans un ruisseau, ces matériaux peuvent rester longtemps à un endroit et ne causer des dommages que plus tard. Par exemple, en hiver, une avalanche peut amener du bois dans le cours d'eau qui sera susceptible de causer des dommages seulement lors d'un événement de crue ultérieur. Des précipitations persistantes d'intensité moyenne peuvent déclencher des glissements de terrain, amenant du bois et des matériaux dans un ruisseau, qui ne les transportera que plus tard, lors de fortes précipitations. Cependant, les apports de matériaux et de bois flottant se produisent souvent en même temps que l'événement provoquant des dommages. Les fortes précipitations de l'été 2005, par exemple, ont causé de nombreux glissements de terrain, lesquels ont amené du bois dans les cours d'eau. Ces bois frais se sont transformés en bois flottant et ont immédiatement provoqué des dommages.

Exigences en fonction du danger naturel

Les principaux processus qui amènent des matériaux et du bois flottant dans les ruisseaux sont généralement les glissements de terrain et l'érosion, auxquels s'ajoutent, en altitude, les avalanches. Les chutes de pierres ne prédominent que dans de rares cas. Il arrive fréquemment que les pentes bordant des cours d'eau cumulent plusieurs processus de dangers naturels qui causent des apports plus ou moins importants de matériaux et de bois. Ainsi, il est parfois difficile, dans la pratique, de déterminer le processus de dangers naturels qui domine sur une surface d'intervention. C'est la raison pour laquelle il convient de viser, sur la pente bordant le cours

d'eau, une structure forestière qui offre la meilleure protection possible tant contre les glissements de terrain que contre l'érosion et les avalanches. Pour ce faire, il convient de combiner les profils d'exigences existants pour ces dangers naturels : les trouées ne doivent pas être trop grandes ni dépasser une certaine longueur dans la ligne de pente. Grâce à ces petites trouées, les racines renforcent le sol, et l'érosion du sol et le départ d'avalanches peuvent être réduits. Un degré de couverture minimal garantit le renforcement du sol sous l'action des racines et empêche une formation uniforme du manteau neigeux. Un degré de couverture élevé améliore la protection générale contre les dangers naturels. En même temps, ce degré visé ne doit pas être trop haut, afin de ne pas porter atteinte à la durabilité de l'effet protecteur ni à l'introduction du rajeunissement.

Dans les rares cas où les chutes de pierres sont la cause principale d'un apport de matériaux, il faut tenir compte du profil d'exigences qui se rapporte au danger « chutes de pierres ».

Exigences en fonction de l'effet hydrologique

Les exigences qui découlent de l'effet de la forêt sur le cycle de l'eau se recourent avec les exigences relatives aux glissements de terrain, à l'érosion et aux avalanches : les grandes trouées sont à éviter, tandis qu'il faut viser un certain étagement et une diversité des essences pour garantir un enracinement solide du sol. Ainsi, les exigences définies optimisent dans le même temps l'effet hydrologique.

Exigences de stabilité

Un peuplement stable réduit le risque de perturbation majeure. Plus les arbres sont stables, plus le danger est faible qu'ils se renversent lors d'un orage ou d'un évènement de neige mouillée. Dans les pentes très raides, les arbres couchés ou cassés peuvent glisser sans qu'un danger naturel ne survienne. C'est pourquoi la stabilité des arbres et des peuplements est un objectif sylvicole important pour les pentes bordant des cours d'eau : elle garantit la durabilité de l'effet protecteur ainsi qu'une quantité réduite de bois et de matériaux entraînés dans le cours d'eau.

Les exigences de stabilité sont toutefois différentes selon la situation des arbres dans le bassin versant. La stabilité des arbres aux abords du ruisseau constitue un objectif essentiel. Néanmoins, s'ils se situent à un endroit où ils n'atteindraient guère le cours d'eau en se renversant, les arbres instables sont tolérés à condition qu'ils ne compromettent pas la stabilité du peuplement.

Abattages de décharge

Décharger la pente par des interventions d'envergure n'a aucun effet positif sur la stabilité de la pente. Le poids des arbres est négligeable en comparaison de la masse du sol. Les coupes de bois ont même souvent un effet déstabilisateur : lorsqu'on abat tous les grands arbres d'une surface, le renforcement du sol sous l'effet des racines s'amointrit, et le risque de glissements de terrain augmente.

5.5 Critères pour la proportionnalité des mesures prises dans une forêt protectrice liée à un cours d'eau

En définissant des mesures dans une forêt protectrice liée à un cours d'eau, les responsables locaux évaluent également la proportionnalité desdites mesures. Les bases à ce sujet se trouvent à l'annexe 4, chapitre 2, du document « Gestion durable des projets de protection » (mode d'emploi du formulaire 2). Une forêt protectrice liée à un cours d'eau présente quelques particularités :

- Elle protège les personnes et les valeurs matérielles non de manière directe, mais du fait qu'elle réduit l'apport de matériaux solides dans le cours d'eau.
- Les matériaux et le bois flottant provenant de la pente bordant le cours d'eau n'atteignent pas nécessairement ce dernier. En effet, la pente peut par exemple présenter des zones plus plates, qui ne peuvent donner lieu à un apport de matériaux dans le ruisseau.
- Le bois et les matériaux peuvent être déposés sur les tronçons plats des cours d'eau, ce qui réduit le danger que des matériaux situés en amont soient transportés vers des points faibles.
- Intervenir dans une forêt protectrice liées à un cours d'eau peut être très coûteux si la forêt est mal desservie. Aussi faut-il analyser soigneusement le rapport entre les coûts et l'utilité de l'intervention.
- La menace provient souvent de points faibles aux dimensions inadéquates (voûtages très étroits, p. ex.). Selon les circonstances, il peut être disproportionné de prendre des mesures sylvicoles pour y remédier.

En raison de ces particularités, il est important d'évaluer soigneusement la proportionnalité des mesures envisagées dans une forêt protectrice liée à un cours d'eau. Les critères déterminants sont notamment la situation locale sur la surface d'intervention, le tracé longitudinal du cours d'eau et les points faibles pertinents en matière de dommages. D'autres critères pouvant avoir de l'importance pour l'évaluation de la proportionnalité figurent dans la liste de contrôle (tableau 2).

Si une surface ne présente qu'un danger modeste de transport de bois et de matériaux dans le cours d'eau, elle se prête bien à la préservation de la biodiversité dans la forêt protectrice. Par exemple, il est possible de laisser davantage de bois mort (sur pied ou au sol) à cet endroit que dans le reste de la forêt protectrice (voir « Gestion durable des forêts protectrices », annexe 7).

Bibliographie

- Bezzola G. R., Hegg C. (éd.) (2007) : Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). *Connaissance de l'environnement* n° 0707 : 215 p.
- Bezzola G.R., Hegg C. (éd.) (2008) : Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). *Connaissance de l'environnement* n° 0825 : 429 p.
- Covi, S. (2008) : Nachhaltiger Schutzwald entlang von Fließgewässern. *Journal forestier suisse* 159 (7) : 198-204.
- Frei, M., Frick, E., Ammann, M., Jörg, P., Lanker, S., Bigger, T. (2017) : Beurteilung von Gerinneabhängungen. Fallbeispiel Schmittenbach. Rapport final à l'attention de l'OFEV, non publié. 134 p.
- Frick, E., Niederer, K., Zahner, F., Jörg, P., Amman, M., Lanker, S. (2018) : Überarbeitung NaiS Fallbeispiele Murgang. Rapport final à l'attention de l'OFEV, non publié. 134 p.
- Gasser, E., Perona, P., Dorren, L., Phillips, C., Hübl, J., Schwarz, M. (2020) : A New Framework to Model Hydraulic Bank Erosion Considering the Effects of Roots. *Water* 2020, 12, 893 ; doi:10.3390/w12030893
- Gertsch, E., Lehmann, C., Spreafico, M. (2012) : Methods for the Estimation of Erosion, Sediment Transport and Deposition in Steep Mountain Catchments. A contribution to the International Sediment Initiative of UNESCO/International Hydrological Programme. International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin, Report No II-21, 69 p.
- Hunziker, G., Berger, C., Berwert-Lopes, J. (2019) : Skript Modul WILDBÄCHE. Praxiskurs Gefahrenbeurteilung gravitative Naturgefahren. *Spécialistes des dangers naturels (FAN)*. V.0.1, 43 p.
- Ingenieure Bart AG (2016) : Beurteilung von Gerinneabhängungen – Weiterentwicklung von NaiS. Fallbeispiel Fluppibach, Kanton St. Gallen. Rapport final à l'attention de l'OFEV, non publié. 101 p.
- Lange, B., Lüscher, P., Germann, P., Bronstert, A. (2012) : Baumwurzeln und Infiltration. *Forum für Wissen* 2012 : 83-90.
- Lange, D., Bezzola G.R. (2006) : Schwemmholz. Probleme und Lösungsansätze. *Mitteilungen VAW*, 188, 135 p.
- Losey, S., Wehrli, A. (2013) : Forêt protectrice en Suisse. Du projet SilvaProtect-CH à la forêt protectrice harmonisée. Office fédéral de l'environnement, Berne. 29 p. et annexes.
- OFEV (éd.) 2019 : Bois flottant dans les cours d'eau. Un projet de recherche à vocation pratique. Office fédéral de l'environnement, Berne. *Connaissance de l'environnement* n° 1910 : 100 p.
- Rickenmann, D. (1995) : Beurteilung von Murgängen. *Schweizer Ingenieur und Architekt* 48, 1104-1108.
- Rickli, C., Bucher, H. (2006) : Einfluss ufernaher Bestockung auf das Schwemmholzvorkommen in Wildbächen. Rapport de projet du 22.12.2006 à l'attention de l'OFEV. 94 p.
- Schwarz, M., Hilfiker, K., Dazio, E., Soldati, M. (2018) : Was bringen Entlastungsschläge in rutschgefährdeten Hängen ? *Wald und Holz*, 2/18, 16-19.

Schwitter, R., Bucher, H. (2009) : La forêt protège-t-elle contre les crues ou les arbres causent-ils eux-mêmes des inondations ? La forêt, 10/09, 21-25.

Spreafico, M., Lehmann, Ch., Naef, O. (1996) : Recommandations concernant l'estimation de la charge sédimentaire dans les torrents. Groupe de travail pour l'hydrologie opérationnelle, communication n° 4, Berne.

Wasser, B., Perren, B., Fehr, S. (2016) : Weiterentwicklung NaiS – Beurteilung von Gerinneabhängigkeiten. Bericht zum Fallbeispiel «Rickebach», Kanton Luzern. Rapport final à l'attention de l'OFEV, non publié. 48 p.

Tableau 2 :

Liste de contrôle pour la détermination de mesures sylvicoles relatives à une forêt protectrice liée à un cours d'eau. Le lieu de la surface d'intervention (zone 1 ou 2) et la situation locale déterminent la pertinence des étapes d'évaluation et l'importance des questions clés ou d'autres aspects.

Étape d'évaluation	Lieu	Questions clés possibles	Bases / information
1 Importance globale du bassin versant (pertinent pour les zones 1 et 2)	Tout le bassin versant	<ul style="list-style-type: none"> • Quelles exigences la protection de la nature, la pêche et autres posent-elles au cours d'eau ? 	<ul style="list-style-type: none"> • Services spécialisés cantonaux • Points 5.1 et 5.3.1 dans « Gestion durable des forêts de protection »
2 Caractéristiques du cours d'eau et situation en matière de dangers naturels (pertinent pour les zones 1 et 2) Analyse des processus de dangers naturels, des points faibles et des chaînes de processus pouvant se produire de la surface d'intervention aux points faibles	Bassin versant	<ul style="list-style-type: none"> • Quels processus de dangers naturels se produisent dans le cours d'eau (lave torrentielle, épandage d'alluvions, crues) ? • Quels sont les potentiels en matière de débit de crue, de bois flottant et de charriage ? • Quelle capacité de transport de matériaux et de bois flottant le cours d'eau présente-t-il ? 	<ul style="list-style-type: none"> • Services spécialisés cantonaux • Cartes des dangers, y c. rapports • Cadastre des événements • Discussion avec le personnel de l'aménagement des cours d'eau • Lange & Bezzola 2006 • OFEV 2019 • Points 5.3.2 et 5.3.4 dans « Gestion durable des forêts de protection »
	Points faibles	<ul style="list-style-type: none"> • Quels processus de dangers naturels sont susceptibles de causer des dommages (lave torrentielle, épandage d'alluvions, bois flottant) ? • Quels sont les points faibles où des dommages peuvent prendre naissance et quelles caractéristiques présentent-ils (profil d'écoulement, piles de pont, etc.) ? • Quel est le risque d'embâcle aux points faibles ? • Quelle est la longueur maximale du bois flottant tolérée aux points faibles ? • Quel bien à protéger est concerné ? 	
	Cours d'eau entre les surfaces d'intervention et les points faibles	<ul style="list-style-type: none"> • Quelle capacité de transport de matériaux et de bois flottant le cours d'eau présente-t-il de la surface d'intervention aux points faibles ? • Existe-t-il, entre la surface d'intervention et les points faibles, des tronçons de déviation et de dépôts empêchant le bois / les matériaux d'être transporté(s) plus loin ? 	
	Surface d'intervention	<ul style="list-style-type: none"> • Quelle est la déclivité et la largeur du lit ? • À quelle hauteur se trouve le seuil de crue ou de lave torrentielle ? • Quelle est l'érosion du cours d'eau en cas de crue ou de lave torrentielle (érodibilité du fond du lit, érosion linéaire, érosion des berges) ? • À quelle profondeur se situe la couche de glissement en cas de glissement de berge ? Se trouve-t-elle dans la zone racinaire principale ou en dessous ? • Quels processus transportent des matériaux et du bois flottant dans le cours d'eau ? • Le bois flottant et les matériaux provenant de la surface d'intervention peuvent-ils arriver jusqu'au cours d'eau et, de là, atteindre un point faible pertinent pour les dommages (processus de dangers naturels, capacité de transport, tronçons de déplacement des matériaux, etc.) ? 	

Étape d'évaluation	Lieu	Questions clés possibles	Bases / information
3 Effet des arbres dans la zone 1	Surface d'intervention	<ul style="list-style-type: none"> • Quelle protection les arbres et les buissons de différentes tailles offrent-ils contre l'érosion, les glissements de berge et les affouillements ? • Quel est le danger que des arbres tombent dans le ruisseau (apport de bois flottant) en cas d'érosion, d'affouillement ou de glissement de berge lors d'un événement ? 	<ul style="list-style-type: none"> • OFEV 2019 • Discussion avec le personnel de l'aménagement des cours d'eau <p>Point 5.3.3 dans « Gestion durable des forêts de protection »</p>
4 Exigences, objectifs sylvicoles et nécessité d'intervenir dans la zone 1 Définition d'objectifs sylvicoles, évaluation de l'état de la forêt, identification d'une nécessité d'intervenir, évaluation de la proportionnalité	Surface d'intervention	<ul style="list-style-type: none"> • Quelles essences sont adaptées aux conditions de la station et doivent être favorisées ? • Quelles exigences sont posées par la situation en matière de dangers naturels (étapes d'évaluation 2 et 3) ? • Quelles sont les exigences de stabilité ? • Comment faut-il gérer le bois au sol dans la zone d'écoulement des laves torrentielles ou des crues (évacuation, tas de branches, sciage) ? • Quels problèmes les néophytes peuvent-ils causer et comment les prévenir ? • À quoi doit ressembler l'état visé (compte tenu des étapes d'évaluation 1 à 3) ? • Quel est l'état actuel de la forêt et comment évoluerait-il en l'absence de mesures ? • Quelles mesures efficaces et proportionnées permettraient d'atteindre l'état visé ? • Y a-t-il nécessité d'intervenir ? • L'intervention prévue est-elle proportionnée (compte tenu de la chaîne de processus pouvant se produire à partir de la surface d'intervention au bien à protéger, étape d'évaluation 2) ? 	<ul style="list-style-type: none"> • Discussion entre les responsables des services forestiers et de l'aménagement des cours d'eau • Discussion avec les services cantonaux de la pêche et de la protection de la nature • Annexe 7 de « Gestion durable des forêts de protection » (bois jonchant le sol) • Lange & Bezzola 2006 • OFEV 2019 • Stratégies cantonales relatives à la gestion des néophytes <p>Points 5.3.5, 5.3.6, 5.5 et annexe 4 dans « Gestion durable des forêts de protection »</p>
5 Identification d'une nécessité d'intervenir dans la zone 2	Surface d'intervention	<ul style="list-style-type: none"> • Quelle est la nécessité d'intervenir d'après le formulaire 2 ? • Est-ce que l'intervention prévue est proportionnée (compte tenu de la chaîne de processus pouvant se produire de la surface d'intervention au bien à protéger, étape d'évaluation 2) ? 	<ul style="list-style-type: none"> • Site Internet www.nais-form2.ch <p>Points 5.4, 5.5 et annexe 4 dans « Gestion durable des forêts de protection »</p>