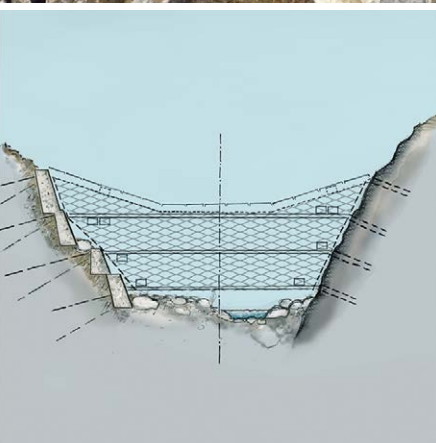




Rapport 114, 2021

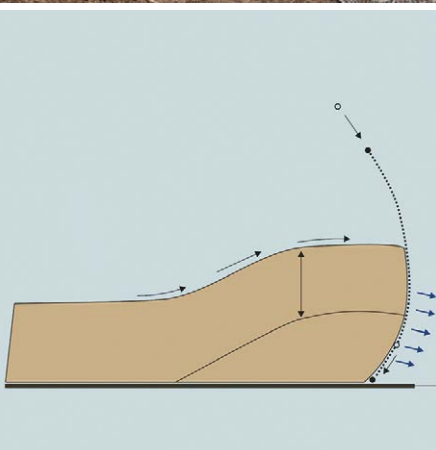
WSL Berichte

ISSN 2296-3456



Guide pratique pour les filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue

Sur mandat de l'Office fédéral des routes OFROU
et de l'Office fédéral de l'environnement OFEV



Catherine Berger
Matthias Denk
Christoph Graf
Lisa Stieglitz
Corinna Wendeler



Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le
paysage WSL, CH-8903 Birmensdorf

Rapport 114, 2021

WSL Berichte

ISSN 2296-3456

Guide pratique pour les filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue

Sur mandat de l'Office fédéral des routes OFROU
et de l'Office fédéral de l'environnement OFEV

Catherine Berger
Matthias Denk
Christoph Graf
Lisa Stieglitz
Corinna Wendeler

Responsable de la série de publications
Institut fédéral de recherches WSL

Responsable de ce numéro
Dr. Manfred Stähli, chef de l'unité de recherche hydrologie des montagnes et mouvements de masse

Rédaction en chef: Sandra Gurzeler, cheffe d'équipe publications, WSL

Mandant
Office fédéral des routes OFROU, CH-3003 Berne
Office fédéral de l'environnement OFEV, CH-3003 Berne

Auteurs
Berger Catherine, geo7 SA
Denk Matthias, Company200 Matthias Denk
Graf Christoph, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL
Stieglitz Lisa, Emch+Berger SA, Berne
Wendeler Corinna, canton d'Appenzell Rhodes-Extérieures, département des eaux

Groupe d'accompagnement
Albaba Adel, Haute école spécialisée bernoise BFH; Arnold Philippe, Office fédéral des routes OFROU; Baumann Reto, Office fédéral de l'environnement OFEV; Egli Thomas, Egli Engineering SA; Feiger Nadine, Geobrug SA; Gertsch-Gautschi Eva, Office fédéral de l'environnement OFEV; Hählen Nils, canton de Berne, Service des dangers naturels; Salvetti Andrea, canton du Tessin, Département du territoire; Schertenleib Adrian, Office fédéral de l'environnement OFEV; Toniolo Marco, MT Swiss GmbH, Maccaferri; Volkwein Axel, Pfeifer Isofer SA; von Boetticher Albrecht, Staubli, Kurath & Partner SA

Relecteurs version originale (en allemand): Dieter Rickenmann, WSL; Manfred Stähli, WSL
Mise en page: Jacqueline Annen, WSL

Proposition de citation
Berger, C.; Denk, M.; Graf, C.; Stieglitz, L.; Wendeler, C., 2021: Guide pratique pour les filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue. Sur mandat de l'Office fédéral des routes OFROU et de l'Office fédéral de l'environnement OFEV. WSL Ber. 114. 79 p.

ISSN 2296-3448 (imprimé)
ISSN 2296-3456 (en ligne)

Illustrations et graphiques: Denis Rochat, Emch+Berger SA, Berne
Traduction: Matthias Denk, Company200 Matthias Denk
Révision linguistique et technique de la traduction: Nadia Benyahia, Triform SA; Niki Beyer Portner, Sabert SA

Photos de couverture
En haut: Trachtbach près de Brienz, photo [G] / Au centre: Baltisberg près d'Arth, photo [H] /
En bas: Gempelegrabe près de Frutigen, photo [G].

Clause de non-responsabilité
Ce rapport (version originale en allemand) a été commandé par l'Office fédéral des routes OFROU et l'Office fédéral de l'environnement OFEV. Les auteurs sont les seuls responsables du contenu. Les auteurs et les traducteurs déclinent toute responsabilité en cas de dégâts matériels ou corporels de quelque nature que ce soit, survenant en dépit, à la suite ou en relation avec le respect et l'emploi de ce guide pratique. Toute personne qui observe ou applique cette publication accepte l'exclusion de la responsabilité.

Une recherche au service de l'homme et de l'environnement: L'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL assure le suivi et l'étude de la forêt, du paysage, de la biodiversité, des dangers naturels, de la neige et la glace. Cet organisme de recherche de la Confédération Suisse appartient au domaine des EPF. L'Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF fait partie du WSL depuis 1989.

© Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL
Birmensdorf, 2021

Table des matières

Résumé	5
Partie générale	7
1 Introduction	7
1.1 Contexte et objectif du guide pratique	7
1.2 Processus de dangers naturels pris en compte	7
1.3 Contenu et structure du guide pratique	8
2 Procédures d'approbation et responsabilités	9
2.1 Procédure d'approbation des barrières à filet	9
2.2 Organismes impliqués, compétences et responsabilités	9
3 Emploi des filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue	11
3.1 Capacité de charge des systèmes standards	11
3.1.1 Disposition technique d'un filet de protection contre les laves torrentielles	11
3.1.2 Disposition technique d'un filet de protection contre les coulées de boue	11
3.1.3 Documents requis pour les produits	13
3.2 Aptitude au service et durabilité	13
3.2.1 Exigences générales	13
3.2.2 Exigences pour ancrages et fondations	13
3.2.3 Exigences pour la superstructure	14
3.3 Prise en compte des conditions locales dans la planification	14
3.3.1 Conception et disposition sur le terrain	14
3.3.2 Conditions écologiques et écomorphologiques	15
3.4 Surcharge des barrières à filet	16
4 Dégâts sur les barrières à filet et prévention	17
4.1 Vue synoptique des dégâts	17
4.2 Dégâts et mesures de prévention	18
5 Aide à la décision pour la planification des barrières à filet	21
5.1 Schéma décisionnel	21
5.2 Évaluation qualitative des barrières à filet par rapport à des ouvrages rigides	21
5.3 Possibilités d'utilisation des barrières à filet	23
5.4 Questions fréquemment posées sur les barrières à filet (FAQ)	23
Partie technique	27
6 Élaboration de scénarios et dimensionnement des paramètres du système	27
6.1 Élaboration de scénarios pour les laves torrentielles et les coulées de boue	27
6.2 Conception des filets de protection contre les laves torrentielles	28
6.2.1 Hauteur utile résiduelle	28
6.2.2 Revanche hydraulique	28
6.2.3 Ouverture de base	29
6.2.4 Volume de rétention	29
6.2.5 Débordement	30
6.3 Conception des filets de protection contre les coulées de boue	30
6.3.1 Hauteur utile résiduelle	30
6.3.2 Volume de rétention	30
6.3.3 Débordement	31
6.3.4 Contournement	31
7 Dimensionnement	33
7.1 Concept de sécurité	33
7.2 Modèles de charges	34
7.2.1 Filets de protection contre les laves torrentielles	34
7.2.1.1 Modèle de charge quasi-statique	34
7.2.1.2 Impact d'un bloc isolé	36

7.2.2	Filets de protection contre les coulées de boue	36
7.2.2.1	Modèle de charge quasi-statique	36
7.2.2.2	Modèle d'interaction fluide-structure (modèle FSI)	37
7.3	Dimensionnement des composants	39
7.3.1	Câbles porteurs	39
7.3.2	Haubans amont et piliers	40
7.3.3	Filet de protection	40
7.3.4	Ancrages et fondations	42
7.3.5	Fondations des piliers	42
7.3.6	Exemple de conception structurelle des fondations	42
8	Inspection et entretien	45
8.1	Conditions de base	45
8.2	Outils dédiés aux inspections des filets de protection	45
8.3	Mesures à mettre en place après un événement	45
8.4	Purge des filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue	47
9	Ouvrages spéciaux	49
10	Processus de dimensionnement	51
11	Conclusion et perspectives	53
12	Répertoires	55
	Glossaire	55
	Liste des abréviations	56
	Symboles	57
13	Bibliographie et crédits photographiques	60
Annexe A	Exemple de dimensionnement	63
Annexe B	Fiches signalétiques des ouvrages spéciaux	69
Annexe B.1	Filet à câbles suspendus, torrent Hüpach	69
Annexe B.2	Barrières à plusieurs niveaux, torrent Trachtbach	70
Annexe B.3	Ouvrage à filet avec murs en béton longitudinaux, torrent Grönbach	71
Annexe B.4	Ouvrage à filet avec piliers en béton, torrent Innere Sitebach	72
Annexe B.5	Ouvrage d'appoint avec ajout d'une barrière à filet, torrent Illgraben	73
Annexe B.6	Protection contre l'érosion et ouvrage de filtration, torrent Durschtbach	74
Annexe B.7	Ouvrage pour charges combinées dans le secteur Baltisberg/Härzigtwald	75
Annexe B.8	Filet de protection contre le bois flottant, torrent de la Chiene	76
Annexe C	Listes des éléments de contrôle pour l'inspection et l'entretien	77
Annexe C.1	Listes des éléments de contrôle pour les inspections régulières	77
Annexe C.2	Listes des éléments de contrôle en cas d'événement	79

Résumé

Les laves torrentielles et les coulées de boue mettent en danger les personnes et les biens dans les régions montagneuses. Dans le cadre de la gestion intégrée des risques, des mesures de protection structurelles, organisationnelles ou du génie biologique peuvent être envisagées, en plus de la prise en compte des dangers naturels dans l'aménagement du territoire. La brièveté des délais d'alerte pour les laves torrentielles et les coulées de boue, leur impact élevé ainsi que les forces destructrices correspondantes sont des raisons suffisantes pour que les mesures structurelles doivent assumer une fonction de protection importante.

Les filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue ne sont disponibles sur le marché suisse que depuis quelques années et complètent l'éventail des mesures possibles. Ce type de protection se caractérise par la perméabilité des filets qui retiennent les matériaux solides les plus grossiers tout en laissant passer l'eau et les matériaux en suspension, et drainent ainsi les laves torrentielles et les coulées de boue. En plus de la rétention du charriage, il existe d'autres possibilités d'utilisation des barrières à filet, notamment pour la stabilisation d'un lit de torrent ou pour dévier le processus de danger.

Lors de la planification des mesures de protection, il est important que les avantages et les inconvénients des différents types d'ouvrages soient présentés de manière transparente et évalués en fonction du contexte local. Les filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue constituent des mesures relativement nouvelles, c'est la raison pour laquelle l'expertise en la matière est encore limitée. Une expérience complète et de longue date en cas d'événement ainsi que le savoir-faire nécessaire en matière de planification, de mise en œuvre, d'entretien et de maintenance, font en effet encore défaut. Le présent guide pratique a pour objectif de combler ce manque de connaissances et de montrer aux projecteurs, aux autorités et aux maîtres d'ouvrages l'étendue de l'expérience déjà acquise en la matière. Pensé par des praticiens pour les praticiens! – tel est le mot d'ordre de ce guide.

Le guide est divisé en deux parties: une partie générale et une partie technique. Il s'adresse à un public orienté à la fois général et technique, et donne un aperçu de l'étendue des connaissances en matière de filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue en Suisse. L'accent est mis sur les processus de danger naturel gravitationnel des laves torrentielles et des coulées de boue ainsi que sur les systèmes standards, portant un label CE, pour barrières à filet.

La partie générale décrit les conditions-cadres importantes, telles que les procédures d'homologation et les responsabilités et montre comment sont conçues et fabriquées les barrières à filet. Cette partie se concentre sur les aspects de capacité de charge, d'aptitude au service, de durabilité, de cas de surcharge et de conditions locales. Sont ensuite décrits les dégâts possibles et leurs causes, ainsi que la manière de les prévenir. Un diagramme d'aide à la décision résume les aspects les plus importants de la partie générale, examine les avantages et inconvénients et répond aux questions fréquemment posées.

Dans la partie technique, l'élaboration de scénarios pour les processus de laves torrentielles et de coulées de boue est brièvement abordée, suivie d'explications sur les détails spécifiques aux barrières à filet. Ces détails portent sur la conception des barrières à filet, notamment concernant la hauteur utile résiduelle ou l'ouverture de base des filets de protection contre les laves torrentielles. Le dimensionnement des barrières à filet est basé sur un concept de sécurité et des modèles de charge. La conception des composants individuels est expliquée en détail. Comme pour tous les ouvrages de protection, l'inspection et l'entretien sont essentiels pour une utilisation sur le long terme. Les aspects clés relatifs aux barrières à filet sont ainsi décrits en conséquence. Des ouvrages spéciaux élargissent les champs d'applications des barrières à filet et des exemples choisis sont illustrés et présentés. Un diagramme de la procédure de conception des barrières contre les coulées de boue et les laves torrentielles sert de support à un dimensionnement spécifique et résume la partie technique de ce guide pratique.

Partie générale

1 Introduction

1.1 Contexte et objectif du guide pratique

Les laves torrentielles et les coulées de boue mettent en danger les personnes et les biens en de nombreux endroits des Alpes et des Préalpes suisses. Les mesures de protection jouent un rôle important dans la gestion intégrée des dangers naturels [30]. En plus de la prise en compte des dangers naturels dans la planification territoriale, des mesures de protection structurelles ou organisationnelles peuvent être envisagées. Des mesures du génie biologique, comme le reboisement, complètent l'éventail des mesures de protection possibles. L'imprévisibilité du moment et du lieu d'occurrence ainsi que la soudaineté de l'apparition des laves torrentielles et des coulées de boue imposent des mesures structurelles garantissant une fonction de protection importante. En raison de leurs densités et de leurs vitesses élevées, ces deux processus de dangers naturels peuvent exercer une forte **pression d'impact** sur les ouvrages.

Les filets de protection contre les chutes de pierres et les avalanches sont des mesures structurelles créées et utilisées depuis longtemps. Les filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue ne sont disponibles sur le marché que depuis quelques années et ont permis d'élargir l'éventail des mesures possibles. Ces derniers types de filet se caractérisent par le fait que les matériaux solides des laves torrentielles et des coulées de boue sont retenus et que l'eau s'écoule au travers des filets, ou plus précisément que les matériaux retenus sont drainés après un certain temps. En plus de la rétention des charriages, il existe d'autres possibilités d'utilisation des **barrières à filet**, par exemple pour stabiliser le lit d'un cours d'eau ou pour dévier le processus de danger naturel en question. Les barrières à filet se caractérisent notamment par leur comportement flexible sous charge et, par rapport aux méthodes de construction rigides classiques telles que les ouvrages en béton, par des coûts d'installation plus faibles et des efforts de montage réduits. D'autres aspects tels que l'entretien, l'accessibilité, la **durée de vie**, le domaine d'application et les détails de la construction, sont des éléments décisifs qui doivent être pris en compte lors de la conception des filets. Il est donc important de connaître les avantages et inconvénients des barrières à filet ainsi que les limites de leur application. Sur cette base, il est possible de déterminer un système de mesures ciblé et économique. Cependant, une expérience vaste et de longue date en cas d'événement ainsi que le savoir-faire nécessaire en matière de planification, de mise en œuvre, d'entretien et de maintenance font encore défaut à ce jour.

Ce guide pratique a pour but de combler ce manque de connaissances et de montrer aux projeteurs, aux autorités et aux maîtres d'ouvrages l'étendue de l'expérience déjà acquise en ce qui concerne les barrières à filet lors d'un événement, mais également en matière de dimensionnement, de mise en œuvre, d'entretien et de maintenance. En plus des informations techniques détaillées et des informations complémentaires issues de la pratique, une attention particulière est portée aux risques et aux opportunités d'utilisation et de mise en œuvre des barrières à filet. Pensé par des praticiens pour les praticiens! – tel est le mot d'ordre de ce guide pratique.

1.2 Processus de dangers naturels pris en compte

Ce guide pratique se concentre sur les processus de dangers naturels gravitationnels des laves torrentielles et des coulées de boue. Les laves torrentielles sont des mélanges à écoulement rapide de matériaux solides (charriage et bois flottant) et avec des proportions variables d'eau dans des torrents à forte pente. Le débit augmente brusquement, formant un front de lave torrentielle avec une forte concentration de solides, et se distingue donc clairement de l'écoulement d'eau pure ou du transport en sédiments. De plus, les laves torrentielles sont souvent caractérisées par un écoulement prenant la forme d'une bouffée [21].

Contrairement aux laves torrentielles, les coulées de boue se forment en dehors des torrents, sur des versants ouverts et à forte pente. Elles peuvent se détacher spontanément des couches de sol saturées en eau et s'écouler à des vitesses relativement élevées. Elles peuvent commencer comme des glissements de terrain spontanés de faible à moyenne

profondeur, mais se transforment ensuite en une masse fluide en raison de leur teneur en eau. En termes de caractéristiques d'écoulement, les coulées de boue sont comparables aux laves torrentielles mais sont généralement plus petites en volume [2].

Les **barrières à filet** étant de plus en plus utilisées pour la rétention de bois flottant ces dernières années, un ouvrage spécialement dédié à cette application est présenté dans ce guide pratique. Jusqu'à un certain degré, la résistance à une charge combinée agissant sur des barrières à filet par différents processus gravitationnels peut également être garantie. Ceci doit toutefois être vérifié mathématiquement pour chaque **cas de charge**. Les autres processus de dangers naturels gravitationnels, tels que les chutes de pierres, les avalanches et les inondations, ne sont mentionnés dans le guide pratique que dans la mesure où ils peuvent avoir un effet défavorable sur la stabilité des barrières à filet en fonction de leur emplacement. Ils doivent donc également être pris en compte dans le processus de planification.

1.3 Contenu et structure du guide pratique

Le présent guide pratique donne un aperçu de l'état de la technique des filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue en Suisse. Il est divisé en deux parties, une partie générale et une partie technique, et se concentre sur les aspects techniques et fonctionnels des **barrières à filet**. Les autres exigences (par exemple la protection de la nature et du paysage) ne sont que mentionnées et peuvent être trouvées dans des documents spécifiques, comme dans [4]. Par ailleurs, des connaissances générales sur la planification, la construction, l'entretien et, surtout, l'assurance qualité des mesures de protection sont également requises mais ne sont pas expliquées en détail dans ce guide, sauf lorsque des aspects spécifiques aux filets sont traités.

Dans la partie générale sont d'abord décrites les procédures d'homologation des barrières à filet et les responsabilités correspondantes. Sont ensuite décrites les possibilités de mise en œuvre des filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue ainsi que les dégâts pouvant être occasionnés sur les ouvrages et la façon dont ils peuvent être prévenus. Le diagramme d'aide à la décision résume les aspects les plus importants de la partie générale et des réponses sont apportées aux questions fréquemment posées.

La partie technique comprend des explications sur l'élaboration de scénarios pour les laves torrentielles et les coulées de boue, l'évaluation des **paramètres du système** et le dimensionnement des composants. Elle comprend également des informations sur l'inspection et l'entretien des ouvrages de protection. En général, le guide pratique se concentre sur les systèmes standards, dotés d'un **label CE**, actuellement disponibles en Suisse. Toutefois, comme l'utilisation des barrières à filet peut aller bien au-delà des applications standards, certains ouvrages spéciaux sont décrits et illustrés à titre d'exemple. Des notes sur le processus de dimensionnement résument le contenu de la partie technique.

Les termes importants sont expliqués dans le glossaire et marqués en **gris foncé** et **en gras** dans le texte; les abréviations et les symboles des formules utilisées sont définis dans les répertoires correspondants. Pour toute lecture complémentaire, veuillez vous référer à la bibliographie.

Le terme «**barrière à filet**» est utilisé pour différents processus de danger et types de construction et se réfère ainsi aux filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue en général. Le terme «**types de filet**» est utilisé pour décrire des ouvrages de la même **famille de processus**, étant toutefois conçus pour différents types d'impacts ou de **cas de charge** (par exemple, dans la famille de processus des filets de protection contre les laves torrentielles: les **types de filet** conçus pour des capacités de charge de 60 kN/m² ou 180 kN/m²).

Les fabricants de barrières à filet ne cessent de faire évoluer les systèmes standards disponibles sur le marché. A ce jour, de nombreux systèmes standards et plusieurs ouvrages spéciaux ont été réalisés en Suisse, et certains d'entre eux ont déjà fait leurs preuves en cas d'événements. Le guide pratique reflète l'état de la situation en juillet 2020. Les informations actualisées peuvent être consultées sur la page d'accueil de ce guide pratique (www.wsl.ch/guide-pratique-filets-de-protection-laves-torrentielles-coulees-de-boue) ou obtenues directement auprès des fabricants de barrières à filet. Si nécessaire, des informations actualisées sur l'état de la technique ou des résultats de recherche seront également publiées sur la page Internet précitée.

2 Procédures d'approbation et responsabilités

2.1 Procédure d'approbation des barrières à filet

En utilisant un produit de construction certifié et approuvé, le maître d'ouvrage et le projeteur bénéficient d'une performance standardisée et d'une garantie de qualité [6]. Il est important que les étiquettes, labels et documents fournis avec le produit soient soigneusement classés, car les documents originaux doivent être présentés comme preuve en cas de plainte.

Jusqu'à présent, aucune norme harmonisée pour les **barrières à filet** sous charge de lave torrentielle ou de coulées de boue n'est disponible à travers le monde. Il est possible, au sein de l'Union Européenne, de faire évaluer les propriétés des produits de construction en dehors du champ d'application des normes existantes. L'organisme responsable de cette évaluation est l'Organisation européenne pour l'évaluation technique (abréviation anglaise: EOTA). En coopération avec un demandeur, l'EOTA élabore une procédure d'évaluation, décrite dans un document d'évaluation (European Assessment Document, EAD). Une fois l'EAD validé par l'EOTA, les fabricants de produits de construction peuvent demander que leurs produits ou familles de produits spécifiques soient évalués. Le résultat est ce que l'on appelle une évaluation technique européenne (European Technical Approval, ETA). Comme pour les EAD, les ETA actuelles sont listées sur le site web de l'EOTA (<https://www.eota.eu>).

Pour les filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue, l'EAD n° 340020-00-0106 a été publié sur le site de l'EOTA en juin 2016 [12]. Sur la base de cet EAD, les organismes d'homologation (exemple: l'EMPA en Suisse) peuvent délivrer des évaluations techniques européennes (ETA) pour les filets de protection contre les coulées de boue et les laves torrentielles. L'EAD concerne non seulement les composants individuels du filet et leur disposition mais également les procédures d'essai nécessaires pour les deux **types de barrières** (construites à l'échelle 1:1). Cela permet de mesurer les paramètres d'influence importants devant être déclarés (valeurs caractéristiques essentielles selon [12]). Pour les deux **types de filet**, seules les procédures d'essai à grande échelle sont autorisées. Cependant, si elle est basée sur des essais à grande échelle sur le terrain, une adaptation de la série de produits est également autorisée au moyen de méthodes d'éléments finis calibrés.

La **durée de vie** minimale prévue de 25 ans pour les filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue est non seulement définie dans l'ETA pour le produit spécifique mais également décrite de manière générale dans l'EAD. Ce dernier indique également les organismes d'essai responsables (organismes d'essai, d'évaluation et d'inspection = Organisme d'évaluation de la conformité, OEC) et définit les procédures d'essai. Enfin, sont décrites les tâches du fabricant afin d'assurer la qualité de la production, à savoir la procédure de contrôle de la production en usine (Factory Production Control, FPC). La validité de l'ETA et le contrôle annuel de la production sont des conditions préalables au maintien du **label CE** sur le produit de construction. A l'appui, le fabricant prépare la déclaration de performance (Declaration of Performance DoP) avec toutes les valeurs caractéristiques et la soumet généralement avec le **certificat de conformité** continu du contrôle de la production en usine (certification FPC).

2.2 Organismes impliqués, compétences et responsabilités

Pour garantir la qualité et l'aptitude au service permanentes d'une **barrière à filet** installée sur le terrain, il convient d'impliquer et de responsabiliser un grand nombre d'acteurs: de la production et de la planification jusqu'à l'installation et à l'exploitation de la barrière à filet. Les différentes tâches pouvant incomber aux participants au projet ainsi que des références à d'autres sources d'information sont indiquées dans le tableau 1. Ce n'est que si toutes les parties impliquées sont conscientes de leurs responsabilités respectives que des solutions durables et de haute qualité peuvent être créées et garanties. Il convient de noter que les domaines de responsabilité peuvent varier en fonction du processus de danger naturel, de l'emplacement des mesures et de la constellation du projet. Ils doivent donc être définis sur une base spécifique au projet. De plus amples informations et des spécifications concernant la sylviculture, la pêche, la protection de la nature, la revitalisation, etc., se trouvent dans le Manuel sur les conventions-programmes 2020-24 dans le domaine de l'environnement [4].

Tab. 1. Tâches des experts impliqués et références à d'autres sources d'information.

Agent	Tâche(s), (non exhaustif)	Pour plus de détails, voir
Fabricant	Autocontrôle de la production avec FPC	EAD
	Documentation des filets de protection	EAD, ETA
	Calcul des forces d'ancrages déterminantes	Données du fabricant
	Rapport d'évaluation (preuve des exigences techniques et de la documentation)	EAD, ETA, DoP
	Identification des éléments du filet	EAD, ETA
	Instructions d'emballage et d'expédition	EAD
	Manuel d'installation et supervision de l'installation, y compris la réception technique	Données du fabricant
Organisme d'approbation	Inspection initiale du produit	EAD
	Inspection initiale de l'usine et FPC	EAD
	Contrôle externe périodique par l'OEC	EAD
Autorités	Cadastre des ouvrages de protection	
	Contrôle de la direction générale de travaux	
	Pour plus d'informations, veuillez-vous référer au Manuel sur les conventions-programmes 2020–24 dans le domaine de l'environnement	[4]
Maître d'ouvrage	Définition des objectifs des mesures de protection et des conditions d'utilisation	
	Définition des exigences (exemple: critères de sélection et d'attribution, convention d'utilisation selon SIA)	
	Définition de la classe de protection contre la corrosion des ancrages	
	Travaux de maintenance et d'entretien	
Projeteur	Dimensionnement de la structure en filet de protection	
	Définition du type et du nombre de tests d'ancrage	
	Dimensionnement des ancrages et des fondations	
	Supervision des travaux de construction et contrôle qualité	
Entreprise de construction	Essais sur des échantillons d'ancrage	
	Documentation des travaux de forage et d'injection	
	Construction des fondations et des ancrages	
	Installation des filets	
Associations/ groupes d'intérêt	Implication ponctuelle d'autres groupes d'intérêt	

3 Emploi des filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue

3.1 Capacité de charge des systèmes standards

Les barrières à filet flexibles peuvent résister à des charges dynamiques et statiques élevées. Comme mentionné au chapitre précédent, les informations contenues dans ce guide pratique font référence à des systèmes standards **labelisés CE**. Les ouvrages spéciaux sont abordés au chapitre 9 et décrits plus en détail en annexe B.

Des systèmes standards portant le **label CE** pour les filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue sont disponibles sur le marché auprès de différents fabricants. Les géométries respectives et les capacités de charge des **barrières à filet** garanties par des contrôles indépendants sont décrites dans le tableau 2 et le tableau 3 suivant (état juillet 2020). D'autres développements de la technologie des barrières à filet sont possibles à l'avenir et les valeurs/systèmes actuels doivent être demandés aux fabricants de barrières à filet.

Tab. 2. Géométries et capacités de charge des filets de protection contre les laves torrentielles (état juillet 2020).

Hauteur nominale	Largeur nominale	Pression d'impact	Forces d'ancrage
Jusqu'à	Jusqu'à 15 m (sans piliers)	Jusqu'à 160 kN/m ²	Jusqu'à 350 kN
max. 4.0 m	Jusqu'à 25 m (avec piliers)	Jusqu'à 160 kN/m ²	Jusqu'à 350 kN
max. 6.0 m	Jusqu'à 24 m (avec piliers)	Jusqu'à 180 kN/m ²	Jusqu'à 350 kN

Tab. 3. Géométries et capacités de charge des filets de protection contre les coulées de boue (état juillet 2020).

Hauteur nominale	Largeur nominale	Pression d'impact	Forces d'ancrage
2.0–4.0 m	Jusqu'à 30 m (avec hauban intermédiaire également plus long)	Jusqu'à 150 kN/m ²	Jusqu'à 250 kN

Selon [7], les barrières à filet et autres ouvrages légers de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue ne sont pas considérés comme des ouvrages d'accumulation dans la législation suisse actuelle. Ainsi, les filets de protection contre les coulées de boue ne sont pas soumis à la Loi fédérale sur les ouvrages d'accumulation.

3.1.1 Disposition technique d'un filet de protection contre les laves torrentielles

Le système de support des systèmes standards actuels est constitué de câbles porteurs tendus en travers du torrent, ancrés latéralement dans les berges du torrent. Le filet de rétention est accroché entre les câbles porteurs. L'utilisation des **treillis dits secondaires**, dont les mailles sont plus petites que celles du **filet primaire**, permet également de retenir les matières fines. Deux types de systèmes standards sont actuellement disponibles en Suisse, en fonction de la nature du torrent: les systèmes jusqu'à 15 m de portée pour les sections de torrent étroites et en forme de V et les systèmes jusqu'à 25 m de portée pour les sections de torrent plus larges et en forme de U. Ces derniers sont installés avec un ou plusieurs piliers sur lesquels passent les câbles porteurs. Les différents composants d'un système standard sont représentés sur la figure 1. Une protection appropriée des composants du filet contre la corrosion et l'**abrasion** garantit une **durée de vie** spécifique au produit et des coûts d'entretien relativement faibles par rapport aux structures rigides.

3.1.2 Disposition technique d'un filet de protection contre les coulées de boue

Le filet de protection standard contre les coulées de boue comprend des piliers articulés boulonnés à des fondations en béton. Les piliers sont ancrés dans l'espace de rétention à l'aide

des haubans amont comprenant, si nécessaire, des **éléments d'absorption d'énergie**. Le **filet primaire** est fixé aux câbles porteurs supérieurs et inférieurs. Le **treillis secondaire** destiné à retenir les matières fines est fixé localement au **filet primaire** (plié en forme de soufflet d'accordéon). La **bavette de rétention amont** est montée en supplément sur le câble porteur inférieur et sur le filet primaire et intégrée dans le sol côté amont au moyen d'éléments d'ancrage appropriés. Les différents composants d'un système standard sont représentés sur la figure 2.

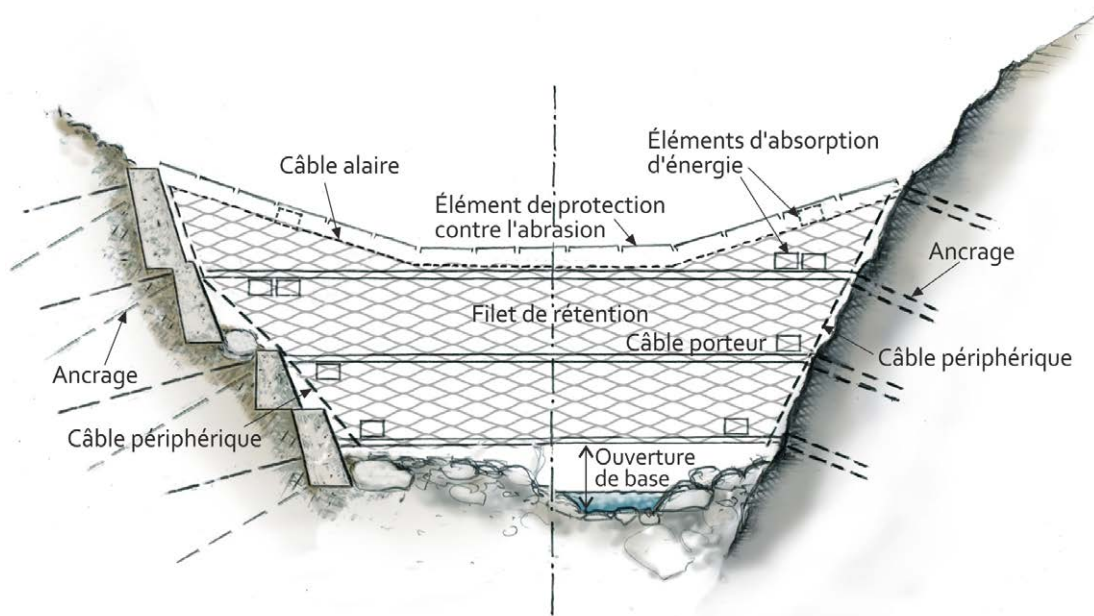


Fig. 1. Vue schématique des composants et de la disposition d'un filet de protection contre les laves torrentielles pour les torrents étroits en forme de V, d'après [12].

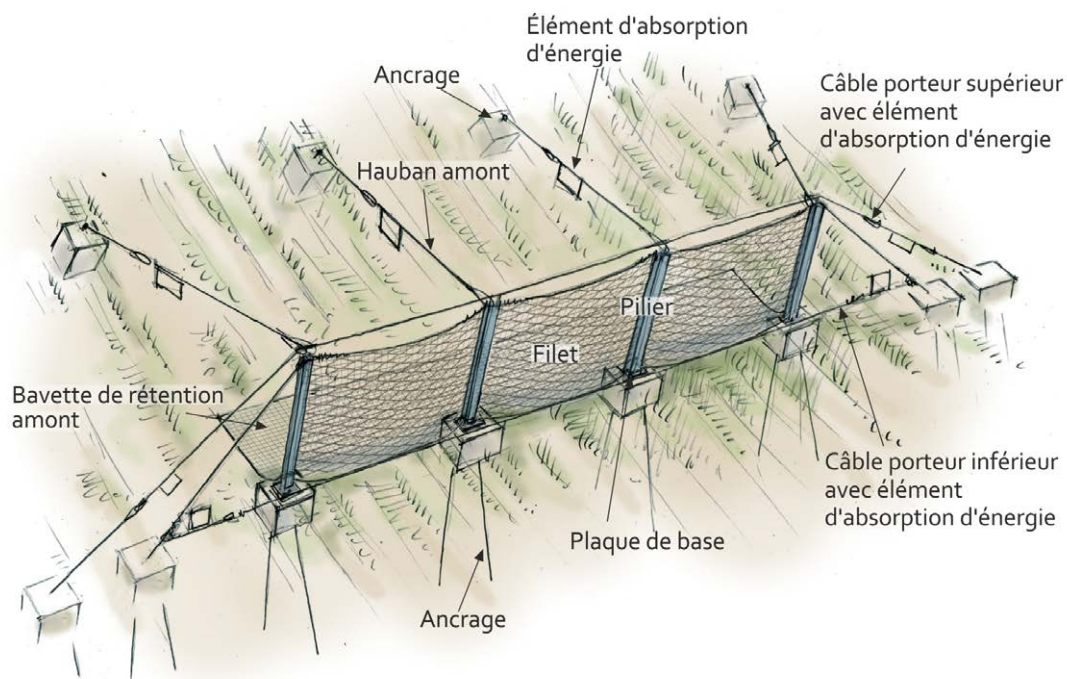


Fig. 2. Vue schématique des composants et de la disposition d'un filet de protection contre les coulées de boue, d'après [12].

3.1.3 Documents requis pour les produits

Les documents suivants sont obligatoires pour les produits en filets et doivent être soumis au maître d'ouvrage:

- manuel du système (spécifique au fabricant);
- manuel d'installation (spécifique au fabricant);
- manuel d'entretien (spécifique au fabricant);
- déclaration de performance (Declaration of Performance DoP) valide du fabricant, de préférence avec **certificat de conformité** continu du contrôle de la production en usine et numéro d'ETA valide.

Il est par ailleurs recommandé de définir au moins l'utilisation de la **barrière à filet** par le biais d'une convention d'utilisation entre le maître d'ouvrage et le projeteur.

3.2 Aptitude au service et durabilité

3.2.1 Exigences générales

Les exigences fondamentales d'aptitude au service et de durabilité sont satisfaites lorsque l'utilisation sans restriction d'un ouvrage pour l'usage prévu et pour la **durée de vie** convenue est assurée à un coût de maintenance raisonnable. Tandis que les vérifications de la sécurité structurale peuvent être réalisées à l'aide de calculs statiques, les exigences en matière d'aptitude au service doivent également être vérifiées sur la base spécifique au projet. En ce qui concerne les **barrières à filet** standardisées, les aspects suivants, entre autres, doivent être pris en compte lors de la vérification de l'aptitude au service:

- forme et position de l'ouvrage global;
- résistance à l'érosion des berges du torrent (pour les filets de protection contre les laves torrentielles);
- protection contre l'affouillement de **l'ouverture de base** (pour les filets de protection contre les laves torrentielles) ou dans la section de déversoir (si conçu pour les débordements);
- résistance à la corrosion de la superstructure et des ancrages, si nécessaire augmentation de la **durée de vie** en choisissant une **classe de protection contre la corrosion** supérieure;
- déficit fonctionnel de l'ensemble de l'ouvrage, par exemple en raison de:
 - déformations de l'ouvrage dans son ensemble;
 - tassements différentiels dus au poids mort ou au basculement des fondations;
 - fissures dans les fondations en béton et réduction consécutive de l'étanchéité;
 - résistance au gel de la structure en béton;
 - réaction des agrégats alcalins de la structure en béton.

Différentes approches de l'aptitude au service et de la durabilité des filets de protection contre les laves torrentielles figurent dans [13], entre autres. Une planification soigneuse, un entretien nécessaire et des inspections régulières des barrières à filet permettent d'éviter un déficit potentiel de durabilité et d'aptitude au service.

3.2.2 Exigences pour ancrages et fondations

Seule la superstructure est incluse dans l'évaluation du produit ETA (voir chapitre 2.1). Lors de la planification et de l'exécution, une grande attention doit donc être portée au dimensionnement et à la construction des ancrages et des fondations. Les conditions pour les ancrages et les fondations sont spécifiques au produit et au site. Dans l'idéal, on dispose d'un profil géologique détaillé du lieu de la barrière et on effectue des essais d'arrachement des ancrages pour déterminer le frottement latéral extérieur du terrain. Ci-après une liste des facteurs déterminants afin d'assurer une transmission de charge permanent des forces résultantes de la superstructure dans le sol:

- données du fabricant sur les forces d'ancrage des barrières à filet, y compris les facteurs de sécurité;
- évaluation des paramètres géotechniques du sol (frottement latéral, etc.);
- utilisation de mortiers d'ancrage homologués (voir la liste des mortiers d'ancrage approuvés selon l'OFEV en [5]), essais de mortier sur place, surveillance de la température de pose du mortier et du temps de durcissement pour l'assurance qualité;

- définition de la **classe de protection contre la corrosion** selon la norme SIA 267 [29] avec le maître d'ouvrage;
- alignement des ancrages en direction des câbles;
- espacement suffisant entre ancrages pour éviter la superposition/réduction de leur rayon d'action;
- utilisation de têtes d'ancrage flexibles pour éviter la réduction de la capacité de charge de l'ancrage;
- éventuellement, utilisation d'ancrages autoforants si le trou de forage n'est pas stable, ou forage tubé avec emploi de **chaussettes en tissu**;
- mise en œuvre d'**injections supplémentaires** de mortier pour obtenir une colonne de mortier d'ancrage reliée solidairement au sol et à l'ancrage;
- protection contre la corrosion, en particulier dans la zone de la tête d'ancrage, si nécessaire avec de petites fondations en béton;
- protection du corps d'ancrage contre l'érosion pour maintenir la longueur d'ancrage requise;
- réalisation d'essais de traction sur les ancrages;
- surveiller la formation de lentilles de glace sur la barre d'ancrage en hiver.

Les longueurs d'ancrage, et donc également les longueurs de forage, dépendent fortement des propriétés du sol. Afin de maintenir les longueurs d'ancrage dans une fourchette techniquement raisonnable et économiquement justifiable, il convient de privilégier les sites d'installation répondant aux exigences suivantes en ce qui concerne le sol:

- roche ou roche meuble, stable, frottement latéral suffisant;
- faible couverture de roches meubles et faible proportion de matières organiques dans la couche de surface;
- pas ou peu de clivages, orientation favorable des éventuelles surfaces de cisaillement;
- pas d'eaux de clivage ou d'eaux interstitielles dans les forages;
- pas de strates géologiques pouvant réagir de manière sensible au forage ou à l'apport de mortier;
- pas de zone de sources.

3.2.3 Exigences pour la superstructure

Pour que l'ouvrage soit pris en compte dans l'aménagement du territoire, une **durée de vie** de 50 ans doit être garantie selon PROTECT [23]. Pour les filets de protection contre les coulées de boue, ladite approche pour une superstructure à **durée de vie** limitée est décrite dans [36]. Le fabricant de la barrière à filet doit fournir la preuve d'une protection adéquate contre la corrosion des composants du filet. Par ailleurs, une construction appropriée et, si l'ouvrage présente un risque de débordement, un élément de **protection contre l'abrasion** spécifique au produit aident à préserver la structure pendant sa durée de vie. Après un événement, la barrière à filet doit être inspectée et, si nécessaire, réparée.

3.3 Prise en compte des conditions locales dans la planification

3.3.1 Conception et disposition sur le terrain

Ci-après, une sélection de points importants à prendre en compte lors de la conception et de la disposition des barrières à filet dans le terrain où le torrent est donnée:

Filets de protection contre les laves torrentielles

- Ne pas disposer de barrières à filet dans les coudes du torrent afin de prévenir l'érosion sur la rive concave. Le cas échéant, des mesures supplémentaires de stabilisation de la berge du torrent sont nécessaires.
- Prendre en compte l'**ouverture de base**.
- Assurer une **protection contre l'abrasion** en cas de débordement éventuel.
- Garantir des voies d'écoulement et une protection appropriée contre l'affouillement en aval des barrières à filet.
- Tenir compte des autres dangers naturels liés au site lors du dimensionnement (exemple: chutes d'arbres, avalanches, etc.)
- Garantir l'accessibilité pour l'entretien et la maintenance.

- Inclure dans les considérations économiques l'augmentation des coûts d'entretien en cas de forte activité des laves torrentielles d'un torrent.
- Développer un concept de gestion des matériaux pour la phase d'exploitation et identifier les sites de dépôt des matériaux.

Filets de protection contre les coulées de boue

- Envisager la mise en place d'une **bavette de rétention amont**.
- Assurer une **protection contre l'abrasion** en cas de débordement éventuel.
- Tenir compte du ruissellement de surface ou de l'évacuation de l'eau de la barrière au moyen d'un drainage ou d'une déviation d'eau.
- Assurer des corridors pour la faune avec des passages et des chevauchements de filets appropriés.
- Adapter la suspension intermédiaire au passage de la faune.
- Vérifier les ravines et les buttes de terrain lors du piquetage.
- Vérifier la profondeur de la surface de glissement par rapport à la longueur de l'ancrage.
- Tenir compte des autres dangers naturels liés au site lors de la conception (exemple: chutes d'arbres, avalanches, etc.).
- Garantir l'accessibilité pour l'entretien et la maintenance.
- Développer un concept de gestion des matériaux pour la phase d'exploitation et identifier les sites de dépôt des matériaux.

Les aspects généraux suivants ont été mis en évidence lors de l'installation de barrières à filet flexibles:

- Les travaux de forage pour les ancrages nécessaires dans la roche ou la roche meuble peuvent être réalisés avec un affût de forage léger et une pelle araignée.
- En raison du faible volume et du poids des éléments d'installation, le matériel peut être transporté sur le site par camion ou par hélicoptère, ce qui s'avère souvent être une solution économiquement viable.
- Les grandes excavations préalables peuvent être évitées.
- Les sites d'installation et de manutention à grande échelle ne sont pas nécessaires.
- La durée des travaux de construction est limitée à quelques mois, tandis que l'installation effective du filet nécessite quelques jours.

3.3.2 Conditions écologiques et écomorphologiques

Visuellement, les **barrières à filet** constituées de structures filigranes s'intègrent relativement bien au paysage. Les filets de protection contre les laves torrentielles, offrant un espace de rétention à **ouverture de base** au-dessus du lit du torrent (voir chapitre 6.2.2), permettent le passage de la plupart des espèces animales et n'entravent pas la mobilité des poissons. Le transport naturel du charriage n'est généralement pas limité par ces barrières à filet et l'état d'origine du lit du torrent est préservé. Si, toutefois, le lit du torrent doit être stabilisé en dessous du filet au moyen d'une rampe en enrochement ou d'autres moyens, la pente du lit et les hauteurs de seuil admissibles de ces ouvrages doivent être respectées afin de permettre la migration piscicole (en consultation avec les autorités compétentes et en fonction de la population piscicole). Si les barrières à filet sont laissées dans le lit du torrent lorsqu'elles sont remplies ou si elles sont remblayées mécaniquement pendant la construction et servent donc à stabiliser le lit en tant qu'ouvrage de seuil, les aspects à considérer relatifs aux impacts écologiques sont les mêmes que ceux pour les autres ouvrages en forme d'escalier ou de seuil.

Les filets de protection contre les coulées de boue ont un impact écologique sur la faune similaire à celui des filets de protection contre les chutes de pierres. Lors de la planification de ces ouvrages linéaires, il faut avant tout tenir compte des passages et des zones de tranquillité pour la faune. Une suspension intermédiaire avec séparation des câbles porteurs doit être adaptée au passage des animaux. Les petits organismes tels que les insectes, les amphibiens, les reptiles et les petits mammifères de type fouines ou souris peuvent passer à travers les mailles des filets sans restriction.

Lors du choix du site d'installation et en fonction du projet, il convient de clarifier si des mesures de planification spéciales sont nécessaires ou non pour des raisons de protection des eaux et de la nature (exemple: utilisation des éléments galvanisés dans les zones de protection ou périodes de fermeture de la chasse). Les exigences en la matière figurent dans la législation actuelle (LEaux, LPN et OACE et [4]).

3.4 Surcharge des barrières à filet

Les mesures techniques sont prévues pour un événement de référence défini lors de la planification des mesures. Des événements plus importants, c'est-à-dire des volumes plus importants ou des charges plus élevées, restent toutefois possibles et ne devraient pas entraîner de défaillance des **barrières à filet** de type effondrement ou de détérioration de la situation initiale avec des quantités de charriage plus importantes. Un éventuel dépassement de l'événement de référence peut entraîner une surcharge, causant alors un dépassement de la capacité de charge ou de la capacité volumique d'une **barrière à filet**. Les composants individuels peuvent être amenés à se rompre (rupture des câbles, des composants du filet, des ancrages, etc.). Une défaillance simultanée, de type effondrement, de tous les composants du système est peu probable. Dans le cas des barrières à filet, le débordement, le contournement latéral d'une barrière ou l'affouillement des berges du torrent peuvent également entraîner une réduction de la fonction de protection d'une barrière à filet (dépassement des limites géométriques du système).

Il est important que les conséquences d'un cas de surcharge soient décrites dans le projet et qu'il soit précisé comment ces dernières peuvent être gérées par des mesures techniques, organisationnelles ou d'aménagement du territoire. Par conséquent, des déclarations spécifiques au projet doivent être faites sur les sujets suivants (sélection):

- Une partie des laves torrentielles ou des coulées de boue se dépose-t-elle en dessous de la barrière à filet ?
- D'autres matériaux peuvent-ils être mobilisées en dessous de l'ouvrage de protection?
- Les matériaux débordants peuvent-ils être évacués sans dégâts?
- La situation s'aggrave-t-elle sensiblement pour l'infrastructure à protéger en cas de surcharge?
- Des mesures structurelles ou de planification supplémentaires sont-elles alors nécessaires?
- Des mesures organisationnelles supplémentaires (exemple: alarmes, points d'intervention, planification d'urgence) sont-elles nécessaires et doivent-elles être prévues?

Toutes les barrières à filet **labélisées CE** ne sont pas couvertes par défaut par leur déclaration de performance:

- Pour la plupart des filets de protection contre les laves torrentielles labélisés CE, le débordement d'une barrière par l'événement de référence est vérifié par des tests sur le terrain et des simulations.
- Les filets de protection contre les coulées de boue ne sont généralement pas dimensionnés pour le débordement.

Si le débordement n'est pas garanti par le fabricant, ce cas doit être considéré et vérifié séparément lors du dimensionnement (voir également les chapitres 6.2.5 et 6.3.3). Des informations sur les déclarations de performance actuelles peuvent être obtenues auprès des fabricants de barrières à filet. Le comportement d'une lave torrentielle, d'une coulée de boue et d'une barrière à filet en cas de débordement (et surtout en cas de surcharge) peut être estimé par une modélisation appropriée.

4 Dégâts sur les barrières à filet et prévention

4.1 Vue synoptique des dégâts

Entre 2007 et l'été 2020, environ 80 filets de protection contre les laves torrentielles et 30 filets de protection contre les coulées de boue ont été installés en Suisse. Ces filets ont permis d'acquérir de l'expérience, d'observer les éventuels dégâts et d'en tirer des leçons. L'expérience a montré que des dégâts sur les éléments du système et une réduction de l'aptitude au service des **barrières à filet** comme représentés sur la figure 3 peuvent se produire.

Les dégâts sur la superstructure des filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue, tels que les ruptures de câbles et de filets, les piliers déformés et autres dégâts similaires, ne devraient se produire dans les barrières à filet certifiées et soigneusement exécutées que quand les valeurs de dimensionnement sont dépassées. Pour cette raison, les dégâts dus à une surcharge ne sont pas traités dans les chapitres suivants.

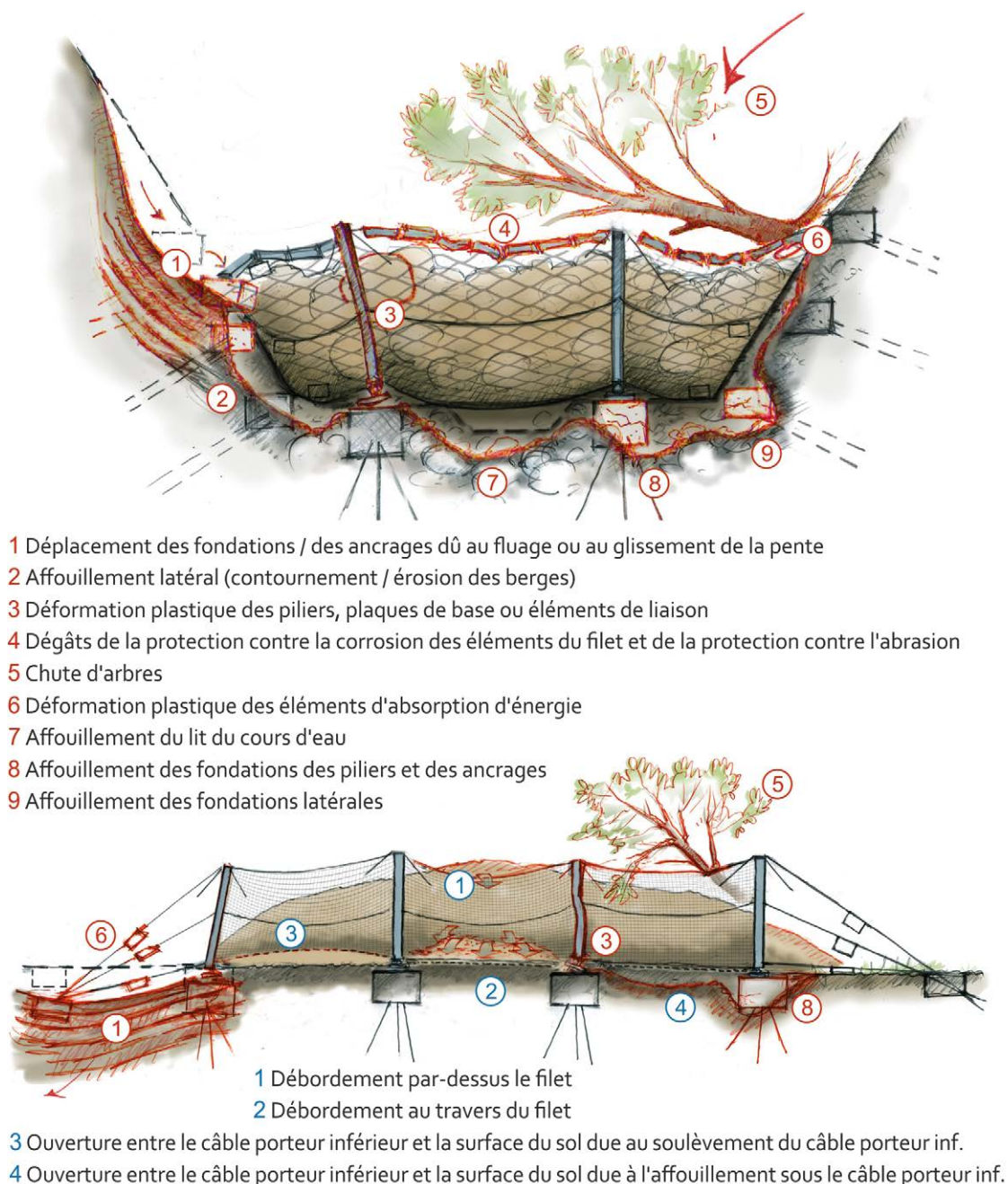


Fig. 3. Vue d'ensemble des dégâts et d'éventuelles pertes d'aptitude au service d'un filet de protection contre les laves torrentielles (en haut) et d'un filet de protection contre les coulées de boue (en bas).

4.2 Dégâts et mesures de prévention

La plupart des dégâts et des pertes d'aptitude au service des **barrières à filet** décrits sur la figure 3 peuvent être évités grâce à une planification, conception, disposition et une construction de qualité. Les déformations élastiques et plastiques des barrières à filet, en particulier des **éléments d'absorption d'énergie**, font partie du comportement sous charge des barrières à filet et sont nécessaires au bon fonctionnement du système. Ces éléments peuvent être remplacés après un événement (voir également le chapitre 8). Le tableau 4 montre les différents types de dégâts ainsi que les éventuelles pertes d'aptitude au service et décrit les mesures de prévention possibles.

Tab. 4. Dégâts possibles et mesures de prévention.

Dégâts sur les composants du système en raison de déformations, endommagement de la protection contre la corrosion



Dégât

Endommagement de la protection anti-corrosion de composants individuels dû à l'abrasion, à l'exemple des éléments de **protection contre l'abrasion** d'un filet de protection contre les laves torrentielles.

Mesures de prévention

La prévention n'est possible que dans une mesure limitée car l'abrasion se produit toujours pendant le débordement. Les parties du filet et les éléments de protection contre l'abrasion peuvent généralement être remplacés s'ils sont endommagés. Image: [B]



Dégât

Élément d'absorption d'énergie déformé plastiquement, à l'exemple d'un filet de protection contre les coulées de boue.

Mesures de prévention

Aucune. Dans le cas des **éléments d'absorption d'énergie**, la déformation plastique fait partie du comportement du système sous charge et est nécessaire au bon fonctionnement du système. Les éléments d'absorption d'énergie déformés plastiquement peuvent être remplacés. Image: [D]



Dégât

Déformation plastique des piliers, des plaques de base ou de leurs éléments de liaison, à l'exemple d'un filet de protection contre les coulées de boue.

Mesures de prévention

Si nécessaire, renforcement des profils de piliers, des plaques de base et des éléments de liaison. Les piliers, les plaques de base et les éléments de liaison déformés plastiquement peuvent être remplacés après un événement. Pour la disposition d'une fondation en béton correctement ancrée à l'arrière, voir Figure 16. Image: [D]



Dégât

Basculement de la fondation du pilier (côté droit de l'image) avec cisaillement consécutif de la plaque de base, à l'exemple d'un filet de protection contre les coulées de boue.

Mesures de prévention

Intégration suffisante des fondations dans le sol ainsi qu'intégration suffisante des micropieux (ancrages de traction et de compression) dans les couches stables du sol. Image: [G]

Dégâts sur l'ensemble du système en raison de l'affouillement des fondations ainsi que du glissement ou de la reptation de la rive latérale.



Dégât

Affouillement des fondations d'un ancrage des câbles, à l'exemple d'un filet de protection contre les laves torrentielles.

Mesures de prévention

Intégration suffisamment profonde de toutes les fondations d'ancrage. Prévoir une protection suffisante contre l'érosion. Si possible, placement des ancrages pour les haubans amont en dehors du lit du torrent, dans la berge du torrent. Image: [C]



Dégât

Fondations de piliers affouillées, à l'exemple d'un filet de protection contre les laves torrentielles.

Mesures de prévention

Intégration suffisamment profonde de toutes les fondations de piliers dans le sol. Placement des fondations des piliers au bord du torrent; intégration des fondations dans la protection contre l'affouillement, qui se présente sous la forme d'un enrochement scellé dans du béton maigre. Image: [B]



Dégât

Affouillement du lit du torrent sous un filet de protection contre les laves torrentielles, entraînant un élargissement important de l'ouverture de base.

Mesures de prévention

Choix d'un emplacement pour la barrière avec une couverture de sol aussi faible que possible et un lit du torrent stable. Sinon, prévoir une protection contre les affouillements avec une disposition en profondeur suffisante dans le sol et une largeur suffisamment dimensionnée en amont et en aval du lieu de la barrière. Des valeurs empiriques et des recommandations sont décrites en [13]. Image: [G]

Autres dégâts ou pertes d'aptitude au service



Pertes d'aptitude au service

Lessivage latéral d'un filet de protection contre les laves torrentielles dû à des contournements et à l'érosion des berges.

Mesures de prévention

Choix d'un emplacement de barrière avec une couverture de sol aussi faible que possible. Sinon, stabilisation permanente du versant latéral autour des ancrages (protection contre l'érosion), afin qu'il ne puisse pas glisser ou être affouillé. Construction de filets de protection de préférence sur des tronçons de torrent rectilignes (à savoir pas dans les courbes ou les coudes du torrent). Image: [G]



Dégât

Débordement, à l'exemple d'un filet de protection contre les coulées de boue dimensionné pour un cas de charge plus petit.

Mesures de prévention

Renforcement des composants du filet de protection contre les coulées de boue, installation d'éléments de protection contre l'abrasion, sélection d'un type de filet ayant une capacité de charge plus élevée et/ou une hauteur nominale plus grande. Image: [H]

**Dégât**

Impact d'un arbre sur une **barrière à filet**.

Mesures de prévention

Déboisement régulier le long des barrières à filet.

Image: [D]

**Dégât**

Déplacement des fondations et/ou des ancrages en raison de la reptation ou du glissement du versant, à l'exemple d'un filet de protection contre les laves torrentielles.

Mesures de prévention

Si possible, choisir l'emplacement de la barrière en dehors des zones de reptation et des versants en glissement. Tenir compte des surfaces de glissement lors de la conception des ancrages.

Image: [E]

5 Aide à la décision pour la planification des barrières à filet

5.1 Schéma décisionnel

Le diagramme suivant résume les principaux éléments pouvant servir de critères décisionnels essentiels lors de la planification et du choix en faveur ou en défaveur du recours à des filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue. Les aspects généraux à prendre en compte, tels que l'inspection des ouvrages de protection et leur entretien ou leur surcharge, ne sont pas explicitement répertoriés.

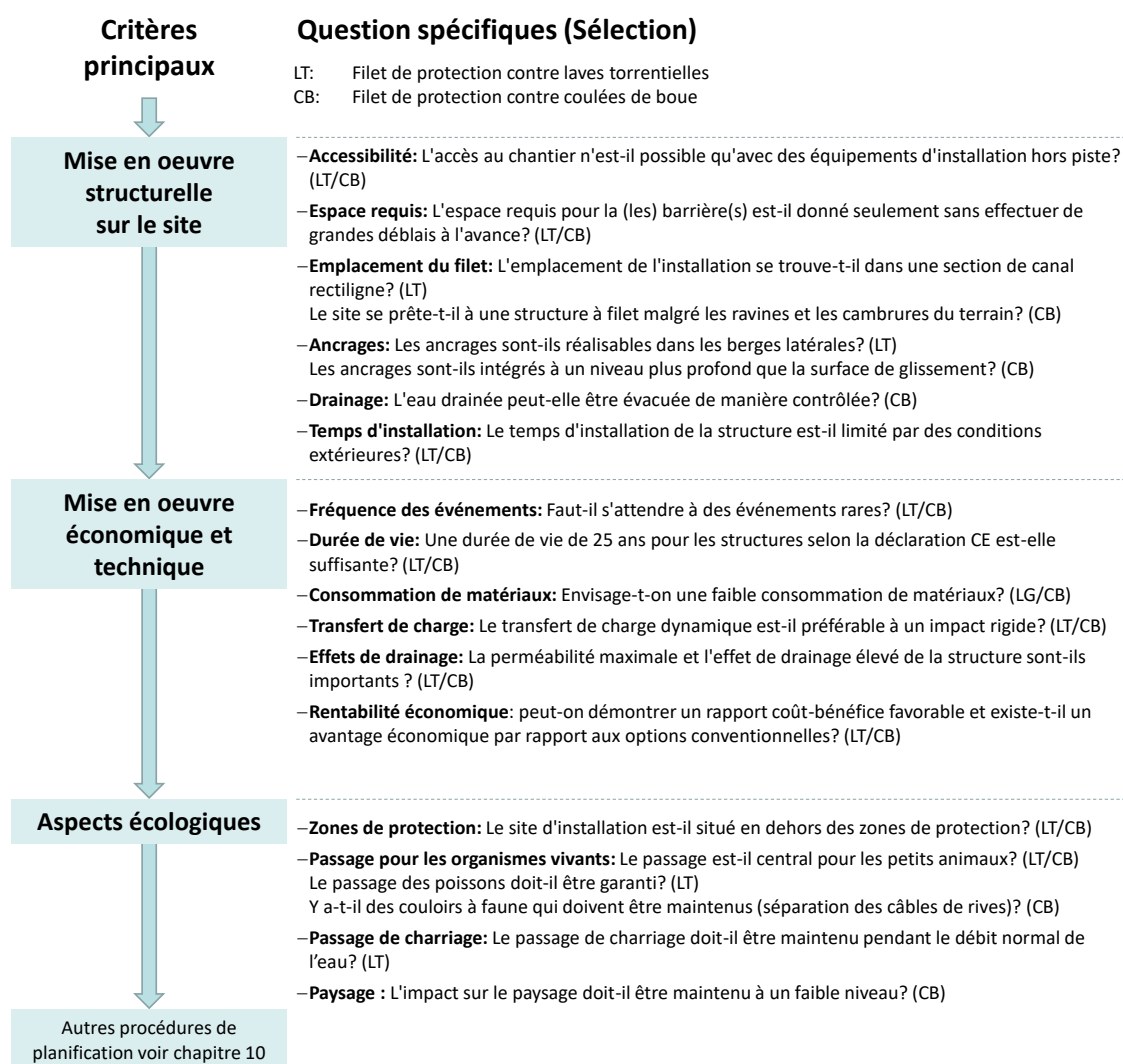


Fig. 4. Critères décisionnels pour le recours aux filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue. Les abréviations indiquent à quel type de processus s'applique la question respective.

5.2 Évaluation qualitative des barrières à filet par rapport à des ouvrages rigides

Compte tenu des critères décisionnels mentionnés sur la figure 4 ainsi que d'autres aspects, les **barrières à filet flexibles** (barrières standards **labelisées CE**, voir chapitre 3.1) présentent des avantages et des inconvénients par rapport aux ouvrages de protection rigides. Les deux types de mesures ont été comparés de manière qualitative (voir Tab. 5). Bien entendu, l'évaluation dépend du contexte local et doit être vérifiée en fonction du projet.

Le tableau 5 compare une structure rigide en béton armé, dotée d'une **ouverture de base** et d'une section de déversoir, avec un filet de protection contre les laves torrentielles **labelisé CE** ayant la même géométrie, le même volume de rétention et la même capacité de charge, et ce au même emplacement dans un torrent raide de la région des Préalpes. L'accessibilité pour la purge après un événement est supposée être assurée en amont de la barrière. La comparaison n'a qu'un caractère indicatif, n'est pas exhaustive et ne porte que sur les critères pour lesquels il existe des différences significatives entre les types de structures.

Tab. 5. Comparaison qualitative entre les barrières à filet et les ouvrages rigides en béton armé, sur la base de différents critères d'évaluation.

Critère d'évaluation	Évaluation qualitative	
	Barrière à filet (système standard)	Ouvrage en béton armé
1. Mise en œuvre de l'ouvrage à l'emplacement choisi		
Site d'installation et utilisation des ressources	Faible volume de transport et utilisation des ressources. Par conséquent, même les emplacements éloignés peuvent être desservis de manière économique par hélicoptère.	Volume de transport et utilisation des ressources plus importants. La mise en œuvre sur des emplacements éloignés est donc plus complexe et plus coûteuse.
Emprise	Emprise pour le site et l'ouvrage d'installation généralement plus petite.	Emprise pour le site et l'ouvrage d'installation généralement plus grande.
Machines et équipements	Souvent, utilisation d'équipements plus légers (par exemple, affût de forage), utilisation possible de pelle araignée.	Généralement, machines de chantier et équipements plus lourds (par exemple bétonnière, pelle à chenille) utilisés, éventuellement installation de blondins, etc., nécessaires.
Durée des travaux/sécurité au travail	Durée des travaux généralement plus courte et ainsi période de séjour dans la zone de danger plus courte. Peut être réalisée sans excavations préalables, donc en règle générale, moins de phases de chantier critiques escomptées.	Durée des travaux généralement plus longue et période de séjour dans la zone de danger plus longue. En raison d'excavations préalables, plus de phases de chantier critiques escomptées.
2. Mise en œuvre économique et technique		
Dimensions de l'ouvrage et volume de rétention	Limités pour les systèmes standards, sinon construction d'ouvrages spéciaux nécessaire.	Selon prescriptions ordinaires de construction, très grandes dimensions et volumes de rétention possibles.
Possibilités d'extension et de rehaussement	Extension/rehaussement possible sous conditions.	Extension/rehaussement généralement plus aisé, mais à vérifier sur le plan statique.
Expérience en matière de planification	Technologie plutôt nouvelle avec moins de normes, valeurs comparatives et empiriques disponibles.	Technologie établie depuis longtemps avec des normes établies et de nombreuses valeurs empiriques disponibles.
Coûts de construction	Pour un système standard, coûts généralement plus bas.	Pour des dimensions comparables, coûts généralement plus élevés.
Coûts d'entretien	Fortement dépendants de la fréquence des sollicitations et de la durée de vie requise.	Moins dépendants de la fréquence des sollicitations.
Durée de vie	25 ans	80 ans
Besoin en matériaux de construction	Besoins généralement plus bas.	Pour des dimensions comparables, largeur et hauteur semblables, besoins généralement plus élevés.
Effets/charges	Impact sur un ouvrage réagissant de manière flexible dynamique, donc réduction des pics de charge.	Impact sur un ouvrage rigide, donc forces dynamiques et pics de charge plus élevés.

Critère d'évaluation	Évaluation qualitative	
	Barrière à filet (système standard)	Ouvrage en béton armé
2. Mise en œuvre économique et technique (suite du tableau)		
Effet de drainage et risque d'obstruction	Passage de l'eau possible sur toute la surface du filet, donc meilleur effet de drainage.	Effet de drainage réduit, risque d'obstruction plus grand.
Effet de rétention/ Débit de restitution maximal	Effet de rétention limité sur le débit d'eau/l'onde de crue, donc débit plus élevé à l'aval, où une remobilisation du charriage est possible.	Atténuation du débit en aval de l'ouvrage, donc tendance à une mobilisation du charriage plus faible à l'aval.
3. Aspects écologiques		
Passage des petits animaux et des poissons	Passage équivalent pour les poissons, meilleur passage pour les petits animaux.	Passage équivalent pour les poissons, passage plus réduit pour les petits animaux.
Aspect paysager	Structure plus filigrane, impact visuel réduit.	Structure plus massive, impact visuel plus important.
4. Inspection et entretien des ouvrages de protection		
Entretien opérationnel	Besoin de contrôles et d'inspections réguliers équivalent, toutefois robustesse des éléments du système plus faible. En cas d'événements fréquents, effort de réparation plus important.	Besoin de contrôles et d'inspections réguliers équivalent, mais plus grande robustesse des éléments du système. Plus adapté aux événements fréquents.
Purge	Prestations équivalentes.	Prestations équivalentes.
5. Surcharge/risque résiduel		
Surcharge/risque résiduel	Pour les deux types de structures, les causes et conséquences possibles en cas de surcharge ainsi que les risques résiduels doivent être clarifiés de manière spécifique au projet.	

5.3 Possibilités d'utilisation des barrières à filet

Sur la base de l'évaluation qualitative et de l'expérience pratique, les filets flexibles de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue sont particulièrement adaptés aux types d'emploi et aux mesures suivants:

- mesures en terrain difficile d'accès;
- mesures temporaires;
- mesures d'urgence;
- en complément des mesures rigides dans le cadre d'un concept de protection intégrée;
- lors de conditions locales sensibles où des mesures rigides ne sont pas envisageables pour des raisons liées au paysage ou à la biosphère.

L'utilisation de barrières à filet comme mesures de protection des objets, notamment en cas de coulées de boue, est possible. En Suisse, les procédures d'autorisation varient d'un canton à l'autre. Il est important que l'inspection et l'entretien par les propriétaires fonciers (souvent privés) soient clairement réglés et garantis.

5.4 Questions fréquemment posées sur les barrières à filet (FAQ)

Les décideurs et les parties prenantes sont souvent confrontés à la question fondamentale de savoir si les **barrières à filet** peuvent être mise en œuvre dans un cas spécifique. Les réponses suivantes aux questions fréquemment posées peuvent aider à se positionner pour ou contre le recours aux barrières à filet. L'accent est mis sur les questions spécifiques aux filets. La liste des questions et des réponses n'est en aucun cas exhaustive et doit être mise à jour au besoin. De plus amples informations sont disponibles auprès des fabricants de filets ainsi que sur la page d'accueil de cette publication.

– **Comment assurer un grand volume de rétention sans ouvrages spéciaux?**

Plusieurs filets de protection contre les laves torrentielles disposés en série (systèmes **labelisés CE** qui couvrent le **cas de charge** du débordement) peuvent générer ensemble un volume de rétention plus important qu'un seul filet de protection.

– **Quelle est la durée de vie d'une barrière à filet?**

Sans impact, on peut supposer une **durée de vie** de 25 ans pour l'ouvrage. Après un événement, la barrière doit être purgée et réparée. Une fois la **barrière à filet** réparée selon les règles de l'art, sa **durée de vie** doit être réévaluée.

– **Quel est l'avantage d'une barrière à filet par rapport aux ouvrages rigides en termes de coûts à prévoir?**

Dans de nombreux cas, les barrières à filet peuvent être réalisées comme des alternatives équivalentes aux ouvrages rigides en béton. Pour l'évaluation, il est important de considérer l'ensemble du cycle de vie, y compris les coûts d'entretien. Pour un projet spécifique, il est utile de réaliser une analyse coûts-bénéfice. Il est également possible de déterminer les coûts du cycle de vie de la barrière afin de démontrer sa viabilité économique. En termes d'installation, de besoin en matériaux et de durée des travaux, le recours aux barrières à filet a souvent un impact positif sur les coûts. Cependant, le facteur décisif de la rentabilité est la fréquence de remplissage et d'utilisation de la structure. Dans les bassins versants, notamment, où les événements sont fréquents, les barrières à filet sont moins rentables en raison de leur **durée de vie** plus courte, des limitations en termes de robustesse de certains éléments du système et des coûts de réparation plus élevés.

– **Les barrières à filet sont-elles soumises à un permis de construire et peuvent-elles bénéficier de subventions?**

Les barrières à filet sont toujours soumises à un permis de construire. Toutefois, l'éligibilité aux subventions ne dépend pas du type de construction mais des exigences auxquelles un projet doit répondre (adéquation au besoin, efficacité économique, conformité légale) et des conditions générales. Dans de nombreux cas, les mesures de protection avec barrières à filet ont répondu aux exigences d'éligibilité à la subvention. Il est recommandé de s'assurer au préalable, auprès des autorités compétentes, que les barrières à filet peuvent être approuvées en tant que mesures de protection et ainsi bénéficier de subventions.

– **En combien de temps une barrière à filet peut-elle être construite?**

La procédure d'obtention d'un permis de construire (planification du projet, procédure de mise à l'enquête, délais d'opposition, etc.) est comparable à celle d'un ouvrage rigide et prend donc un temps similaire. Une barrière à filet standardisée peut être installée en quelques semaines après obtention du permis de construire et dès que les conditions météorologiques le permettent.

– **Où les matériaux sont-ils déposés après un événement?**

La question du dépôt des matériaux humides collectés dans la zone de rétention de la barrière à filet doit être clarifiée à un stade précoce, comme c'est également le cas pour les structures rigides. Par conséquent, il convient de définir, au cours de la phase de planification, des voies d'accès et des sites d'élimination appropriés, ainsi que des sites de réalimentation du charriage en aval du filet pour la gestion du charriage, et de tenir compte des coûts y relatifs.

– **Dans quelle mesure une solution recourant aux filets est-elle écologique et durable par rapport aux ouvrages rigides?**

Les ouvertures de maille relativement grandes et l'**ouverture de base** des filets de protection contre les laves torrentielles offrent un bon passage des poissons et petits animaux. Concernant le développement durable, une évaluation écologique spécifique au projet doit être réalisée dans le cadre de l'étude des variantes du projet.

– **Comment les filets de protection contre les laves torrentielles s'intègrent-ils dans le paysage?**

Contrairement aux ouvrages de protection massifs en acier et en béton, les filets de protection contre les laves torrentielles sont relativement discrets visuellement et s'intègrent généralement bien au paysage. Ils sont à peine visibles de loin.

– **Comment les barrières à filet sont-elles purgées?**

Les barrières à filet sont généralement purgées du côté amont au moyen d'une pelle araignée ou d'une pelle à chenilles classique. Après une première vidange, les barrières à filet peuvent être ouvertes et les éléments endommagés remplacés. Les ancrages et les fondations restent en général intacts.

– **Les barrières à filet comptent-elles parmi les mesures de protection structurelles et doivent-elles être inscrites au cadastre cantonal des ouvrages de protection?**

Depuis quelques années, les barrières à filet sont venues enrichir la gamme des ouvrages de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue. L'entretien, la purge et la réparation doivent être assurés de la même manière que pour les ouvrages de protection rigides. Les barrières à filet doivent donc également être inscrites dans les cadastres cantonaux des ouvrages de protection concernés.

– **Où obtenir des informations sur les modélisations conformes des processus d'écoulement?**

Les instituts de recherche, les réseaux et associations scientifiques effectuent des recherches et publient régulièrement leurs travaux sur les processus d'écoulement et leur modélisation. Une sélection de publications se trouve dans la bibliographie du présent guide pratique.

– **Quelle est la perméabilité d'un filet de protection contre les laves torrentielles ou contre les coulées de boue, et quelle doit être la taille de l'ouverture de base d'un filet de protection contre les laves torrentielles?**

La perméabilité des barrières à filet dépend fortement du processus, de la zone concernée et des matériaux à retenir; il est donc impossible de répondre de manière générale. En ce qui concerne la perméabilité des filets, le WSL a réalisé des expériences à petite échelle sur le rapport entre la taille des mailles et la granulométrie déterminante (voir [37] pour plus de détails).

L'influence de la profondeur d'écoulement sur l'obstruction de **l'ouverture de base** des filets de protection contre les laves torrentielles a été étudiée en [37]. Des informations spécifiques sur le dimensionnement de l'ouverture de base sont données au chapitre 6.2.3.

Partie technique

6 Élaboration de scénarios et dimensionnement des paramètres du système

6.1 Élaboration de scénarios pour les laves torrentielles et les coulées de boue

Les cartes de dangers, les informations complémentaires contenues dans le rapport technique et les fiches d'information fournissent des indications initiales sur les scénarios d'événements et les paramètres d'écoulement. Pour le dimensionnement proprement dit et la détermination de l'événement de référence, il convient toutefois d'apporter des précisions supplémentaires afin que l'évaluation soit adaptée au problème à résoudre et à la phase de planification. L'évaluation de l'effet des mesures de protection est réalisée selon PROTECT [23]. Par ailleurs, le comportement en cas de surcharge d'une structure doit être clarifié et pris en compte dans la conception et le dimensionnement. Les incertitudes dans l'évaluation des dangers naturels en général et dans l'estimation des dimensions des événements en particulier doivent toujours être prises en compte. Elles peuvent être indiquées par des fourchettes de valeurs et doivent être déclarées ouvertement.

Les laves torrentielles et les coulées de boue se caractérisent par des bouffées soudaines d'un mélange d'eau et de solides. La teneur en matériaux solides prédomine, ce qui se traduit par des densités élevées du mélange. Par conséquent, des composants individuels lourds et de grande taille peuvent être transportés à la surface de l'écoulement ou à proximité. La teneur en eau du mélange, associée à la pente du torrent ou du versant, définit la vitesse d'écoulement. La combinaison entre hauteurs d'écoulement, vitesses et densités élevées ainsi que la présence de grands blocs individuels, en partie, créent des forces énormes qui agissent directement sur les structures, de façon ponctuelle et/ou surfacique. La détermination des paramètres d'écoulement est donc l'élément central du dimensionnement des ouvrages. Davantage d'informations sont par exemple disponibles sous [21]. Les zones et les paramètres d'impact qui découlent d'un événement peuvent être déterminés et évalués à l'aide de modèles numériques.

Dans l'élaboration de scénarios, la fréquence et le volume des laves torrentielles sont des variables d'événement déterminantes, en particulier pour le choix de mesures de protection appropriées. Pour plus de précisions, des méthodes éprouvées telles que SEDEX [14] et Gertsch [17] peuvent être utilisées. Elles se basent sur des estimations sur le terrain ou sur des considérations théoriques et comparent les résultats avec des valeurs issues de formules empiriques. En ce qui concerne le volume des matériaux solides, il convient de faire une distinction claire, pour les laves torrentielles, entre l'événement global et les bouffées individuelles. Il convient également de savoir au préalable s'il faut s'attendre à des mélanges visqueux ou granulaires, de quelle manière les événements se développent et si le bois flottant joue un rôle décisif.

Dans les régions alpines, les laves torrentielles peuvent atteindre des volumes de quelques 100 m³ à plusieurs 100 000 m³. Les vitesses d'écoulement sur le cône alluvial atteignent 1 à

Tab. 6. Ordre de grandeur des paramètres d'écoulement déterminants des laves torrentielles (basé sur diverses sources).

Paramètre	Unité	Ordre de grandeur	Remarque
$V_{\text{bouffée,réel}}$	[m ³]	100–100 000	Volume par bouffée, le volume total de l'événement V_{total} peut être plusieurs fois plus élevé
Q_{max}	[m ³ /s]	10–1000	Débit de pointe ou débit maximal au niveau du front de la bouffée
v	[m/s]	1–15	Vitesse au front
ρ	[kg/m ³]	1600–2200	Densité du mélange de lave torrentielle, au front
ρ	[kg/m ³]	2200–2650	Densité d'un bloc isolé, basée sur la géologie locale
h_{fl}	[m]	0.5–10	Hauteur d'écoulement au front
d	[m]	Jusqu'à max h_{fl}	Diamètre d'un bloc isolé

15 m/s et les débits de pointe correspondants sont de l'ordre de 10 à 1000 m³/s. Le diamètre maximal d'un bloc isolé atteint approximativement la valeur de la hauteur d'écoulement. Les paramètres de dimensionnement déterminants et les ordres de grandeur escomptés pour les laves torrentielles sont présentés dans le tableau 6.

En général, il y a prédisposition aux coulées de boue lorsque qu'un périmètre d'étude comprenant des pentes supérieures à 20° présente des caractéristiques géologiques défavorables [2]. Les coulées de boue ne se produisent généralement qu'une seule fois sur le même site mais la prédiction précise de leur apparition reste difficile. Habituellement, une approche de prédisposition [2] est utilisée pour déterminer les secteurs sujets à ce processus, basée en premier lieu sur des propriétés géotechniques. Dans l'analyse, il est également important de relever les coulées de boue qui se sont produites antérieurement dans le périmètre d'investigation. La prédisposition de la zone d'arrachement et la probabilité d'occurrence des coulées de boue sont, dans une certaine mesure, similaires à celles des glissements de terrain spontanés superficiels à semi-profonds. Il est recommandé d'effectuer l'évaluation par étapes selon la méthode AGN [1]. Les zones d'impact et valeurs des actions qui en résultent peuvent être déterminées, en complément, à l'aide de modèles numériques.

L'épaisseur de la masse mobilisable est généralement de 0.5 à 3 m pour les coulées de boues, et peut atteindre, mais plus rarement, jusqu'à 10 m. Le volume déplacé est généralement limité. La teneur en eau relativement élevée entraîne des vitesses élevées (1 à 15 m/s) souvent génératrices d'importants dommages. La teneur élevée en eau favorise également l'étendue d'une coulée de boue et la surface de la zone impactée peut dépasser celle de la zone d'arrachement d'un facteur de 10 à 100 [8]. Les paramètres de dimensionnement déterminants et les ordres de grandeur attendus pour les coulées de boue sont présentés dans le tableau 7.

Tab. 7. Ordre de grandeur des paramètres d'écoulement déterminants pour les coulées de boue (basé sur diverses sources).

Paramètre	Unité	Ordre de grandeur	Remarque
V_{total}	[m ³]	10–10000	Volume total de l'événement
Q_{max}	[m ³ /s]	1–100	Débit de pointe ou débit maximal au niveau du front
v	[m/s]	1–15	Vitesse au front
ρ	[kg/m ³]	1600–2200	Densité du mélange de coulées de boue, au front
ρ	[kg/m ³]	2200–2650	Densité d'un bloc isolé, basée sur la géologie locale
h_{fl}	[m]	0.3–3	Hauteur d'écoulement au front
d	[m]	< h_{fl}	Diamètre d'un bloc isolé

6.2 Conception des filets de protection contre les laves torrentielles

6.2.1 Hauteur utile résiduelle

La hauteur utile résiduelle h_b' est définie comme la plus petite distance entre le câble porteur supérieur et le lit du torrent (ou le câble porteur inférieur) après un événement de remplissage d'un filet de protection contre les laves torrentielles. Les données relatives à la hauteur utile résiduelle dépendent du système de support, des paramètres d'écoulement, de la distribution granulométrique et du degré de remplissage du filet de protection contre les laves torrentielles. Les valeurs standards de la hauteur utile résiduelle peuvent être obtenues auprès du fabricant du système.

6.2.2 Revanche hydraulique

La revanche hydraulique est la distance entre les câbles porteurs supérieurs et le bord supérieur des berges du torrent, mesurée lorsque le système de protection contre les laves torrentielles n'est pas en charge. Il permet de s'assurer que les laves torrentielles ne peuvent pas s'échapper du torrent lorsque la **barrière à filet** est débordée (voir également le chapitre 6.2.5). Il est important que la somme de la hauteur utile résiduelle h_b' et de la hauteur d'écoulement h_{fl} du débordement de la lave torrentielle soit inférieure à la somme de la hauteur nominale et de la revanche hydraulique sélectionnée.

6.2.3 Ouverture de base

L'**ouverture de base** h_d est la distance entre les câbles porteurs inférieurs et le lit du torrent. Elle est utilisée pour faire passer un écoulement normal sans grandes quantités de charriage et de bois. Si l'on prévoit une grande quantité de bois flottant dans un torrent, il est recommandé de concevoir une barrière à filet dotée d'une **ouverture de base** plus grande par rapport à la valeur standard habituelle de $h_d = 2/3 h_{ff}$ [35]. Il est également possible d'envisager un écran de rétention séparé pour bois flottant en amont de la barrière à filet. Lors de la disposition de l'ouverture de base, il convient de toujours tenir compte de la capacité du torrent en aval de la barrière à filet.

6.2.4 Volume de rétention

Le volume de rétention V_R est déterminé par la hauteur utile résiduelle de la barrière à filet h_b' et la largeur moyenne du torrent b_m à l'emplacement de la barrière. Pour un calcul approximatif, il faut également considérer la pente du torrent I_s en amont de la barrière à filet et la pente I_s' des dépôts de la lave torrentielle dans la zone de rétention.

La pente des matériaux déposés peut être estimée selon [22] avec $I_s' = 2/3 I_s$. Par conséquent, la pente des dépôts de lave torrentielle est d'un tiers plus plat que la pente originale du torrent en amont de l'ouvrage. En supposant un torrent rectiligne en amont de la barrière, on obtient alors la relation géométrique ci-dessous selon [35] qui permet d'estimer le volume de rétention (avec une disposition verticale des filets de protection selon [35] et Fig. 5).

$$V_R = 0.5(h_b')^2 b_m \sin \xi \left(\frac{\sin \xi}{\tan(\theta - \theta')} + \cos \xi \right) \quad (1)$$

avec

V_R = volume de rétention de la barrière à filet

h_b' = hauteur utile résiduelle, voir 6.2.1

b_m = $(b_u + b_o)/2$ largeur moyenne du filet de protection, généralement calculée à partir de la largeur supérieure du filet de protection b_o et de la largeur inférieure du filet de protection b_u

ξ = angle entre l'ouvrage de protection et le lit du torrent en [°]

θ = pente du tronçon de cours d'eau en [°]

θ' = pente du dépôt en [°]

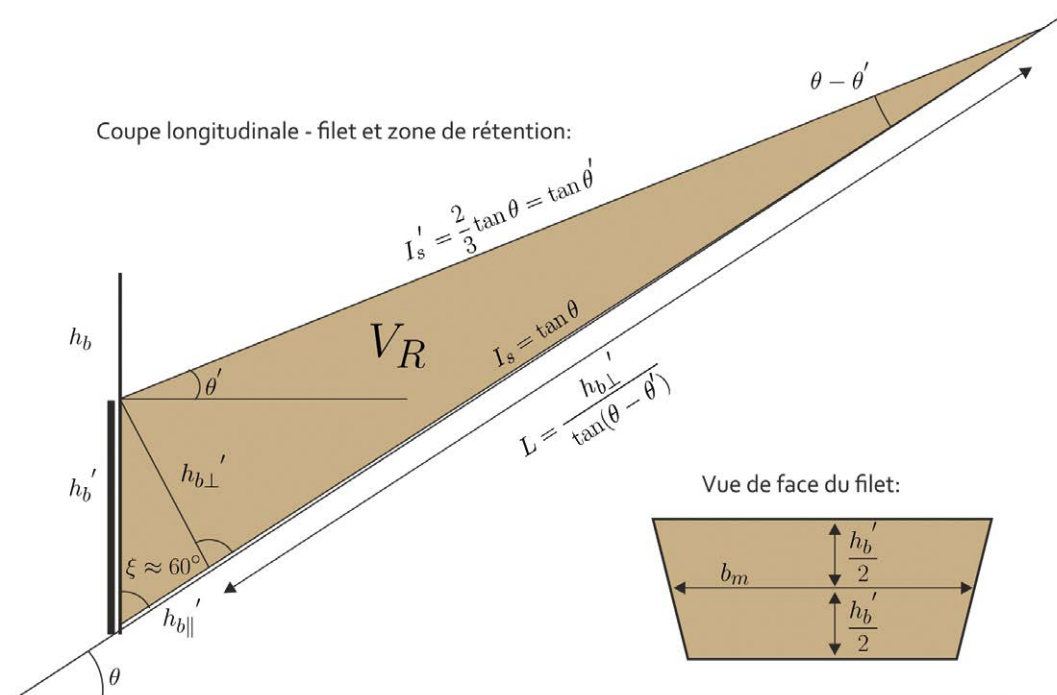


Fig. 5. Coupe longitudinale du torrent et vue de face du filet. Figure d'après [35].

6.2.5 Débordement

Le débordement d'un filet de protection contre les laves torrentielles doit être vérifié comme un **cas de charge** de dimensionnement distinct (voir chapitre 7.2.1). Le cas de débordement peut devenir déterminant dans le cas de barrières à hauteur nominale élevée et/ou de grandes hauteurs d'écoulement h_{ff} . Dans ce cas, en effet, la pression hydrostatique augmente proportionnellement et peut devenir plus grande que l'impact dynamique. Les barrières à hauteur utile plus basse sont débordées plus tôt mais, dans ces cas de figure, la pression hydrostatique n'est généralement pas déterminante. Par défaut, les **cas de charge** de débordement ne sont pas couverts par la déclaration de performance (DoP) pour le **label CE** d'un filet de protection contre les laves torrentielles/coulées de boue. Par ailleurs, il est important de s'assurer au préalable que la revanche hydraulique restante est bien supérieure à la hauteur d'écoulement maximale de la lave torrentielle lors du débordement de la barrière à filet. Il est également essentiel de prévoir un élément constructif dit de **protection contre l'abrasion** pour protéger les câbles porteurs supérieurs.

6.3 Conception des filets de protection contre les coulées de boue

6.3.1 Hauteur utile résiduelle

La hauteur utile résiduelle h_b' est définie comme la plus petite distance entre le câble porteur supérieur et la surface du sol (ou le câble porteur inférieur) après un événement de remplissage d'un filet de protection contre les coulées de boue. Les données relatives à la hauteur utile résiduelle dépendent du système de support, des paramètres d'écoulement, de la distribution granulométrique et du degré de remplissage du filet de protection contre les coulées de boue. Les valeurs standards de la hauteur utile résiduelle peuvent être obtenues auprès du fabricant du système.

6.3.2 Volume de rétention

Le volume de rétention V_R est déterminé à partir de la hauteur utile résiduelle de la barrière h_b' et de l'étalement maximal des matériaux à l'emplacement de la barrière b_{max} . Comme pour les filets de protection contre les laves torrentielles (voir chapitre 6.2.4), le volume peut être calculé approximativement comme suit:

$$V_R = 0.5(h_b')^2 b_{max} \sin \xi \left(\frac{\sin \xi}{\tan(\theta - \theta')} + \cos \xi \right) \quad (2)$$

avec

V_R	= volume de rétention de la barrière à filet
h_b'	= hauteur utile résiduelle, voir chapitre 6.3.1
b_{max}	= étalement maximal de matériaux le long de la barrière à filet
ξ	= angle entre l'ouvrage de protection et la surface du versant en [°]
θ	= pente de la section du versant en [°]
θ'	= pente du dépôt en [°]

Il est considéré par simplification que la hauteur d'écoulement reste constante sur toute la largeur b_{max} . L'estimation géométrique de la largeur maximale b_{max} s'effectue comme suit: si la largeur de la zone d'arrachement d'une coulée de boue b_0 peut être estimée, et si l'on suppose que la coulée de boue se déplace avec un angle d'étalement maximal δ [2–10°], alors l'étalement maximal du dépôt de matériaux b_{max} peut être déterminé en utilisant la distance entre la zone d'arrachement et l'emplacement de l'ouvrage L_0 (voir Fig. 6), selon la formule suivante:

$$b_{max} = 2 \tan \delta L_0 + b_0 \quad (3)$$

Alternativement, ou en complément des considérations géométriques entre la zone d'arrachement (de départ de la coulée) et le site prévu pour l'installation du filet de protection contre les coulées de boue, des simulations numériques peuvent être utilisées.

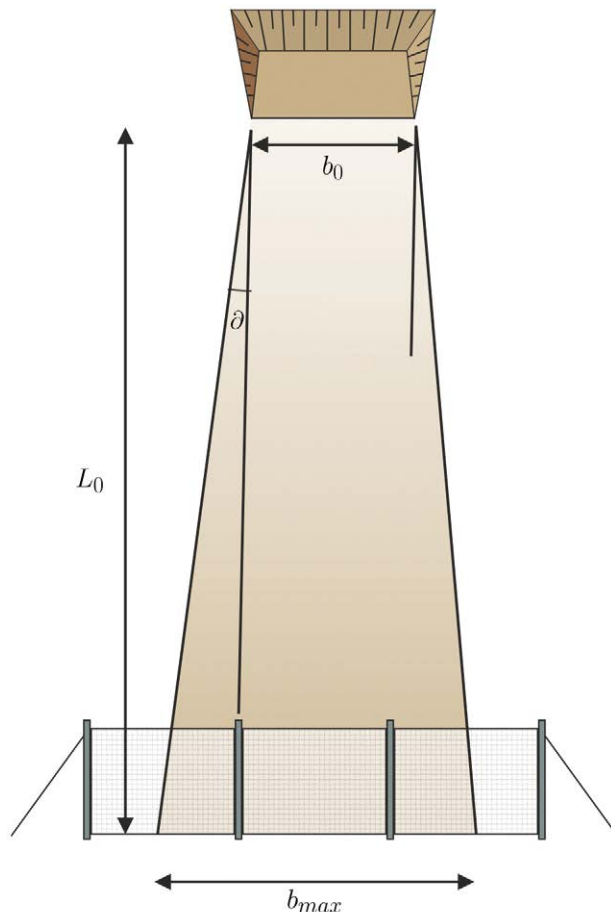


Fig. 6. Esquisse de la détermination géométrique de l'étalement maximal. Figure selon [16].

6.3.3 Débordement

En règle générale, les filets de protection contre les coulées de boue dotés du **label CE** ne sont pas conçus pour le débordement. Par défaut, les cas de débordement ne sont donc pas couverts par la déclaration de performance (DoP) d'un filet de protection contre les coulées de boue (voir chap. 6.2.5 relatif au débordement des filets de protection contre les laves torrentielles).

Si, néanmoins, un débordement de la barrière à filet est envisagé, il doit être vérifié en tant que **cas de charge** de dimensionnement distinct (pour les détails du modèle de charge pour les filets de protection contre les coulées de boue, voir chap. 7.2.2). Dans ce cas, en plus des renforcements potentiels de l'ouvrage, les câbles porteurs supérieurs doivent être dotés d'un élément supplémentaire de **protection contre l'abrasion**. Il convient également de vérifier si le débordement est susceptible d'entraîner une érosion problématique en aval et si des mesures structurelles ou organisationnelles doivent être prises en conséquence dans ce cas.

6.3.4 Contournement

Le contournement latéral de la barrière doit être évité dans la mesure du possible. Pour cela, la longueur minimale de la barrière $L_{\min}$ doit être conçue de manière à être nettement supérieure à l'étalement maximal des matériaux derrière la barrière $b_{\max}$ (voir aussi chap. 6.3.2).

Une **bavette de rétention amont**, installée en complément des filets de protection contre les coulées de boue, empêche l'ouverture du filet entre le sol et la partie inférieure du filet pouvant survenir lorsque le câble porteur inférieur se soulève. Un écoulement par-dessous la barrière est ainsi empêché. L'installation d'un **treillis secondaire** à mailles plus fines sur le côté amont du filet de protection assure la rétention des matières fines.

Dans le cas des filets de protection contre les laves torrentielles, l'eau s'écoule de manière contrôlée via le torrent situé sur le côté aval du filet. Dans le cas des filets de protection contre les coulées de boue, cette évacuation contrôlée fait cependant défaut. Il s'avère donc utile d'installer, en aval du filet de protection contre les coulées de boue, un système approprié de captage et de drainage de l'eau afin que l'eau provenant de la coulée de boue et les eaux de ruissellement amont puissent être collectées et évacuées sans dommage.

7 Dimensionnement

7.1 Concept de sécurité

En règle générale, un concept de sécurité sert à garantir la stabilité d'un ouvrage en ce qui concerne la sécurité structurale, l'aptitude au service et la durabilité. Le chapitre suivant porte sur l'état limite de la sécurité structurale. Les deux autres aspects, l'aptitude au service et la durabilité, sont traités au chapitre 3.2.

Pour les filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue, il est fondamental que les aspects suivants soient étudiés à l'état limite de la sécurité structurale:

- charge de rupture des câbles porteurs avec **éléments d'absorption d'énergie** en raison de forces de traction et de cisaillement excessives;
- charge de rupture de la structure due à des charges ponctuelles excessives (exemple: poinçonnement dû à un impact isolé, pics de pression et surcharge);
- défaillance des ancrages en cas d'arrachement et résistance interne des ancrages à la rupture.

Pour les ouvrages de protection rigides, le côté charge et le côté résistance sont dimensionnés séparément avec des facteurs de sécurité partiels γ_F pour le côté charge et γ_R pour le côté résistance (exemple: norme SIA 261, norme SIA 263 et norme SIA 267 [25]–[29]). Pour les **barrières à filet** soumises à des charges de lave torrentielle ou de coulée de boue, il n'existe pas à ce jour de probabilités de défaillance définies, comme c'est le cas pour les structures rigides selon les normes SIA pour certains scénarios de charge. Une approche probabiliste n'est donc pas encore possible pour les solutions avec filets.

Selon le chapitre 5 de la norme SIA 261/1 [27], les laves torrentielles et les coulées de boue sont toujours décrites comme des charges exceptionnelles sur un ouvrage (côté charge). Dans [31], les laves torrentielles à courte période de retour (1 à 30 ans) sont classées comme charges régulières; celles à périodes de retour plus importantes (>30 ans) comme charges exceptionnelles. Ainsi, la période de retour (ou la fréquence d'occurrence) ainsi que la classification comme charge régulière ou exceptionnelle sont des paramètres essentiels qui constituent la base du concept de sécurité. Par ailleurs, il est important d'évaluer l'intensité des charges qui se produisent. Dans la norme SIA 261/1 [27] et sur les cartes de dangers, les laves torrentielles sont classées en fonction de leur intensité moyenne ou forte et les coulées de boue en fonction d'une intensité faible, moyenne ou forte. Les intensités spécifiques, les paramètres d'écoulement et les charges relatives au site doivent être évalués et déterminés par un expert.

Pour l'évaluation des risques sur les personnes, les conséquences environnementales et les dommages économiques dus à une défaillance d'un ouvrage de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue, une classification par classes de risque est proposée dans [35]. Concernant les classes de risque, des probabilités de défaillance validées par le Joint Committee of Structural Safety JCSS [18] peuvent notamment être utilisées et attribuées aux classes de risque:

- Classe de risque 3 / probabilité de défaillance $p_f = 10^{-6}$ en cas de grand danger pour les vies humaines; pour les mesures de protection à proximité immédiate des habitations, des routes et des zones industrielles
- Classe de risque 2 / probabilité de défaillance $p_f = 10^{-5}$ en cas de danger moyen pour les vies humaines; pour les mesures de protection dans les environs des habitations, des routes et des lignes de chemin de fer
- Classe de risque 1 / probabilité de défaillance $p_f = 10^{-3}$ en cas de faible danger pour les vies humaines; pour les forêts, les zones inondables et les pâturages.

Ces classes de risque sont comparées aux temps de retour des laves torrentielles ou des coulées de boue et, suivant [31], les facteurs de sécurité partiels γ_F côté charge sont attribués conformément à la figure 7. Pour la protection explicite des nouveaux bâtiments au moyen d'un filet de protection contre les laves torrentielles ou les coulées de boue, il convient de consulter la norme SIA 261/1 [27] dans laquelle les classes d'ouvrages sont définies en fonction de l'utilisation de l'ouvrage. Côté résistance, les facteurs de sécurité partiels γ_R sont recommandés selon les normes SIA correspondantes (normes SIA 261, 262, 263 et 267 dans [25]–[29]).

Temps de retour Classe de risque	1 – 30 ans	30 – 100 ans	Plus que 100 ans
1	1.0	1.0	1.0
2	1.3	1.3	1.2
3	1.5	1.3	1.2

Fig. 7. Facteur de sécurité partiel γ_F recommandé côté charge compte tenu de la classe de risque et de la période de retour de l'événement de lave torrentielle ou de coulée de boue. Basé sur [31]/extrait de [35].

7.2 Modèles de charges

7.2.1 Filets de protection contre les laves torrentielles

Le rapport n° 8 du WSL [33] constitue la base des sous-chapitres suivants. Il décrit en détail le concept de dimensionnement des structures avec filet flexibles donné dans la thèse n° 17916 de l'EPFZ [35] de Corinna Wendeler, publiée en 2008. Ce travail de doctorat a été réalisé au WSL sous la direction de Perry Bartelt et Axel Volkwein dans le cadre d'un projet de recherche commun de la CTI et de Geobruugg AG. Les coefficients de pression α sont plus faibles pour les **barrières à filet** que les valeurs de c_p , publiées dans la norme SIA 261/1 [27] et correspondant au même facteur, mais s'appliquent aux **pressions d'impact** contre des obstacles rigides (mur, digue, etc.).

7.2.1.1 Modèle de charge quasi-statique

Une approche qui détermine les pressions, et donc les forces, exercées sur les filets de protection contre les laves torrentielles, et qui illustre parfaitement la situation pour un modèle d'ingénierie simplifié, est décrite dans [35]. Dans ce modèle, la lave torrentielle est **discretisée** avec une hauteur d'écoulement constante h_{fl} , une densité constante ρ et une vitesse d'écoulement constante v . Elle exerce une action sur la barrière à filet lors d'un impact dit «initial» (voir Fig. 8). Après l'arrêt de la lave torrentielle, la barrière à filet est modélisée en étant remplie en plus par les matériaux qui se déposent par la suite (voir Fig. 9). Ce processus continu est discretisé dans le temps dans le modèle de charge simplifié, de telle sorte que la barrière à filet est remplie par des dites «bouffées» individuelles, en supposant une distribution uniforme de la hauteur d'écoulement (voir Fig. 9).

La pression hydrostatique p_{stat} et la pression hydrodynamique p_{dyn} (en N/m²) exercées sur la barrière sont supposées être uniformément réparties sur la largeur du torrent. Il en résulte les formules de calcul suivantes:

$$p_{dyn} = \alpha \rho v^2 \quad (4)$$

avec

ρ = densité des laves torrentielles avec $\rho = 1600\text{--}2200 \text{ kg/m}^3$

α = coefficient de pression

(laves torrentielles granulaires $\alpha = 2.0$; laves boueuses avec $\rho < 1900 \text{ kg/m}^3$ $\alpha = 0.7\text{--}1.0$)

v = vitesse moyenne du front de la lave torrentielle en m/s

et

$$p_{stat} = a h_{fl} \rho g \quad (5)$$

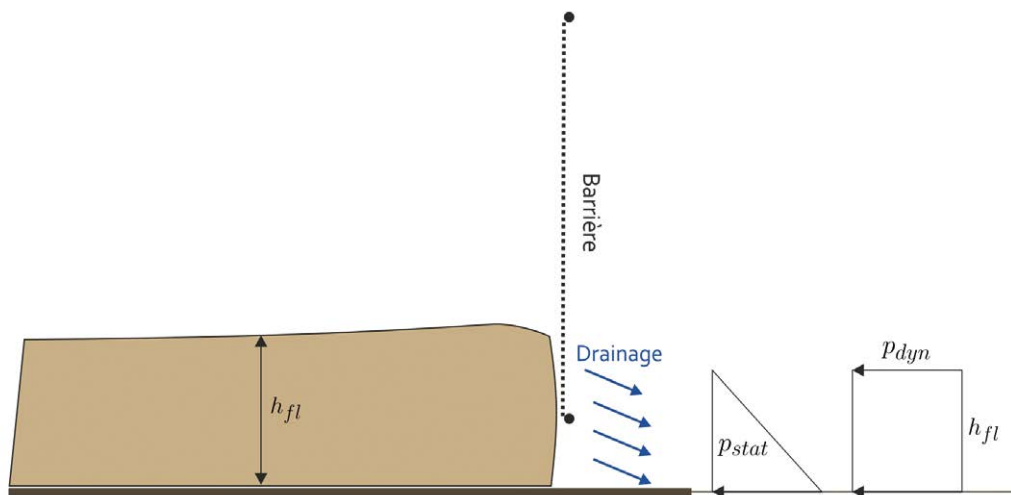


Fig. 8. Impact initial des laves torrentielles sur la barrière avec application d'un modèle de bouffées comprenant la pression hydrostatique p_{stat} et la pression hydrodynamique p_{dyn} . Figure d'après [35].

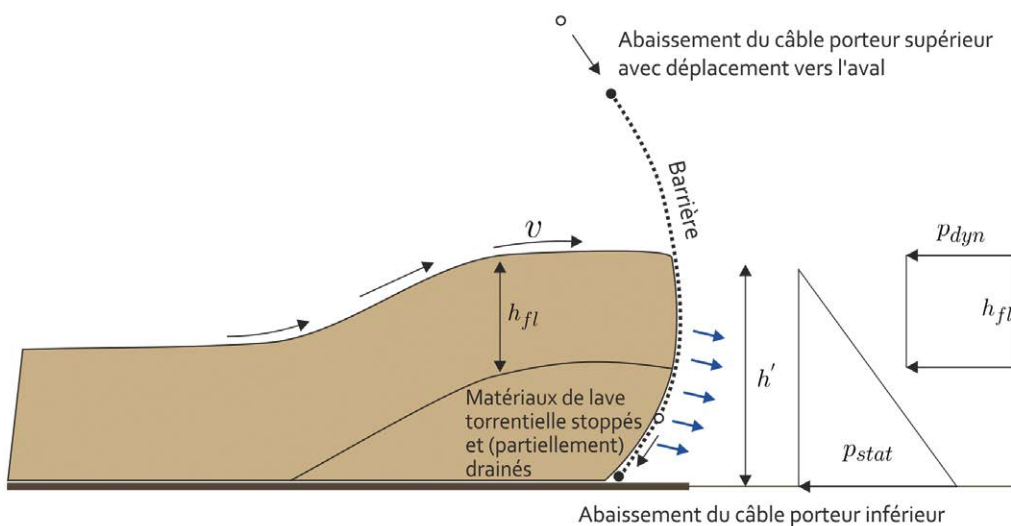


Fig. 9. Processus de remplissage discrétisé dans le temps dans le modèle de bouffées, y compris les déformations escomptées de la barrière. Figure d'après [35].

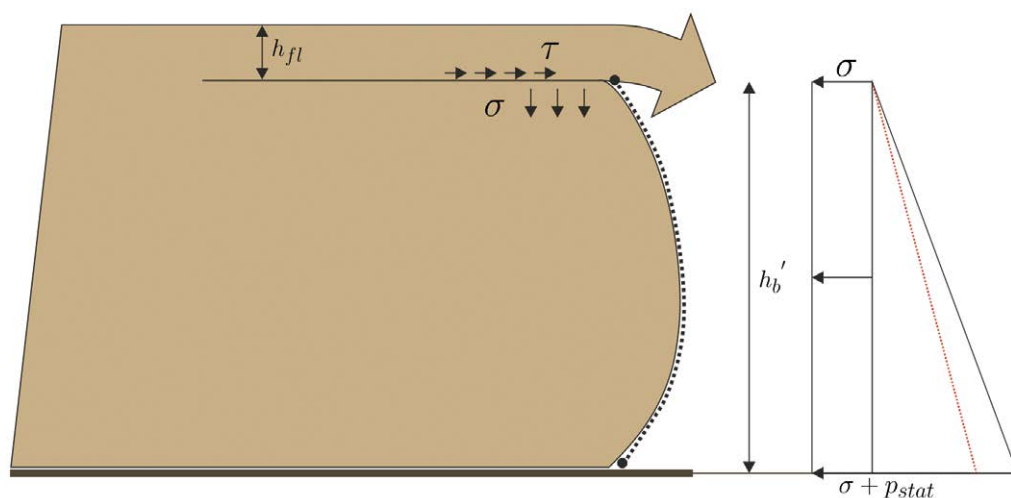


Fig. 10. Situation de charge lors du débordement d'une barrière qui arrive à sa hauteur utile résiduelle en raison du remplissage. Figure d'après [35].

avec

a = coefficient de poussée de terre $a = 1.0$

g = accélération de la pesanteur $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

Pour les géométries spéciales avec un lit du torrent localement plus profond ou des berges du torrent très peu profondes, la théorie ci-dessus doit être vérifiée au cas par cas sur la base spécifique au projet.

Pour le **cas de charge** de débordement, une contrainte de cisaillement supplémentaire $\tau = h_{\text{fl}} \rho g \tan \theta$ (dans le sens de l'écoulement) et une charge supplémentaire avec $\sigma = h_{\text{fl}} \rho g$, (perpendiculaire au sens de l'écoulement) agissent sur la partie supérieure remplie de la barrière. La composante de la contrainte de cisaillement est souvent négligée en raison de sa faible valeur ($\tau \approx 1/10 \sigma$).

7.2.1.2 Impact d'un bloc isolé

L'impact d'un bloc isolé ou d'un autre composant (un tronc d'arbre, par exemple) n'est généralement significatif que lorsque l'impact se produit directement sur un câble porteur. Dans le cas de figure où l'espacement entre les câbles porteurs est supérieur à la taille du bloc de dimensionnement, une vérification du poinçonnement du filet doit être effectuée séparément. Si le bloc de masse m entre directement en collision avec un câble porteur, ou un faisceau de câbles porteurs, de longueur L à la vitesse v , la majeure partie de l'énergie cinétique du bloc est transformée en énergie d'allongement (déformation longitudinale) du câble, tandis qu'une partie de l'énergie est également absorbée par les **éléments d'absorption d'énergie**. Pour ne pas prendre de risque dans le calcul, cette composante des éléments d'absorption d'énergie est négligée ci-après, à titre d'hypothèse simplificatrice.

L'énergie d'allongement du câble $E_{\text{pot,câble}}$ (en J) peut être déterminée par la formule suivante:

$$E_{\text{pot,câble}} = 0.5 k_s \Delta L^2 \quad (6)$$

avec

k_s = $E A/L$ rigidité de ressort attribué au câble de longueur L

E = module d'élasticité du câble

A = surface effective de la section transversale du câble

ΔL = étirement ou allongement élastique du câble

Dans le calcul qui suit, la force dans le câble $F_{\text{câble}}$ (en N) peut être calculée en utilisant l'approche de la loi du ressort $k_s = F_{\text{câble}}/\Delta L$:

$$F_{\text{câble}} = \sqrt{\frac{mv^2 EA}{L}} \quad (7)$$

avec

m = masse du bloc

v = vitesse moyenne du front de la lave torrentielle

E = module d'élasticité du câble

A = surface effective de la section transversale du câble

L = longueur du câble

De manière simplifiée, on suppose que la rigidité de ressort k_s est constante sur la longueur de corde L et que l'énergie d'absorption des freins est négligée.

7.2.2 Filets de protection contre les coulées de boue

7.2.2.1 Modèle de charge quasi-statique

Le modèle de charge quasi-statique pour les filets de protection contre les coulées de boue fonctionne de manière analogue aux formules des chapitres 7.2.1.1 et 7.2.1.2. La seule différence est que les filets de protection contre les coulées de boue n'ont généralement pas

besoin d'être vérifiés pour le **cas de charge** de débordement, les coulées de boue présentant des volumes nettement plus faibles que ceux des laves torrentielles. La largeur d'impact, ou l'étalement maximal des matériaux, au niveau de la barrière où s'est produite la coulée de boue peut être déterminée selon les descriptions du chapitre 6.3.2.

7.2.2.2 Modèle d'interaction fluide-structure (modèle FSI)

En alternative au modèle de charge quasi-statique, l'interaction du matériau de la coulée de boue avec la **barrière à filet** peut être représentée par le modèle FSI (Fluid-Structure-Interaction-Model). Ce modèle a été développé au WSL dans le cadre de la thèse de doctorat d'Albrecht von Boetticher [34], dans un projet de recherche CTI commun avec Geobrug AG, sous la direction d'Axel Volkwein.

Le volume de rétention maximal V_R est calculé en tenant compte de la topographie du terrain actuel. On tient compte à la fois de la réduction de volume due à l'abaissement escompté des câbles porteurs supérieurs de la barrière à la hauteur utile résiduelle h_b' et de la pente du dépôt des matériaux de coulée de boue i_s' (voir Fig. 5). On obtient ainsi la longueur horizontale de l'espace de rétention l_r . Avec une largeur d'impact maximale dans l'espace de rétention de b_{max} , le temps de remplissage t_f pour un volume de bouffée $V_{bouffée}$ peut être déterminé par:

$$t_f = \frac{V_{bouffée}}{h_{fl} b_{max} v} \quad (8)$$

mit

$V_{bouffée}$	=	volume de la poussée (=bouffée)
h_{fl}	=	hauteur d'écoulement
b_{max}	=	étalement maximal de la coulée de boue à l'emplacement du filet
v	=	vitesse moyenne d'écoulement du front de la coulée de boue

Pour l'impact initial, on suppose que les matériaux de la coulée de boue frappent la barrière à filet avec un front distinct et que cette dernière est soumise à une charge violente sur la hauteur d'écoulement h_{fl} et la largeur d'impact b_{max} . L'impact des matériaux qui suivent est **discretisé** en impacts individuels provenant d'étapes de remplissage qui se superposent.

Les charges provenant des étapes de remplissage qui se superposent et qui frappent le filet avec une hauteur d'écoulement h_{fl} , une vitesse d'écoulement frontale v et une densité ρ (approche force en fonction du temps selon Wendeler [35]), sont converties en pressions qui se superposent à la hauteur de la barrière à filet. Comme pour les laves torrentielles, la pression correspondant à un niveau de remplissage x comprend une composante statique et une composante dynamique:

$$p_x = p_{stat} + p_{dyn,x}(t) \quad (9)$$

La composante dynamique de la **pression d'impact** d'un niveau de remplissage $p_{dyn,x}(t)$ décroît au fil du temps t_x . Cet effet favorable peut être considéré de manière simplifiée en réduisant la pression dynamique d'impact du niveau de remplissage de façon linéaire sur le temps de freinage t_b , à partir du moment où la bouffée atteint le filet (en utilisant l'approche approfondie dans [34] pour déterminer la force en fonction du temps).

La pression d'impact après l'impact initial $p_{dyn,1}(t)$ est alors calculée comme suit:

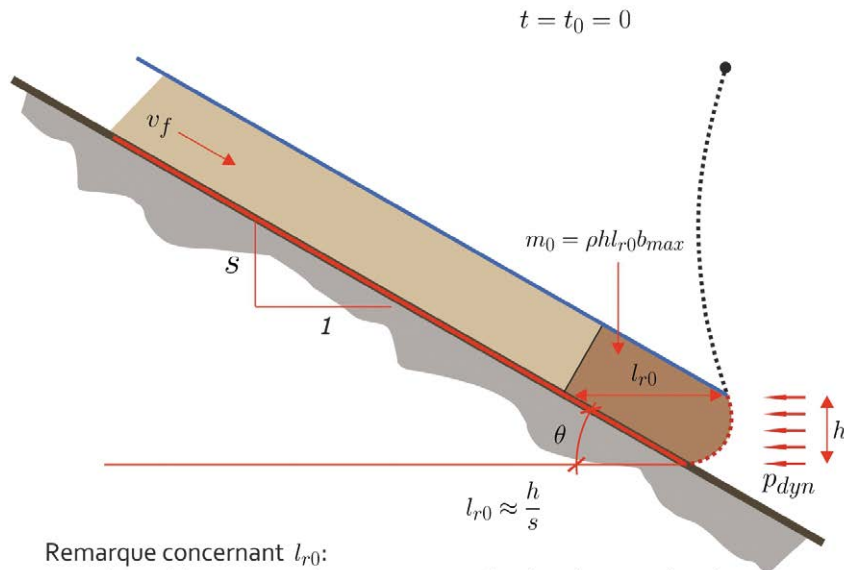
$$p_{dyn,1}(t) = \max \left(\frac{t_{b1} - (t - t_1)}{t_{b1}}, 0 \right) \cdot p_{dyn} \quad (10)$$

Le temps de freinage t_b dépend de la **pression d'impact** qui, en réalité, décroît de manière non linéaire. Une pression d'impact simplifiée, considérée comme linéairement décroissante, sous-estimerait le temps de freinage. Par conséquent, le temps de freinage doit être considéré comme le temps nécessaire pour décélérer un bloc de masse m et de vitesse v_f avec une décélération moyenne α_b . Le temps de freinage peut donc être calculé comme suit:

$$t_{b,i} = \frac{v_f}{a_{b,i}} = \frac{v_f \rho h l_{r,i} b_{max}}{k p_{dyn} h b_{max}} \quad (11)$$

avec

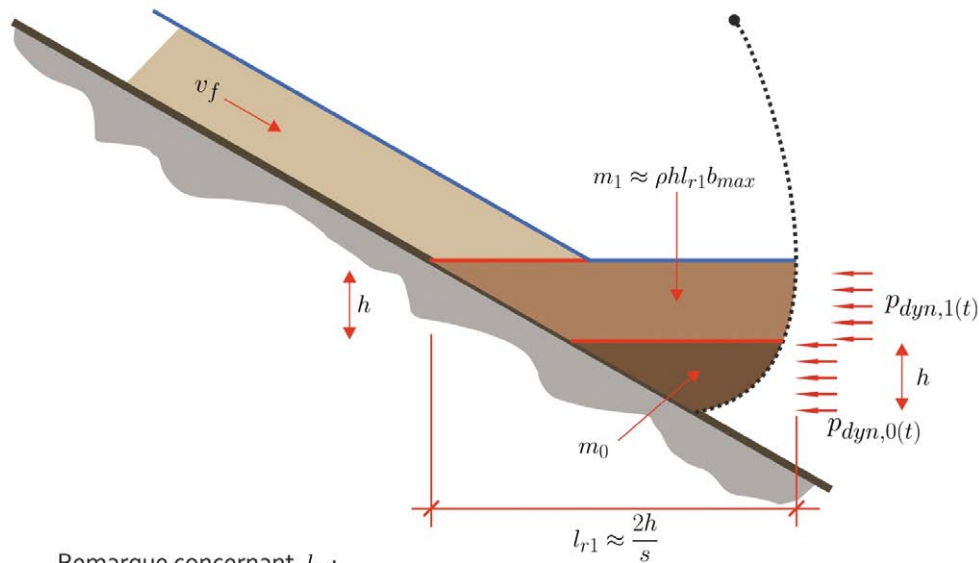
- v_f = vitesse du bloc
 $a_{b,i}$ = $k p_{dyn} h b_{max} / m$ décélération pour la poussée i
 p_{dyn} = pression hydrodynamique
 m = $\rho h l_r b_{max}$ masse du bloc
 k = 0.1, valeur d'étalonnage provenant d'essais réalisés à Veltheim AG [9].



Remarque concernant l_{r0} :
cette hypothèse ne s'applique qu'aux angles d'inclinaison de 0 à 30° maximum.

Fig. 11. Représentation schématique de la discrétisation du modèle FSI à l'impact initial, d'après [34].

$$p_{dyn,1(t)} = \max\left(\frac{t_{b1} - (t - t_1)}{t_{b1}}, 0\right) \cdot p_{dyn}$$



Remarque concernant l_{r1} :
cette hypothèse ne s'applique qu'aux angles d'inclinaison de 0 à 30° maximum.

Fig. 12. Discrétisation d'une étape de remplissage suivante selon la méthode FSI suite à l'arrêt de l'impact initial de la masse m_0 d'après [34].

L'estimation du temps d'arrivée des bouffées individuelles est difficile à déterminer. En principe, on peut supposer que les matériaux de ces bouffées, qui succèdent à la bouffée initiale, se posent sur celles déjà ralenties par la barrière à filet. Pour les faibles nombres de Froude < 1 , on peut supposer de manière simplifiée que l'effet de freinage de la barrière à filet agit sur les matériaux de la première poussée de remplissage jusqu'à une distance de $l_{r0} = h/s$ dans l'espace de rétention. Par conséquent, l'étape de charge suivante se forme à une distance de l_{b1} en amont de la barrière à filet. Une troisième bouffée se forme de manière analogue à une distance $l_{r1} = 2 h/s$ en amont de la barrière, au moment de l'arrivée de la deuxième bouffée. Les temps d'impact des bouffées peuvent ainsi être déterminés à $t_0 = 0$ [s], $t_1 = l_{r0}/v$, $t_2 = t_1 + l_{r1}/v$, et ainsi de suite.

Les **pressions d'impact** correspondantes $p_0, p_1, p_2 \dots$ agissent sur la barrière à filet au niveau des hauteurs $0-h, h-2h, 2h-3h$, etc. jusqu'au débordement de la barrière à filet. De cette façon, le moment critique du remplissage conduisant à la charge maximale sur les câbles porteurs peut être déterminé pendant le calcul ou la simulation.

Un contrôle de plausibilité de la superposition des charges ainsi estimée est essentiel, tant pour la charge que pour la cohérence entre le temps d'arrivée de la dernière bouffée et le temps de remplissage total t_f . En cas de doute, la réduction de la pression dynamique doit être appliquée sur une plus longue période en réduisant le paramètre k .

Si l'approche du temps de freinage est insérée dans la formule de la pression dynamique, la pression dynamique pour un niveau de remplissage x se calcule comme suit:

$$p_{dyn,x(t)} = \max \left(\frac{\frac{v_f \rho l_{rx}}{k p_{dyn}} - (t - t_x)}{\frac{v_f \rho l_{rx}}{k p_{dyn}}}, 0 \right) \cdot p_{dyn} \quad (12)$$

Enfin, la barrière à filet débordée à une hauteur de débordement h_b' et avec une hauteur d'écoulement h_{fl} est soumise à la pression hydrostatique p_{stat} sur la hauteur cumulée $h_b' + h_{fl}$. De plus, une charge de cisaillement τ est exercée en raison de la coulée de boue débordant

$$\tau = h_{fl} \rho g \tan \theta \quad (13)$$

où θ représente la pente du versant affecté par la coulée de boue. θ peut varier en fonction de la végétation et de l'angle de frottement interne des matériaux [11].

7.3 Dimensionnement des composants

7.3.1 Câbles porteurs

Les câbles porteurs transmettent les charges exercées sur le filet de protection vers les ancrages. En fonction de la charge prévue, un faisceau de câbles porteurs peut être composé de plusieurs câbles individuels. Plusieurs faisceaux de câbles porteurs sont généralement répartis uniformément sur la hauteur h_b de la barrière à filet. Le positionnement des câbles porteurs doit être optimisé en fonction des déformations attendues des barrières à filet. Les éléments intégrés aux câbles porteurs qui permettent de grandes déformations (**éléments d'absorption d'énergie**) permettent un alignement optimal des câbles. Il est essentiel d'assurer une bonne liaison structurelle des câbles avec les éléments en béton, les ancrages en câbles ou les ancrages autoforants afin de transmettre la force du câble aux ancrages, si possible dans le sens de la traction.

Les câbles peuvent être dimensionnés analytiquement selon [35] sur la base des vérifications suivantes. Les pressions exercées sur le filet de protection sont transférées aux câbles porteurs à l'aide de **zones d'influence** moyennes. On peut supposer que la charge exercée sur les câbles horizontaux est uniformément répartie, à condition que le processus de remplissage ait lieu sur toute la largeur de la barrière à filet. L'équation différentielle pour les câbles est ensuite résolue avec la méthode itérative de Newton, jusqu'à ce que les forces calculées dans les câbles correspondent aux allongements des câbles et des freins escomptés pour ces forces [20]. L'équation de câble est donnée comme suit (voir également Fig. 13):

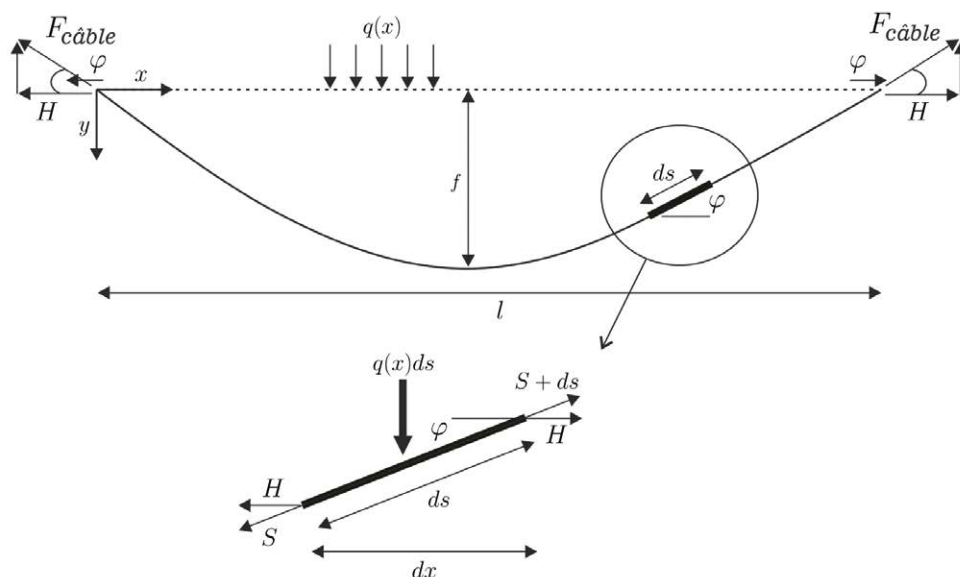


Fig. 13. Représentation de l'équation du câble pour une charge uniformément répartie sur le câble fléchi, d'après [20] et [35].

$$H^3 + H^2 EA \left[1 - \frac{1}{s_0} (l - \alpha_t \Delta t s_0) \right] = \frac{EA}{2s_0} \int_0^l Q^2 dx \quad (14)$$

avec

- H = force de retenue horizontale du câble
- E = module d'élasticité du câble
- A = section transversale effective du câble
- s_0 = longueur du câble horizontal
- α_t = coefficient de température pour l'acier
- Δt = gradient de température
- Q = valeurs de l'intégrale d'après [20].

Les haubans amont ne peuvent pas être dimensionnés de cette manière car ils ne sont pas soumis à une charge uniforme et continue. Leur dimensionnement est traité dans le chapitre suivant. L'utilisation en pratique de l'équation de câble est illustrée par l'exemple de dimensionnement en annexe A.

7.3.2 Haubans amont et piliers

Les forces des haubans amonts résultent des forces déterminantes des piliers et d'une faible composante de force due à l'écoulement des laves torrentielles (dans le cas des haubans amont ancrés dans le torrent). Cette dernière composante est généralement négligée. Le facteur déterminant pour la charge exercée sur les haubans amont est généralement le **cas de charge** de débordement avec une barrière à filet entièrement remplie. Les pressions sont transférées aux piliers via la largeur moyenne des **zones d'influence**. Une **vérification au flambage par flexion et torsion** combinée des piliers, en utilisant la force normale et la force dans la direction de l'écoulement de la lave torrentielle, est donc nécessaire pour la vérification des piliers. La force d'appui supérieure des supports est transmise dans les haubans amont et la composante déterminante doit être déterminée en fonction des angles des haubans (voir Fig. 14).

7.3.3 Filet de protection

Le dimensionnement du filet de protection de la barrière à filet est déterminé par la disposition des câbles porteurs horizontaux. La **vérification du filet** simplifiée consiste à considérer le filet comme un câble, en utilisant la portée des câbles porteurs supérieurs et inférieurs et la flèche maximale de la barrière à filet (voir Fig. 15). Le **cas de charge** de dimensionnement avec des câbles horizontaux intermédiaires, comme indiqué dans l'exemple de dimension-

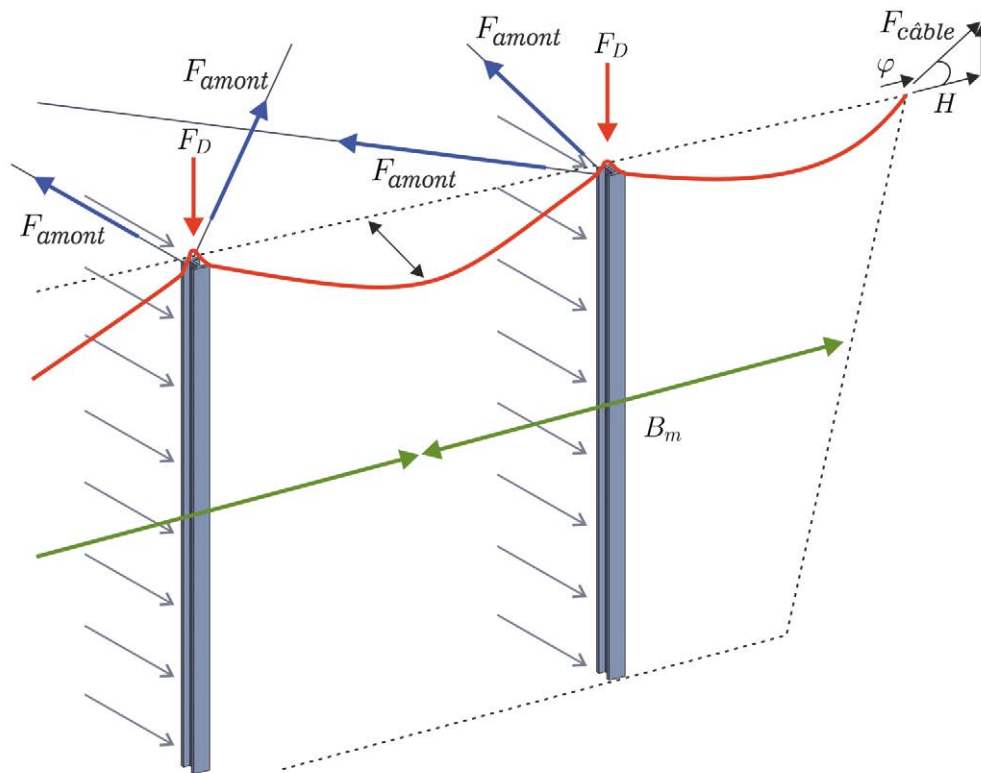


Fig. 14. Filet de protection contre les laves torrentielles avec piliers et vecteurs de force correspondants des câbles porteurs et des haubans amont, d'après [35].

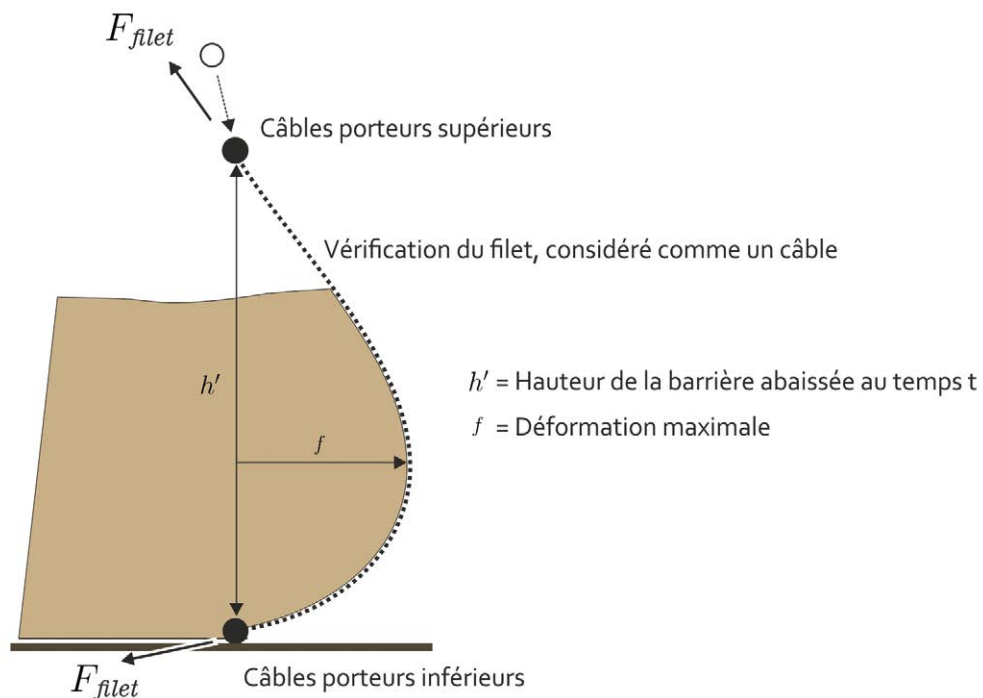


Fig. 15. Représentation en coupe du filet de protection contre les laves torrentielles pour la vérification du filet et de ses composantes de force.

nement en annexe A, doit être considéré séparément. L'équation de câble (Fig. 13) et les paramètres du filet par mètre linéaire permettent de déterminer la force exercée sur la surface du filet.

7.3.4 Ancrages et fondations

Nous recommandons de tenir compte des spécifications du fabricant en ce qui concerne les charges des ancrages des filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue. Il est également conseillé, dans la mesure du possible, de réaliser des tests d'ancrage. Le nombre d'ancrages à tester dépend des conditions du sol, de la taille du projet de construction et du risque potentiel de défaillance [3] mais doit au moins correspondre aux spécifications de la norme SIA 267 [29]. Les tests sur les ancrages passifs à adhérence totale (= clous) pour roche ou sol sont décrits dans la norme SIA 267/1, Géotechnique – Spécifications complémentaires [29].

En ce qui concerne les barrières à filet, en raison des incertitudes liées aux charges exercées, il est recommandé de partir du principe que la totalité de la charge de rupture des câbles, avec **éléments d'absorption d'énergie** intégrés, est transférée dans le sol. En ce qui concerne les ancrages, leurs charges de rupture doivent être déclarées. Par ailleurs, les fondations recommandées servent à transférer les charges dues aux efforts des câbles dans les ancrages et à protéger la tête d'ancrage de la corrosion. Dans le cas d'une roche meuble, il est conseillé d'envisager des fondations latérales continues en béton au niveau des berges du torrent afin d'éviter que les ancrages ne soient affouillés. Il est également recommandé de prévoir une armature de 10 mm de diamètre dans les fondations, tous les 1 cm, afin de minimiser la largeur des fissures. La **classe de résistance à la compression du béton** doit être choisie en fonction de la **classe de protection contre la corrosion** correspondante. Des références sur le dimensionnement et la conception des ancrages figurent dans [35], [3] et [29].

7.3.5 Fondations des piliers

Les fondations des piliers protègent les barres d'ancrage de pression et de traction contre l'affouillement et la corrosion. En même temps, elles transfèrent les forces de pression dans le sol de manière distribuée. Le dimensionnement des fondations des piliers doit prendre en compte les forces de compression du pilier ainsi que les forces de traction des câbles porteurs inférieurs exercées sur la fondation. En cas de raccordement excentré des piliers à la plaque de base, le moment de force correspondant doit être pris en compte dans le dimensionnement des ancrages de pression et de traction. En termes d'armature, il est également recommandé de poser l'armature minimale requise pour limiter la largeur des fissures.

7.3.6 Exemple de conception structurelle des fondations

Les conditions géométriques des fondations des filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue dépendent dans une large mesure des conditions géométriques des plaques de base et d'ancrage des différents fabricants. Un exemple sans vérification des calculs est représenté sur les figures 16 et 17 pour des fondations de piliers avec une barre de pression et deux barres de traction, installées avec un angle de 45°.

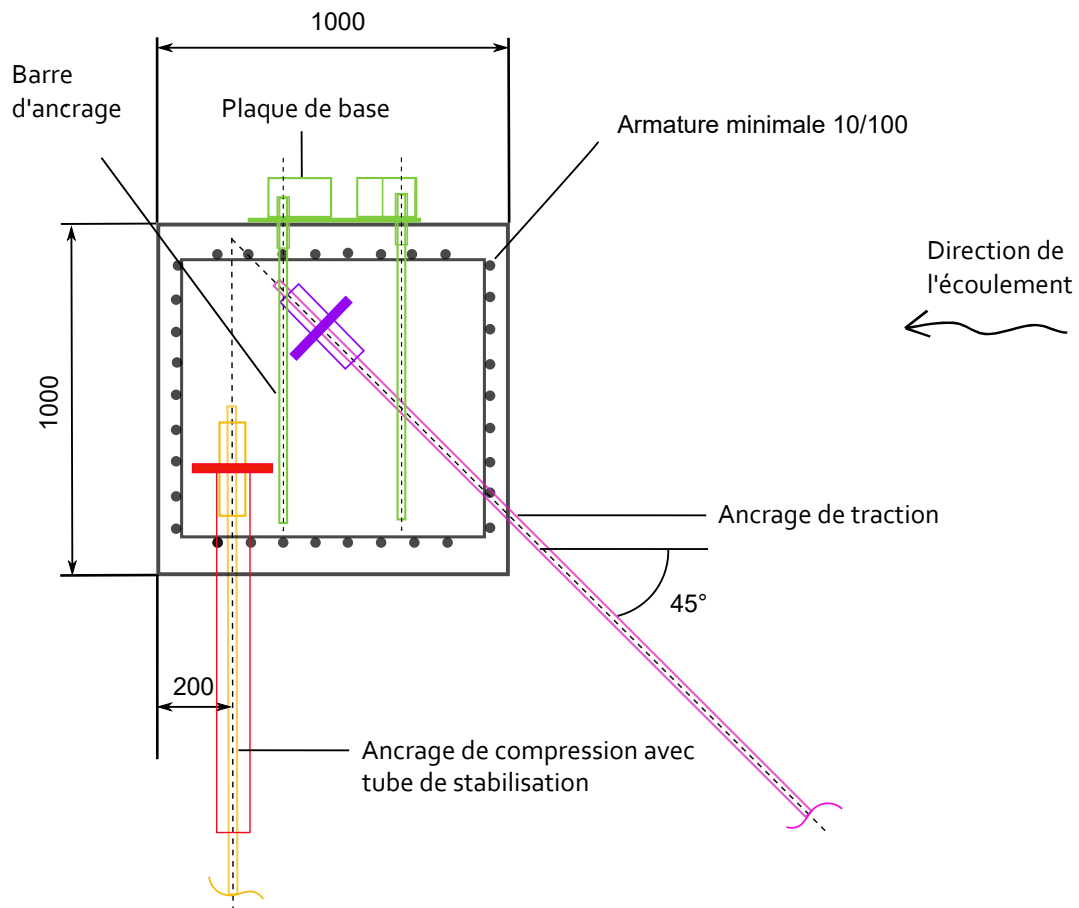


Fig. 16. Vue latérale d'une fondation en béton armé avec une barre de pression et deux barres de traction, d'après [15].

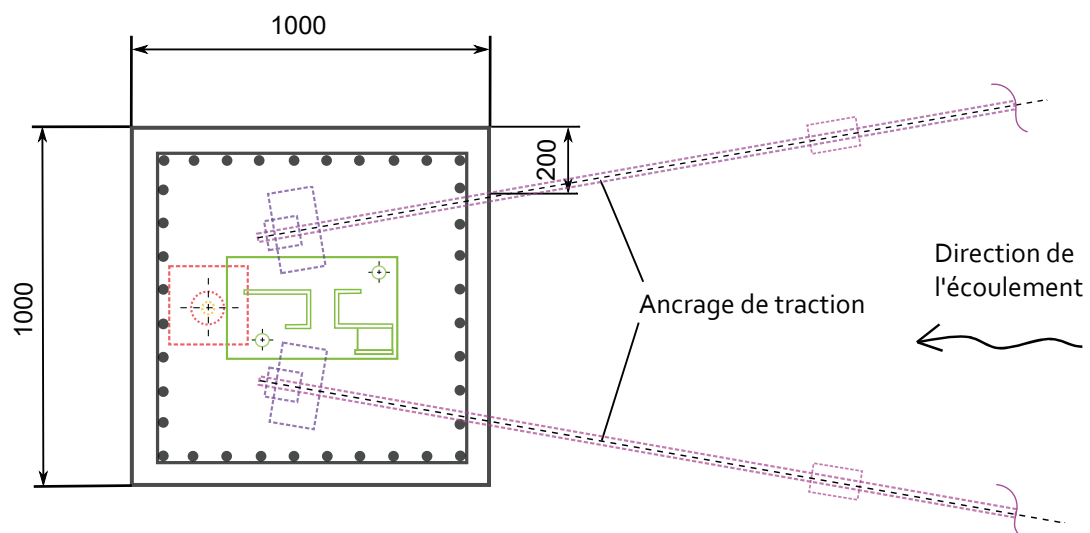


Fig. 17. Vue de dessus d'une fondation en béton armé avec une barre de pression et deux barres de traction, d'après [15].

8 Inspection et entretien

8.1 Conditions de base

Les ouvrages de protection sont soumis à des exigences en matière de sécurité structurale, d'aptitude au service et de durabilité. Des inspections régulières et un entretien approprié sont nécessaires pour garantir le bon fonctionnement des **barrières à filet** pendant leur **durée de vie** définie [19].

Les responsabilités et la fréquence des inspections ainsi que de l'entretien courant et structural sont gérées différemment selon le canton/l'autorité compétente et le propriétaire de l'ouvrage. Elles doivent donc être prises en compte et identifiées lors de la planification. L'entretien courant peut être effectué par le propriétaire ou par des prestataires de services spécialisés, tels que les services d'approvisionnement en eau ou le service forestier. Pour tout entretien structural (réparation de l'ouvrage), il est conseillé d'impliquer le fabricant de la barrière à filet, les autorités responsables et une entreprise de construction spécialisée. Il est important que l'inspection et l'entretien soient pris en charge exclusivement par des professionnels spécifiquement formés. La sécurité de tous les intervenants doit être garantie à tout moment et conforme aux dispositions légales en vigueur.

Des systèmes de surveillance et d'alerte peuvent également s'avérer très utiles pour l'inspection des ouvrages de protection. La publication «Guide pratique pour l'utilisation de systèmes de préalerte dans le domaine des dangers naturels gravitationnels» [24] décrit, sur la base de la théorie et d'études de cas, différentes possibilités de recours à de tels systèmes.

8.2 Outils dédiés aux inspections des filets de protection

Les outils suivants peuvent être utilisés pour les inspections ainsi que pour l'entretien courant et structural:

- Manuel «Contrôle des ouvrages de protection» [19]
- Manuels d'entretien des fournisseurs de systèmes

Pour les filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue, on utilise généralement les mêmes composants, ou équivalents, que pour les filets de protection contre les chutes de pierres. Pour l'inspection des filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue, les mêmes formulaires d'évaluation des dommages peuvent être utilisés que ceux pour les filets de protection contre les chutes de pierres (voir également le Manuel Contrôle des ouvrages de protection [19]). En règle générale, les manuels d'entretien des fournisseurs de systèmes contiennent également ces formulaires (exemple en annexe C). En cas de dégâts, la réparation de l'ouvrage peut être réalisée de la même manière que pour les filets de protection contre les chutes de pierres.

8.3 Mesures à mettre en place après un événement

Mesures nécessaires à mettre en place après un événement (remplissage partiel ou complet, voir exemples au tab. 8):

- Informer les autorités cantonales, via les propriétaires ou les services techniques associés.
- Informer la population concernée par la situation, via la commune ou les autorités cantonales.
- Assurer la sécurité des infrastructures à protéger (exemple: fermeture de routes, via la commune ou le canton).
- Mandater une entreprise de construction, via le maître d'ouvrage, pour le vidage des barrières.
- Assurer la sécurité des intervenants, via l'entreprise.
- Purge de la barrière à filet par l'entreprise.
- Remplacement de tous les composants défectueux de la barrière en filet par l'entreprise.
- Réception/mise en service de la structure par le fabricant de la barrière de filet en concertation avec les autorités cantonales.

Après la réparation d'une barrière à filet par des professionnels, une réévaluation de sa **durée de vie** future doit être réalisée.

Tab. 8. Situation après remplissage partiel ou complet d'une barrière à filet.



Embâcle de l'ouverture de base suite au remplissage partiel d'un filet de protection contre les laves torrentielles.

Image: [C]



Filet de protection contre les laves torrentielles complètement rempli et débordé.

Image: [D]



Filet de protection contre les laves torrentielles rempli par le charriage.

Image: [G]

8.4 Purge des filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue

Comme tous les ouvrages de rétention, les filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue doivent être vidés et réparés après avoir été partiellement ou complètement remplis. Lors de la purge de ces filets (voir également le tableau 9), les points suivants doivent être pris en compte:

- L'accès au site, l'enlèvement et le transport des matériaux, les sites de mise en décharge et les sites de réalimentation du charriage doivent être définis lors de la planification.
- En raison du remplissage du filet, la structure porteuse est sous tension. Par conséquent, une attention particulière doit être apportée lors de toutes les opérations de purge. Les manuels d'installation ou d'entretien des fabricants de barrières à filet fournissent des informations sur les méthodes d'ouverture de la barrière à filet.

Comme pour les autres ouvrages de rétention, les points suivants doivent être pris en compte:

- Les filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue doivent être vidés depuis le côté amont, dans la mesure du possible. Même si la purge depuis le côté aval de l'ouvrage est souvent possible, elle est généralement plus complexe du point de vue de la sécurité des intervenants.
- Si la situation le permet, la purge doit être effectuée le plus rapidement possible afin de rendre la zone de rétention à nouveau disponible dans les plus brefs délais.
- Une attention particulière doit être accordée à la sécurité des intervenants.
- Il est recommandé d'élaborer un concept de purge incluant les étapes de travail et les scénarios d'urgence.

Tab. 9. Purge des filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue après un événement.



Purge d'un filet de protection contre les laves torrentielles depuis le côté amont à l'aide d'une pelle araignée.

Image: [G]



Purge d'un filet de protection contre les coulées de boue du côté aval à l'aide d'une pelleuse.

Image: [G]

9 Ouvrages spéciaux

Des exigences particulières nécessitent des solutions particulières. C'est notamment le cas pour les barrières à filet, lorsque les limites du système, telles décrites au chapitre 3.1, sont atteintes. En Suisse, plusieurs structures spéciales ont été mises en place jusqu'à présent. Ci-dessous, une sélection d'ouvrages spéciaux est présentée. Des informations plus détaillées sont disponibles dans les fiches signalétiques données en annexe B. Il est important de noter que les ouvrages spéciaux ont généralement une structure porteuse très complexe et nécessitent un examen et un dimensionnement détaillés. Par ailleurs, une simulation numérique de la structure peut apporter des compléments d'information plus détaillés.



Filet à câbles suspendus

Torrent Hüpbach à Oberwil, Simmental
Image: [F]



Barrière à plusieurs niveaux

Torrent Trachtbach à Brienz
Image: [G]



Ouvrage à filet avec murs en béton longitudinaux

Torrent Grönbach à Merligen
Image: [F]



Ouvrage à filet avec piliers en béton

Torrent Innere Sitebach à Lenk i.S.
Image: [F]

**Ouvrage d'appoint avec ajout d'un filet**

Torrent Illgraben à Loèche

Image: [A]

**Protection contre l'érosion et ouvrage de filtration**

Torrent Durschtbach au Simplon

Image: [G]

**Ouvrage pour charges combinées**

Baltisberg/Härzigwald

Image: [H]

**Filet de protection contre le bois flottant**

Torrent Chiene à Reichenbach i.K.

Image: [F]

10 Processus de dimensionnement

Une fois la décision prise d'installer une **barrière à filet**, cette dernière doit être dimensionnée. Le processus de dimensionnement des filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue, tel que schématisé sur les figures 18 et 19, permet d'assurer un bon dimensionnement de l'ouvrage de protection.

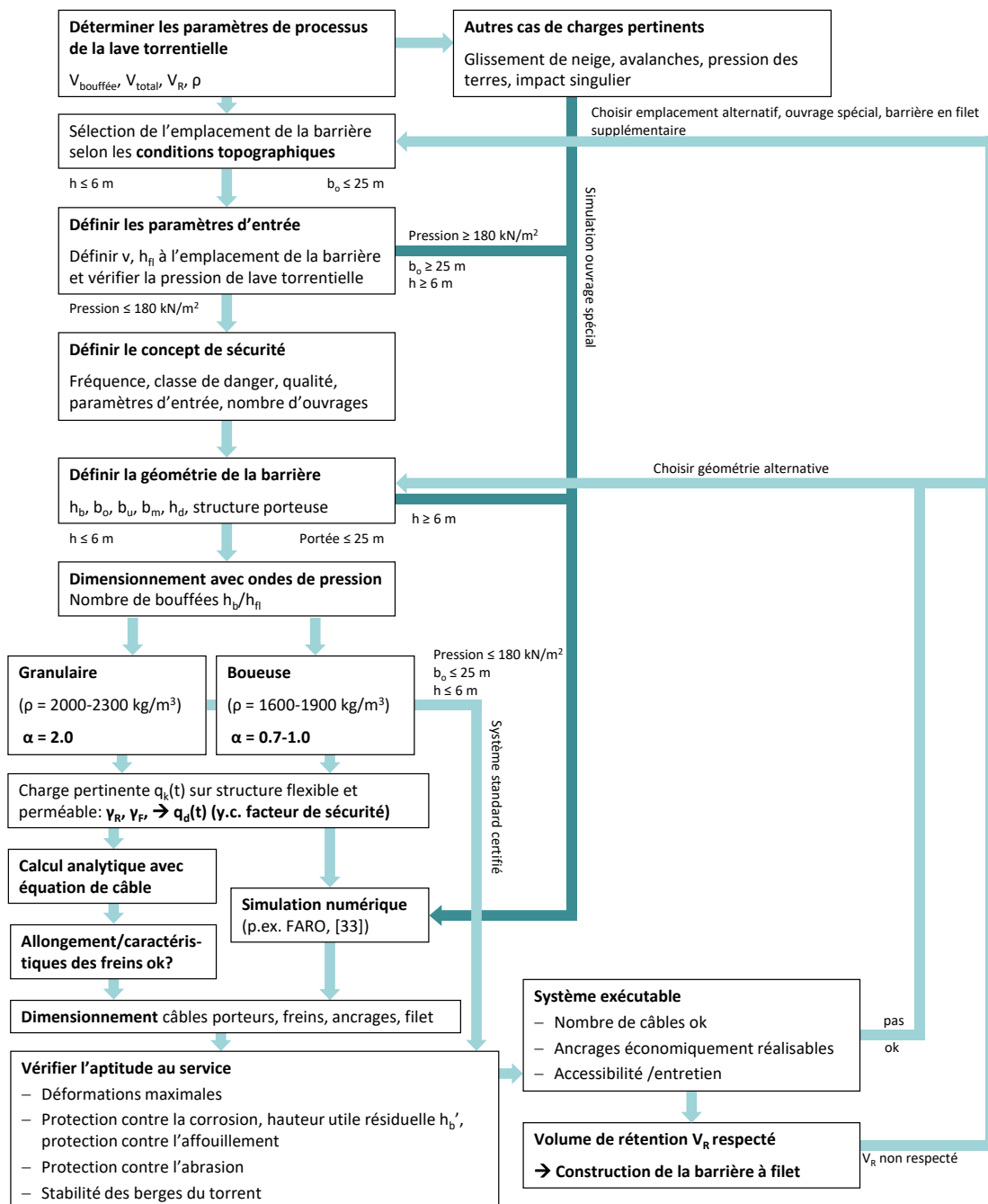


Fig. 18. Processus de dimensionnement pour les filets de protection contre les laves torrentielles, d'après [35].

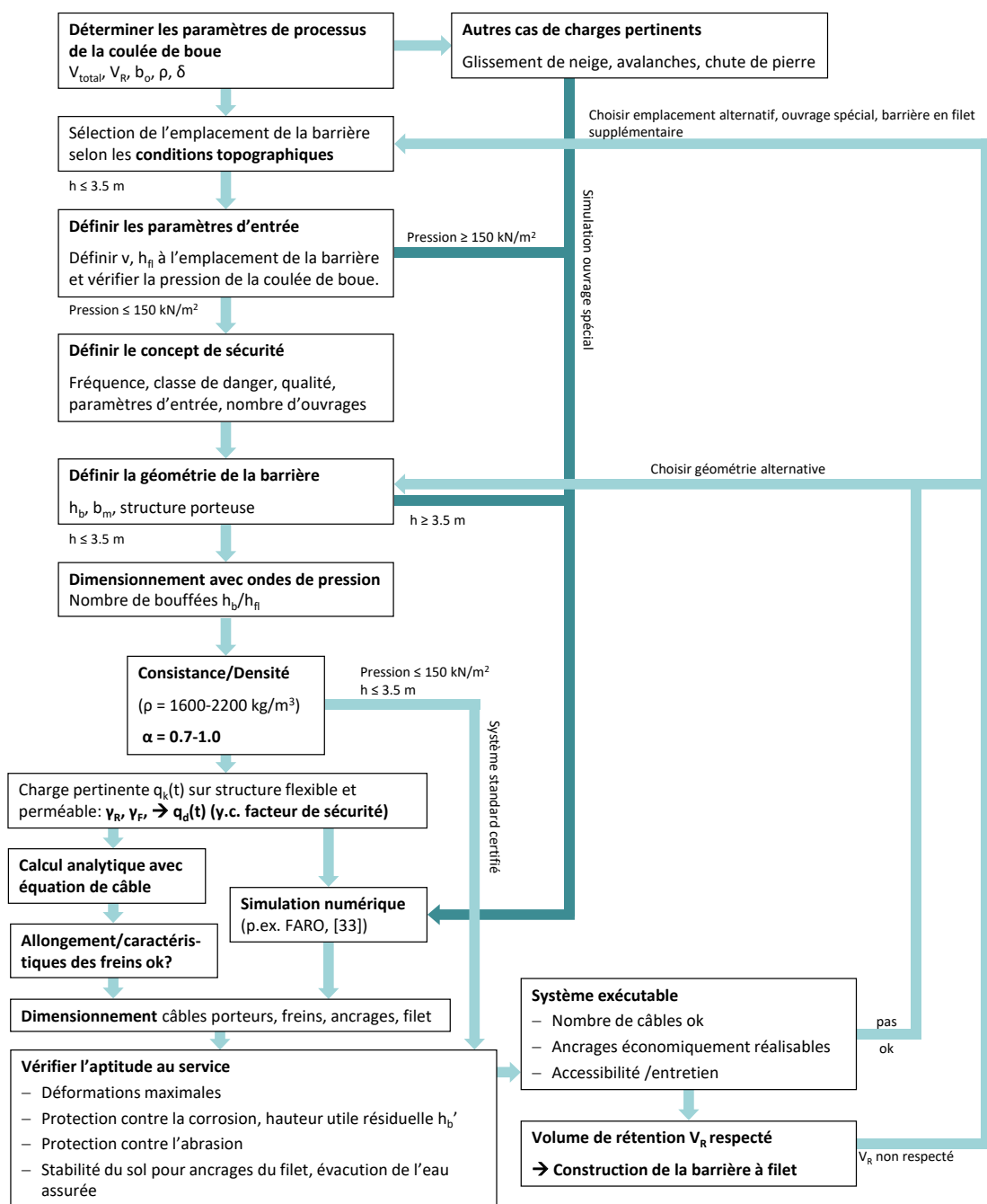


Fig. 19. Processus de dimensionnement pour les filets de protection contre les coulées de boue, d'après [35].

11 Conclusion et perspectives

Les ouvrages de protection sont, en plus des mesures de protection liées à l'aménagement du territoire, des mesures organisationnelles et des mesures de génie biologique, un élément important de la protection intégrée contre les dangers naturels. Conçus et entretenus correctement, ils remplissent une fonction de protection à long terme. En fonction de leur emplacement dans des secteurs sujets à un processus, les dangers naturels peuvent être déviés, ralentis, arrêtés ou leur développement empêché. Au cours des dernières décennies, de nombreuses habitations et voies de communication en Suisse ont été protégées par des ouvrages installés dans les zones d'arrachement ou de rupture, ou par des ouvrages installés à proximité ou sur des objets à protéger. En plus des ouvrages traditionnels, plutôt rigides, des solutions plus légères et flexibles, telles que les barrières à filet, ont été développées plus récemment.

Ce guide pratique donne un aperçu de l'état de la technique sur les filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue en Suisse. Il traite de sujets importants tels que les possibilités et limites d'utilisation ainsi que de la conception et du dimensionnement des filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue. Des diagrammes d'aide à la décision permettent de déterminer si, dans une situation donnée, une barrière à filet est une structure de protection appropriée et quels aspects doivent être pris en compte pour sa planification et sa mise en œuvre. Le guide met l'accent sur l'importance de l'inspection et de l'entretien des barrières à filet pour une utilisation à long terme, comme c'est le cas pour tous les ouvrages de protection. Il traite de différents types de barrières à filet dans la mesure où diverses structures spéciales, en plus des systèmes standards labellisés CE, sont mises en œuvre et viennent élargir le champ d'application des barrières à filet.

Les enseignements tirés des événements liés aux dangers naturels et le comportement des ouvrages de protection en cas d'événement constituent une précieuse source d'expérience. Cela permet d'améliorer la protection contre les dangers naturels dans le cadre d'une gestion intégrée des risques. Cette publication a été réalisée grâce au soutien de nos mandants que sont l'Office fédéral des routes OFROU et l'Office fédéral de l'environnement OFEV, que nous remercions ici. L'élaboration de ce guide a également bénéficié du savoir-faire d'experts en matière de filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue. Nous tenons à remercier toutes celles et ceux qui ont contribué à cet effort commun: pensé par des praticiens pour les praticiens !

Pour la suite, il est important que les expériences réalisées dans le domaine des barrières à filet continuent à être documentées et partagées. Les connaissances acquises jusqu'à aujourd'hui sont une clé pour l'avenir et constituent une base précieuse pour le développement et l'amélioration continus des filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue.

12 Répertoires

Glossaire

Terme	Explication
Barrière à filet	Structure de rétention contre les dangers naturels gravitationnels composée d'ancrages et de filets métalliques flexibles. Dans ce guide, le terme est utilisé pour des filets de protection contre les laves torrentielles et les coulées de boue.
Bavette de rétention amont	Filet auxiliaire monté de façon détendue sur le côté amont de la barrière à filet pour éviter un écoulement sous la barrière.
Cas de charge	Dans l'analyse structurelle, un cas de charge est défini comme un ensemble de charges, de déformations et d'imperfections qui peuvent agir simultanément sur une structure.
Certificat/déclaration de conformité	La déclaration de conformité est une confirmation écrite, à la fin d'une évaluation de conformité, par laquelle le/la responsable de la fourniture d'un produit ou d'un service (exemple: le fabricant, le distributeur, l'exploitant, le contractant) ou un organisme (exemple: un laboratoire d'essais, l'exploitant d'un système de gestion de la qualité) déclare et confirme de manière contraignante que l'objet en question (le produit, le service, l'organisme, le système de gestion de la qualité) possède les propriétés spécifiées dans la déclaration.
Chaussette en tissu	Tissu utilisé pour réduire la perte du mortier d'ancrage dans le trou de forage.
Classe de protection contre la corrosion	Selon la norme SIA 267 [29], la classification graduelle d'un ancrage permet de déterminer les mesures de protection nécessaires contre la corrosion. Le niveau de protection dépend de la durée de vie prévue, de la classe structurelle et du risque de corrosion.
Classe de résistance à la compression du béton	Pour la classification de la résistance à la compression du béton, on utilise la résistance caractéristique de cylindres de 150 mm de diamètre et 300 mm de longueur ($f_{ck,cyl}$) ou de cubes de 150 mm de longueur d'arête ($f_{ck,cube}$) à l'âge d'essai de 28 jours.
Discrétisation	La discrétisation est la segmentation de la zone de calcul en petites parties permettant de mettre à disposition un modèle idéalisé comme modèle de calcul numérique. Le pas de temps est défini comme la longueur de l'intervalle de temps d'une simulation dynamique. La progression temporelle divisée en segments individuels (discrétisés) et la solution calculée par étapes pour des pas de temps successifs est également une discrétisation dans la Méthode des Eléments Finis (FEM).
Durée de vie	Période prévue pendant laquelle l'aptitude au service complète d'une barrière à filet est garantie.
Élément d'absorption d'énergie	Composant, généralement en métal, qui absorbe les forces exercées sur la structure du filet ainsi que l'énergie par déformation plastique de l'élément (souvent communément appelé «élément de freinage»)
Famille de processus	Classification des filets de protection en fonction de leur utilisation dans un processus de danger naturel spécifique (exemple: filets de protection contre les laves torrentielles, filets de protection contre les chutes de pierres). Une famille de processus est subdivisée en fonction des différents types de filet.
Filet primaire	Élément de filet pour la transmission de la charge principale et la rétention des matériaux, principalement à mailles grossières.
Injection supplémentaire	Injection répétée de mortier d'ancrage dans le trou de forage afin d'augmenter la liaison entre le mortier d'ancrage et le trou de forage. Cela augmente également la liaison entre la colonne du mortier d'ancrage et l'ancrage lui-même.
Label CE	Conformité du produit déclarée par le fabricant conformément à la Directive Européenne N° 765/2008. Le produit est conforme aux exigences applicables définies dans la législation communautaire d'harmonisation sur l'apposition du label.

Terme	Explication
Ouverture de base	Pour les filets de protection contre les laves torrentielles: ouverture entre le fond du lit du torrent et les câbles porteurs inférieurs pour permettre à l'écoulement normal et aux petits événements non critiques de s'écouler sous la barrière à filet.
Paramètres du système	Paramètres structurels tels que la taille du système de protection (portée et hauteur), la résistance, le type de filet de protection, la charge d'ancrage, etc.
Pression d'impact	Pression de pointe à court terme exercée sur la surface du filet dans la zone de l'impact.
Protection contre l'abrasion	Elément de protection sur les câbles porteurs supérieurs d'une barrière à filet pour éviter d'endommager les câbles en cas de débordement de celle-ci.
Treillis secondaire	Deuxième filet à mailles plus fines monté sur le filet primaire du côté amont pour retenir les matières fines.
Types de barrière	Classification d'une structure par type de construction (exemple: structure rigide ou barrière à filets flexibles).
Types de filet	Le terme définit des structures appartenant à la même famille de processus, mais conçues pour des actions ou des cas de charge différents.
Vérification au flambage par flexion et torsion	Vérification d'un pilier selon la norme SIA 263 [28]: analyse du flambage de l'élément dû à une charge combinée de flexion et de compression.
Vérification du filet	Vérification de la sécurité structurale du filet seul.
Zones d'influence	Au sens statique, une zone spécifique dans laquelle sont retenus des matériaux et à partir de laquelle, mathématiquement parlant, une charge est exercée sur un composant spécifique étudié.

Liste des abréviations

Abréviation	Explication
AGN	Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren / Groupe de travail géologie et dangers naturels
CTI	Ancienne Commission pour la technologie et l'innovation de l'ancien Office fédéral de la formation professionnelle et de la technologie (OFFT)
DoP	Déclaration of Performance / Déclaration de performance
EAD	European Assessment Document / Document d'évaluation européen; document d'évaluation des produits de construction
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungsanstalt / Laboratoire fédéral suisse d'essai des matériaux et de recherche
EOTA	European Organisation for Technical Assessment / Organisation européenne pour évaluations techniques
EPF	Ecole polytechnique fédérale
ETA	European Technical Assessment / Évaluation technique européenne; évaluation technique des produits de construction
FAN	Fachleute Naturgefahren / Spécialistes des dangers naturels
FPC	Factory Production Control / Contrôle de la production en usine
JCSS	Joint Comitee of Structural Safety/ Comité mixte de la sécurité structurale; organisme international dans le domaine du risque et de la fiabilité liés aux structures
LACE	Loi fédérale sur l'aménagement des cours d'eau
LEaux	Loi fédérale sur la protection des eaux
LPN	Loi fédérale sur la protection de la nature et du paysage

Abréviation	Explication
OEC	Organisme d'évaluation de la conformité
OFEV	Office fédérale de l'environnement
OFROU	Office fédéral des routes
SIA	Société suisse des ingénieurs et des architectes
WSL	Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage

Symboles

Symbole	Explication	
<i>Lettres grecques</i>		
α	Coefficient de pression pour l'impact de la lave torrentielle ou de la coulée de boue sur la structure/le filet de protection	[–]
α_t	Coefficient de dilatation thermique du fil d'acier des câbles	[–]
δ	Angle de propagation d'une lave torrentielle ou d'une coulée de boue	[°]
ξ	Angle entre la structure de protection et le lit du cours d'eau	[°]
ρ	Densité du front de la lave torrentielle ou de la coulée de boue. Mais aussi: densité d'un bloc isolé selon la géologie locale	[kg/m ³]
σ	Charge de la lave torrentielle lors du débordement avec hauteur d'écoulement h_{ff}	[N/m ²]
τ	Contrainte de cisaillement de la lave torrentielle ou de la coulée de boue sur le lit et pendant le débordement	[N/m ²]
θ	Angle de la section du cours d'eau ou angle de la pente à l'emplacement du filet	[°]
θ'	Angle de dépôt	[°]
γ_F	Facteur de sécurité partiel pour les laves torrentielles et coulées de boue côté charge	[–]
γ_R	Facteur de sécurité partiel côté résistance	[–]
<i>Lettres latines</i>		
A	Section transversale effective du câble	[m ²]
a	Coefficient de poussée des terres, $a = 1.0$	[–]
$a_{b,i}$	Accélération moyenne de freinage pendant l'impact de la bouffée i	[m/s ²]
B_m	Largeur portante du pilier	[m]
b_m	Largeur moyenne du filet de protection, déterminée à partir de la largeur en haut b_o et de la largeur en bas b_u , où: $b_m = (b_u + b_o)/2$	[m]
b_{max}	Étalement maximal des matériaux le long de la barrière à filet	[m]
b_o	Largeur du filet de protection en haut	[m]
b_u	Largeur du filet de protection en bas	[m]
b_0	Largeur de la zone de départ	[m]
c_p	Coefficient de pression pour les laves torrentielles/glissements de terrain selon la norme SIA 261/1 [27]	[–]
d	Diamètre d'un bloc typique	[m]
E	Module d'élasticité du câble	[N/m ²]
$E_{pot,câble}$	Énergie d'allongement du câble pendant l'impact d'un bloc	[J]

Symbole	Explication	
F_D	Force de compression du pilier	[N]
F_g	Force due au poids propre de l'expansion du filet	[N]
F_{filet}	Force dans le filet par mètre linéaire	[N/m]
F_{amont}	Force des haubans amont	[N]
$F_{\text{câble}}$	Force des câbles porteurs	[N]
G	Force due au poids du renflement du câble	[kN/m]
f	Flèche maximale de la barrière	[m]
g	Constante gravitationnelle	[m/s ²]
H	Force horizontale du câble selon l'équation du câble	[N]
H'_0	Hauteur abaissée de la barrière pendant le processus de remplissage	[m]
h	Hauteur de la barrière à filet	[m]
h'	Hauteur abaissée de la barrière à l'instant t . Lorsque la barrière est remplie $h' = h_b'$	[m]
h_b	Hauteur originale de la barrière avant la condition de charge	[m]
h_b'	Hauteur utile résiduelle, ou hauteur de barrière abaissée	[m]
h_d	Hauteur de l'ouverture de base de la barrière à filet	[m]
h_{fl}	Hauteur d'écoulement	[m]
I_s	Pente du torrent, côté amont	[–]
I_s'	Pente des matériaux retenus	[–]
k_s	Rigidité du ressort d'un câble de longueur L	[N/m]
L	Longueur du câble	[m]
ΔL	Déformation élastique du câble	[m]
L_0	Distance entre la zone de départ de la coulée de boue et la barrière à filet	[m]
L_{min}	Longueur minimale de la barrière à filet	[m]
L_r	Longueur de la zone de rétention le long du lit du torrent	[m]
l	Portée effective du câble considéré	[m]
l_{r1}, l_{r2}	Longueurs de retenue individuelles horizontales pour le modèle FSI par bouffée	[m]
l_r	Longueur de l'espace de retenue horizontal dans le modèle FSI	[m]
m	Masse du bloc isolé	[kg]
m_0, m_1	Masse de l'impact discrétisé	[kg]
n	Nombre de câbles	[–]
p_0, p_1	Pression d'impact selon le nombre d'impacts discrétisés (dans le modèle FSI)	[N/m ²]
p_{dyn}	Pression hydrodynamique	[N/m ²]
p_f	Probabilité de défaillance acceptée d'une structure à filet en fonction de la classification des risques	[–]
p_{stat}	Pression hydrostatique	[N/m ²]
Q	Valeurs de l'intégrale de l'équation du câble selon [20].	[–]

Symbole	Explication	
$Q_{\max}$	Pic de débit ou débit maximal au front de la lave torrentielle ou de la coulée de boue	[m ³ /s]
q	Charge répartie sur le câble provenant de la pression des matériaux	[kN/m]
R	Résultante du cas de charge débordement	[kN/m]
S	Section du câble discrétisée S	[m]
s	Pente du versant	[–]
s_0	Longueur initiale du câble avec une flèche de $L/30$ et le poids propre considéré	[m]
t_f	Temps de remplissage réel discrétisé, pour le modèle FSI	[s]
t_b	Temps de freinage, pour le modèle FSI	[s]
t_x	Temps de remplissage discrétisé pour une bouffée de volume V	[s]
Δt	Gradient de température	[–]
V_R	Volume de rétention de la barrière à filet	[m ³]
v	Vitesse frontale moyenne de la lave torrentielle ou de la coulée de boue	[m/s]
v_f	Vitesse des blocs dans le modèle FSI	[m/s]
$V_{\text{bouffée,réel}}$	Volume d'une bouffée de lave torrentielle	[m ³]
$V_{\text{bouffée}}$	Volume d'une bouffée de lave torrentielle, pour le modèle FSI	[m ³]
V_{total}	Volume d'événement total d'une lave torrentielle ou d'une coulée de boue	[m ³]

13 Bibliographie et crédits photographiques

- [1] AGN, 2004: Gefahreneinstufung Rutschungen i.w.S. (classification des dangers liés aux glissements de terrain au sens large). Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren AGN (Groupe de travail Danger naturel et Géologie). Rapport de travail à l'attention de l'Office fédéral des eaux et de la géologie OFEG, Berne. 44 p.
- [2] OFEV (éd.), 2016: Protection contre les dangers dus aux mouvements de terrain. Aide à l'exécution concernant la gestion des dangers dus aux glissements de terrain, aux chutes de pierres et aux coulées de boue. Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne. L'environnement pratique N° UV-1608-F. 98 p.
- [3] OFEV (éd.), 2018a: Bases de l'évaluation de la qualité des filets pare-pierres et de leurs fondations. Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne. Connaissance de l'environnement N° UW-1805-F. 42 p.
- [4] OFEV (éd.), 2018b: Manuel sur les conventions-programmes 2020–24 dans le domaine de l'environnement. Communication de l'OFEV en tant qu'autorité d'exécution aux demandeurs. Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne. L'environnement pratique N° UV-1817-F. 294 p.
- [5] OFEV (éd.), 2019: Typenliste Ankermörtel (Liste des types de mortier d'ancrage approuvés). Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne. L'environnement pratique N° 1007. 5 p.
- [6] OFCL (éd.), 2017: Guide concernant la législation sur les produits de construction. Office fédéral des constructions et de la logistique OFCL, Berne. 103 p. (consulté via <https://www.bbl.admin.ch/bbl/fr/home/themen/fachbereich-bauprodukte/downloads.html>, en date du: 27.07.2020)
- [7] OFEN (éd.), 2015: Directive sur la sécurité des ouvrages d'accumulation. Partie A: Généralités. Office fédéral de l'énergie OFEN. Version 2.0, 01.03.2015. 23 p.
- [8] OFAT; OFEE; OFEFP, (éd.), 1997: Prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire. Recommandations 1997, Office fédéral de l'aménagement du territoire OFAT, Office fédéral de l'économie des eaux OFEE, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP, Berne. 42 p.
- [9] BUGNION, L.; McARDELL, B. W.; BARTELT, P.; WENDELER, C., 2012: Measurements of hillslope debris flow impact pressure on obstacles. Dans: Landslides – Journal of the International Consortium on Landslides 9: 179–187.
- [10] OFEFP (éd.), 2004: Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP (aujourd'hui Office fédéral de l'environnement OFEV), Berne. L'environnement pratique N° VU-2508-F. 143 p.
- [11] DORREN, L.; SCHWARZ, M., 2016: Quantifying the stabilizing Effect of Forests on Shallow Landslide-prone Slopes. Dans: Ecosystem-based Disaster Risk Reduction and Adaptation in Practice. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg. 255–270.
- [12] EAD 340020-00-0106, 2016: Flexible Kits for retaining Debris Flows and Shallow Landslides/ Open Hill Debris Flows. European Assessment Document EAD (Document d'évaluation européen). European Organisation for Technical Assessment EOTA (Organisation européenne pour agréments techniques) 2016. 25 p. (consulté via www.eota.eu, EAD-N° 340020-00-0106, en date du: 27.07.2020)
- [13] FEIGER, N., 2019: Analyse der Gebrauchstauglichkeit von Murgangnetzen nach 10 Jahren Praxiserfahrung (Analyse de l'aptitude au service des filets de protection contre les laves torrentielles après 10 ans d'expérience pratique). Thèse master à l'EPF Zurich. 30 p.
- [14] FRICK, E.; KIENHOLZ, H.; ROMANG, H., 2011: SEDEX (SEDiments and EXperts), Guide d'utilisateurs. Geographica Bernensia P42. Institut Géographique de l'Université de Berne, Berne. 128 p.
- [15] GEOBRUGG AG (éd.), 2016: Systemhandbuch Murgangbarrieren VX/UX. Ausgabe 164-N-FO/05, Romanshorn.
- [16] GEOBRUGG AG (éd.), 2020: Notice du logiciel DEBFLOW – protection contre laves torrentielles. (consulté via <https://www.geobrugg.com/fr/Outils-de-cotation-117493.html>, en date du: 27.07.2020)
- [17] GERTSCH, E., 2009: Geschiebelieferung alpiner Wildbachsysteme bei Grossereignissen – Ereignisanalysen und Entwicklung eines Abschätzverfahrens (Approvisionnement de charriage des systèmes de torrents alpins pendant des événements majeurs - analyses d'événements et développement d'une procédure d'estimation). Dissertation à l'Institut Géographique de l'Université de Berne, Berne. 203 p.

- [18] JCSS (éd.), 2001: Probabilistic Model Code. Part I. Joint Comitee of Structural Safety JCSS. (consulté via https://www.jcss-lc.org/publications/jcsspmc/part_i.pdf, en date du: 07.08.2020)
- [19] Cantons GR, BE, VS (éd.), 2012: Manuel Contrôle des ouvrages de protection. Offices des forêts et des dangers naturels des cantons des Grisons et de Berne. Service des forêts, des cours d'eau et du paysage du canton du Valais. 82 p.
- [20] PALKOWSKI, S., 1990: Statik der Seilkonstruktionen. Theorie und Zahlenbeispiele (Statique des constructions avec câbles. Théorie et exemples). Edition Springer, Berlin, Heidelberg. 108 p.
- [21] RICKENMANN, D., 2014: Methoden zur quantitativen Beurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen (Méthodes pour l'évaluation quantitative des processus en torrents alpins). Birnensdorf. Rapport WSL 9: 105 p.
- [22] RICKENMANN, D., 2016: Methods for the Quantitative Assessment of Channel Processes in Torrents (Steep Streams). IAHR Monograph Series (éd. Peter A. Davies), London. <https://doi.org/10.1201/b21306>
- [23] ROMANG, H. (éd.), 2008: Efficacité des mesures de protection / PROTECT. Plate-forme nationale Dangers naturels PLANAT, Berne. 289 p.
- [24] SÄTTELE, M.; BRÜNDL, M., 2015: Guide pratique pour l'utilisation de systèmes de préalerte dans le domaine des dangers naturels gravitationnels. WSL Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF, Office fédéral de la population OFPP (éd.), Berne. 61 p.
- [25] SIA 260, 2003: Bases pour l'élaboration des structures porteuses. Norme suisse. Société suisse des ingénieurs et des architectes sia.
- [26] SIA 261, 2003: Actions sur les structures porteuses. Norme suisse. Société suisse des ingénieurs et des architectes sia.
- [27] SIA 261/1, 2020: Actions sur les structures porteuses – Spécifications complémentaires. Norme suisse. Société suisse des ingénieurs et des architectes sia.
- [28] SIA 263, 2013: Construction en acier. Norme suisse. Société suisse des ingénieurs et des architectes sia.
- [29] SIA 267, 2003: Géotechnique. SIA 267/1, 2013: Géotechnique – Spécifications complémentaires. Société suisse des ingénieurs et des architectes sia.
- [30] SUDA, J.; RUDOLF-MIKLAU F. (éd.), 2012: Bauen und Naturgefahren. Handbuch für konstruktiven Gebäudeschutz (Bâtiments et dangers naturels. Manuel pour la protection constructive des bâtiments). Edition Springer, Wien. 507 p.
- [31] AEAI (éd.), 2005: Protection des objets contre les dangers naturels gravitationnels – Recommandations. Association des établissements cantonaux d'assurance incendie AEAI, Berne. 105 p.
- [32] VOLKWEIN, A., 2004: Numerische Simulation von flexiblen Steinschlagschutzsystemen (Simulation numérique de systèmes flexibles de protection contre les chutes de pierres). Dissertation à l'EPF Zürich. 134 p.
- [33] VOLKWEIN, A., 2014: Flexible Murgangbarrieren – Bemessung und Verwendung (Barrières flexibles contre les laves torrentielles – dimensionnement et utilisation). WSL Berichte 8: 31 p.
- [34] VON BOETTICHER, A., 2012: Flexible Hangmurenbarrieren: Eine numerische Modellierung des Tragwerks, der Hangmure und der Fluid-Struktur-Interaktion (Barrières flexibles contre les coulées de boue: une simulation numérique de la structure porteuse, du processus et de l'interaction fluide-structure). Dissertation à l'Université Polytechnique de Munich, Munich. 186 p.
- [35] WENDELER, C., 2008: Murgangrückhalt in Wildbächen – Grundlagen zu Planung und Berechnung von flexiblen Barrieren. (Rétention des laves torrentielles dans les torrents alpins – bases pour la planification et le dimensionnement des barrières flexibles). Dissertation à l'EPF Zürich, Zürich. N° de dissertation EPFZ 17916. 277 p.
- [36] WENDELER, C., 2010: In wie weit können trotz der grossen Prozessunsicherheit bei einer Hangmure flexible Netze zu einer Rückstufung der Gefahrenkarte gemäss PROTECT führen? (Incertitudes au niveau des évaluations du processus des coulées de boue: à quel point des filets flexibles sont-ils appropriés pour justifier une réduction du degré de danger sur la carte des dangers selon PROTECT?) CAS Protection des bâtiments contre les risques naturels. Haute école spécialisée bernoise FHB, Berne. 60 p.
- [37] WENDELER, C.; VOLKWEIN, A., 2015: Laboratory Tests for the Optimization of Mesh Size for Flexible Debris-Flow Barriers. Dans: Natural Hazards and Earth System Science 15: 2597–2604.

Photos

Les photos utilisées proviennent des personnes/organisations énumérées ci-dessous.

- [A] Berger Catherine
- [B] Feiger Nadine
- [C] Hählen Nils
- [D] Toniolo Marco
- [E] Wendeler Corinna
- [F] Emch+Berger SA
- [G] Geobrugg SA
- [H] Pfeifer-Isofer SA
- [I] Teyssere & Candolfi SA
- [J] Section de la carte nationale 1:25 000 de Swisstopo, reproduite avec l'autorisation de Swisstopo (JA100118)

Annexe A Exemple de dimensionnement

Calcul des forces déterminantes pour un filet de protection avec piliers

1. Géométrie/paramètres d'entrée

L'exemple de dimensionnement montre un système de 4 m de haut avec piliers, chargé par une lave torrentielle présentant une hauteur d'écoulement d'1 m, une vitesse d'écoulement de 6 m/s et une densité de 2200 kg/m³. Le cas de charge de débordement est à vérifier.

La géométrie de l'ouvrage est présentée sur la figure 20.

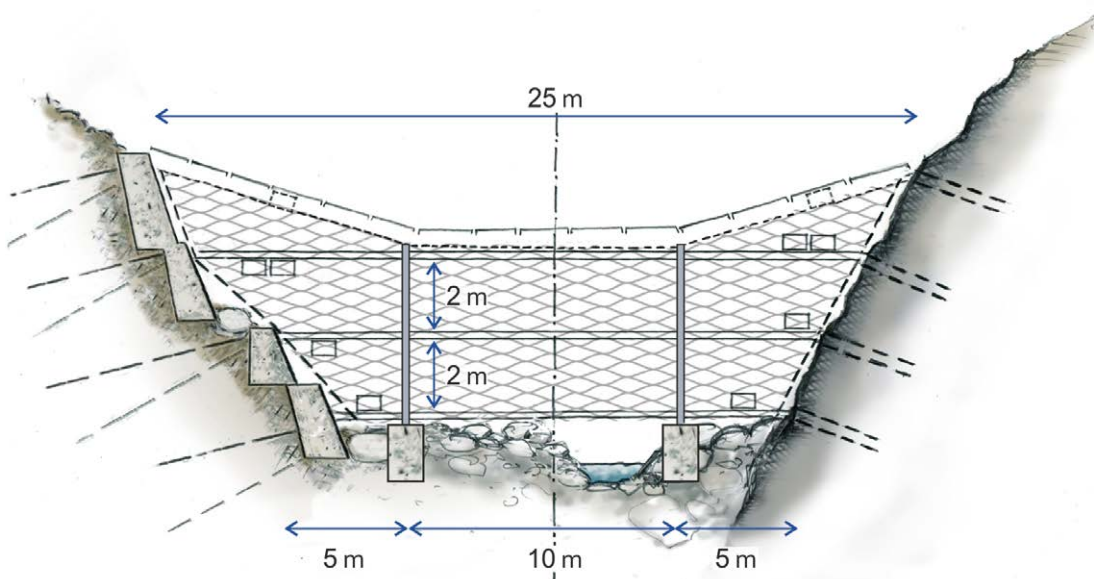


Fig. 20. Représentation schématique de la géométrie de la barrière à filet dans l'exemple de dimensionnement.

2. Cas de charge déterminants

Les cas de charge suivants sont étudiés afin de déterminer le cas de charge déterminant pour l'ouvrage.

Impact initial (voir Fig. 8, chapitre 7.2.1.1):

$$p_{dyn} = \alpha \rho v^2 = 2.0 \cdot 2'200 \cdot 6^2 = 158 \frac{kN}{m^2} \quad \text{avec } \alpha = 2.0 \text{ pour les laves torrentielles granulaires}$$

$$p_{stat} = a h_{fl} \rho g = 1.0 \cdot 1 \cdot 2'200 \cdot 9.81 = 21.6 \frac{kN}{m^2} \quad \text{avec } a = 1.0$$

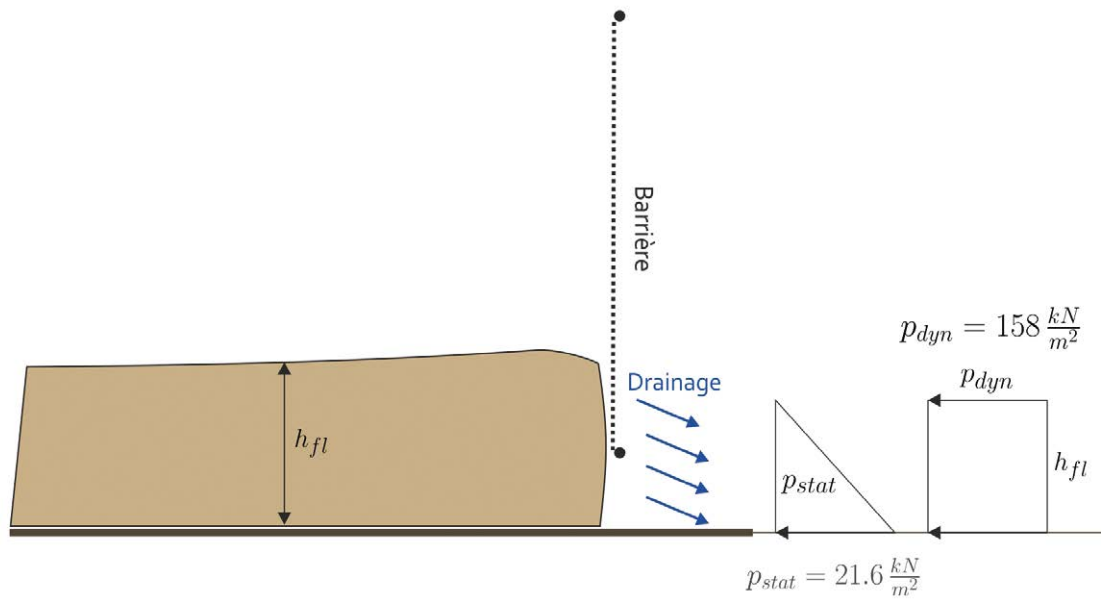


Fig. 21. Distribution des charges pour un impact initial dynamique selon les charges calculées.

La hauteur d'écoulement étant d'1 m et la distance entre les câbles porteurs de 2 m, l'impact initial frappe complètement le faisceau de câbles porteurs inférieurs, si l'ouverture de base dispose d'une hauteur $h_d = 0.0$ m. Si la profondeur de l'écoulement est supérieure à $h_{fl} = 1.5 \cdot h_d$, la barrière devient embâclée ([36], [37]). Dans ce cas, $h_d = 0$.

La charge de compression sur les câbles porteurs inférieurs se traduit alors par:

$$p_{\text{premier impact}} = 21.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1\text{m} \cdot 0.5 + 158 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1\text{m} = 168.8 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad (\text{voir Fig. 21})$$

La suite du processus de remplissage est maintenant considérée bouffée par bouffée pour une hauteur d'écoulement d'1 m, d'après figure 9.

Si la barrière est remplie et débordée par l'apport de la lave torrentielle suivante, le cas de charge de débordement doit être calculé. Les charges suivantes résultent du modèle de charge d'après [35] avec la hauteur de barrière abaissée $h_b' = 3/4 \cdot 4 \text{ m} = 3 \text{ m}$ et $h_{fl} = 1.0 \text{ m}$. Il en résulte une hauteur totale, pour la pression hydrostatique à considérer, de 4 m (3 m de hauteur de barrière abaissée plus 1 m de hauteur d'écoulement comme charge) et le calcul suivant:

$$p_{\text{stat}} = a(h_b' + h_{fl})\rho g = 1.0 \cdot 4.0 \cdot 2'200 \cdot 9.81 = 86.3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad \text{avec } a = 1.0$$

Avec un espacement des câbles de 2 m, la charge R, due au débordement, sur les câbles porteurs inférieurs est de $R = 75.5 \text{ kN/m}$ et n'est donc pas significative par rapport à l'impact initial.

3. Dimensionnement des câbles porteurs

En ce qui concerne le danger potentiel directement sous le filet de protection, s'il existe une forte probabilité que des personnes soient présentes, on utilise un facteur de sécurité $\gamma_F = 1.5$. Si cette probabilité est faible, un facteur de sécurité plus petit peut être utilisé.

Les câbles porteurs inférieurs fonctionnent comme un système à travées multiples car ils sont soutenus par les plaques de base. A titre d'exemple, la figure 22 montre la charge dans les câbles selon Palkowski [20] pour un système à travées multiples.

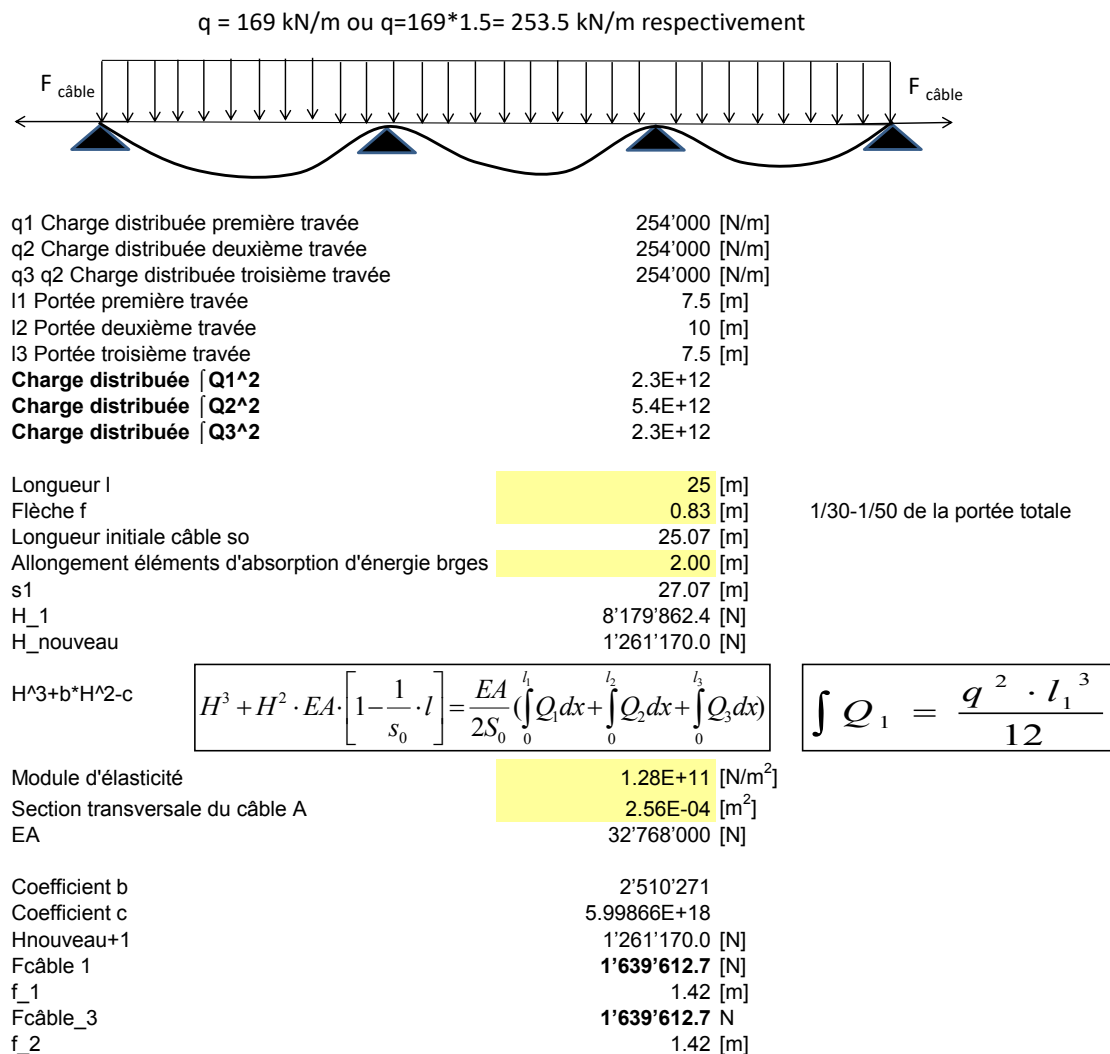


Fig. 22. Calcul des forces des câbles inférieurs d'après [20], illustré dans un tableur, avec représentation schématique des câbles.

L'équation de câble résolue à l'aide de la méthode itérative de Newton donne des forces déterminantes totales de 1300 kN pour un allongement de 2 m des éléments d'absorption d'énergie. En supposant une force de rupture de 350 kN pour les câbles avec éléments d'absorption d'énergie intégrés, on obtient le nombre de câbles n suivant (en respectant les facteurs de sécurité):

$$n = \frac{1'300 \text{ kN}}{350 \text{ kN}} = 3.7$$

Ainsi, pour une charge de rupture de 350 kN, 4 câbles sont nécessaires.

4. Dimensionnement des haubans amont

La charge sur les haubans amont est déterminée par l'impact de la dernière bouffée avant le remplissage complet de la barrière (voir Fig. 23). Une hauteur de barrière abaissée $h_b' = 3/4 \cdot 4 \text{ m} = 3 \text{ m}$ est déjà prise en compte. Dans le cas de haubans amont installés horizontalement, la composante de force horizontale serait approximativement de $F_{\text{amont}} = 1548 \text{ kN}$ en supposant une largeur d'influence moyenne de 8.5 m. Cette force doit ensuite être transformée vectoriellement dans la direction réelle des haubans amont.

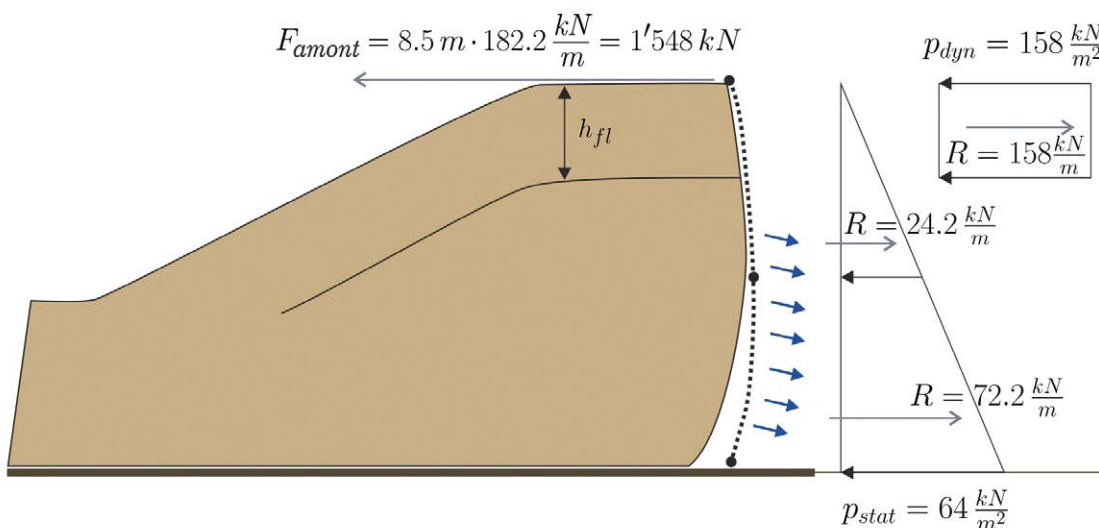
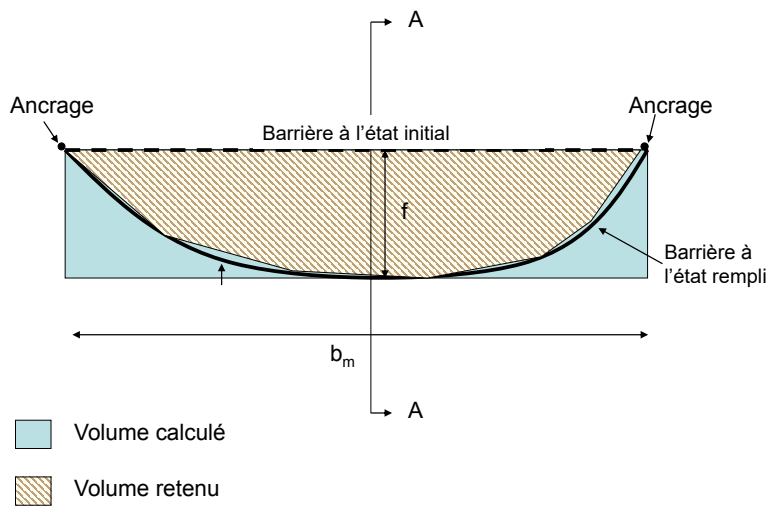


Fig. 23. Dernier impact de bouffée dans le filet de protection avant le début du débordement. Cas décisif pour le calcul des haubans amont.

5. Dimensionnement des câbles alaires

Pour le dimensionnement des câbles alaires, le poids maximal de la barrière est estimée selon la figure 24 en utilisant le poids approximatif du ventre du filet déployé F_g à une déflexion de $f = 2.5 \text{ m}$. Par conséquent, $F_g = 0.5 \cdot g \cdot f \cdot h_b' \cdot b_m \cdot \rho = 0.5 \cdot 9.81 \cdot 2.5 \cdot 3 \cdot 22.5 \cdot 2200 = 1820 \text{ kN}$. Il en résulte une composante de force verticale $G = 1820 \text{ kN} / 25 \text{ m} = 72.8 \text{ kN/m}$ pour les câbles alaires et les câbles porteurs supérieurs combinés. Avec un facteur de sécurité d'1.5, cela donne 109 kN/m sur une longueur de câble de 25 m. En utilisant une équation de câble à champ unique et en supposant un allongement de l'élément d'absorption d'énergie de 2 m, on obtient une charge maximale du câble de 2043 kN. Cela donne 6 câbles d'un diamètre de 22 mm chacun. 4 câbles étant déjà nécessaires suite à l'impact initial pour chaque impact de bouffée, 2 câbles alaires supplémentaires sont nécessaires pour l'installation.

Vue de dessus de la barrière:



Section A-A:

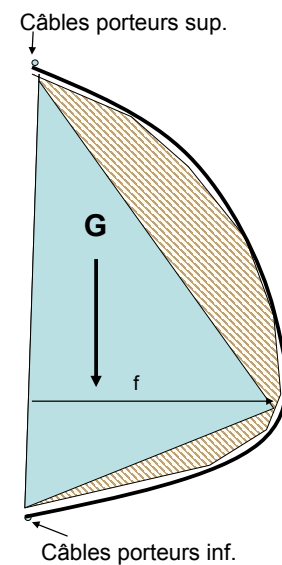


Fig. 24. Déflexion du filet et poids propre du ventre du filet. Figure d'après [35].

Charge distribuée [Q^2	1.5E+13	
q charge distribuée de câble à travée unique	109'000 [N/m]	
Longueur horizontale l	25 [m]	
Flèche f	0.83 [m]	1/30-1/50 de la portée totale
Longueur initiale câble So	25.07 [m]	
Allongement éléments d'absorption d'énergie br_ges	2.00 [m]	
s1	27.07 [m]	
H_1	1'931'162.2 [N]	Formule 6.32 selon Wendeler 2008, [34]
H_nouveau	1'523'443.9 [N]	Formule 6.34 selon Wendeler 2008, [34]
H^3+b*H^2-c		Formule 6.30 selon Wendeler 2008, [34]
Module d'élasticité	1.28E+11 [N/m ²]	
Section transversale du câble A	2.56E-04 [m ²]	
EA	32'768'000 [N]	
Coefficient b	2510270.9	
Coefficient c	9.36177E+18	
Hnouveau+1	1'523'443.9 [N]	Formule 6.33 selon Wendeler 2008, [34]
F_câble	2'043'841.4 [N]	
f_deformation	6.56 [m]	

Champs d'entrée pour le calcul

Procédure d'itération selon Palkowski, 1990

Fig. 25. Équation itérée des câbles à travée unique d'après [20], illustrée dans un tableur, pour le dimensionnement des câbles alaires.

6. Dimensionnement des piliers

Pour les piliers, la composante verticale des câbles porteurs supérieurs et intermédiaires (si présents ou s'ils sont guidés à travers le pilier) doit être transmise aux piliers sous forme de force de compression. Le cas échéant, la composante de charge de surface de la lave torrentielle doit également être incluse en tant que composante de cisaillement continue conformément à la figure 14. D'après l'équation de câble pour les systèmes à travées multiples, le poids dû au ventre du filet entraîne une composante de charge verticale de $F_D = (109 \text{ kN/m} \cdot 10 \text{ m})/2 = 545 \text{ kN}$ (force de compression sur les piliers). La composante verticale des câbles intermédiaires sur les piliers est négligée pour des raisons de simplification, puisque le poids total est supposé avoir une action sur les câbles supérieurs et est donc déjà pris en compte. Par ailleurs, une charge continue provenant des **zones d'influence** des piliers doit être appliquée pour l'impact de la dernière bouffée. À partir de là, la **vérification au flambage par flexion et torsion** doit être effectuée selon la norme SIA 263 [28].

7. Dimensionnement du filet

Dans cet exemple, le cas de charge «impact de la dernière bouffée» est déterminant pour le dimensionnement du filet. Dans ce cas, en effet, la pression totale la plus élevée agit sur l'ouvrage. Elle est déterminée à partir du schéma de pression de la figure 14 en utilisant la largeur moyenne de la barrière. Le comportement de la surface du filet est spécifique au fabricant et la vérification détaillée n'est donc pas fournie ici.

8. Résumé des résultats du dimensionnement

Tab. 10. Résultats de l'exemple de dimensionnement d'un filet de protection contre les laves torrentielles.

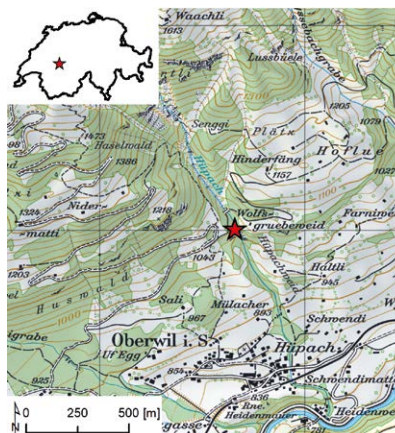
Composants à dimensionner	Câbles porteurs inférieurs	Câbles porteurs intermédiaires	Câbles porteurs supérieurs	Câbles alaires	Piliers
	4 câbles de 22 mm, charge de rupture min. 350 kN	4 câbles de 22 mm, charge de rupture min. 350 kN	4 câbles de 22 mm, charge de rupture min. 350 kN	4 câbles de 22 mm, charge de rupture min. 350 kN	2 piliers type HEA 180 S235

Annexe B Fiches signalétiques des ouvrages spéciaux

Annexe B.1 Filet à câbles suspendus, torrent Hüpach

Brève description du projet

La barrière de protection contre les laves torrentielles se compose d'un filet en acier de grande taille, suspendu à 10 câbles en acier ($d = 90 \text{ mm}$, force de traction de 1000 t par câble) superposés et installés de manière lâche. Les câbles porteurs sont ancrés latéralement dans une barre en béton continue au moyen d'une liaison en trompette, ce qui permet d'ancrer les câbles sans contrainte. La charge est transmise des câbles d'acier vers les fondations en béton, d'où elle est transmise dans le sol à l'aide des ancrages entièrement scellés d'une longueur maximale de 15 m. La lave torrentielle et le bois flottant sont retenus uniquement par le filet de rétention flexible. Ainsi, la transmission de charge dynamique se traduit par des forces totales et de cisaillement plus faibles. Par ailleurs, il a été possible de renoncer à la mise en œuvre d'une fondation en béton transversale au cours d'eau, garantissant ainsi la plus grande perméabilité possible sur toute la surface non remplie du filet.



Emplacement du projet (Source [J]).

Le déversoir de crues en cas de surcharge est garanti sur toute la largeur du filet de 42 m mais il est canalisé au milieu du filet en raison de la flèche des câbles suspendus. Grâce à la conception de la structure porteuse perméable et à faible consommation de béton, il a été possible d'installer un ouvrage économiquement très viable malgré son emplacement éloigné. L'ouvrage, imposant mais filigrane, s'intègre bien au paysage.



Barrière côté amont (Image: [F]).



Barrière côté aval (Image: [F]).

Caractéristiques du projet

Type de cours d'eau:	Torrent de montagne
Type de processus:	Lave torrentielle
Charges:	Lave boueuse à granulaire, pression dynamique jusqu'à 215 kN/m^2
Emplacement:	Oberwil im Simmental, torrent Hüpach
Dimensions:	Hauteur maximale de mise en eau 14.5 m, portée maximale 42 m, revanche hydraulique 2 m, ouverture de base $3.5 \times 1 \text{ m}$
Volume de rétention:	13000 m^3
Réalisation:	Câbles d'acier entièrement verrouillés soutenant un filet de rétention, barres en béton armé latérales, ancrages de type SAS 670/800.
Géologie:	Calcaire de Malm, partiellement schiste marneux du Dogger
Coûts de construction:	Environ 2 millions de CHF
Durée des travaux:	1 an
Dimensionnement:	Modélisation de la lave torrentielle à l'aide de l'outil de simulation 2D RAMMS, modélisation de l'ouvrage à l'aide de FARO [32]
Remarque:	Rétention supplémentaire en aval avec un système standard de type UX-180-H6 avec un volume de rétention de 3000 m^3 .
Auteur du projet:	Emch+Berger SA Berne

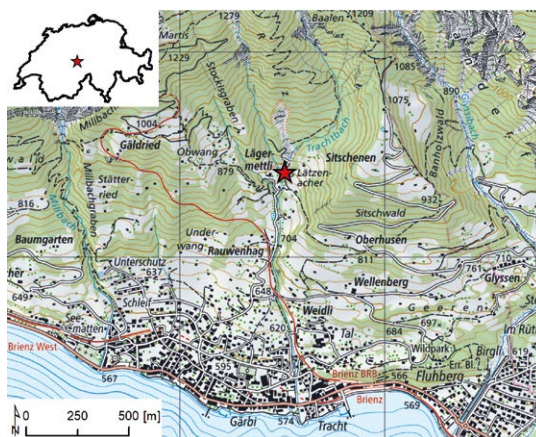
Annexe B.2 Barrières à plusieurs niveaux, torrent Trachtbach

Brève description du projet

Après les événements dévastateurs de laves torrentielles de 2005, quatre barrières flexibles de protection contre les laves torrentielles d'un volume de rétention cumulé de 22 000 m³ ont été installées dans le torrent Trachtbach en 2009 et protègent le village de Brienz. Le grand glissement de terrain du Ritzwald est protégé par une barrière en béton située plus bas.

Les trois barrières VX installées en série sont conçues pour imposer la rétention des matériaux au sein de la section du torrent par un remplissage complet.

Des essais à petite échelle sur le comportement d'écoulement et les caractéristiques d'obstruction des barrières à filet ont été réalisés au WSL (Laboratoire d'essais de rétention des laves torrentielles Trachtbach. WSL, Corinna Wendeler, Birmensdorf, 28.4.2007).



Emplacement du projet (Source [J]).



Barrière UX-180-H6
(Image: [G]).



Barrière VX-080-H4 (Image: [G]).

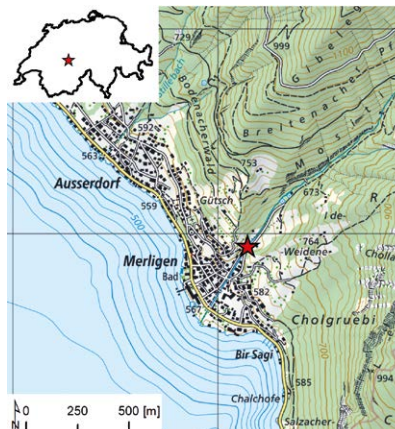
Caractéristiques du projet

Type de cours d'eau:	Torrent de montagne
Type de processus:	Lave torrentielle
Charges:	Laves torrentielles granulaires
Emplacement:	Brienz, torrent Trachtbach
Dimensions:	UX-180-H6 avec une portée de 31 m et une hauteur nominale de 6 m, VX140-H5 avec une portée de 15 m et une hauteur nominale de 5 m
Volume de rétention:	22 000 m ³
Réalisation:	Systèmes standard UX-180-H6 et VX140-H5 avec filets à anneaux haute résistance
Géologie:	Calcaires siliceux et strates de calcaires marneux de mauvaise qualité (formations du Crétacé et du Jurassique).
Coûts de construction:	Barrière UX-180-H6 avec une portée de 31 m: environ 0.8 million de CHF, coûts totaux du projet, y compris l'ouvrage en béton: environ 7 millions de CHF
Durée des travaux:	Durée de construction des barrières à filet: environ 4 mois
Dimensionnement:	Modélisation de l'ouvrage à l'aide de FARO [32]
Auteur du projet:	NDR Consulting / Niederer + Pozzi Umwelt SA

Annexe B.3 Ouvrage à filet avec murs en béton longitudinaux, torrent Grönbach

Brève description du projet

La barrière de protection contre les laves torrentielles est constituée d'une structure porteuse en béton rigide en forme d'arc sur laquelle les filets de rétention sont fixés à l'aide de câbles en acier. L'ouvrage en béton est constitué de quatre parois de guidage massives, reliées de manière monolithique par deux nervures transversales. Les parois de guidage dépassent d'environ 7.5 m de la base du torrent et ont une largeur d'environ 1.0 m chacune. Le contrôle de l'érosion est assuré par un bassin amortisseur constitué de blocs bétonnés qui se raccorde directement au lit canalisé du torrent avec une fermeture transversale. La charge primaire est transmise au terrain par les câbles d'acier via les murs en béton et les nervures transversales ainsi que par les micropieux de tension et de compression au milieu du torrent. Les laves torrentielles et les bois flottants sont retenus par les trois filets de rétention flexibles. Ainsi, la transmission de charge dynamique entraîne des forces totales plus faibles.



Emplacement du projet (Source [J]).

En cas de surcharge, l'évacuation des crues est assurée sur toute la largeur du filet (23.90 m). L'installation d'un batardeau à segments pouvant être levé a permis de garantir la praticabilité du Grönweg situé à proximité ainsi que la rétention des laves torrentielles en cas d'événement. Le batardeau est normalement fermé et ne peut être ouvert qu'avec autorisation/à l'aide d'une clé. L'ouvrage de conception filigrane et perméable s'intègre relativement bien dans le paysage.



Barrière, côté amont (Image: [F]).



Barrière, côté aval (Image: [F]).

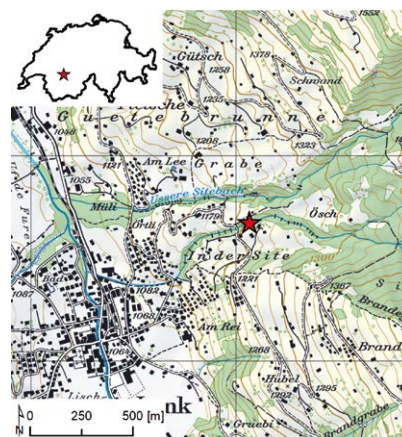
Caractéristiques du projet

Type de cours d'eau:	Torrent de montagne
Type de processus:	Lave torrentielle
Charges:	Laves torrentielles boueuses à granulaires, pression dynamique max. 100 kN/m ²
Emplacement:	Merligen, torrent Grönbach
Dimensions:	Hauteur de mise en eau max. 7.5 m, section de débordement 23.9 m, revanche hydraulique 2.5 m, ouverture de base à 2 champs de 7.47/7.37 x 1.0 m chacun
Volume de rétention:	12000 m ³
Réalisation:	Béton armé, câbles porteurs et filets de rétention en acier, micropieux entièrement scellés
Géologie:	Schistes argileux et marneux de la formation du Palfries
Coûts de construction:	Environ 2.2 millions de CHF
Durée des travaux:	Environ 2 ans
Dimensionnement:	Modélisation de la lave torrentielle à l'aide de l'outil de simulation 2D RAMMS, modélisation de l'ouvrage à l'aide de FARO [32]
Auteur du projet:	Emch+Berger SA Berne

Annexe B.4 Ouvrage à filet avec piliers en béton, torrent Innere Sitebach

Brève description du projet

La barrière de lave torrentielle est constituée de six piliers en béton, chacun d'eux étant installé sur des fondations en béton armé. Les cinq filets de rétention sont tendus entre les piliers au moyen de câbles d'acier. Chacun des deux champs externes périphériques est relié au terrain adjacent par des murs d'aile qui, entre autres, empêchent le contournement de la barrière par les matériaux. La charge primaire est transmise dans le sol par les câbles d'acier et les piliers à l'aide de pieux en béton coulés sur place ou des micropieux. La lave torrentielle et le bois flottant sont retenus par les filets de rétention flexibles. Il en résulte des forces totales plus faibles grâce à la transmission de charge dynamique. En cas de surcharge, l'évacuation des crues est assurée par les 3 champs de filets centraux sur une largeur totale de 22.2 m. Le bassin amortisseur est délimité par un contreseuil en béton armé soutenu par des pieux.



Emplacement du projet (Source [J]).

Le cours d'eau en aval est protégé contre l'érosion par un lit rugueux et des seuils échelonnés («en escalier»). Grâce à la méthode de construction multi-travées, il a été possible d'installer un ouvrage économiquement viable à cet endroit, malgré un problème de reptation superficielle du versant associée à une surface de glissement profonde. L'ouvrage filigrane et perméable s'intègre relativement bien dans le paysage.



Barrière, côté amont (Image: [F]).



Barrière, côté aval (Image: [F]).

Caractéristiques du projet

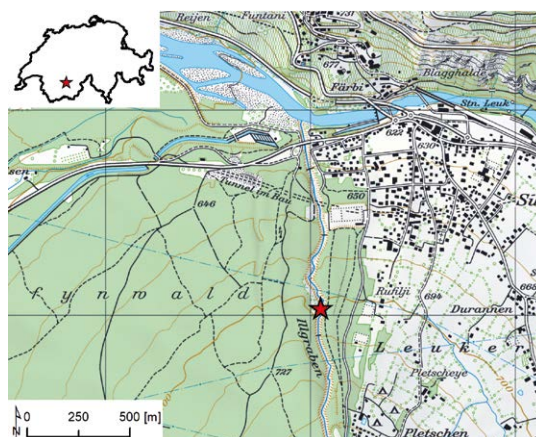
Type de cours d'eau:	Torrent de montagne
Type de processus:	Lave torrentielle
Charges:	Laves torrentielles boueuses à granulaires, pression dynamique max. 190 kN/m ²
Emplacement:	Lenk im Simmental, torrent Innere Sitebach
Dimensions:	Hauteur de mise en eau maximale de 13 m, section de débordement de 22.2 m, revanche hydraulique de 2 m, ouverture de base de 6.4 x 0.5 m
Volume de rétention:	40000 m ³
Réalisation:	Béton armé, câbles porteurs et filets de rétention en acier, pieux en béton coulé sur place, ancrages de type SAS 670/800.
Géologie:	Schistes de l'Aalénien
Coûts de construction:	Environ 3.5 millions de CHF
Durée des travaux:	Environ 2 ans
Dimensionnement:	Modélisation de la lave torrentielle à l'aide de l'outil de simulation 2D RAMMS, modélisation de l'ouvrage à l'aide de FARO [32]
Auteur du projet:	Emch+Berger SA Berne

Annexe B.5 Ouvrage d'appoint avec ajout d'une barrière à filet, torrent Illgraben

Brève description du projet

Après d'innombrables événements de laves torrentielles dans l'Illgraben, le seuil de retenue n° 25 a été complètement érodé sur sa rive droite (vu dans le sens de l'écoulement) et les parois latérales en béton ont été contournées par la lave torrentielle.

Pour sécuriser durablement le cours du torrent au-dessus de l'ancien seuil en béton, la barrière à filet inférieure a été installée en 2007 dans une première phase de construction (image de gauche). Suite au remplissage de la barrière inférieure par une lave torrentielle l'année suivante, le mur d'aile droit a été réhabilité et une deuxième barrière à filet a été installée à un niveau plus élevé et légèrement décalé vers le côté amont (image de droite).



Emplacement du projet (Source [J]).



Barrière VX remplie, tronçon d'aménagement 1 (Image: [G]).



Restauration de l'aile du mur latéral et installation d'une deuxième barrière VX partiellement remplie (Image: [A]).

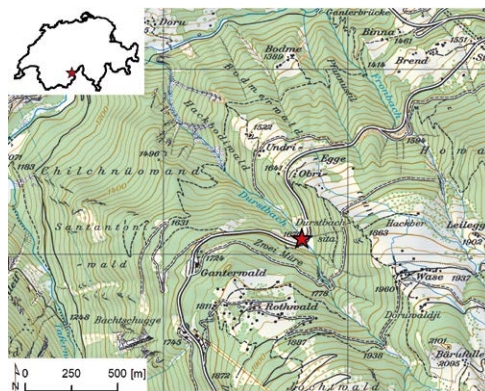
Caractéristiques du projet

Type de cours d'eau:	Torrent de montagne
Type de processus:	Lave torrentielle
Charges:	Laves torrentielles granulaires/boueuses.
Emplacement:	Loèche, torrent Illgraben (seuil n° 25)
Dimensions:	15 m de portée et 4 m de hauteur nominale
Volume de rétention:	4000 m ³ , en incluant les deux barrières à filet.
Réalisation:	2 barrières VX adaptées aux caractéristiques du terrain
Géologie:	Dépôts dolomitiques/calcaires du Trias et quartzites, entraînant de forts effets d'érosion
Coûts de construction:	Les deux barrières à filet VX, y compris les travaux de construction et de bétonnage, ont coûté environ 200 000 CHF
Durée des travaux:	Durée des travaux par barrière à filet: environ 1 mois
Dimensionnement:	Dimensionnement basé sur les valeurs empiriques d'une barrière d'essai installée en aval
Auteur du projet:	Geobrugg SA/WSL

Annexe B.6 Protection contre l'érosion et ouvrage de filtration, torrent Durschtbach

Brève description du projet

Barrière UX-180-H6 pré-remplie installée comme protection contre l'érosion et l'affouillement du pont sur la route du col du Simplon. L'effet filtrant souhaité de la barrière est clairement visible sur les deux images ci-dessous: les écoulements passent à travers l'enrochement non consolidé et ne s'écoulent pas sur la section du déversoir de la barrière à filet. Ainsi, le pont de la route du col du Simplon est protégé en permanence contre les affouillements.



Emplacement du projet (Source [J]).



Barrière UX-180-H6 pré-remplie, vue d'aval (Image: [G]).



Barrière pré-remplie à l'aide de gros blocs, vue d'en haut (Image: [I]).

Caractéristiques du projet

Type de cours d'eau:	Torrent de montagne
Type de processus:	Avalanches/laves torrentielles
Charges:	Débordements de laves torrentielles, avalanches et écoulements normaux
Emplacement:	Col de Simplon, torrent Durschtbach
Dimensions:	UX-180-H6 de 33 m de portée et 4.5 m de hauteur après pré-rempilage
Volume de rétention:	2200 m ³
Réalisation:	Barrière à filet de haute résistance avec 4 profils de piliers pour maintenir la hauteur résiduelle, basée sur le produit standard labelisé CE
Géologie:	Moraine/éboulis
Coûts de construction:	Environ 1 million de CHF, tous les travaux d'installation et de génie civil compris
Durée des travaux:	Durée de construction de l'ensemble de la barrière à filet: environ 6 mois
Dimensionnement:	La barrière a été dimensionnée analytiquement pour le débordement d'avalanches et de laves torrentielles
Auteur du projet:	Teyssiere & Candolfi SA/OFROU

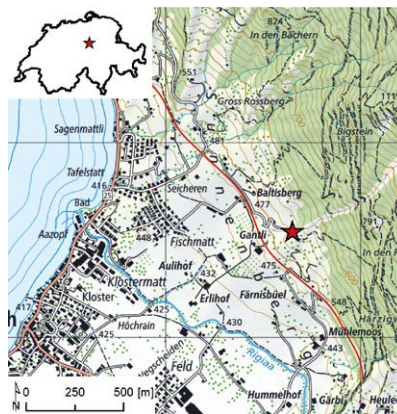
Annexe B.7 Ouvrage pour charges combinées dans le secteur Baltisberg/Härzigenwald

Brève description du projet

Dans le cadre du projet des CFF «Mesures d'infrastructure du lac de Zoug oriental», la ligne ferroviaire Zoug-Goldau doit être protégée contre des chutes de pierres d'une énergie pouvant atteindre 2000 kJ. Par ailleurs, l'ouvrage doit pouvoir absorber des charges dynamiques de coulée de boue allant jusqu'à 60 kN/m².

En raison de la complexité de la dynamique impliquée dans un événement de chute de pierres, une barrière certifiée a été sélectionnée. Pour les événements de coulées de boue attendus, des ajustements mineurs de conception sont apportés au système. Ceux-ci ne doivent pas influencer négativement les performances pour le cas de charge de chute de pierres.

Procédure de vérification de la performance de la barrière: basée sur le système de protection contre les chutes de pierres «Isostop 2000Ev», certifié pour le marché suisse selon [3]; simulation numérique du système de protection certifié, comparaison avec les données de mesure du certificat correspondant; modification de la construction pour répondre aux conditions géométriques limites selon les spécifications requises ET, en même temps, pour créer un système de protection contre les coulées de boue approprié, analogue à la barrière contre les coulées de boue «Debris Stop 150-HM» testée et certifiée selon [12]; simulations et vérifications numériques pour les cas de charge 2000 kJ de chute de pierres et 60 kN/m² de coulée de boue; test et homologation de la barrière par l'Office fédéral de l'environnement OFEV.



Emplacement du projet (Source [J]).



Barrière, vue du dessous (Image: [H]).



Espace de rétention (Image: [H]).

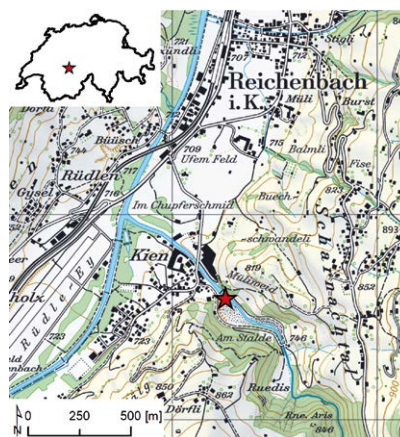
Caractéristiques du projet

Conditions du site:	Pente avec des angles de versant allant jusqu'à 40°
Type de processus:	Chute de pierres ou coulée de boue
Charges:	Pour les coulées de boue: pression dynamique de 60 kN/m ² et hauteur d'écoulement d'1 m; pour les chutes de pierres: 2000 kJ
Emplacement:	Baltisberg & Härzigenwald, Arth SZ
Dimensions:	Six barrières d'une longueur nominale comprise entre 62 et 168 m (séparation des câbles porteurs au moins tous les 6 champs)
Volume de rétention:	Hauteur de mise en eau max. 4 m
Réalisation:	Système de protection contre les chutes de pierres ISOSTOP 2000Ev modifié; réduction de l'espacement des piliers, doublement du nombre de haubans amont, augmentation des sections transversales des piliers et des câbles porteurs
Géologie:	Conglomérat de la Molasse subalpine (« Nagelfluh ») avec couverture de blocs ou d'éboulis
Coûts de construction:	Environ 3 millions de CHF
Durée des travaux:	Six mois
Dimensionnement:	Modélisation de l'ouvrage à l'aide de FARO [32]
Auteur du projet:	Emch+Berger SA Berne

Annexe B.8 Filet de protection contre le bois flottant, torrent de la Chiene

Brève description du projet

Après les inondations dévastatrices d'août 2005, le cours inférieur du torrent de la Chiene a été entièrement réaménagé sur une longueur d'environ 1 km, avant sa confluence avec la Kander. La capacité du torrent a été plus que doublée et une zone de rétention du charriage ainsi qu'un couloir d'écoulement en cas de surcharge ont été installés. Par ailleurs, il a fallu prévoir un grand espace de rétention pour le bois flottant. Des simulations physiques réalisées par l'Université des sciences appliquées HSR de Rapperswil ont permis d'optimiser le processus de rétention du bois flottant et du charriage et de tirer l'enseignement suivant: le filet de protection contre le bois flottant doit être installé à une distance suffisante de l'ouvrage de sortie et s'étendre sur toute la largeur de l'espace de rétention; cela permet d'éviter que certaines parties du barrage final ne soient recouvertes de bois flottant et ne finissent par déborder.



Emplacement du projet (Source [J]).

De par sa structure, la barrière de protection contre le bois flottant est adaptée à sa fonction: sur le côté gauche, elle s'étend dans le versant montagne au-dessus du barrage final sous la forme d'un ouvrage fermé et imperméable (barre en béton/batardeau au niveau du passage). Dans la zone adjacente derrière le barrage, la barrière est équipée d'un filet annulaire perméable à l'eau. La barrière de protection contre le bois flottant n'est perméable au charriage que dans la zone d'entrée directe de l'ouvrage. La section actuelle de la barrière de protection contre le bois flottant est fondée sur le substrat rocheux et se compose de 11 piliers en béton d'un diamètre d'1.0 m chacun et d'une hauteur de près de 10 m, chacun soutenu par des contreforts en béton du côté aval. Les quatre câbles horizontaux sont fixés aux piliers à l'aide de supports ouverts (pour un remplacement facilité par la suite).



Barrière, côté amont (Image: [F]).



Barrière, côté aval (Image: [F]).

Caractéristiques du projet

Type de cours d'eau:	Torrent de montagne
Type de processus:	Crue transportant du bois flottant et du charriage
Charges:	Pression dynamique de l'eau et 2 m de bois flottant alluvial
Emplacement:	Kien in Reichenbach im Kandental, torrent de la Chiene
Dimensions:	Hauteur maximale de la mise en eau 7 m, portée maximale 90 m, revanche hydraulique 2 m, passage de l'ouvrage de sortie 2 x 5.00 x 0.75 m
Volume de rétention:	60 000 m ³ charriage/3000 m ³ bois flottant
Réalisation:	Ouvrages en béton avec filets annulaires et câbles porteurs
Géologie:	Calcaire alpin (lit et berge droite)
Coûts de construction:	Environ 1.1 million de CHF pour le filet de protection contre le bois flottant, environ 16 millions de CHF pour l'ensemble de l'ouvrage
Durée des travaux:	Six mois pour l'installation de l'écran, quatre ans pour la structure complète
Dimensionnement:	HSR Université des sciences appliquées de Rapperswil à l'aide d'essais de modélisation physique
Auteur du projet:	Emch+Berger SA Berne

Annexe C Listes des éléments de contrôle pour l'inspection et l'entretien

Source: [14]

Annexe C.1 Liste des éléments de contrôle pour les inspections régulières

Date _____

N° barrière/Nom de l'ouvrage _____

Personne en charge _____

Critères d'inspection	OUI	NON	Commentaires
Toutes les manilles sont-elles encore montées sur le filet?			
Les éléments d'absorption d'énergie ont-ils été activés?			Déformation des éléments d'absorption d'énergie Allongement..... N°..... Allongement..... N°..... Allongement..... N°..... Allongement..... N°..... Allongement..... N°..... Allongement..... N°.....
Les causes de l'allongement des éléments d'absorption d'énergie sont-elles connues?			Causes:
Y a-t-il de la corrosion visible?			Emplacement de la corrosion observée:
A-t-on procédé à une inspection des ancrages (pour haubans amont, câbles porteurs et fondations des piliers)?			
Une inspection de tous les serre-câbles a-t-elle été effectuée à l'aide d'une clé dynamométrique (après une durée d'installation de 6 mois, tous les serre-câbles doivent être resserrés).			

Éléments de contrôle supplémentaires, uniquement pour les filets de protection contre les laves torrentielles

Critères d'inspection	OUI	NON	Commentaires
Y a-t-il des embâcles importants?			
Est-il nécessaire d'éliminer les embâcles ou de purger le filet de protection?			
L'ouverture de base a-t-elle changé depuis la dernière inspection?			Ouverture de base mesurée:
A-t-on vérifié qu'aucun élément d'absorption d'énergie ne dépasse dans l'ouverture de base?			

Éléments de contrôle supplémentaires, uniquement pour les filets de protection contre les coulées de boue

Critères d'inspection	OUI	NON	Commentaires
Le filet de protection doit-il être purgé?			
La bavette de rétention amont est-elle intacte?			
Le treillis secondaire est-il encore plié en forme de soufflet d'accordéon?			

Annexe C.2 Liste des éléments de contrôle en cas d'évènement

Date de l'évènement _____ Date de l'inspection _____

N° barrière/Nom de l'ouvrage _____

Personne en charge _____

Critères d'inspection	OUI	NON	Commentaires
Les éléments d'absorption d'énergie ont-ils été activés?			Déformation des éléments d'absorption d'énergie Allongement..... N°..... Allongement..... N°..... Allongement..... N°..... Allongement..... N°..... Allongement..... N°..... Allongement..... N°.....
Des éléments d'absorption d'énergie doivent-ils être remplacés? Si oui, lesquels?			
Le système a-t-il été complètement rempli et a-t-il débordé?			
Les câbles porteurs ou les haubans amont ont-ils été endommagés? L'inspection des haubans amont n'est souvent possible qu'après la purge.			
Le filet a-t-il subi des déformations plastiques?			
Les piliers, les plaques de base, les éléments de liaison (boulons, etc.) ont-ils été endommagés?			
Des dégâts aux barres d'ancrage de la plaque de base ou aux fondations en béton sont-ils visibles?			
Les ancrages des câbles porteurs ou des haubans amont sont-ils endommagés? Les têtes d'ancrage sont-elles encore intactes?			
Combien de mètres cubes, environ, doivent être évacués?	m ³		
Des signes locaux d'érosion sont-ils visibles sur l'ouvrage?			
Uniquement pour les filets de protection contre les laves torrentielles, au niveau de leurs éléments de protection contre l'abrasion: ceux-ci ont-ils été pliés, ou les trous oblongs ou les manilles ont-ils été détruits?			

WSL Berichte en français

Météo, manteau neigeux et danger d'avalanche dans les Alpes suisses. L'année hydrologique 2019/20. Trachsel, J., Zweifel, B., Techel, F., Marty, C., Stucki, T., 2021. WSL Ber. 112. 39 p.

Protection des forêts – vue d'ensemble 2020. Dubach, V.; Beenken, L.; Bader, M.; Odermatt, O.; Stroheker, S.; Hölling, D.; treenet; Vögtli, I.; Augustinus, B.A.; Queloz, V., 2021. WSL Ber. 110. 57 p.

Überwachung von besonders gefährlichen Schadorganismen für den Wald – Jahresbericht 2020. Surveillance des organismes nuisibles particulièrement dangereux pour la forêt – Rapport annuel 2020. Monitoraggio degli organismi nocivi particolarmente pericolosi per il bosco – Rapporto annuale 2020. Rigling, D.; Dubach, V.; Beenken, L.; Schneider, S.; Hölling, D.; Prospero, S.; Cornejo, C.; Ruffner, B.; Augustinus, B.; Bockerhoff, E.; Queloz, V., 2021. WSL Ber. 108. 99 S.

Derniers WSL Berichte

Umweltbericht 2018–2020. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Environmental Report 2018–2020. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL. Jendrovits, R.; Zurlinden, A., 2021. WSL Ber. 109. 44 S.

Waldschutzüberblick 2020. Dubach, V.; Beenken, L.; Bader, M.; Odermatt, O.; Stroheker, S.; Hölling, D.; treenet; Vögtli, I.; Augustinus, B.A.; Queloz, V., 2021. WSL Ber. 107. 57 S.

Geschäftsbericht der Eidg. Forschungsanstalt WSL 2020. Eidg. Forschungsanstalt WSL (Hrsg.) 2021. WSL Ber. 105. 93 S.

Extremhochwasser an der Aare. Hauptbericht Projekt EXAR. Methodik und Resultate. Andres, N.; Steeb, N.; Badoux, A.; Hegg, Ch. (Ed.) 2021. WSL Ber. 104. 226 S.

Programm Landschaftsbeobachtung Schweiz. Methodische und inhaltliche Weiterentwicklung 2018–2020. Wartmann, F.; Hunziker, M.; Kienast, F., 2021. WSL Ber. 103. 215 S.

Schnee und Lawinen in den Schweizer Alpen. Hydrologisches Jahr 2019/20. Trachsel, J.; Zweifel, B.; Techel, F.; Marty, C.; Stucki, T., 2020. WSL Ber. 101: 75 S.

Forum für Wissen 2019. Biodiversität im Schweizer Wald. Bollmann, K. (Red.), 2020. WSL Ber. 100. 101 S.

Herausforderungen Landschaftsentwicklung Schweiz. Zweite Umfrage unter Expertinnen und Experten 2019/2020. Wartmann, F.; Hunziker, M., 2020. WSL Ber. 99: 48 S.

Einsatz von Klebeankern im subventionierten Lawinen- und Steinschlagverbau. Margreth, S., 2020. WSL Ber. 98. 8 S.

Biodiversitätsschädigende Subventionen in der Schweiz. Grundlagenbericht. Gubler, L.; Ismail, S. A.; Seidl, I., 2020. WSL Ber. 96. 216 S.

Steinschlagversuche Galerie Pardé. Versuchsdurchführung, Auswertung und Resultate. Volkwein, A.; Fergg, D.; Kurihashi, Y.; Schellenberg, K., 2020. WSL Ber. 95. 96 S.

Überwachung von besonders gefährlichen Schadorganismen für den Wald – Jahresbericht 2019. Surveillance des organismes nuisibles particulièrement dangereux pour la forêt – Rapport annuel 2019. Monitoraggio degli organismi nocivi particolarmente pericolosi per il bosco – Rapporto annuale 2019. Queloz, V.; Cornejo, C.; Dubach, V.; Prospero, S.; Hölling, D.; Beenken, L.; Ruffner, B.; Rigling, D., 2020. WSL Ber. 94. 61 S.

Waldinventur 2017 im Naturerlebnispark Sihlwald. Brändli, K.; Stillhard, J.; Hobi, M.; Brang, P., 2020. WSL Ber. 93. 52 S.

Situazione fitosanitaria dei boschi 2019. Queloz, V.; Forster, B.; Beenken, L.; Stroheker, S.; Odermatt, O.; Hölling, D.; Klesse, S.; Vögtli, I.; treenet.info; Dubach, V., 2020. WSL Ber. 92. 40 p.