

Les ouvrages déflecteurs



Guide technique
Les ouvrages déflecteurs

Ont participé à la rédaction de ce guide :

- Pierre AZÉMARD (Cerema),
- Ivan BRUNET (Alpes Ingé),
- Jacques BOURRIOT (Avaroc),
- Clément GALANDRIN (CAN),
- Jean Michel PAULIK (Hydrokarst),
- Marie MALASCRABES (Cerema),
- Patrice MAURIN (Cerema),
- Damien PORRE (Géolithe),
- Philippe ROBIT (NGE FONDATIONS)

Groupe de relecture :

- Catherine CALMET (MTES/DGPR)
- Simon CARLADOUS (ONF/RTM)
- Marie-Aurélien CHANUT (Cerema)
- Jacques MARTIN (Egis)
- Remy MARTIN (ONF/RTM)
- Lionel LORIER (SAGE)

Comment citer cet ouvrage :

Projet National C2ROP. *Les ouvrages défecteurs*

Bron : Cerema, 2020. Collection : Connaissances. ISBN : 978-2-37180-469-2

Sommaire

Avant-propos	5
Introduction et domaine d'application	7
Références Normatives	8
Chapitre 1 - Définition et fonctionnement des différents types d'ouvrages	9
1.1. Déflecteur pendu	10
1.2. Déflecteur avaloir	11
1.3. Déflecteur de couloir	12
1.4. Ouvrages d'interception	13
Chapitre 2 - Définition et conception des principaux sous-ensembles	14
2.1. Nappe	14
2.2. Structure de liaison de tête (ou ligne de rive supérieure)	15
2.3. Système avaloir	19
2.4. Structures de liaison de pied (ou ligne de rive inférieure)	21
2.5. Structures de liaison latérales (ou ligne de rive latérale)	23
2.6. Pieuvre	24
2.7. Système de placage	25
2.8. Ancrages	25
2.9. Dissipateur d'énergie	26
Chapitre 3 - Prise en compte de la mise en œuvre dans la conception	27
Chapitre 4 - Contraintes environnementales	28
4.1. Zones protégées	28
4.2. Présence de végétation	28
4.3. Glace et vent	29
4.4. Durabilité	29
Chapitre 5 - Composants	30
5.1. Montants	30
5.2. Nappe	31
5.2.1. Grillages simple torsion	31
5.2.2. Grillages double torsion	31
5.2.3. Grillages à haute limite élastique	32
5.2.4. Filets à anneaux	32
5.2.5. Filets de câbles	32
5.3. Câbles	32
5.4. Accastillage	33
5.4.1. Serre-câbles	33
5.4.2. Cosses	33
5.4.3. Manilles	33
5.4.4. Matériaux en inox	33

Chapitre 6 - Dimensionnement	34
6.1. Conception générale	34
6.2. Application de l'Eurocode Ø	34
6.3. Caractérisation des actions de sollicitation des déflecteurs	35
6.3.1. L'éboulement nominal dans l'ouvrage	35
6.3.2. L'accumulation de matériaux	36
6.3.3. L'impact nominal au niveau du système avaloir (optionnel)	36
6.3.4. Le poids propre de l'ouvrage	36
6.3.5. Surcharge	37
6.3.6. Pondération des actions et combinaison	37
6.4. Descente de charge sur les composants	37
6.5. Caractérisation des composants ou sous-ensembles de l'ouvrage déflecteur	38
6.5.1. La nappe	38
6.5.2. La zone avaloir (optionnelle)	39
6.5.3. Les autres composants	39
6.5.4. Coefficients de sécurité sur les composants et sous-ensembles	40
6.6. Vérification de capacité des composants et sous-ensembles	40
6.6.1. Cas de la structure de liaison inférieure	40
6.6.2. Cas de la partie avaloir	40
6.6.3. Cas des ancrages et fondations	40
Chapitre 7 - Maintenance	41
7.1. Facteurs de dégradation et principaux désordres associés à l'ouvrage déflecteur	41
7.2. Visites de contrôle	42
7.2.1. Contrôle récurrent ou périodique	42
7.2.2. Contrôle suite à forte sollicitation	43
7.3. Travaux d'entretien	43
7.3.1. Maintenance préventive (ou entretien courant)	44
7.3.2. Maintenance curative (ou travaux de réparation)	45
Bibliographie	46
Annexe - Note de calcul type	47

Avant-propos

Le projet national C2ROP Chutes de blocs, *Risques Rocheux et Ouvrages de Protection* (2015-2019) s'est proposé d'aborder de manière globale et concertée la problématique du risque rocheux depuis les processus de genèse (aléas), jusqu'aux stratégies de protection (parades, gestion du risque). A ce titre, ce projet a su rassembler la plupart des éléments de connaissance à ce jour disponibles dans le domaine du risque rocheux, puis développer et transférer vers le monde opérationnel des outils, méthodes et concepts nouveaux en s'appuyant sur l'ensemble des plateformes expérimentales, afin d'améliorer tant les produits que les bonnes pratiques à mettre en œuvre.

Ces dernières années, des avancées considérables ont été obtenues dans le domaine académique : mécanique appliquée aux géomatériaux et aux structures, modélisation numérique, investigation expérimentale en laboratoire ou *in-situ*, analyse de l'aléa et du risque. Elles ont trouvé au travers de ce projet un formidable champ d'application et une source d'inspiration et d'innovation. Les méthodes numériques modernes permettent désormais de modéliser de manière pertinente le comportement de structures complexes sous chargement dynamique. Les puissances de calcul auxquelles on peut accéder aujourd'hui rendent possible des simulations remarquablement fines, prenant en compte les mécanismes élémentaires fondamentaux, mais ouvrant sur des résultats pertinents pour l'ingénieur. Des installations sur site permettent d'explorer le comportement des ouvrages en vraie grandeur ; le site expérimental de Montagnole en Savoie pour les structures de protection en est une illustration parfaite. Cette connaissance et ces outils rassemblés par C2ROP sont le socle fondamental du processus de gestion du risque associé.

L'ancrage très fort du projet national auprès de l'ensemble de la communauté académique (universités, organismes publics de recherche) et opérationnelle (gestionnaires, maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, bureaux d'ingénierie, entreprises) a garanti son exigence et sa crédibilité. Sa capacité à supporter des actions de recherche a permis de lever les principaux verrous et de donner accès à des outils, méthodes, guides et référentiels techniques, attendus par toute la profession. Le présent document est l'un des 10 guides et recommandations produits par C2ROP autour des trois axes du projet :

Axe Aléas

- Glossaire du risque rocheux
- Caractérisation de l'aléa éboulement rocheux : Etat de l'art

Axe Parades

- Merlons pare-blocs : Recommandations pour la conception, le suivi de réalisation et la maintenance
- Les Ouvrages Déflecteurs : Guide technique
- Surveillance instrumentale pour la gestion du risque rocheux : Recommandations

Axe Risque

- Prise en compte des risques rocheux par les Maîtres d'Ouvrage gestionnaires d'infrastructures : Recommandations
- Cahier des charges type pour l'étude de l'aléa éboulement rocheux et la définition des travaux
- Cahier des charges type pour les travaux de protection contre les éboulements rocheux
- Mémento des ouvrages de protection contre les éboulements rocheux : Maintenance et Coûts
- Aide à la formalisation de retours d'expérience à la suite d'un événement rocheux sur infrastructures de transport : Note méthodologique

Cette production technique conséquente et aboutie est le reflet de près de 5 années de travail collaboratif des 45 partenaires du projet. Qu'ils soient ici tous chaleureusement remerciés pour leurs multiples efforts engagés et leur dynamisme. Il ne fait aucun doute que la communauté du risque rocheux saura exploiter avec intérêt cette production technique.

Le Comité de Pilotage du Projet National C2ROP

Les défecteurs sont des équipements souples permettant de canaliser des éléments rocheux entre le terrain et l'ouvrage, sur tout ou partie de leur propagation. L'objectif principal est de maîtriser la trajectoire des blocs lors de leur passage au sein de l'ouvrage sans nécessairement les arrêter. Composés principalement de nappes de grillage ou de filet dont les rives sont amarrées au terrain par diverses structures de liaison, ils peuvent être équipés d'un système avaloir en tête afin de capter les trajectoires des blocs arrivant de l'amont.

Après avoir donné les définitions des types d'ouvrages, des sous-ensembles et des principaux composants, ce guide établit les principes généraux pour la conception, le dimensionnement, la mise en œuvre, le suivi et les contrôles d'exécution de ces ouvrages ainsi que pour leur maintenance.

Participants au projet C2ROP



Introduction et domaine d'application

Les ouvrages défecteurs sont des équipements de protection contre les éboulements rocheux. Ceux-ci visent à améliorer la sécurité des infrastructures de communication ou tout autre site exposé.

Les ouvrages défecteurs ne sont pas des ouvrages actifs à part entière dans la mesure où leur fonction principale n'est pas d'empêcher le départ des éboulements. Les ouvrages défecteurs ne constituent pas non plus des ouvrages passifs à part entière dans la mesure où leur fonction principale n'est pas de stopper l'éboulement.

La combinaison d'un ouvrage défecteur avec un ouvrage d'interception constitue un système passif qui va canaliser puis arrêter un éboulement.

Certaines parties d'un ouvrage défecteur peuvent avoir un rôle actif local (ex : placage en tête d'ouvrage en vue de confiner la zone sommitale) ou un rôle passif local (ex : blocage de la ligne de rive inférieure qui stoppe les matériaux canalisés). Ce rôle actif local ne doit pas entraver la fonction principale de l'ouvrage complet.

Le présent document définit un cadre général et des éléments de référence permettant de fixer des caractéristiques types auxquelles doivent correspondre les ouvrages défecteurs.

Le présent document ne constitue pas une norme ou un répertoire exhaustif de ces équipements dont l'application se ferait automatiquement suivant les cas traités. La complexité des problèmes posés par la protection contre les éboulements rocheux et le nombre de paramètres qui interviennent rendent en effet indispensable une étude spécifique de chaque cas, avant de décider du choix d'une protection.

L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments du présent document peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. Les membres du groupe de travail et le projet national C2ROP ne sauraient être tenus pour responsable[s] de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et averti de leur existence.

Le présent document est applicable aux ouvrages défecteurs avec ou sans avaloirs et utilisés en matière de protection contre les éboulements rocheux, les chutes de blocs et de pierres. Il établit les définitions, les principes généraux pour la conception, le dimensionnement, la mise en œuvre, le suivi et les contrôles d'exécution de ces ouvrages ainsi que pour leur maintenance.

Sont exclus du présent document :

- **les ouvrages similaires qui auraient vocation à se prémunir d'autres aléas tels que les coulées de boue, les avalanches, etc ;**
- **les filets ou grillages entièrement plaqués par clouage ;**
- **le dimensionnement des fondations.**

Références Normatives

- Les documents suivants sont indispensables pour l'application du présent document. La dernière application du document de référence (y compris les éventuels amendements) s'applique.
- NF EN 1990 : 2003, Eurocodes structuraux – Bases de calcul des structures.
- EN 1993-1-1 : 2005, Eurocode 3 - Calcul des structures en acier – Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments.
- EN 1997-1 : 2005, Eurocode 7 : Calcul géotechnique.
- EN 10080 : 2005, Acier pour l'armature du béton – Armatures pour béton armé soudables à verrous B500 – Conditions techniques de livraison pour les barres, les couronnes et les treillis soudés.
- EAD340059-00-0106, Falling Rock Protection Kits, juillet 2018.
- NF EN 10034, Poutrelles I et H en acier de construction - Tolérances de forme et de dimensions.
- EN 10083, Aciers pour trempe et revenu.
- EN 10088, Aciers inoxydables - Partie 3 : conditions techniques de livraison pour les demi-produits, barres, fils tréfilés, profils et produits transformés à froid en acier résistant à la corrosion pour usage général.
- EN 10210-1 : 2006, Profils creux de construction finis à chaud en aciers non alliés et à grains fins – Partie 1 : Conditions techniques de livraison.
- EN 10210-2 : 2006, Profils creux de construction finis à chaud en aciers non alliés et à grains fins – Partie 2 : Tolérances, dimensions et caractéristiques de profil.
- EN 10218-2, Fils et produits tréfilés en acier - Généralités - Partie 2 : dimensions et tolérances des fils.
- EN 10244-2, Fils et produits tréfilés en acier - Revêtements métalliques non ferreux sur fils d'acier - Partie 2 : revêtement de zinc ou d'alliage de zinc.
- EN 10219-1 : 2006, Profils creux de construction soudés, formés à froid en aciers non alliés et à grains fins – Partie 1 : Conditions techniques de livraison.
- EN 10219-2 : 2006, Profils creux de construction soudés, formés à froid en aciers non alliés et à grains fins – Partie 2 : Tolérances, dimensions et caractéristiques de profil.
- EN 10223-3 Avril 2014, E84-006. Fils et produits tréfilés en acier pour clôtures et grillages - Partie 3 : produits en grillage à mailles hexagonales en acier pour applications en génie civil.
- EN 10223-6, Fils et produits tréfilés en acier pour clôtures et grillages - Partie 6 : grillage à simple torsion en acier.
- EN13411-3, Terminaisons pour câbles en acier - Sécurité - Partie 3 : manchons et boucles manchonnées.
- EN 13411-5, Terminaisons pour câbles en acier - Sécurité - Partie 5 : serre-câbles à étrier en U.
- EN ISO 6988, Revêtements métalliques et autres revêtements non organiques – Essai au dioxyde de soufre avec condensation générale de l'humidité.
- EN ISO 9227, Essais de corrosion en atmosphères artificielles – Essais aux brouillards salins.
- EN 12385-1+A1, Câbles en acier – Sécurité – Partie 1 à 5.
- NF EN ISO 1461, Revêtements par galvanisation à chaud sur produits finis en fonte et en acier - Spécifications et méthodes d'essai.
- ISO 17745:2016, Steel wire ring net panels -- Definitions and specifications (Not available in French).
- ISO 17746:2016, Panneaux et rouleaux de filet en câble d'acier -- Définitions et spécifications.
- NF EN 13889+A1 Janvier 2009, Manilles forgées en acier pour applications générales de levage – Manilles droites et manilles lyres – Classe 6 – Sécurité.
- NF EN ISO 1460 Avril 1995, Revêtements métalliques – Revêtements de galvanisation à chaud sur métaux ferreux – Détermination gravimétrique de la masse par unité de surface.
- NF EN 13411-1+A1 Décembre 2008, Terminaisons pour câbles en acier – Sécurité – Partie 1 : cosses pour élingues en câbles d'acier.

Chapitre 1 - Définition et fonctionnement des différents types d'ouvrages

Les déflecteurs sont des équipements souples permettant de canaliser des blocs rocheux (isolés ou en nombre limité) entre le terrain et l'ouvrage, sur tout ou partie de leur propagation. L'objectif principal est de maîtriser la trajectoire des blocs lors de leur passage au sein de l'ouvrage sans nécessairement les arrêter. Ils peuvent être équipés d'un système avaloir en tête afin de capter les trajectoires des blocs arrivant de l'amont. Ils sont généralement utilisés pour traiter des terrains rocheux de forte pente (falaise, talus routier en roche fracturée, etc.).

Les ouvrages déflecteurs sont souvent complétés par des ouvrages d'interception (merlon, gabion, écran pare-pierres, etc.) disposés à leur pied.

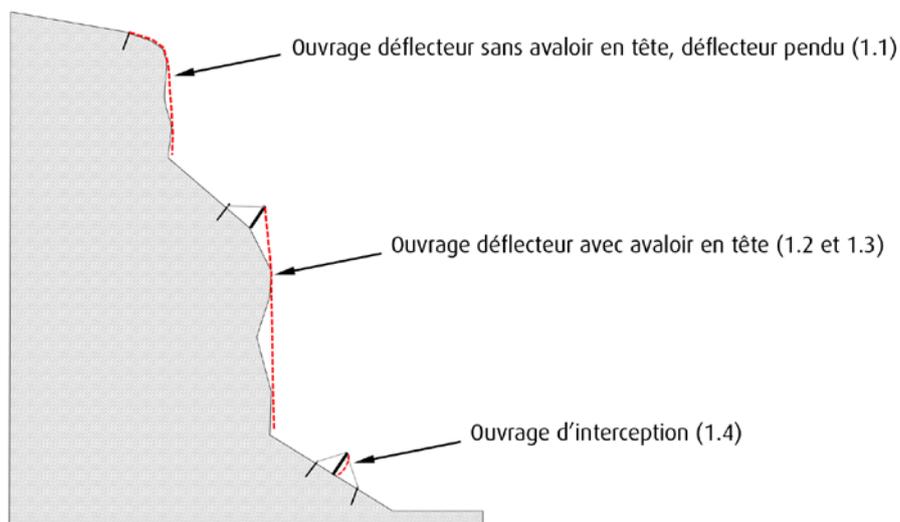


Figure 1 : Principe général des ouvrages déflecteurs (Source : C2ROP)



Figure 2 : Combinaison de déflecteurs avec et sans avaloirs et d'ouvrages d'interception (Source : Géolithe)

1.1. Déflecteur pendu

Les déflecteurs pendus traitent uniquement les éboulements de blocs dont le départ est au sein même de l'emprise de l'ouvrage. Ils sont implantés depuis l'amont des zones instables jusqu'au pied du talus ou, *a minima*, jusqu'à un fort adoucissement de la pente (vire naturelle ou redan/risberme anthropique).

Mode de fonctionnement principal

En cas d'éboulement, la trajectoire des blocs est canalisée entre l'ouvrage et le terrain. Les frottements induits entre les blocs, la nappe et le terrain naturel permettent de réduire l'énergie arrivant en pied d'ouvrage. Cette réduction, très difficile à estimer, peut aller jusqu'à l'arrêt complet des blocs.

Mode de fonctionnement secondaire

Même si ce n'est pas la fonction recherchée, le poids de la nappe et/ou les dispositifs de placage localisés jouent, dans certaines configurations, un rôle actif s'opposant au départ des volumes rocheux.

Certains déflecteurs pendus sont conçus pour arrêter les blocs à leur pied par fixation de la rive inférieure. Il est alors nécessaire de gérer l'accumulation des matériaux au cours de la vie de l'ouvrage.



Figure 3 : Illustration de filets et grillages pendus
(Source : NGE)

Capacité

Le déflecteur pendu se caractérise par le volume d'éboulement qu'il peut prendre en charge et la surface du terrain qu'il recouvre.

En cas de blocage en pied, il se caractérise aussi par sa capacité maximale d'accumulation de matériaux.

Limite de fonctionnement

L'ouvrage remplit son rôle uniquement sur la surface de terrain recouverte, éventuellement diminuée des bandes latérales non efficaces (voir § 2.5).

Le maintien du rôle de déflexion et de stockage en pied est conditionné par le respect du programme de maintenance qui doit être défini par le concepteur.

1.2. Déflecteur avaloir

Le déflecteur avaloir est une variante du déflecteur pendu dont la rive supérieure est décollée du terrain naturel afin de capter les trajectoires (« d'avaloir ») des blocs arrivant de l'amont. Ces ouvrages recouvrent le profil du talus non pas depuis les zones de départ de blocs mais depuis la position intermédiaire la plus adaptée vis-à-vis des trajectoires à capter. Ce principe permet de réduire la surface de l'ouvrage, son coût et son impact environnemental.



Figure 4 : Déflecteurs avaloir (Source : NGE)

Mode de fonctionnement

Le système avaloir intercepte les éboulements de blocs provenant de la zone amont de l'ouvrage puis les prend en charge suivant les mêmes modes de fonctionnement qu'un déflecteur pendu (voir § 1.1). L'interception des blocs amont implique la gestion d'impacts à énergie potentiellement forte, ce qui nécessite une conception particulière de la zone d'interception.

Capacité

Le système avaloir est caractérisé par une hauteur d'interception et une capacité énergétique d'interception. Les autres caractéristiques de l'ouvrage sont identiques à celles du déflecteur pendu.

Remarque : La hauteur de l'ouvrage minimale correspond à la hauteur d'interception maximale déterminée par l'étude, augmentée d'un demi-diamètre du bloc de référence.

Limite de fonctionnement

Le risque de lob du système avaloir supprime l'avantage principal du déflecteur qui est la maîtrise complète de la trajectoire des blocs.

1.3. Déflecteur de couloir

Le déflecteur de couloir est un déflecteur avaloir qui est posé dans un talweg. Il permet de s'affranchir partiellement ou totalement des montants intermédiaires en se fixant sur les parois latérales ce qui permet d'augmenter la hauteur d'interception.

Mode de fonctionnement

Il fonctionne comme un avaloir mais sur une largeur souvent faible.

Remarque : Un déflecteur de couloir fixé en pied et avec une faible hauteur de nappe est à rapprocher d'un écran de filets ou d'un barrage souple et ne rentre pas dans le cadre de cette note. On se rapprochera de la note d'information « Ecrans de filet pare-blocs dynamiques – Recommandations pour leurs spécifications » du Cerema d'août 2014.



Figure 5 : Déflecteur de couloir (Source : Cerema)

Limites de fonctionnement

Ces ouvrages sont particulièrement sensibles à un défaut d'amarrage latéral de la rive supérieure. À ce titre, il peut être opportun de doubler les ancrages latéraux.

En cas de poids important (surface importante, grande largeur, etc.), il pourra être fait usage d'un système de suspension (voir § 2.2).

En cas de fort élancement vertical de l'ouvrage, le risque d'échappement de l'éboulement par la rive latérale est augmenté.

Dans certaines configurations géométriques (couloir très étroit, hauteur réduite), la réduction de la surface de l'ouvrage peut augmenter fortement les sollicitations du fait de la faible déformabilité et de l'absence de diffusion des efforts sur de multiples ancrages.

1.4. Ouvrages d'interception

L'ouvrage d'interception est un ouvrage complémentaire permettant d'intercepter et de stocker des blocs après leur sortie des déflecteurs. Situés généralement en pied de versant, ils sont de types : écrans pare-pierres, merlon, gabion, etc.

La trajectoire en sortie de déflecteur peut être considérée voisine de la ligne de plus grande pente. Néanmoins, la détermination de la hauteur d'impact de ces ouvrages peut nécessiter une trajectographie depuis la sortie du déflecteur.

Limite de fonctionnement

Il est très difficile d'estimer l'énergie d'un bloc qui va impacter un ouvrage d'interception implanté en sortie de déflecteur, dans la mesure où l'action de décélération du déflecteur sur le bloc est fortement conditionnée par l'interaction avec le terrain.

La valeur de vitesse de sortie est souvent estimée à dire d'expert. À titre indicatif, on peut retenir un ordre de grandeur entre 5 m/s et 20 m/s.

Chapitre 2 - Définition et conception des principaux sous-ensembles

Les déflecteurs peuvent être décomposés en plusieurs sous-ensembles définis soit par leur position dans l'ouvrage (ex : rive supérieure), soit par leur rôle (ex : transmission des efforts au sol). Pour chacun de ces sous-ensembles est présenté leur mode de fonctionnement, leur limite, leur disposition constructive et leurs éventuelles sous-structures.

2.1. Nappe

La nappe est l'élément d'interception de la masse rocheuse en mouvement. Elle est constituée de panneaux de filet ou de lés de grillage qui sont reliés entre eux par des coutures.

Limites de fonctionnement

La principale pathologie est la perforation qui survient quand les contraintes surfaciques locales dépassent la capacité de résistance de la nappe. Ce phénomène est accentué quand les vitesses des blocs sont élevées ou quand les blocs possèdent des angles saillants.

En cas d'accumulation trop importante en pied de l'ouvrage, on peut atteindre le déchirement de la nappe.

Dispositions constructives

Afin d'assurer la continuité de résistance, il convient que la couture entre panneaux/lés et entre panneaux et câbles de rives soit faite à chaque maille de bordure (y compris demi maille de rive) avec un composant de résistance adaptée (agrafes, câblettes, manilles). À défaut d'essai, la résistance du composant de couture sera au moins égale à celle du câble ou du fil constitutif de la nappe.

Exemple : manille de CMU : 3T250 pour un filet à anneau en toron de 16 mm, manille CMU 2T000 pour un anneau en toron de 9 mm.

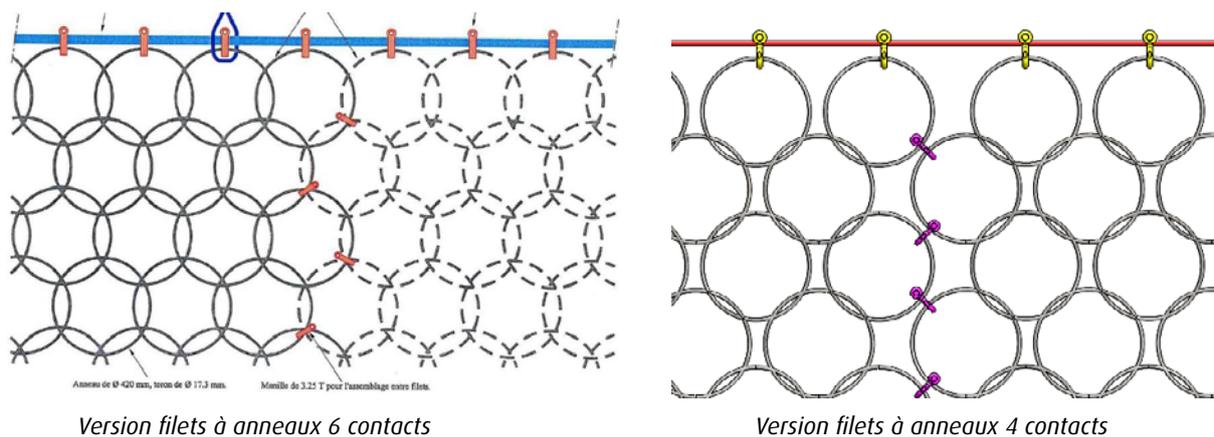


Figure 6 : Mode de jonction de filets à anneaux
(Source : Cerema)

Suivant le cas de figure, la nappe principale peut être doublée d'une nappe à mailles plus fines afin de contenir les blocs de petits diamètres susceptibles de traverser la nappe principale. Elle peut être positionnée sous la nappe principale notamment pour sécuriser les opérateurs lors de la pause de cette dernière ou sur la nappe principale pour limiter les fortes accumulations difficiles à purger. La fixation d'un grillage double torsion à une rive se fera par un ourlet de 50 cm de largeur et un agrafage maille à maille.

La taille des panneaux ou lés devra être limitée afin de ne pas entraîner de déformation excessive (allongement vertical + raccourcissement latéral) lors de leur acheminement sur site par hélicoptage ou grutage. L'utilisation d'un palonnier permettra de prévenir ces déformations.

Dans le cas de filets à anneaux, la pose des panneaux se fera avec le sens de la « vague » à la verticale (voir Figure 7), de manière à épouser au mieux le profil du terrain.



Figure 7 : Sens de pose des filets à anneaux
(Source : NGE)

2.2. Structure de liaison de tête (ou ligne de rive supérieure)

La structure de liaison de tête assure la suspension de la nappe et la reprise des efforts transmis. Elle est composée d'un câble de rive supérieure, d'ancrages de rive supérieure et de composants (ex : manilles pour des filets) ou d'un principe constructif (ex : rabat + ligature pour du grillage) permettant la liaison entre la nappe et le câble de rive. Cette structure peut intégrer un système d'avaloir (voir § 2.3).

Mode de fonctionnement

La structure de liaison de tête assure la transition entre les efforts surfaciques auxquels est soumise la nappe (kN/m) et les efforts (kN) transmis aux ancrages par l'intermédiaire d'un câble disposé orthogonalement à ces efforts. D'un point de vue mécanique, cette transition ne peut se faire que si ce câble a une flèche non nulle.

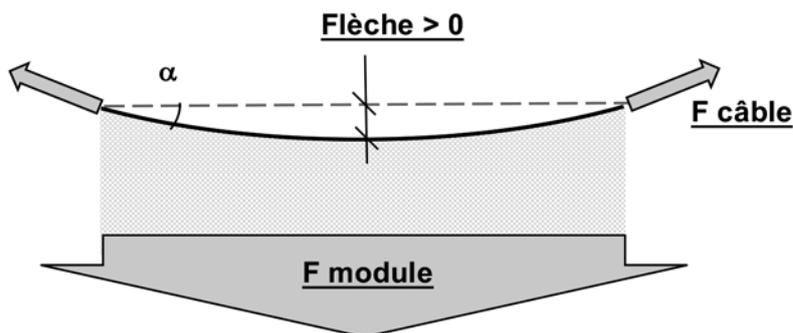


Figure 8 : Principe de renvoi d'effort d'un câble de rive (Source : C2ROP)

Plus la flèche du câble est faible, plus les efforts transmis au câble sont importants.

Flèche (% portée)	20 %	15 %	10 %	5 %	2 %	1 %	0 %
α	38°	30°	22°	11°	5°	2,3°	0°
F câble / F module	0,8	1,0	1,3	2,5	6,3	12,5	∞

Figure 9 : Calcul de l'influence de la flèche sur les efforts transmis en rive



Figure 10 : Une rive supérieure sous tension : pas de résistance possible sans flèche (Source : NGE)

Limite de fonctionnement

Les structures de liaison de tête transmettent convenablement les efforts des nappes vers les ancrages uniquement si les flèches prévues sont respectées. Si les câbles sont trop tendus, il y a risque de rupture du câble ou des ancrages lors des sollicitations de l'ouvrage. Il faut donc prévoir une sensibilisation du personnel de pose sur ce point et une méthode de contrôle de sa bonne mise en œuvre (mesure de la flèche ou des tensions, etc.).

Dispositions constructives

On distingue deux principes de ligne de rive supérieure :

- le câble de rive supérieure peut coulisser entre les modules. Sous sollicitation, la flèche est accentuée par effet de vase communicant, ce qui réduit les efforts dans le câble mais en cas de rupture de ce dernier, la ruine se propage à l'ensemble de l'ouvrage ;
- le câble de rive supérieure est fixe sur les ancrages/poteaux. Le bénéfice/risque est inversé : flèche fixe, augmentation des efforts dans le câble au droit de la sollicitation mais sauvegarde de l'ouvrage en cas de rupture locale.

La conception devra veiller à éviter de blesser le câble et à limiter son rayon de courbure (cosse sur ancrage, tête de poteau sans arrête vive, etc.).

Pour les grillages pendus, il est difficile d'imposer une flèche car le poids propre ne suffit pas toujours à déformer le câble de rive supérieure. Le montage devra se faire avec comme consigne de ne pas tendre le câble de rive autrement que manuellement (pas de mise en tension avec des outils de traction).

Sous-structure

- **système de reprise** : dispositif optionnel qui permet de déporter vers l'amont la ligne d'ancrages de tête afin de s'amarrer sur un terrain plus stable sans augmenter la surface de la nappe. Dans ce cas, il ne faut pas qu'il y ait de risque de départ de bloc sur la zone de déport. Ce dispositif est généralement composé de :
 - **élingues de reprise** : câbles situés en amont et perpendiculairement au câble de rive. Ils servent à transférer les efforts de la nappe à travers la zone de reprise,
 - **câble de reprise supérieur** : câble situé le long des ancrages amont et permettant de relier les élingues de reprise aux ancrages amont.

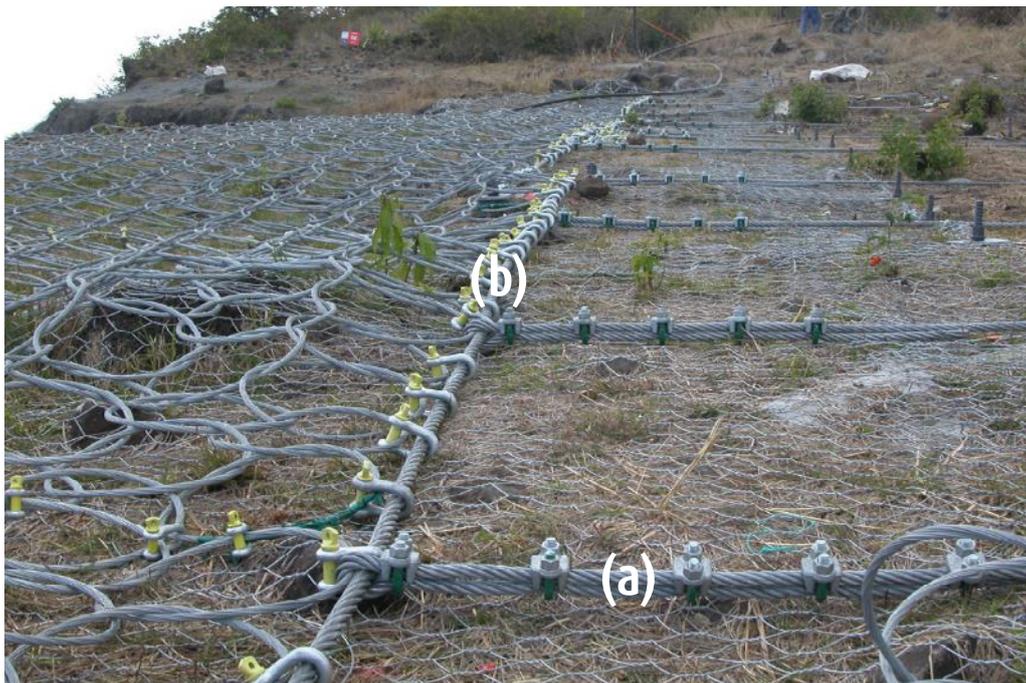


Figure 11 : Exemple d'élingue de reprise (a) sur un câble de rive (b)
(Source : NGE)

- **système de suspension** : dispositif permettant l'amarrage du défecteur sur deux massifs d'ancrages situés de part et d'autre d'un talweg sans générer de flèche sur la ligne de rive supérieure. Il fonctionne suivant le même principe qu'un pont suspendu ou qu'une caténaire ferroviaire. Ce système est généralement mis en place quand les portées entre les points d'amarrage de tête sont importantes.



Figure 12 : Exemple de système de suspension
(Source : AVAROC)

Ce dispositif se compose de :

- **câble de suspension** : câble situé entre les ancrages amont des élingues de suspension. C'est ce câble qui va avoir la flèche nécessaire à la bonne transmission des efforts à la place de la ligne de rive supérieure du défecteur,
- **élingues de suspension** : câbles de liaison entre le câble de suspension et la ligne de rive supérieure du défecteur. Leurs différentes longueurs permettent de maintenir rectiligne la ligne de rive supérieure ce qui permet d'optimiser la hauteur d'interception et la pose des nappes/panneaux rectangulaires. L'élingue doit être fixée sans possibilité de translation sur le câble de suspension. Le réglage de ce système est complexe.

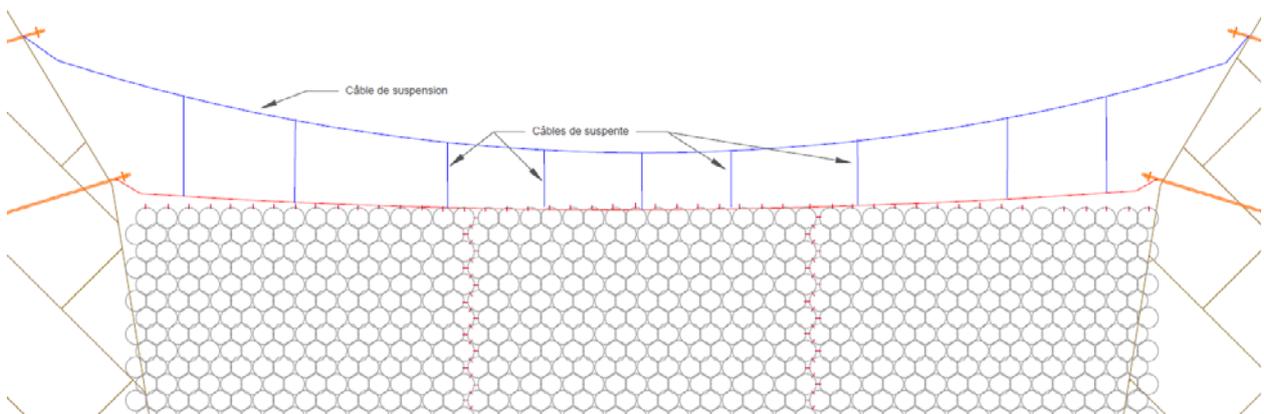


Figure 13 : Schéma de système de suspension
(Source : CAN)

2.3. Système avaloir

Un avaloir est un système intégré à la structure de liaison supérieure qui permet de créer un espace entre le sol et la rive supérieure de la nappe afin que les blocs arrivant de l'amont puissent entrer et être pris en charge par le déflecteur. Il se compose de :

- **montants** : structure (très souvent constituée par un poteau) permettant de maintenir la ligne de rive supérieure décollée du sol. Sa stabilité doit être assurée en tête mais aussi en pied ;
- **haubans amont et aval** : câbles reliant la tête des montants à des spécifics et servant à maintenir les montants en position érigée. On a souvent trois haubans :
 - un ou deux haubans amont suivant les objectifs visés : stabilité du montant, protection des montants par le hauban, libre passage des blocs,
 - aucun, un ou deux haubans aval suivant les objectifs visés. Ils ont souvent comme seul objectif de stabiliser le montant en phase chantier afin d'assurer la sécurité du personnel lorsqu'il aura besoin d'accéder en tête de montant ;
- **hauban latéral** : câble ancré situé latéralement par rapport aux montants. Au-delà de la stabilité des montants, il sert principalement à reprendre les efforts de la ligne de rive supérieure. On peut avoir un ou deux haubans latéraux. Le hauban latéral peut être une simple prolongation du câble de rive supérieure : attention à assurer la stabilité du montant latéral dans ce cas.
- **câblages de pied** : variante à une fondation pour assurer la fixation du pied d'un montant.



Figure 14 : Avaloir dérivé d'un écran ETAG
(Source : NGE)

Mode de fonctionnement principal

Le système avaloir permet de capter la trajectoire de blocs provenant des zones de départ se trouvant en amont de l'ouvrage déflecteur. Ce principe permet de réduire les surfaces à couvrir par l'ouvrage. L'interception des trajectoires des blocs venant de l'amont implique des impacts d'énergie potentiellement importante, ce qui nécessite une conception spécifique dans cette zone particulière de l'ouvrage.

Limites de fonctionnement

L'impact dans la zone avaloir accentue le risque de perforation de la nappe ce qui nécessite des mesures appropriées telles que le doublement de la nappe sur la zone d'interception, l'utilisation de dissipateur d'énergie, la conception dérivée d'un écran d'interception conforme au DEE n° 340059-00-0106 (voir § 10.4.2).

Pour des ouvrages de grande hauteur, la mise en tension de la nappe par son poids propre, l'accumulation de matériaux en pied ou la repousse de la végétation dans l'ouvrage peuvent raidir significativement le comportement de la partie avaloir et entraîner une baisse de sa capacité d'interception.

Pour des ouvrages de faible hauteur, la nappe de faible poids peut être soulevée lors de l'impact ce qui entraîne une limitation de son pouvoir de canalisation de la trajectoire. Il faut dans ce cas compléter l'ouvrage par un dispositif de limitation de débattement de la nappe.

La hauteur d'interception peut être fortement diminuée par des chocs sur les montants qui résistent rarement, même à de faibles énergies.

Le fonctionnement des dissipateurs d'énergie entraîne une modification de la géométrie de l'ouvrage qui peut conduire à la formation de poches de matériaux.

Dispositions constructives

Si l'on choisit de ne pas trianguler la tête du montant (utilisation d'un seul hauban amont, etc.), il convient de renforcer sa stabilité en bridant (fixation sans coulissement possible) le câble de rive supérieur sur la tête du montant.

Dans certaines configurations (proximité de niche d'arrachement, ravinement dans un couloir, etc), il y a un risque d'affouillement des pieds de poteaux. Des adaptations spécifiques devront être prévues au stade de la conception (adaptation de la position et du nombre de poteaux, fondation profonde, massif béton, câblage de pied, etc.).

Dans le cas de déflecteurs avec avaloir peu élevé, les montants peuvent être constitués par des sur-longueurs d'armatures d'ancrages (exemple : barres de diamètre 32 mm pour un avaloir inférieur à 1 m ; barres de diamètre 25 mm pour un avaloir de 50 cm). Pour des hauteurs supérieures à 1 m, il conviendra de prévoir un haubanage amont.



Figure 15 : Avaloir avec montants en armatures de diamètre 32 mm
(Source : NGE)

2.4. Structures de liaison de pied (ou ligne de rive inférieure)

La structure de liaison de pied gère soit la sortie des blocs de l'ouvrage, soit leur accumulation en pied.

Mode de fonctionnement principal

Quand le rôle du déflecteur est de canaliser la trajectoire de l'éboulement sans la stopper, il doit permettre l'échappement des blocs. Lorsqu'un ouvrage d'interception complète le système, la trajectoire en sortie de déflecteur doit être compatible, notamment en termes de hauteur de passage. Il est alors nécessaire de limiter le débattement de la nappe en partie inférieure, ce qui peut être obtenu par les techniques suivantes :

- simple poids propre de la nappe (avec éventuelle sur-longueur de nappe) ;
- lests de la nappe ;
- autres dispositifs de limitation de débattement (voir paragraphe ci-dessous : sous-structure).



Figure 16 : Ligne de rive inférieure lestée (Source : NGE)

Mode de fonctionnement secondaire

Lorsque le site ne permet pas d'installer d'ouvrage d'interception, il est courant de mettre une ligne de placage inférieure ancrée au terrain afin de stopper les blocs avant leur sortie de l'ouvrage. Ce principe, qui a fait ses preuves, est contradictoire avec le mode de fonctionnement principal et a deux conséquences pour l'ouvrage :

- un éboulement arrêté brutalement en pied entraîne des pics de tension dans l'ouvrage qui sont très difficiles à appréhender. Il faut donc prévoir un dimensionnement sécuritaire.
- une accumulation de matériaux va se créer en pied. Elle doit, d'une part, être intégrée au dimensionnement de l'ouvrage et, d'autre part, être intégrée au programme de maintenance de l'ouvrage qui prévoira des purges lorsque les volumes prévus seront atteints. Le non-respect de la maintenance peut entraîner la ruine de l'ouvrage.

Dispositions constructives

Attention à la prééminence des composants de la rive inférieure (notamment les armatures d'ancrages) qui ne doivent pas présenter un danger pour les usagers de l'infrastructure.

La ligne de rive inférieure est la principale partie visible des usagers. Au-delà de sa résistance et de sa fonctionnalité, il convient de soigner l'esthétique de cette partie de l'ouvrage.

Sous-structure

- **dispositifs de limitation de débattement** : dispositifs limitant le décollement de la rive inférieure de la nappe. On distinguera :
 - **lest de pied de nappe (a)** : divers poids reliés à la nappe (corps en béton, barre métallique, tuyaux métalliques rempli de coulis, etc.),
 - **élingues de pied (b)** : câbles reliant un ancrage au pied de la nappe et bridant le débattement de ce dernier,
 - **contrôles de sortie (c)** : câbles passant à travers la nappe et reliés à deux ancrages distants placés sur un même profil. La longueur des câbles conditionne le débattement.

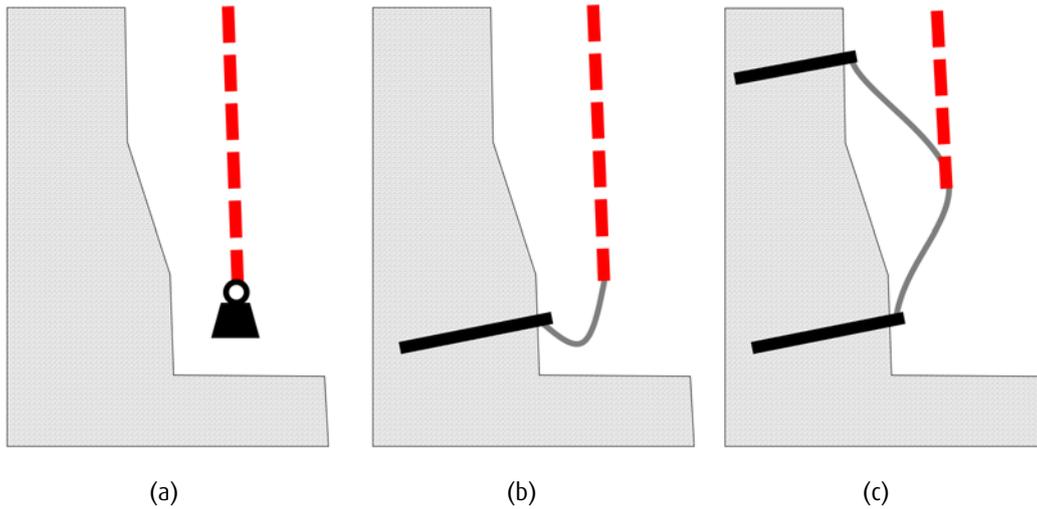


Figure 17 : Différents systèmes de limitation de sortie (Source : C2ROP)

- **ligne de placage inférieur** : dispositif de blocage des blocs en pied de défecteur. Il se compose d'un câble de rive inférieure, d'ancrages de rive inférieure et de composants (ex : manilles pour des filets) ou d'un principe constructif (ex : rabat + ligature pour du grillage) permettant la liaison entre la nappe et le câble de rive.



Figure 18 : Exemple de ligne de placage inférieur
(Source : NGE)

2.5. Structures de liaison latérales (ou ligne de rive latérale)

Cette structure, optionnelle, relie la rive latérale de la nappe au sol. Elle est composée d'un câble de rive latérale, éventuellement d'élingues de déport latéral, d'ancrages latéraux et, suivant le type de déflecteur, de composants de liaison entre la nappe et les câbles de rive.

Mode de fonctionnement

La structure de liaison latérale doit empêcher l'échappement des blocs par les rives latérales de l'ouvrage.

En son absence, on doit ajouter une bande latérale de nappe implantée au-delà des zones de départ et libre de mouvement (sans structure latérale).

Limite de fonctionnement

La structure de rive latérale constitue un point fixe de la nappe. Le bridage de la déformation peut entraîner des concentrations de contraintes et des ruptures de la nappe ou de la structure de liaison.



Figure 19 : Structures de liaison latérales - câbles de rive latérale et élingues de déport (Source : CAN)

Disposition constructive

Afin d'éviter les ruptures par pic de contrainte, l'utilisation de dissipateurs d'énergie (voir § 2.9). peut être avantageuse. Attention cependant à bien maîtriser les avantages et inconvénients de ces composants.

2.6. Pieuvre

Dans le cas de défecteurs de grande hauteur, ce dispositif optionnel permet la suspension de la nappe à une hauteur intermédiaire de l'ouvrage afin de soulager la structure de liaison de tête et faciliter le fonctionnement d'un éventuel avaloir. Les pieuvres sont souvent fixées à des ancrages spécifiques implantés au niveau des ancrages de ligne de rive supérieure.



Figure 20 : Pieuvre (Source : AVAROC)

Mode de fonctionnement

Les pieuvres sont nécessaires pour les ouvrages de grande hauteur lorsque le poids propre devient prépondérant dans le dimensionnement de la ligne de rive supérieure et de l'éventuel avaloir.

Disposition constructive

Une pieuvre se compose d'un câble vertical (câble principal) avec, à la base, une ramification d'élingues secondaires raccordées à la nappe afin d'en reprendre les efforts qui lui seront transmis (poids propres et diverses sollicitations de fonctionnement).

2.7. Système de placage

Les systèmes de placages permettent de rapprocher localement la nappe du terrain. Ce dispositif est composé d'ancrages de placage, de plaques de répartition et éventuellement d'un câble de placage.

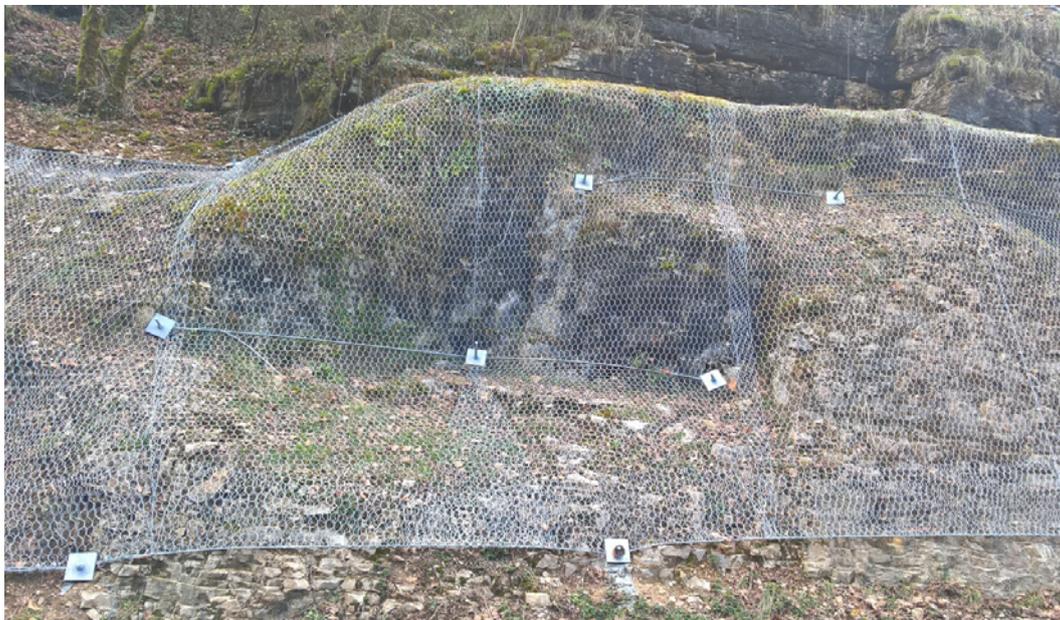


Figure 21 : Système de placage (Source : NGE)

Mode de fonctionnement

Les dispositifs de placage sont principalement utilisés afin de limiter les départs des blocs en créant une pression de la nappe sur le terrain. Ils peuvent s'avérer très efficaces pour réduire la maintenance de l'ouvrage, par exemple sous la niche d'arrachement au sein des terrains de couverture que l'on peut retrouver en sommet des talus.

Attention : Ce rôle actif local ne doit pas entraver la fonction principale de l'ouvrage complet. Par exemple, ce dispositif peut entraver la propagation des éboulements et entraîner une poche de matériaux difficile à purger.

2.8. Ancrages

Dans ce document, il a été choisi d'utiliser le terme générique d'ancrage pour désigner tous les dispositifs dont le rôle est de transmettre un effort vers une couche de sol ou de roche. Ce terme générique regroupe, suivant les définitions de l'Eurocode 7.1, les ancres non précontraints avec longueur libre (non scellée) dans les terrains de couverture, les micropieux en terrain meuble reprenant des efforts de traction ou compression et les boulons en terrain rocheux.

Le dimensionnement des ancres ne fait pas partie de ce document.

Ancrages de rive supérieure : ancres permettant de relier la ligne de rive supérieure ou le système de reprise au sol. On distinguera les ancres courants de ceux d'extrémités qui ne reprennent pas les mêmes efforts.

Ancrages de hauban : en cas de système avaloir, ancres qui se substituent aux ancres de rive supérieure en permettant de relier les câbles de hauban au sol. On distinguera les ancres de hauban amont, aval et latéraux qui ne reprennent pas les mêmes efforts.

Fondations de pied de poteau : en cas de système avaloir, fondations permettant de stabiliser le pied d'un poteau. Elles reprennent des efforts de compression mais aussi de cisaillement. Elles peuvent être constituées d'ancres, de câblage de pied, de massifs béton, etc.

Ancrages de rive inférieure : ancrages permettant de relier la ligne de rive inférieure au terrain. On distinguera les ancrages courants de ceux d'extrémités qui ne reprennent pas les mêmes efforts (voir Figure 18) :

- **ancrages de rive latérale** : ancrages permettant de relier la ligne de rive latérale au terrain (voir Figure 19) ;
- **ancrages de pieuvre** : ancrages indépendants, situés à l'extrémité amont de la pieuvre, permettant de relier et de transmettre les efforts du câble principal de la pieuvre au sol ;
- **ancrages de placage** : ancrages permettant le placage de la nappe au terrain par l'intermédiaire d'une plaque de répartition et/ou d'un câble de placage (voir Figure 21) ;
- **massif d'ancrage** : structure permettant de transmettre des efforts élevés dans un terrain éventuellement médiocre. Elle se compose généralement d'un massif de béton et de micropieux ou d'ancrages.

2.9. Dissipateur d'énergie

Les dissipateurs d'énergie sont des dispositifs optionnels qui se déforment en fonction de l'effort qu'ils reçoivent. De technologies très variées, ils sont caractérisés par leur courbe force / déformation qui peut avoir des phases croissantes, décroissantes, des seuils (des plateaux) et ce, souvent en combinaison. Ils ont des limites maximales de déformation et de résistance. Leur comportement peut être dépendant de la vitesse de sollicitation.

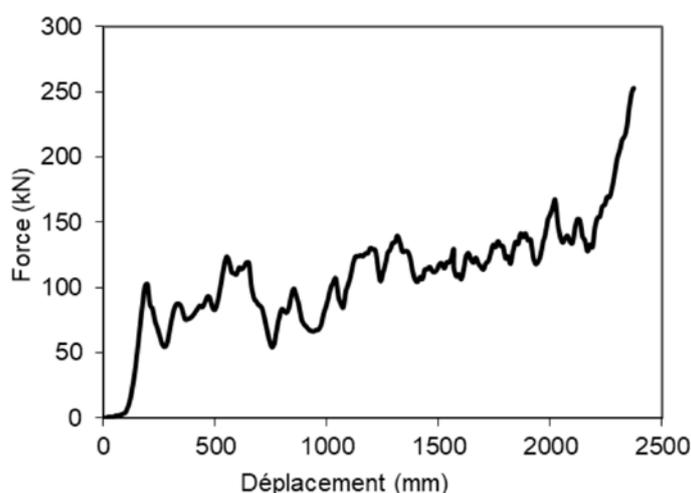


Figure 22 : Exemple de courbe effort / déformation d'un dissipateur
(Source : NGE)

Les dissipateurs peuvent être utilisés au sein d'un déflecteur, souvent en extrémité d'une ligne de rive ou d'un hauban d'avaloir, dans le but de :

- absorber de l'énergie ;
- répartir les efforts (exemple : les égaliser entre deux haubans) ;
- limiter les surtensions locales ;
- limiter les efforts transmis dans les ancrages.

Limite de fonctionnement

Pour que l'ouvrage bénéficie des avantages des dissipateurs, le concepteur doit bien appréhender la chaîne de transmission des efforts qui peut être complexe et évolutive compte tenu des modifications de géométrie de l'ouvrage qu'entraîne le fonctionnement des dissipateurs. Il est prudent de s'inspirer de la conception et du comportement des écrans pare-pierres conforme au DEE n° 340059-00-0106 (ancien ETAG 27) afin de les utiliser à bon escient.

Chapitre 3 - Prise en compte de la mise en œuvre dans la conception

Compte tenu de la difficulté d'accès et de l'instabilité des terrains qui caractérisent les sites où les défecteurs sont installés, la facilité de leur mise en œuvre et la sécurité des opérateurs doivent être une donnée d'entrée dès leur conception.

On veillera à prendre en compte les points suivants :

- le phasage de réalisation précis de l'ouvrage devra être défini dès sa conception et son dimensionnement, dans le but d'assurer un temps de pose optimisé et un niveau de sécurité maximal pour les ouvriers. D'une façon générale, l'ouvrage se pose de haut en bas.
- la présence éventuelle de réseaux aériens (ex : lignes électriques) doit être prise en compte dès la conception et lors des opérations de levage/hélicoptage.
- la stabilité des poteaux devra être assurée, y compris lors des phases provisoires avant la mise en place de la ligne de rive supérieure et de la nappe. Un haubanage aval (éventuellement provisoire) peut être nécessaire sans que l'ouvrage terminé ne le nécessite.
- la ligne de rive supérieure devra faire l'objet d'une attention particulière si les opérateurs cordistes sont amenés à se suspendre dessus.
- le mode d'approvisionnement sur site des composants (hélicoptage, grutage, déplacement par moyen manuel, etc.) devra être pris en considération lors de la conception. Les colisages et les accessoires de levage devront être prévus en adéquation avec les capacités de levage. Les points de levage sur les montants devront être dimensionnés et matérialisés.
- sur les sites fortement instables, des moyens de protection provisoires des opérateurs peuvent être nécessaires : ils doivent être prévus, quantifiés et financés dans le marché afin de ne pas devenir une source d'optimisation d'une offre. Ces protections peuvent être, par exemples, un écran provisoire en partie supérieure du site ou une nappe de grillage mise en place avant l'installation de la nappe de l'ouvrage.
- la conception devra anticiper la méthodologie de remplacement des composants en limitant les besoins de démontage.



Figure 23 : Hélicoptage d'un filet d'avaloir
(Source : NGE)

Chapitre 4 - Contraintes environnementales

4.1. Zones protégées

Les défecteurs, ainsi que leur mise en œuvre, doivent tenir compte des enjeux environnementaux présents sur leurs secteurs d'implantation. Force est de constater que ces dispositifs concernent souvent des zones à enjeux écologiques reconnus (périmètres ZNIEFF, périmètres Natura 2000...) où s'applique une réglementation protectrice.

La préservation optimale de la biodiversité (milieux naturels, flore et faune) constitue donc un enjeu particulièrement prégnant lorsque les dispositifs de protection sont installés sur ces périmètres juridiquement sensibles et/ou dès lors qu'ils peuvent impacter des zones vitales pour des animaux et/ou des plantes protégés.

L'expérience acquise dans le dimensionnement des ouvrages de protection et dans les suivis des chantiers de confortement montre que les dispositifs de protection, de par leur conception, leur mise en œuvre ou leur entretien, changent le milieu naturel et peuvent avoir un impact sur les populations animales et végétales préexistantes sur le site. C'est d'autant plus vrai pour les défecteurs qui couvrent souvent de grandes surfaces de terrain naturel.

Non anticipée, la maîtrise de cet impact nécessite des adaptations d'urgence avant et pendant les chantiers (pouvant induire des surcoûts et retards) ainsi que, dans certains cas, la mise en œuvre par le maître d'ouvrage de mesures compensatoires assez lourdes, puisque la séquence « Éviter – Réduire – Compenser » n'a pas été mise en œuvre et que l'évitement et la réduction des impacts ne sont plus vraiment possibles. Cette conduite de projet subie, et non maîtrisée, est particulièrement pénalisante dès lors qu'une demande de dérogation à l'interdiction de destruction d'espèces protégées est nécessaire.

Il faut donc que les solutions de protection contre les chutes de blocs préconisées prennent en compte les enjeux écologiques très tôt dans les phases d'études, afin que les solutions de moindre impact soient rapidement proposées au maître d'ouvrage. Celui-ci pourra ainsi les intégrer le plus en amont possible dans sa planification, qu'elle soit financière, administrative ou technique.

4.2. Présence de végétation

La végétation qui repousse sur la surface couverte par un défecteur doit être intégrée dans la réflexion de conception générale de l'ouvrage car elle a deux incidences contradictoires sur son fonctionnement :

- défavorable en empêchant la déformation de la nappe, ce qui peut perturber la canalisation des éboulements et être à l'origine de poches de matériaux qui peuvent, *a minima*, s'avérer difficile à purger et, à l'extrême, entraîner la déchirure de la nappe ;
- favorable en jouant le rôle de placage de la nappe, ce qui peut s'avérer stabilisant pour le terrain ainsi confiné alors que ce n'est pas le rôle attendu.

4.3. Glace et vent

Les surcharges suivantes doivent être intégrées dans le dimensionnement lorsque l'ouvrage y est soumis :

- poids de la glace dans les zones à fort écoulement d'eau (même intermittent) en conditions hivernales (*nota* : il convient de se poser la question du cumul de cette charge avec celle liée à la survenance d'un éboulement rocheux) ;
- poids voire reptation de la neige en zone de montagne (se référer aux normes paravalanches en vigueur pour déterminer la charge hivernale correspondante) ;
- vent très fort sur les zones avaloirs d'ouvrages à faible poids. Dans une première approche, on pourra estimer la force du vent par la formule simplifiée issue des ouvrages paravalanches :

$$F_v = 2,08 \times H_a \text{ (kN/m)}$$

avec H_a : hauteur nominale de l'avaloir pris perpendiculairement au terrain.

Si cette valeur est du même ordre de grandeur que le poids propre de la nappe, un calcul plus approfondi devra être mené sur la base de l'Eurocode 1991-1-4.



Figure 24 : Ouvrages soumis à neige et glace (Source : Alpes Ingé)

4.4. Durabilité

Le maître d'ouvrage doit indiquer la durée de vie souhaitée pour l'ouvrage ainsi que la catégorie de corrosion atmosphérique du site au sens de la norme NF EN ISO 14713.

En fonction de ces données d'entrée, les protections et/ou épaisseurs sacrificées à la corrosion doivent être déterminées et intégrées au dimensionnement de l'ouvrage.

Chapitre 5 - Composants

Les composants présentés sont les plus couramment utilisés dans les défecteurs. La liste n'est pas exhaustive. D'autres types de composants peuvent être utilisés dans le cadre d'exigences ou d'adaptations particulières rencontrées.

5.1. Montants

Les montants, généralement des poteaux, sont principalement constitués de profilés acier standard (H, tube rond, etc.). Les nuances d'acier généralement utilisées sont S235, S275 ou S355. La protection anticorrosion est assurée par galvanisation à chaud suivant la norme NF EN ISO 1461

Leur géométrie varie suivant la hauteur de l'avaloir, les efforts de compression transmis et les modes de fixations (fixation des câbles par coiffage, perçages pour fixation par manilles, etc.).

Le pied de montant peut être articulé ou non, fixé au sol au moyen d'une platine ancrée ou triangulée par des câbles avec ancrages déportés.

Précautions de conception :

- la jonction des montants avec les divers câbles doit être conçue pour ne pas les blesser. En absence de cosse-cœur, les pièces d'accueil auront un diamètre minimal de 2.5 fois le diamètre des câbles ;
- les arêtes vives et angles saillants doivent être supprimés (meulés *a minima*) ou protégés pour ne pas blesser les opérateurs de terrain ;
- pour les montants de grande hauteur, il est recommandé de prévoir des échelons sur la hauteur facilitant l'accès des opérateurs en tête de montant ;
- prévoir d'obturer les poteaux de section creuse pour préserver la faune.



Figure 25 : Exemple de tête de poteau ne blessant pas les câbles (Source : NGE)

Les montants constitués de bois sont déconseillés pour les ouvrages définitifs, en raison de :

- leur moindre durabilité dans le temps ;
- leur forte sensibilité aux incendies ;
- leur faible résilience aux chocs ;
- la difficulté à liaisonner le bois aux câbles ;
- la difficulté à garantir les caractéristiques mécaniques requises.

5.2. Nappe

Les panneaux ou lés peuvent être de différents types :

- grillages simple ou double torsion ;
- grillages/treillis à haute limite élastique ;
- filets à anneaux ;
- filets de câbles.

Pour les besoins du dimensionnement, les caractéristiques suivantes devront être données :

- la résistance de la nappe dans le plan devra être indiquée en kN/m ;
- le poids devra être indiqué en kg/m².

Remarque : La résistance au poinçonnement n'est pas utilisée dans la méthode présentée dans ce document.

5.2.1. Grillages simple torsion

Il s'agit de grillage simple torsion à maille losangique de taille 30x30 mm à 50x50 mm :

- Le grillage répondra à la norme NF EN 10223-6.
- La maille est constituée d'un fil d'acier 350/550 N/mm² de diamètre 2,7 mm à 3 mm.
- La protection anti-corrosion sera assurée par galvanisation classe A ou alu-zinc classe A selon la norme NF EN 10244-2.
- La bordure du grillage sera de type bouclée nouée.

5.2.2. Grillages double torsion

Il s'agit de grillage double torsion à maille hexagonale de taille 60x80 mm à 100x120 mm :

- la maille du grillage répondra à la norme NF EN 10223-3 ;
- la maille est constituée d'un fil d'acier 350/550 N/mm² de diamètre 2,7 mm à 3 mm ;
- protection anti-corrosion par galvanisation ou Alu-Zinc classe A selon NF EN 10244-2 ;
- l'ordre de grandeur de la résistance d'un grillage 60x80 mm, fil de 2,7 mm, est de 60 kN/m ;
- l'ordre de grandeur de la résistance d'un grillage 100x120 mm, fil de 2,7 mm, est de 30 kN/m ;

Les valeurs de ruptures indiquées ci-dessus sont directement issues d'essais. Elles ne sont pas affectées de coefficient de sécurité.

Remarque : Le certificat NF Acier sur les grillages n'impose pas les essais de traction sur la performance mécanique, contrairement au marquage CE.

5.2.3. Grillages à haute limite élastique

Il s'agit de grillages ou treillis à maille carrée, losangique, ou autre, composés de fil d'acier de nuance $\geq 900 \text{ N/mm}^2$:

- la maille est constituée d'un fil d'acier galvanisé de diamètre minimum de 2 mm ;
- la protection anti-corrosion sera assurée par galvanisation classe A ou alu-zinc classe A ou B selon la norme NF EN 10244-2.

5.2.4. Filets à anneaux

Les filets à anneaux répondront à la norme ISO 17745.

Les caractéristiques suivantes sont recommandées en fonction de la capacité de l'ouvrage considéré :

- panneaux de filets à anneaux à 4 ou 6 points de contacts ;
- toron de diamètre 7,5 à 16 mm ;
- nuance d'acier minimale : 1380 N/mm^2 ;
- protection anti-corrosion par galvanisation classe A ou alu-zinc classe A selon la norme NF EN 10244-2.

5.2.5. Filets de câbles

Les filets de câbles répondront à la norme ISO 17746.

Les filets de câbles doivent avoir une structure suffisamment déformable pour épouser les irrégularités du terrain.

La structure du filet sera telle qu'en cas de rupture d'un câble, il n'y ait pas de propagation des désordres à plus de 2 mailles voisines.

Les caractéristiques des câbles suivantes sont recommandées en fonction de la capacité de l'ouvrage considéré :

- câble de diamètre 7 à 20 mm ;
- nuance d'acier minimale 1550 N/mm^2 ;
- protection anticorrosion par galvanisation classe A ou alu-zinc classe A ou B selon la norme NF EN 10244-2.

5.3. Câbles

De manière générale, il est préconisé la mise en œuvre de câbles multi-torons à âmes métalliques. Les âmes textiles sont proscrites.

Il s'agira de câbles acier répondant à la norme EN 12385-4 :

- nuance d'acier 1550 ou 1960 N/mm^2 ;
- torons composés de 6x19 fils ou 6x36 fils.

Ces câbles seront galvanisés classe A ou B suivant la norme NF EN 10244-2.

Les terminaisons de câbles doivent être conçues conformément à la série de normes NF EN 13411 traitant des cosses, des épissures, des manchons, des serre-câbles, etc.

Précautions de conception :

Les câbles ne devront rencontrer aucun angle vif, que ce soit à leur terminaison ou aux éventuels points d'accroches intermédiaires. Des pièces d'accueil adaptées devront être mises en place afin de limiter le diamètre de courbure du câble à 2,5 fois son diamètre.

5.4. Accastillage

5.4.1 Serre-câbles

Les serre-câbles utilisés doivent répondre à la norme EN 13411-5 A ou B.

Les serre-câbles DIN 741 sont proscrits.

La protection anticorrosion sera assurée par galvanisation à chaud ou électrozinguage.

Le diamètre des serre-câbles sera adapté à celui du câble utilisé. Le nombre, l'espacement et le couple de serrage des serre-câbles devront respecter les préconisations de la norme. En complément, il est recommandé de mettre en place une boucle anti-échappement sur le brin mort telle que sur la figure 27.



Figure 26 : Boucle anti-échappement, avant (à gauche) et après sollicitation (à droite) - (Source : NGE)

5.4.2. Cosses

Les cosses utilisées doivent répondre à la norme EN 13411-1. A ce titre :

- le diamètre de courbure de la partie fermée sera au moins égal à 2,5 fois le diamètre du câble ;
- l'épaisseur d'acier des cosses sera suffisante pour ne pas entraîner de réduction de largeur supérieure à 15 % sous une charge de 27 % de la charge de travail.

Bien que non normalisées, les cosses rondes pourront être tolérées pour la réalisation d'élingues réglables pour lesquelles les cosses cœurs sont difficiles à mettre en œuvre.

Les cosses auront une largeur de gorge adaptée aux câbles utilisés.

La protection anticorrosion sera assurée par une galvanisation à chaud selon la norme ISO 1461.

5.4.3. Manilles

Les manilles utilisées doivent répondre à la réglementation européenne 2006/42/CE ou respecter la norme EN 13889. La résistance tient compte d'un coefficient d'utilisation minimale de 5.

La protection anticorrosion sera assurée par une galvanisation à chaud selon ISO 1461.

5.4.4. Matériaux en inox

L'utilisation de pièces en inox doit faire l'objet d'une attention toute particulière afin d'éviter les effets de couple galvanique ou « pile » qui peuvent avoir pour résultat la corrosion accélérée du matériau moins noble.

Il convient d'éviter d'associer des matériaux métalliques différents notamment entre les accessoires et la barre d'ancrage pour éviter les risques d'électrolyse ce qui contribuerait à accélérer la corrosion.

Chapitre 6 - Dimensionnement

Le dimensionnement d'un ouvrage défecteur doit être fait par un concepteur bénéficiant de l'expérience suffisante pour appréhender la variabilité des différents paramètres et leur incidence sur le comportement de l'ouvrage.

En dehors d'ouvrages pouvant justifier d'un test en grandeur réelle ou d'un calcul numérique complexe capable de modéliser avec fiabilité les phénomènes dynamiques, le dimensionnement des ouvrages défecteurs se fera suivant une approche quasi-statique. Les phénomènes dynamiques seront pris en compte par l'intermédiaire de coefficients de pondération appliqués aux masses ébouloées, ce qui permet l'utilisation d'un calcul analytique simple. L'approche qui est présentée par la suite est faite aux états-limites ultimes, pour un bloc unitaire, avec des hauteurs de chute libre inférieures à 15 mètres.

6.1. Conception générale

La conception d'un défecteur consiste :

- à définir la géométrie générale de la structure en fonction de l'aléa ;
- à concevoir les sous-ensembles en fonction du contexte et des objectifs ;
- à choisir les composants ;
- à définir les modes d'assemblage.

Comme pour toute structure métallique, le choix et la disposition des assemblages est aussi important que les calculs de dimensionnement. Afin de garantir une cohésion d'ensemble, il est préférable que l'entité qui réalise le dimensionnement soit aussi celle qui fait la conception.

6.2. Application de l'Eurocode 0

Il n'existe pas d'Eurocode approprié pour les ouvrages défecteurs, du fait de leur fonctionnement atypique (grande déformation, canalisation sans arrêt, gestion d'énergie, etc.). Il est cependant possible d'appliquer les principes généraux de « l'Eurocode 0 » (norme NF EN 1990 - Eurocodes structuraux – Base de Calcul des Structures). Il repose sur l'application conjuguée de la méthode de calcul aux états-limites et de coefficients de sécurité partiels pour pondérer les actions, les effets des actions, les paramètres du sol et les résistances.

Le dimensionnement nécessite que soient définies (NF EN 1990 § 4) :

- les actions, leur valeurs caractéristiques, leur effet sur la structure étudiée et leurs différentes combinaisons à étudier : masse de l'éboulement nominal, accumulation de matériaux, énergie d'impact sur avaloir, poids propres des composants, charge de neige, etc. ;
- les propriétés des composants et matériaux : résistance, capacité d'allongement, etc. ;
- les données géométriques : dimension de l'ouvrage, variabilité de ces dimensions, profil de terrain, taille des blocs, hauteur de passage au niveau de l'avaloir, respect du gabarit de l'infrastructure, etc.

Ces éléments sont pondérés par des coefficients de sécurité partiels :

- les coefficients partiels à appliquer sur les actions ;
- les coefficients partiels à appliquer sur les résistances des matériaux.

Concernant les propriétés mécaniques d'un composant ou d'un matériau, on fera la distinction entre (NF EN 1990 - § 4.2) :

- les **valeurs de résistance** issues de campagnes d'essais normalisés ;
- la **valeur caractéristique** qui est obtenue soit directement de la norme du produit concerné (exemple : câble, profilé laminé, etc.), soit à partir des valeurs de résistance issues d'essais affectées d'un coefficient qui tient compte de la dispersion des données et de l'incertitude statistique associée au nombre d'essais réalisés ;
- la **valeur de calcul** qui est la valeur caractéristique affectée du coefficient partiel de sécurité.

6.3. Caractérisation des actions de sollicitation des déflecteurs

Les types de sollicitations d'un ouvrage déflecteur sont :

- l'éboulement nominal dans l'ouvrage ;
- l'accumulation de matériaux ;
- l'impact nominal au niveau du système avaloir (optionnel) ;
- le poids propre ;
- les surcharges de neige et glace.

Remarque : Suivant la norme NF EN 1990, une action « nominale » renvoie à une « valeur fixée, par exemple, sur une expérience acquise ou sur des considérations physiques ». Elle renvoie donc souvent à une appréciation « à dire d'expert » du concepteur.

6.3.1. L'éboulement nominal dans l'ouvrage

L'éboulement nominal est la plus grande masse susceptible de se détacher dans la zone couverte par l'ouvrage déflecteur. Il va être canalisé et freiné plus ou moins fortement par l'ouvrage. Il est caractérisé par :

- sa masse **Me** exprimée en kilogramme (kg) : l'attention du concepteur est attirée sur la difficulté d'estimation du poids propre du bloc de référence qui dépend de la qualité et des possibilités de mesure de son volume°;
- sa largeur de contact avec la nappe **Le** exprimée en mètre (m). Cette largeur doit tenir compte des dimensions du bloc, corrigée en fonction de sa forme. Le tableau suivant donne un exemple de correction en fonction de forme basique ;

Forme				
Paramètres de dimension	Diam : D	L x l x h	Diam : D Epaisseur : ep	Longueur maximale : Lmax
Largeur de contact : Le	1/2 x D	Min (L ; l ; h)	ep	1/4 x Lmax

Figure 27 : Largeur de contact en fonction de la forme

- il est aussi nécessaire de caractériser la décélération maximale **Déc**, exprimée en nombre de *g* (9,81m/s²), que va subir l'ouvrage sollicité par l'éboulement nominal.

Remarque : La décélération maximale que l'ouvrage va subir est un élément clé du dimensionnement. Ce n'est pas une donnée intrinsèque de l'ouvrage qui peut se calculer, mais un paramètre très difficile à appréhender. Il dépend des facteurs suivants :

- frottement que procure la nappe de déflexion sur le bloc,
- capacité de déformation de l'ouvrage (module de la nappe de déflexion, présence de frein, longueur développée, etc.),
- capacité du site à bloquer cette déformation (cassure de pente bloquante, rugosité de surface, repousse du couvert végétal et forestier, système de rive inférieure, etc.).

On peut encadrer les valeurs limites comme suit :

- un déflecteur qui maintient simplement la vitesse des blocs constante subit une décélération de 1 *g* ;
- des essais sur déflecteurs non freinés et impactés par des blocs à forte vitesse ont enregistré des décélération de 15 *g* à 25 *g*.

Pour compléter ces informations, le tableau ci-dessous donne à titre indicatif les décélérations subies par des écrans d'interception freinés :

	Décélération	Masse du bloc	Force d'impact
SEL* 1 3000 kj	16 g	2,6 tonnes	408 kN
SEL 2 3000 kj	17 g	2,7 tonnes	443 kN
MEL* 3000 kj	8 g	7,3 tonnes	606 kN
SEL 1 5000 kj	12 g	4,8 tonnes	574 kN
SEL 2 5000 kj	12 g	4,8 tonnes	569 kN
MEL 5000 kj	6 g	12,3 tonnes	740 kN

* voir définition dans EAD 340059 – Falling Rock Protection Kits

Figure 28 : Coefficients de décélération et forces d'impact sur divers écrans (Source : NGE)

Compte tenu du peu de données à disposition, il est recommandé de ne pas appliquer à **Déc** une valeur inférieure à 10 g. On pourra moduler cette valeur par défaut comme suit :

- à la baisse, si la propagation des blocs sous le déflecteur est très peu entravée (ex : filet écarté d'une falaise verticale sans blocage en pied) ;
- à la hausse, si la configuration va entraîner des décélérations brutales des blocs, voire leur arrêt complet (ex : filet posé sur une cassure de pente, déflecteur bridé en pied).

Cette valeur pourra être revue à l'avenir lorsque des essais auront permis de préciser cette caractéristique pour ces ouvrages.

On en déduit **F_{déc}** l'effort linéique de décélération caractéristique que subit l'ouvrage :

$$F_{d\acute{e}c} = \frac{M_e}{L_e} \cdot D\acute{e}c \cdot g \quad (\text{kN/m})$$

6.3.2. L'accumulation de matériaux

L'accumulation de matériaux caractéristique **Accu** (exprimée en kN/m) correspond au cumul de matériaux éboulés que peut produire le site. Elle est estimée sur la période correspondant à la fréquence de maintenance par curage. Il est important que cette fréquence soit déterminée entre le maître d'œuvre et le maître d'ouvrage au moment de la conception et elle doit être clairement mentionnée dans le document de maintenance.

Pour déterminer la sollicitation de cette accumulation sur l'ouvrage, on fait l'hypothèse conservatrice que le frottement du matériau contre le terrain naturel est négligé. Le poids de l'accumulation est donc directement appliqué sur la nappe de déflexion. Il ne sera pas pris en compte d'effet dynamique.

6.3.3. L'impact nominal au niveau du système avaloir (optionnel)

Si l'ouvrage comprend un avaloir, sa sollicitation caractéristique est définie par :

- une énergie d'impact nominale **E_i** (exprimée en kJ) ;
- sa hauteur d'impact nominale **H_i** (exprimée en m)

qui sont estimées au niveau de l'entrée du système avaloir.

La hauteur d'impact nominale correspond à la hauteur de passage à laquelle s'ajoute le rayon du bloc impactant. Elle se mesure perpendiculairement au terrain se trouvant directement à l'amont du système avaloir (attention en cas d'implantation classique sur une cassure de pente).

6.3.4. Le poids propre de l'ouvrage

Le poids propre caractéristique de l'ouvrage **P_p** (exprimé en kN/m) pourra généralement être simplifié au poids propre de la nappe.

6.3.5. Surcharge

Dans certaines régions, en période hivernale, il convient de ne pas oublier de prendre en compte le poids de la glace et de la neige sur l'ouvrage.

6.3.6. Pondération des actions et combinaison

La combinaison d'actions principale à considérer correspond à une situation de projet transitoire au sens de la norme NF EN 1990. Elle doit prendre en compte l'ensemble des sollicitations pondérées suivantes en même temps :

- le poids propre **Pp** de l'ouvrage est une action permanente, affectée d'un coefficient partiel de 1,35 ;
- l'accumulation de matériaux **Accu** et les surcharges éventuelles sont considérées comme variables, donc affectées d'un coefficient partiel de 1,5 ;
- la décélération **Fdec** est considérée généralement comme variable, affectée d'un coefficient partiel de 1,5.

Remarque : En cas de très faible fréquence d'occurrences attendues sur le site, la décélération **Fdec** peut être considérée comme accidentelle. Elle doit alors être retirée de la combinaison d'action principale (qui doit être calculée sans elle) et faire l'objet d'une seconde combinaison correspond à une situation de projet accidentelle qui reprend l'ensemble des actions ci-dessus affectés d'un coefficient partiel de 1,0. La maintenance en cas d'évènements sera bien sûr beaucoup plus importante.

En cas d'avaloir, l'impact **E** doit faire l'objet d'une combinaison d'actions à part correspondant à une situation de projet qui, selon les fréquences d'occurrences attendues sur le site, pourra être considérée comme transitoire avec un coefficient partiel variable de 1,5 ou accidentelle avec un coefficient partiel de 1,0.

6.4. Descente de charge sur les composants

Un calcul analytique doit permettre de déterminer la répartition des efforts sur chacun des composants de la structure à partir de l'application des combinaisons d'actions à considérer. Ce calcul passe par un modèle géométrique simplifié de l'ouvrage où les principaux composants de transmission d'effort sont représentés (voir exemple en annexe). Ce modèle doit prendre en compte les trois dimensions. Les angles entre les composants sont des paramètres influents qui peuvent « orienter » un effort sur un composant plutôt qu'un autre : il convient de les choisir judicieusement.

Le résultat de ce calcul devra mentionner les sollicitations maximales transmises aux divers composants ainsi qu'aux différents ancrages. Il doit préciser le type de sollicitation (compression, traction, cisaillement, couple).

Remarque :

- La flèche des câbles de rives est un paramètre très influent dans les calculs de répartition. Il est recommandé de ne pas la réduire à moins de 5 % de la portée.
- On considèrera que les câbles de rive ont une géométrie parabolique (correspondant à une charge constante suivant l'horizontale). Cependant, dans la mesure où elle est conservative, on pourra simplifier en considérant que la charge est concentrée au centre de la portée. La géométrie du câble se ramène alors à deux demi-câbles tendus de même longueur.
- Les paramètres géométriques de l'ouvrage (profil de pente, distance entre ancrages, angles des haubans et poteaux, etc.) peuvent varier de façon non négligeable entre les plans d'exécution et la réalité de l'adaptation au terrain. Cette variation devra être prise en compte dans le calcul, éventuellement par un coefficient partiel de modèle à ajouter aux efforts maximaux obtenus.

Important : En phase chantier, des mesures de contrôle de flèche ou, *a minima*, de (non) mise en tension des câbles de rive doivent être prévues afin de s'assurer que les conditions de dimensionnement sont respectées.

6.5. Caractérisation des composants ou sous-ensembles de l'ouvrage déflecteur

6.5.1. La nappe

La nappe est caractérisée par sa résistance ultime à la traction dans le plan R_{nu} exprimée en kN/m. À défaut de norme spécifique au produit, cette résistance est déterminée à partir de l'essai suivant :

- l'essai consiste à appliquer un effort dans le plan d'un échantillon rectangulaire de nappe jusqu'à sa rupture. L'effort est appliqué sur l'un des côtés de l'échantillon, les trois autres côtés étant maintenus fixes ;
- les échantillons de nappe sont rectangulaires. Chaque côté est au moins égal à un mètre et comprend au moins 3 mailles ;
- le rapport longueur/largeur de l'échantillon doit être le plus proche de 1 tel que le permet la forme des mailles ;
- le protocole d'essais doit être conforme aux normes ISO 17745 et 17746 annexe C.

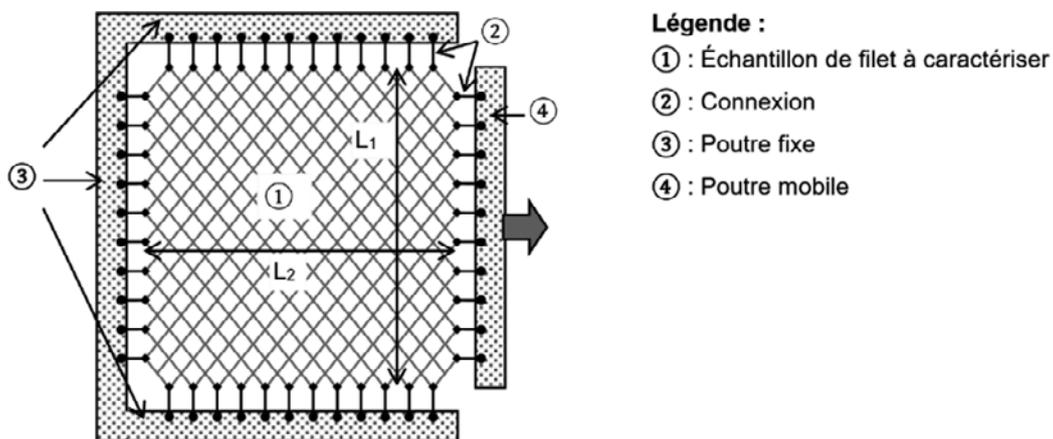


Figure 29 : Vue schématique de l'appareillage d'essai d'une nappe
(Source : schéma extrait de la norme ISO 17746)

- Pour chaque essai, F_{u_max} est égale au pic d'effort atteint avant rupture d'un composant du filet (fil, câbles, agrafes, manchon, etc.).

À défaut de préconisation différente dans une norme spécifique au produit, l'exploitation des résultats d'essai se fera comme suit :

- trois échantillons doivent être testés dans le sens vertical de pose du produit ;

la résistance linéaire caractéristique de la nappe, R_{nu} , est égale à la plus petite valeur de F_{u_max}/L_1 obtenu au cours des trois essais réalisés.

Remarque : En cas de doublage d'un filet métallique, on ne prendra pas en compte le grillage dans la résistance globale.

6.5.2. La zone avaloir (optionnelle)

La zone avaloir est un sous-ensemble de l'ouvrage qui comprend la portion de nappe d'interception des trajectoires amont et la structure de liaison supérieure. Elle est caractérisée par sa capacité d'absorption d'énergie ultime (en anglais : Maximum Energy Level) E_{MEL} exprimée en kJ, par sa hauteur minimale sous rive supérieure H_{MEL} et par les efforts qu'elle renvoie vers les ancrages.

Pour les avaloirs en grillage, un exemple de valeurs est présenté dans le tableau suivant.

Type de nappe de déflexion	Capacité d'absorption E_{MEL}
Simple nappe de grillage 60x80 mm + câble de rive diam. 16 mm + double haubanage diam. 12 mm + espacement de 4 m entre poteaux + ancrages à armature Ø25 mm (pour catégorie II d'agressivité des sols)	12,5 kJ
Double nappe de grillage 60x80 mm + câble de rive diam 20 mm + espacement de 4 m entre poteaux + armature Ø32 mm pour les ancrages latéraux et armature Ø25 mm pour les autres (pour catégorie II d'agressivité des sols)	50 kJ

Figure 30 : Capacité des avaloirs usuels en grillage double torsion

Pour les capacités supérieures, les avaloirs seront soit justifiés par des essais en grandeur réelle, soit conçus à partir de kits pare-pierres agréés de même capacité d'énergie MEL que l'on modifiera selon les principes suivants :

- l'ensemble du système de rive supérieure, y compris poteaux, sera maintenu ;
- la rive inférieure sera libérée ;
- les dissipateurs (hors rive inférieure) seront maintenus, y compris dissipateurs de câbles horizontaux intermédiaires ;
- les concepts susceptibles d'entraver le libre débattement aval de la nappe d'interception seront modifiés (ex : filet à l'amont des poteaux, connexions des câbles horizontaux intermédiaires aux poteaux, etc.) ;
- la nappe d'interception sera prolongée par une nappe de même nature sur toute la surface susceptible d'être impactée par un bloc provenant de l'amont de l'ouvrage.

Remarque : Une attention doit être apportée aux sites entraînant des chutes de roches de faible volume mais à grande vitesse. À énergie équivalente, ces blocs peuvent avoir un effet perforant plus prononcé qu'un bloc plus gros. Un renforcement de la nappe d'interception est conseillé dans ce cas. Pour mémoire, dans le cadre du DE EAD340059-00-0106, la vitesse retenue pour les écrans pare-pierres est de 25 m/s.

6.5.3. Les autres composants

Les valeurs caractéristiques de résistance des autres composants doivent être déterminées soit à partir de la norme les régissant (ex : câbles), soit par un calcul suivant l'Eurocode correspondant (ex : poteaux), soit par des essais spécifiques avec un traitement statistique adéquat des valeurs obtenues (par défaut, la valeur caractéristique est le fractile 5 %).

Pour les accessoires de levage (manille, chaîne, etc.), la résistance ultime sera égale à la charge de CMU (Charge Maximale d'Utilisation exprimée en kg) multipliée par le coefficient d'utilisation et exprimée en kN.

6.5.4. Coefficients de sécurité sur les composants et sous-ensembles

Les valeurs caractéristiques de résistance des composants et sous-ensembles ci-dessus doivent être affectés des coefficients de sécurité suivants.

Composant ou Sous-ensemble	Coefficient de sécurité γ_m
Câble de rive supérieure	1,75
Haubans latéraux	1,75
Autres câbles (haubans amont, aval, etc.)	1,35
Nappe de filet	1,50
Pièces de liaisons acier (manilles, axes, etc.)	1,25
Poteaux et pièces mécano-soudées	Coefficient de l'Eurocode correspondant

Figure 31 : Coefficients de sécurité des principaux composants

6.6. Vérification de capacité des composants et sous-ensembles

On vérifiera que la géométrie de l'ouvrage couvre la zone à protéger telle que définie avec le maître d'ouvrage. Cette vérification devra prendre en compte une estimation de la propagation latérale des blocs à canaliser afin de prévenir un échappement par les rives latérales de l'ouvrage.

Pour chaque composant ou sous-ensemble de l'ouvrage, l'inéquation $F_{max} < \frac{R_{caract.}}{\gamma_m}$ doit être vérifiée avec :

F_{max} : effort maximal transmis au composant sous l'effet des actions affectées de leur coefficient de pondération

$R_{caract.}$: résistance caractéristique du composant

γ_m : coefficient de sécurité approprié pour le composant (voir Figure 32)

6.6.1. Cas de la structure de liaison inférieure

Dans la plupart des cas, la structure de liaison inférieure a un rôle fonctionnel plutôt que structurel. On s'assurera que les résistances de ses composants sont proportionnées à la nappe de déflexion et au rôle qui lui est conféré (lest, fermeture de pied, fusible, etc.).

6.6.2. Cas de la partie avaloir

En fonction de la situation considérée (voir § 6.3), les équations suivantes doivent être vérifiées :

- Situation transitoire : $E_i * 1.5 < \frac{E_{MEL}}{1,5}$
- Situation accidentelle : $E_i * 1.0 < \frac{E_{MEL}}{1,5}$
- $H_i < \frac{H_{MEL}}{1,0}$

6.6.3. Cas des ancrages et fondations

Les ancrages et fondations doivent être en mesure de reprendre les descentes de charges provenant du calcul de la structure de liaison auxquelles s'ajoutent les efforts liés à l'éventuelle fonction avaloir.

Le dimensionnement des ancrages et fondations fera l'objet d'une note de calcul particulière (hors domaine d'application de ce document).

Chapitre 7 - Maintenance

7.1. Facteurs de dégradation et principaux désordres associés à l'ouvrage déflecteur

Les facteurs de dégradation principaux sont :

- éboulement normal (\leq seuil nominal) ;
- éboulement exceptionnel ($>$ seuil nominal) ;
- accumulation de matériaux éboulés dans l'ouvrage (formation d'une poche de matériaux) ;
- accumulation de neige et/ou glace ;
- chute d'arbre ;
- envahissement végétal ;
- érosion de pied de poteau ;
- environnement maritime ;
- sel de déverglaçage ;
- environnement industriel (soufre, etc.)
- incendie ;
- impact de foudre ;
- vent très violent.

Les types de désordres principaux sont :

- déformation/flambement/rupture de montant ;
- déformation/arrachement d'ancrage ;
- déclenchement d'un dissipateur d'énergie ;
- déformation/rupture de la nappe ;
- rupture de câbles ;
- corrosion et perte de résistance associée ;
- modification sensible de la géométrie de l'ouvrage ;
- modification de la capacité de déformation de l'ouvrage.



Figure 32 : Eboulement exceptionnel (Source : AVAROC)

7.2. Visites de contrôle

7.2.1. Contrôle récurrent ou périodique

Un programme de contrôle par visites simples et visites détaillées s'inscrit dans la politique de gestion du parc d'ouvrages décidée par le maître d'ouvrage.

- **Les visites simples** sont destinées essentiellement à mettre en évidence une sollicitation fonctionnelle de l'ouvrage (qui, le cas échéant, pourra déclencher une visite détaillée), ou un impact environnemental clairement visible (ex : envahissement végétal).

Etant donné qu'une sollicitation fonctionnelle d'ouvrage peut survenir à n'importe quel moment, la fréquence des visites simples doit être forte (ex : visites régulières de fréquence mensuelle à annuelle). Cette fréquence sera à adapter au contexte (notamment au niveau des aléas associés à l'ouvrage) et à différents paramètres tels que la météorologie (ex : déclenchement d'une visite après un fort épisode pluvieux).

Ce type de visite ne nécessite aucune compétence spécifique : le contrôle est basé sur un constat visuel général de l'ouvrage, qui peut être réalisé à distance. À ce titre, il peut être réalisé soit par une entreprise spécialisée, soit en régie par le maître d'ouvrage.

Selon la situation de l'ouvrage, une habilitation à l'intervention sur corde pourra être nécessaire.

- **Les visites détaillées** sont destinées à établir un diagnostic poussé de l'ensemble du matériel et des composants qui constituent l'ouvrage (solicitation fonctionnelle ou impact environnemental).

Elles seront réalisées selon une fréquence prédéfinie en fonction du contexte (classification des aléas associés à l'ouvrage, agressivité du milieu, etc.), selon une périodicité à définir par le maître d'ouvrage, généralement de 1 à 5 ans.

Remarque : Ce type d'inspection nécessite du personnel spécialisé ayant une bonne connaissance de l'ouvrage, de son mode de fonctionnement et des enjeux qui y sont associés. À ce titre, il ne peut être réalisé que par un personnel qualifié.

Chaque intervention de contrôle sur l'ouvrage, qu'elle soit sous forme de visite simple ou d'inspection détaillée, doit systématiquement faire l'objet d'un enregistrement formalisé (main courante, fiche de visite ou d'inspection).

7.2.2. Contrôle suite à forte sollicitation

L'ouvrage devra faire l'objet d'un contrôle spécifique, *a minima* dans les cas suivants : incendie, éboulement dans l'ouvrage ou à proximité immédiate, forte accumulation de neige et/ou formation de glace dans l'ouvrage.

L'intervention à réaliser sera identique à une visite détaillée (voir § 7.2.1).



Figure 33 : Ouvrage sollicité au-delà de ses capacités (Source : NGE)

7.3. Travaux d'entretien

On entend par maintenance préventive (ou entretien courant) toute opération de maintenance d'un ouvrage n'ayant pas subi de dégradations ou sollicitations susceptibles d'altérer ses capacités. Elle permet donc à l'ouvrage de maintenir un niveau de service optimal.

On entend par maintenance curative (ou travaux de réparation) toute opération de maintenance d'un ouvrage ayant subi une dégradation ou une sollicitation susceptible d'altérer ses capacités. Elle permet donc à l'ouvrage de rétablir son niveau de service optimal.

Maintenance préventive et maintenance curative doivent être basées sur le résultat des contrôles récurrents (voir § 7.2.1).

7.3.1. Maintenance préventive (ou entretien courant)

Le tableau suivant présente les travaux d'entretien courant des ouvrages déflecteurs et le type de visite les déclenchant.

Nature de l'entretien		Déclenchement
1	Débroussaillage	Visite simple
2	Vidange de l'ouvrage des matériaux éboulés	
3	Remise en tension des câbles	
4	Reprise de serrage des pièces d'accastillage, des serre-câbles, des écrous des ancrages	Visite détaillée
5	Entretien des accès à l'ouvrage	
6	Entretien de la peinture anticorrosion des poteaux et des armatures d'ancrages	

Le développement de la végétation dans l'ouvrage pourra, en particulier, être anticipé et un niveau limite de végétalisation de l'ouvrage déclenchant une intervention pourra être établi en accord avec le maître d'ouvrage. Il pourra être basé :

- soit sur une notion de durée/fréquence (ex : intervention chaque année au printemps, etc.) ;
- soit sur une notion de seuil limite d'envahissement végétal (ex : surface envahie ramenée à la surface totale de l'ouvrage).

Le taux de remplissage limite de l'ouvrage devra être défini en accord avec le maître d'ouvrage et associé à une intervention. Il pourra être basé, selon les caractéristiques du site :

- au volume de matériaux accumulés prévus dans le dimensionnement ;
- à un critère de déformation de l'ouvrage par les volumes accumulés (ex : pas d'intervention pour purge si un bloc est simplement coincé entre la paroi et le filet, sans déformation de l'ouvrage).



Figure 34 : Un entretien trop tardif peut rendre l'opération très difficile
(Source : NGE)

7.3.2. Maintenance curative (ou travaux de réparation)

Suite à une forte sollicitation, un contrôle spécifique (voir § 7.2.2) doit définir la nature des travaux de réparation. La liste suivante présente les principaux travaux à réaliser sur les ouvrages déflecteurs ayant subi une forte sollicitation :

- remplacement de montant, de câbles, de pièces d'accastillage ;
- réparation de la nappe, par remplacement intégral ou ajout de patch ;
- réalisation d'ancrages complémentaires en cas de défaillance d'un ou plusieurs ancrages ;
- remplacement de dissipateurs d'énergie en cas de fonctionnement estimé supérieur à 30 %.

Certaines opérations de maintenance curative pourront faire l'objet d'un programme d'interventions préalablement défini en fonction de certains critères prévisibles.

Bibliographie

- B. Arndt et al - "Colorado's Full-Scale Field Testing of Rockfall Attenuator Systems" - Circular n° E-C141 - Transportation Research Board 2009 - DOI: 10.17226/22989
- T.C. Badger et J.D. Duffy - "Drapery system" - chapitre 16 dans "Rockfall characterisation and control" - Transportation Research Board - 2012
- P. Bertolo, C. Oggeri, D. Piella - "Full scale procedure for testing cortical rockfall protection system" - Canadian Geotechnical Journal - 2009 - DOI: 10.1139/T08-126
- J.D. Duffy - "Flexible Wire rope rockfall nets" - Transportation Research Record 1343 <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1992/1343/1343-003.pdf>
- T.D. Eliassen et al - "Evaluation of hybrid rockfall barrier / drape system initial report" - Vermont Agency of Transportation Report No.2011- 1
- G. Giacchetti et al - "Software Design Theory and Railroad Application of Simple Drapery System" - AREMA 2014 Annual Conference & Exposition
- B. Muhunthan et al - "ANALYSIS AND DESIGN OF WIRE MESH/CABLE NET SLOPE PROTECTION" - Washington State Department of Transportation WA-RD 612.1 avril 2005
- N. Sasiharan, B. Muhunthan, T.C. Badger, S. Shu, D.M. Carradine - "Numerical analysis of the performance of wire mesh and cable net rockfall protection systems" - Engineering Geology 88 (2006) 121-132 - doi:10.1016/j.enggeo.2006.09.005
- S. Shu, B. Muhunthan, T. C. Badger - "Snow loads on wire mesh and cable net rockfall slope protection systems" - Engineering Geology 81 (2005) 15-31 - doi:10.1016/j.enggeo.2005.06.007
- J. R. Smerekanicz - "Rock Slope Stabilization Measures at the Pali Tunnel Route 30, Maui, Hawaii" - 59th Highway Geology Symposium, 2008
- K. Thoeni et al - "Numerical Investigation on the Performance of a Rockfall Drapery System" - III International Conference on Particle-based Methods - Fundamentals and Applications PARTICLES 2013

Caractéristiques géométriques principales de l'ouvrage					
Dénomination	Symbole	Valeur	Unité	Commentaire	
Hauteur totale de l'ouvrage	H	22	m		
Largeur de module	Lm	6	m		
Distance poteau / ancrage amont		4	m		
Distance poteau / ancrage latéral		5	m		
Hauteur poteau		3	m		
Flèche imposée au câble de rive supérieure		0.3	m	doit être une consigne de pose: correspond ici à 5% de la portée	
angle câble rive sup/horizontale au niveau du poteau		11	°		
angle entre deux haubans amonts		62	°		
angle entre haubans amonts / poteau dans plan de coupe		53	°	issu du modèle géométrique simplifié (voir schéma page précédente)	
angle entre haubans latéral / poteau		59	°		
angle entre poteau/nappe de grillage		40	°		
Caractérisation des sollicitations					
Dénomination	Symbole	Valeur	Unité	Commentaire	
Poids propre					
Masse surfacique du grillage		1.75	kg/m ²		
<i>Pondération sur charge constante</i>		1.35			
Poids propre linéique pondéré		0.52	kN/m		
Eboulement nominal au sein du déflecteur					
Volume du bloc nominal		30	litres	issue des observations du terrain et des objectifs du MOA	
Largeur de contact correspondante (hypothèse de forme: cube)	Le	0.31	m		
Densité		2.5	T/m ³		
Masse de l'éboulement nominale	Me	75	kg		
Décélération maximale de l'ouvrage sur le bloc (entre 1g et 20g)	Déc	10	g (9.81m/s ²)	Valeur à choisir entre 1g et 20g suivant la configuration	
<i>Pondération sur charge variable</i>		1.5			
Eboulement nominal linéique pondéré	Fdéc x □	36	kN/m		
Accumulation de matériaux dans le déflecteur					
Accumulation		100	litre/m	fonction du programme de maintenance du MOA	
Densité apparente		18	kN/m ³		
<i>Pondération sur charge variable</i>		1.5			
Accumulation pondérée	Accu x □	2.7	kN/m		
Impact au niveau de l'avaloir					
Hauteur d'impact nominale	Hi	2	m	considéré non concomitant aux autres sollicitations	
Volume du bloc nominal		30	litres		
Densité		2.5	T/m ³		
Masse		75	kg		
vitesse		20	m/s		
Energie d'impact nominale	Ei	15	kl		
<i>Pondération sur charge accidentelle</i>		1.0			
Energie d'impact nominale pondérée		15	kl		
Estimation de la sollicitation de la nappe correspondante		23	kN	estimé à partir d'essai	

Descente de charge et résistance des principaux composants					
Dénomination	Symbole	Valeur	Unité	Commentaire	
Grillage (hors avaloir)					
Descente de charge sur la nappe de grillage		39	kN/m	Effort de traction dans le plan	
Type		60x80 double torsion			
Résistance de la nappe de grillage	Rnu	60	kN/m		
<i>coefficient de sécurité</i>		1.5			
valeur de calcul		40	kN/m	Résistance/Sollicitation=1.03	
Câble de rive supérieur et hauban latéral					
Descente de charge sur la structure de liaison d'un module		42	kN	Effort orthogonal à la rive supérieure	
Descente de charge sur le câble de rive supérieur		107	kN	Effort de traction	
Diamètre câble de rive supérieure		20	mm		
Charge de rupture minimale	Fmin	234	kN		
<i>coefficient de sécurité</i>		1.75			
valeur de calcul		134	kN	Résistance/Sollicitation=1.26	
Hauban amont					
Descente de charge sur les haubans amonts		20	kN	Effort de traction	
Diamètre câble de hauban amont		12	mm		
Charge de rupture minimale	Fmin	84	kN		
<i>coefficient de sécurité</i>		1.35			
valeur de calcul		63	kN	Résistance/Sollicitation=3.19	
Poteau					
Descente de charge sur les poteaux		52	kN	Effort de Compression	
Type		HEA100			
Longueur		3	m		
Résistance poteau en compression/flambement		190	kN	calcul suivant l'eurocode 3 coeff inclus	
valeur de calcul		190	kN	Résistance/Sollicitation=3.64	
Avaloir					
Hauteur minimale sous rive supérieure	H _{MEL}	2.7	m	H _{MEL} /H _I =1.35	
Type		double nappe 60x80			
Capacité d'absorption énergétique ultime	E _{MEL}	50	kl		
<i>coefficient de sécurité</i>		1.5			
valeur de calcul		33	kl	Résistance/Sollicitation=2.22	
Ancrage amont					
Descente de charge sur les fondations amont		34	kN	=>dimensionnement à réaliser	
Ancrage latéral					
Descente de charge sur les fondations latérales		107	kN	=>dimensionnement à réaliser	

© 2020 - Cerema

Le Cerema, l'expertise publique pour le développement et la cohésion des territoires.

Le Cerema est un établissement public qui apporte un appui scientifique et technique renforcé dans l'élaboration, la mise en oeuvre et l'évaluation des politiques publiques de l'aménagement et du développement durables. Centre de ressources et d'expertise, il a pour vocation de produire et de diffuser des connaissances et savoirs scientifiques et techniques ainsi que des solutions innovantes au coeur des projets territoriaux pour améliorer le cadre de vie des citoyens. Alliant à la fois expertise et transversalité, il met à disposition des méthodologies, outils et retours d'expérience auprès de tous les acteurs des territoires : collectivités territoriales, services de l'État et partenaires scientifiques, associations et particuliers, bureaux d'études et entreprises.

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Cerema est illicite (loi du 11 mars 1957). Cette reproduction par quelque procédé que se soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

Coordination et suivi d'édition › Cerema Infrastructures de transport et matériaux, Département de la valorisation technique, Pôle édition multimédia.

Mise en page › Cerema

Illustration couverture › © NGE fondation

Août 2020

ISBN : 978-2-37180-469-2

ISSN : 2417-9701

Gratuit

Éditions du Cerema

Cité des mobilités

25 avenue François Mitterrand

CS 92803

69674 Bron Cedex

Pour commander nos ouvrages › www.cerema.fr

Pour toute correspondance › Cerema - Bureau de vente - 2 rue Antoine Charial - CS 33927 - 69426 Lyon Cedex 03

ou par mail › bventes@cerema.fr

www.cerema.fr › Nos publications

La collection « Connaissances » du Cerema

Cette collection présente l'état des connaissances à un moment donné et délivre de l'information sur un sujet, sans pour autant prétendre à l'exhaustivité. Elle offre une mise à jour des savoirs et pratiques professionnelles incluant de nouvelles approches techniques ou méthodologiques. Elle s'adresse à des professionnels souhaitant maintenir et approfondir leurs connaissances sur des domaines techniques en évolution constante. Les éléments présentés peuvent être considérés comme des préconisations, sans avoir le statut de références validées.

Les ouvrages défecteurs

Les défecteurs sont des équipements souples permettant de canaliser des éléments rocheux entre le terrain et l'ouvrage, sur tout ou partie de leur propagation. L'objectif principal est de maîtriser la trajectoire des blocs lors de leur passage au sein de l'ouvrage sans nécessairement les arrêter. Composés principalement de nappes de grillage ou de filet dont les rives sont amarrées au terrain par diverses structures de liaison, ils peuvent être équipés d'un système avaloir en tête afin de capter les trajectoires des blocs arrivant de l'amont.

Après avoir donné les définitions des types d'ouvrages, des sous-ensembles et des principaux composants, ce guide établit les principes généraux pour la conception, le dimensionnement, la mise en œuvre, le suivi et les contrôles d'exécution de ces ouvrages ainsi que pour leur maintenance.

Sur le même thème, les autres publications du projet C2ROP

Axe Aléas

Glossaire du risque rocheux

Caractérisation de l'aléa éboulement rocheux : Etat de l'art

Axe Parades

Merlons pare-blocs : Recommandations pour la conception, le suivi de réalisation et la maintenance

Les Ouvrages Défecteurs : Guide technique

Surveillance instrumentale pour la gestion du risque rocheux : Recommandations

Axe Risque

Prise en compte des risques rocheux par les Maîtres d'Ouvrage gestionnaires d'infrastructures : Recommandations

Cahier des charges type pour l'étude de l'aléa éboulement rocheux et la définition des travaux

Cahier des charges type pour les travaux de protection contre les éboulements rocheux

Mémento des ouvrages de protection contre les éboulements rocheux : Maintenance et Coûts

Aide à la formalisation de retours d'expérience à la suite d'un événement rocheux sur infrastructures de transport : Note méthodologique

Aménagement et cohésion des territoires - Ville et stratégies urbaines - Transition énergétique et climat - Environnement et ressources naturelles - Prévention des risques - Bien-être et réduction des nuisances - Mobilité et transport - Infrastructures de transport - Habitat et bâtiment

Gratuit

ISSN : 2417-9701

ISBN : 978-2-37180-469-2



9 782371 804692

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement - www.cerema.fr

Infrastructures de transport et matériaux - 110 rue de Paris - 77171 Sourdun - Tél. +33 (0)1 60 52 31 31

Siège social : Cité des mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél. +33 (0)4 72 14 30 30