INTERREG III A Projet n° 179 (ex n° 046)

RiskYdrogéo

"Risques hydro-géologiques en montagne : parades et surveillance »

Guide pratique

Investigations, Instrumentation et parades en matière de risques hydro-géologiques : état des connaissances dans l'Arc alpin

Partenaires et financeurs :

Région autonome Vallée d'Aoste
Assessorat du territoire,
de l'environnement et des ouvrages publics
Regione autonoma Valle d'Aosta
Assessorato del territorio,
ambiente e opere pubbliche

CANTON DU VALAIS
KANTON WALLIS

SAVOIE & HAUTE SAVOIE
L'ASSEMBLEE des PAYS DE SAVOIE

CETE de Lyon
laboratoire régional des ponts et chaussées de Lyon

Office National des Forêts
rtm
restauration des terrains en montagne

Bundesamt für Wasser und Geologie BWG
Office fédéral des eaux et de la géologie OFEG
Ufficio federale delle acque e della geologia UFAEG
Uffizi federal per aua e geologia UFAEG
Federal Office for Water and Geology FOWG

En collaboration avec :

FONDAZIONE MONTAGNA SICURA
MONTAGNE SÛRE

Pôle Grenoblois
Risques Naturels

realp
Centre de recherche sur l'environnement alpin
Zentrum für alpine Umweltforschung
Centre of research on the alpine environment

Activité 5 - Systèmes de parades

Introduction

Ce chapitre présente les parades utilisées contre les mouvements de terrain, essentiellement les instabilités rocheuses. Certaines parades peuvent parfois s'appliquer à des mouvements de sol meuble / mouvements de versant, en particulier les deux fiches sur le drainage, superficiel et profond. Le traitement des laves torrentielles n'est pas spécifiquement abordé (même si certains filets utilisés contre les chutes de blocs peuvent également servir à retenir des laves).
Les fiches proposées sont en partie issues du guide technique du L.C.P.C. « Parades contre les instabilités rocheuses » (voir bibliographie), mais elles comprennent de nombreux apports, compléments et mises à jour, et certaines ont été entièrement refondues. L'expérience des partenaires valaisans et valdôtains est en particulier intégrée, les spécificités techniques utilisées dans chaque régions étant détaillées notamment à travers des exemples locaux. S'ils ont évolué depuis l'édition de 2001 du L.C.P.C., les éléments normatifs et les coûts sont également mis à jour.
Il ne s'agit pas d'une étude bibliographique exhaustive, mais plutôt de la formulation et de la **mise en commun des pratiques des différents partenaires du projet**.

Les fiches-Parade

Parade 1 – Merlons et digues
Parade 2a – Ecrans rigides
Parade 2b – Barrières fixes
Parade 3 – Ecrans de filets déformables
Parade 4 – Grillages et filets pendus
Parade 5 – Galeries de protection
Parade 6 – Boisement
Parade 7 – Suppression de l'aléa
Parade 8 – Soutènement
Parade 9 – Ancrages
Parade 10 – Béton projeté
Parade 11 – Grillages et filets plaqués
Parade 12 – Végétalisation
Parade 13 – Drainage de surface
Parade 14 – Drainage profond

Bibliographie (spécifique aux parades)

Parade 1
Merlons et digues

Le texte de cette fiche est très largement inspiré de la version originale, publiée dans l'ouvrage: " Parades contre les instabilités rocheuses. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2001."

1. DESCRIPTION

Le terme "merlons" désigne en France les ouvrages massifs en surélévation, situé à l'amont de la structure à protéger et ceci quelle que soit l'importance de l'ouvrage. En Suisse, le terme merlon désigne les petits ouvrages en remblai ; les ouvrages plus importants, le plus souvent renforcés, sont appelés "digues" (positive).
Les ouvrages en déblais, appelés en France fosse de réception, sont considérés en Valais et Vallée d'Aoste comme des digues négatives.
Le déviateur latéral est un obstacle biais destiné à infléchir la trajectoire en plan d'un éboulement. Il s'agit souvent d'une levée de terre, donc une digue positive au sens valaisan et valdotain.

1.1. Objectif

Merlon : parade passive ayant pour but de stopper les blocs ou les masses de grande dimension se propageant le long d'un versant avec des énergies élevées, voire très élevées (couramment 30000 kJ jusqu'à environ 150000kJ).
Fosse : cette parade passive a pour objectif de capter et de stocker des pierres, des blocs isolés ou des éboulements importants. Il s'agit d'une excavation qui est réalisée immédiatement à l'amont de l'enjeu à protéger (très souvent associée aux digues positives).

Déviateur : Parade passive ayant pour but de dévier latéralement, vers une zone à moindre risque ou vers des ouvrages de réception, la trajectoire de blocs ou masse rocheuses dévalant une pente ; le but n'est donc pas de stopper les blocs, mais de modifier leur trajectoire (le déviateur peut aussi avoir une action de freinage).
Un déviateur latéral est utilisé pour :

- dévier en direction des zones où il n'y a pas de risques ;
- dévier quand il existe une lacune entre deux ouvrages de protection ne pouvant pas être traitée par un écran classique ;
- modifier les trajectoires dans les zones où les ouvrages de protection n'ont pas toute leur efficacité.

1.2. Principe

Merlon : Elever dans le versant ou en pied de versant un obstacle massif, mais suffisamment déformable pour absorber l'énergie des masses en mouvement, et donc les arrêter. On entend par obstacle une levée ayant un parement amont à forte pente, pour éviter que les masses rocheuses ne remontent le talus en rotation, et possédant une masse propre suffisante pour résister aux impacts.

Fosse : Aménagement par terrassement d'un volume de réception. La géométrie de la fosse doit être telle que les masses éboulées y soient piégées et stockées. Les caractéristiques géométriques et fonctionnelles peuvent varier dans un large domaine, en fonction de l'importance des éboulements considérés.

Déviateur : Il s'agit de placer en amont de la zone à protéger, une structure généralement en remblai, dont le parement amont est oblique par rapport à la trajectoire incidente. La direction du déviateur réoriente la trajectoire des masses interceptées dans une direction plus favorable.

1.3. Description technique

Les caractéristiques géométriques et fonctionnelles du **merlon** peuvent varier dans un domaine large en fonction des éboulements considérés:

- Le parement amont est en général très raide. Il peut être réalisé en enrochement ou en sol renforcé (bois, pneusol, pneutex, etc…) (Figure 5.1. 1). Pour résoudre des problèmes de stabilité interne, le remblai peut être lui-même renforcé, soit par des nappes de géotextiles, soit par des nappes de pneus (pneusol).
- En général, le parement aval est moins incliné. Même si en cas d'emprise limitée, il peut également être plus raide. Le parement aval est souvent végétalisé.

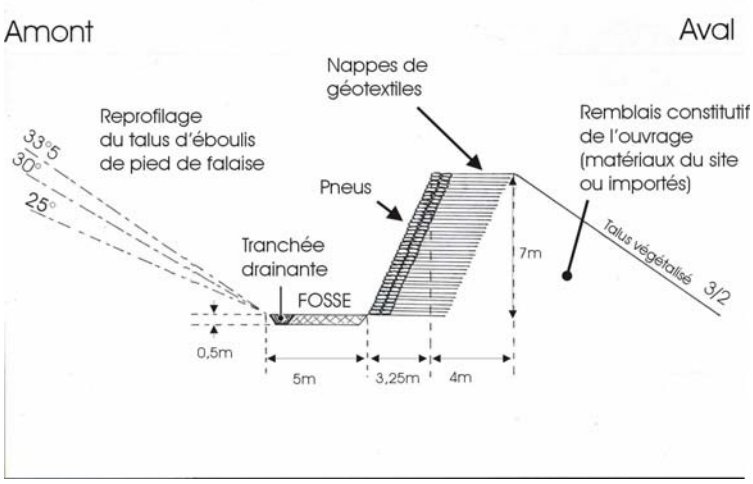


Figure 5.1. 1: Exemple de profil en travers d'un merlon avec parement en Pneutex (Guide LCPC, 2001).

Cliquer pour agrandir

Il existe de nombreux types de merlons, dont les plus courants sont présentés ci-dessous:

- Une levée de terre compactée de forme trapézoïdale, plutôt aplatie, présentant un parement amont peu raide (35° au maximum, soit inférieur à 2H/3V) et ayant une hauteur maximale de 5 à 6 m. Ce type de merlon est utilisé sur des versants peu raides et pour retenir des énergies peu élevées.
- Une levée de terre, renforcée par un géotextile, une géogrille ou un grillage métallique. De forme trapézoïdale, elle peut atteindre une hauteur de 7 à 8 m. Son parement amont est raide (de l'ordre de 60 à 70°, soit environ 2H/1V).
- Une levée constituée d'un parement amont en gabions, qui est presque vertical et qui peut atteindre une hauteur de 5 à 6 m. Elle est caractérisée par une faible emprise.
- Un enrochement à gros blocs avec un parement amont raide (au minimum 65 à 70°, soit supérieur à 5H/2V), dont la hauteur peut atteindre une dizaine de mètres voire plus . L'enrochement peut être monté à sec ou maçonné avec du béton.

La **fosse** correspond à un déblai. Plusieurs variantes sont possibles, du fossé élargi (destiné à piéger les blocs se détachant des petits talus situés en bordure de route) à l'ouvrage large et profond, creusé dans le terrain. Une fosse est caractérisée par trois dimensions principales:

- La pente du talus aval (i.e. situé du côté structure à protéger) doit être le plus raide possible, pour éviter la remontée des blocs en rotation ; elle peut être prolongée directement par le parement amont d'un merlon.

- La largeur du fond de la fosse est variable. Elle dépend de la morphologie du versant et du volume des chutes attendues. Le fond est en principe recouvert d'une couche de matériau meuble, afin d'amortir davantage l'énergie des blocs. Elle varie généralement entre 2 et 8 mètres.
- La profondeur de la fosse.

Les deux principaux types de **déviateurs** utilisés sont les tournes et les étraves (Figure 5.1. 2).
Déviateur simple ou tourne **:** obstacle allongé, rectiligne ou courbe, dressé sur un versant dans la zone de propagation (utilisé couramment en protection contre les avalanches). Son orientation est fonction à la fois de la zone de départ des masses instables (nécessité d'intercepter un maximum de masses) et de la zone de réception vers laquelle on souhaite les diriger.
Déviateur double en étrave : obstacle en forme de chevron pointé vers l'amont et placé immédiatement au dessus de l'ouvrage ponctuel à protéger.

Les déviateurs sont des ouvrages dont la forme et le dimensionnement doivent être adaptés aux objectifs de déviation recherchés. L'utilisation d'un sol renforcé pour raidir le parement amont présente plusieurs avantages :
- amortissement augmenté de l'énergie des masses en mouvement ;
- diminution de l'emprise au sol ;
- arrêt des masses qui se propagent en rotation.

Les matériaux utilisés sont variés :
- levée de terre ;
- gabions de pierre ;
- sol renforcé ;
- éperon en béton pour les petites étraves ponctuelles.

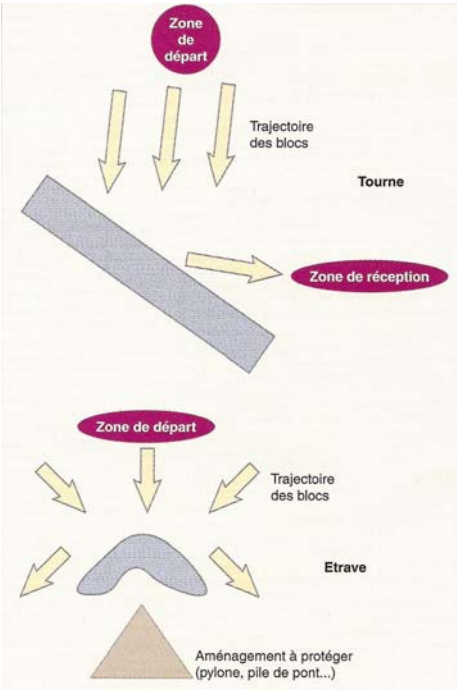


Figure 5.1. 2 Schémas en plan d'une tourne et d'une étrave (Guide LCPC, 2001). **Cliquer pour agrandir**

2. DOMAINE D'UTILISATION

2.1. Performances

Les **merlons** sont érigés lorsque l'on souhaite protéger un secteur menacé par des instabilités présentant des volumes élevés. Ce sont des protections collectives, qui peuvent également être mises en œuvre contre les avalanches de neige.

Les énergies maximales que peuvent reprendre les merlons atteignent 100'000 kJ. Certains ouvrages dépassent même les 150 000 kJ (cf. exemples de Barjac et d'Aigueblanche). Quoi qu'il en soit, l'efficacité de ces ouvrages dépend:
- De leur maintenance (curage régulier de la fosse de réception située à l'amont).
- De la résistance aux chocs du parement amont (ce qui exige la mise en place au moins de deux pneus côte à côte, dans le cas du pneusol).
- De l'existence d'une marge de sécurité sur la hauteur (surélévation d'un rayon du plus gros bloc attendu, par rapport à la hauteur calculée par trajectographie).

En outre, il faut étudier attentivement le site sur lequel le merlon doit être implanté. Un merlon ne peut par exemple pas être implanté dans une pente trop raide. D'autre part, il est souvent indispensable de reprofiler le terrain à l'amont de l'ouvrage, pour éviter que des replats puissent jouer le rôle de tremplin (**Annexe 5.1.1**). Dans ces cas il faut vérifier que les matériaux soient réutilisables pour la construction du remblai lui-même. Il faut également s'assurer que des affleurements rocheux ne vont pas apparaître en surface, ce qui modifierait les données trajectographiques.

L'impact visuel d'un merlon est diminué si le parement aval est recouvert de végétation. A l'amont, l'aspect dépend de la nature du parement: un parement amont constitué par des pneus est par exemple très visible dans un premier temps, mais l'impact visuel diminue ensuite avec la végétalisation.

Une **fosse de réception** peut arrêter, selon son dimensionnement, des éléments allant des chutes de pierres aux éboulements importants. Le dimensionnement dépend principalement de l'espace disponible en pied de versant.

Correctement dimensionnés et positionnés sur le terrain, les **déviateurs latéraux** peuvent dévier des énergies très élevées du même ordre de grandeur que celles reprise par les merlons(100 000kJ, voir plus, blocs de plusieurs m3).

2.2. Techniques associées

La fosse est souvent couplée avec un écran ou un merlon situé immédiatement à l'aval et créant une surprofondeur de la fosse. Des déviateurs peuvent être placés en amont pour guider les masses vers la fosse et/ou le merlon ou vers un écran rigide ou souple.
Ecran statique en sommet de merlon

3. REALISATION

3.1. Conception

L'implantation d'une digue au sens large suppose que l'on dispose physiquement d'une emprise suffisante entre l'objet à protéger et le pied du versant.

L'implantation, la géométrie et le dimensionnement d'un merlon, d'une fosse et/ou d'un déviateur sont dictés par une étude trajectographique détaillée. A partir des données fournies par un géologue sur le volume potentiel généré par chaque éboulement ainsi que les volumes des blocs de référence, cette étude doit fournir au minimum les paramètres suivants:

- La localisation des points de rebonds à l'amont de l'ouvrage proposé ;
- Les énergies et les hauteurs de vol des blocs à la hauteur de l'ouvrage proposé.

Il faut prêter un attention particulière aux pentes irrégulières et à la présence d'affleurements rocheux, qui peuvent donner lieu à des trajectoires difficilement prévisibles.
Ces données permettent d'implanter et de dimensionner précisément l'ouvrage en portant une attention particulière aux caractéristiques suivantes :

- La géométrie du merlon (sa position, son extension et sa hauteur). Il est préférable de prévoir des merlons disposés en tuiles plutôt qu'un merlon unique de grande longueur pour faciliter l'accès au parement amont, et donc l'entretien des ouvrages.
- Le type même de merlon / fosse / déviateur et sa conception.
- L'effet sur les trajectoires des blocs (en particulier le pourcentage des blocs arrêtés).

- Le couple "largeur de la fosse-pente du talus amont", compte tenu des phénomènes de rebond susceptibles de se produire sur ce dernier.

L'efficacité de chaque option retenue doit être vérifiée à l'aide d'une nouvelle simulation trajectographique.

Si nécessaire, des modifications pourront être apportées au projet initial, principalement en fonction des contingences topographiques:

- Combinaison du merlon avec d'autres techniques (déviateurs latéraux, …).
- Guidage des blocs au niveau de la zone de départ.
- Déplacement du merlon, avec modification des hauteurs et des pentes des parements.
- Abandon pur et simple de l'option merlon.

Les études au niveau de l'ouvrage lui-même doivent porter sur:

- La stabilité d'ensemble du versant (y compris réactivation de glissements anciens).
- La stabilité interne de l'ouvrage dans des conditions statiques et dynamiques. Les essais statiques doivent tenir compte de la sismicité de la zone (spécialement pour les merlons). Les essais dynamiques doivent vérifier:
  - Que les blocs ne puissent pas franchir le merlon par roulement le long du parement amont.
  - Que de fragments de blocs résultant de l'impact ne puissent pas franchir le merlon.
  - Que le merlon ne puisse pas être poinçonné.
  - Que l'ouvrage reste stable lors de l'impact des blocs (choc en général oblique sur les déviateurs).
- Les emprunts de matériaux (possibilités d'utiliser le terrain en place en tant que matériau de construction du merlon) et l'accessibilité à la zone lors de la construction.
- La prise en compte des eaux de ruissellement en pied de versant : mise au point des systèmes de drainage et de collecte des eaux en amont de l'ouvrage et étude du drainage de l'ouvrage lui-même.
- L'évaluation de l'influence des phénomènes comme les avalanches ou les laves torrentielles sur l'efficacité du merlon (l'ouvrage peut-il être rempli par une avalanche, puis jouer le rôle de tremplin pour les blocs?).
- La planification des travaux et l'évaluation de la faisabilité d'ouvrages de protection provisoires nécessaires à la sécurité du chantier.
- Les conditions de durabilité de l'ouvrage, les coûts d'entretien et de maintenance (accessibilité aux engins de curage de la fosse).

Le dimensionnement d'une fosse utilisée seule s'effectue à l'aide d'abaques. Les plus fréquents fournissent la largeur et la profondeur de la fosse en fonction de la hauteur et de l'inclinaison du talus (**Annexe 5.1.2**). En outre, une fosse doit toujours être assez large pour permettre son entretien (opération de curage).

3.2. Mise en œuvre

Les contraintes techniques sont du ressort d'une entreprise de terrassement ou de Génie Civil Pour une digue positive, elles varient suivant le procédé employé (remblai simple ou sol renforcé).

Pour les fosses, la réalisation se fait sans difficulté particulière en terrain meuble. En terrain rocheux, le brise-roche ou l'explosif peuvent s'avérer nécessaires ponctuellement. Dans les deux cas, des précautions seront à prendre pour ne pas mettre en danger la stabilité du versant. Lorsque la

fosse est associée à un merlon, on analysera les matériaux excavés pour déterminer s'ils peuvent être réutilisés pour la levée de terre.
On veillera à ce que les terrassements au niveau de la fosse respectent bien le dimensionnement prévu (largeur de la fosse et de son talus amont).

Pour les digues positives, la réalisation d'un remblai simple ne pose pas de problème particulier : une entreprise de terrassement peut l'exécuter avec une pelle mécanique ou un bouteur léger.
Quelques spécificités :

- Parement amont suffisamment raide pour éviter l'effet de tremplin ;
- Prévoir un système de collecte des eaux recueillies par l'ouvrage, ainsi qu'une protection du pied du parement amont contre l'érosion (système anti-ravinement, fascines par exemple) ;
- Si la zone d'emprunt comporte une couche de terre végétale, la stocker et la réutiliser pour la végétalisation des parements.

Pour les merlons, afin de répondre aux exigences de résistance et de durabilité dans un environnement géotechnique souvent difficile, l'ouvrage doit faire l'objet d'une étude géotechnique détaillée assortie d'un contrôle des travaux de terrassement.

En ce qui concerne les déblais, les points suivants doivent être pris en compte:

- Caractérisation de la sensibilité à l'excès d'eau (à l'aide de sondages, de coupes, de prélèvement d'échantillons, d'essais de laboratoire avec analyse de la teneur en eau naturelle et de la granulométrie, …).
- Portance du sol support du merlon.
- Diminution de la traficabilité du chantier.

L'utilisation des déblais requiert quelques précautions:

- Elle suppose que la teneur en eau naturelle du matériau au moment de la mise en œuvre soit compatible avec un compactage minimal à définir par rapport à la densité sèche de référence (PROCTOR normal).
- La mise en œuvre doit être adaptée à l'état hydrique des matériaux (mise en dépôt provisoire, mise en œuvre en couches minces associées à un compactage moyen…).
- Si l'équilibre du mouvement des terres n'est pas assuré, des matériaux d'emprunt sont à rechercher.

3.3. Éléments de coût

Les coûts d'un merlon (associé ou non à une fosse, un déviateur) dépendent de plusieurs paramètres:

- La préparation du chantier (déboisement, mesures de sécurité du chantier, …).
- La réutilisation possible des matériaux en place.
- La taille de l'ouvrage, essentiellement la largeur en crête (2 m au minimum).
- La morphologie du terrain, qui conduit à des reprofilages plus ou moins importants.
- Le drainage.

Terrassement seul : environ 8 € par mètre cube en terrain meuble, 15 à 37 €/m^3 en rocher

En France, la part principale du coût d'un merlon ou d'un déviateur tient au parement, réalisé par exemple avec des pneus usagés de poids lourds. La fourchette de prix est de l'ordre de 100 à 150 €/m^2 en schématisant l'ouvrage à son parement projeté sur un plan vertical.

En Italie, à titre de comparaison, le coût d'un merlon constitué d'un enrochement comprenant des blocs > 1 m³ et d'un remblai comprenant de blocs de 0,5 m³, tous frais compris (préparation du sol de fondation, drainage, construction du merlon) est de:

- 37,01 €/m³ si les blocs sont posés à sec.
- 56,64 €/m³ si les blocs sont maçonnés avec du béton.

4. ENTRETIEN

La pérennité des ouvrages en terre est surtout liée à leur résistance contre l'érosion, d'où la nécessité d'un contrôle :

- Sur la levée elle-même : entretien des fascines, végétalisation des parements ;
- Au pied de la levée entretien du système de collecte des eaux de ruissellement, végétalisation du versant.

Vérifier la stabilité de la levée de terre elle-même et de l'ensemble du versant.*Dégager le parement amont des blocs accumulés, particulièrement si la levée est associée à une fosse.

L'entretien est un aspect essentiel de l'efficacité d'une fosse. Le curage régulier des matériaux accumulés pour éviter l'effet de tremplin engendré par une fosse comblée est indispensable. Il convient donc de prévoir des accès à la fosse. Au même titre, on s'assurera que la pente du talus aval de la fosse est toujours assez raide.
Un contrôle annuel est indispensable; il portera sur la nécessité d'enlever des matériaux ou d'améliorer le système d'évacuation des eaux pour éviter la stagnation des eaux de ruissellement dans le fond de la fosse (agent de dégradation important).

Les merlons eux-mêmes ne présentent pas de sensibilité particulière au vieillissement (sauf ceux qui ont un parement en géotextile). Il peuvent néanmoins être endommagés par des impacts de blocs. Une visite annuelle est recommandée pour vérifier le bon fonctionnement du système de drainage et pour s'assurer qu'il n'existe pas de déformations de l'ouvrage (ces déformations peuvent être liées à des impacts ou à une instabilité du sol support).

5. EXEMPLES

5.1. BARJAC (Lozère)

Protection d'un lotissement par une merlon avec parement en pneutex, associé à un piège à cailloux obtenu par reprofilage du talus naturel. Pente du talus amont du merlon: 65°. Pente du talus aval: 33°. Largeur en tête: 5m. Dimensionnement 170 000 kJ.

Photo 5.1.1 Merlon de Barjac **Cliquer pour agrandir**

5.2. SECTEUR SAINTE MARIE DE CUINES (Savoie, autoroute A43):

Une série de merlons en Pneusol sont disposés "en tuiles" sur près de 3 km. Directement à l'amont de l'autoroute, ils interceptent les éléments provenant d'une falaise d'une centaine de mètres de haut prolongée par un versant d'éboulis.
La fosse à l'arrière formant un piège (2 à 3m de large) est maçonnée pour faciliter les écoulements d'eau et l'entretien.

Cet ouvrage à été réalisé en 6 mois (cadence moyenne 250 pneus/jour pour 4 hommes et une pelle) pour un coût de 42 €/m^2 de parement + 6 €/pneu amené sur site, soit au total près de 75 €/m^2.

5.3. DEVIATION d'AIGUEBLANCHE (Savoie):

Merlon de 7,2m de haut, 800m de long, avec parement amont en Pneutex. Dimensionnement 160000kJ.(150 000 pneus poids lourds.)

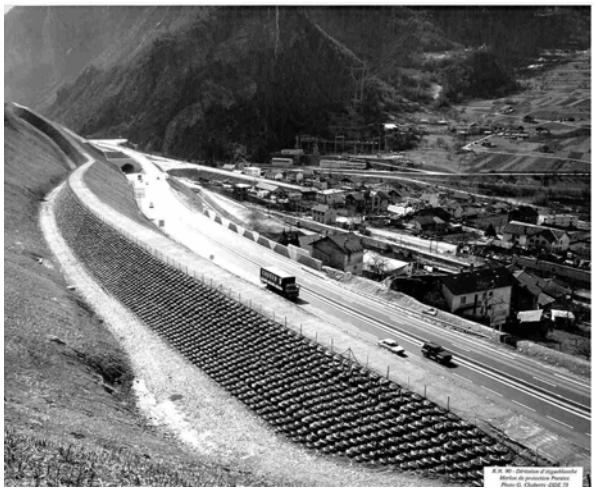
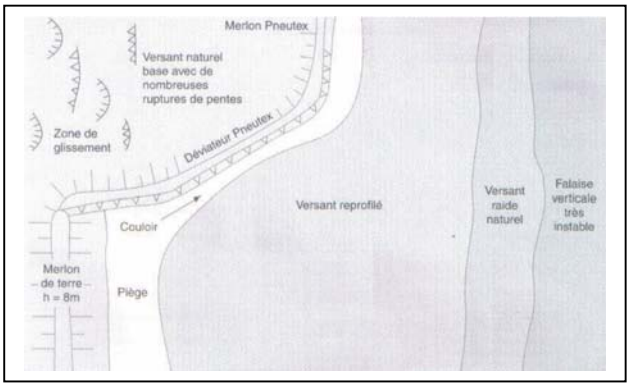


Photo 5.2.2. Construction d'un merlon avec un parement en Pneutex: protection de la RN 90 à Aigueblanche, Savoie (photo Cete Lyon). **Cliquer pour agrandir**

5.4. NANTUA (Ain):

Pour protéger la ville contre les chutes de blocs et éboulements provenant d'une falaise calcaire de 150 m de haut, un immense piège a été installé au pied de la pente d'éboulis qui prolonge cette falaise. Il s'agit d'un ensemble de merlons continus sur près de 500 m, réalisés en 1996, implantés à deux niveaux différents dans le versant : l'un presque au pied de la falaise génératrice de blocs, l'autre à proximité des habitations à protéger.
Chaque ouvrage comporte à la fois une partie en Pneutex et une partie en remblai classique.
Fosse amont très large (une dizaine de mètres), et retalutage du terrain amont important.
Intégration dans le paysage excellente, puisque les ouvrages ne se voient pas de la ville, excepté une faible portion de terrain retaluté.

Pour des raisons liées à la topographie, le merlon et la fosse n'ont pu être prolongés sur toute l'étendue de la zone, aussi pour assurer la continuité de la protection entre les parties inférieures et supérieures du piège, toutes deux perpendiculaires à la pente, une tourne a été levée (fig. 2). Cette tourne est réalisée en Pneutex), pente du parement amont 60°. Le grand axe de l'ouvrage est incliné sur la pente de façon à diriger les produits d'éboulement vers le piège à blocs.



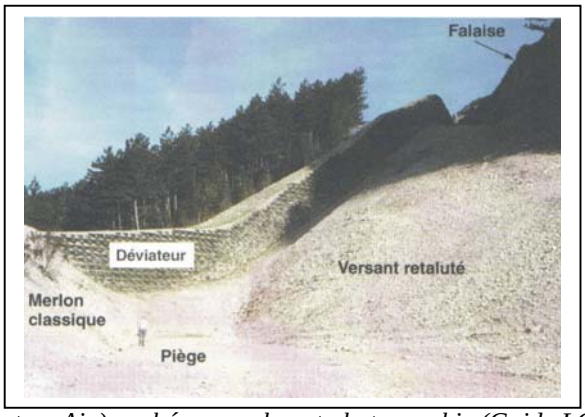


Figure 5.1. 3. Tourne en Pneutex reliant deux merlons (Nantua, Ain) : schéma en plan et photographie (Guide LCPC, 2001). **Cliquer pour agrandir**

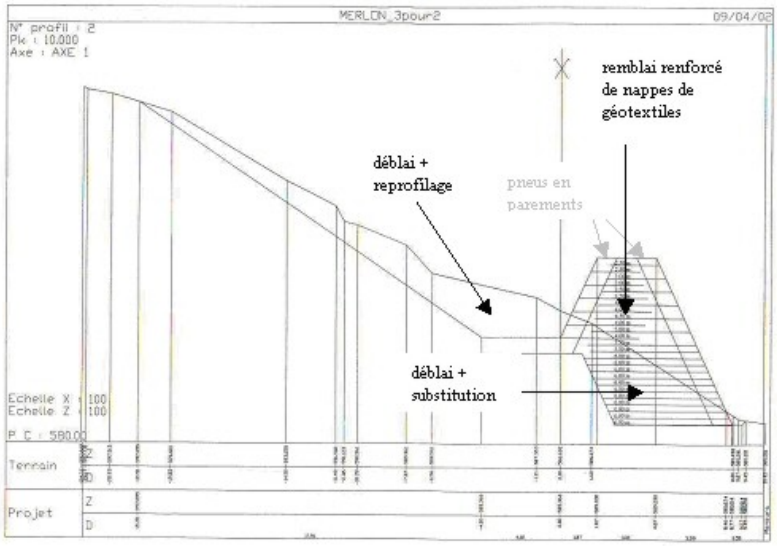
5.5. POMBLIERES (Savoie, RN 90)

La pente très raide a imposé des contraintes fortes pour la réalisation des pistes d'accès au chantier et pour la protection de la voie ferrée située en contrebas pendant les travaux.

Laboratoire Régional de Lyon Géotechnique

Photos 5.1.3 et 5.1.4 : Pomblières - présence de gros blocs incompatibles avec la technique de renforcement du merlon en couches géotextiles. Le problème a été résolu par le concassage des blocs sur place.

Cliquer pour agrandir

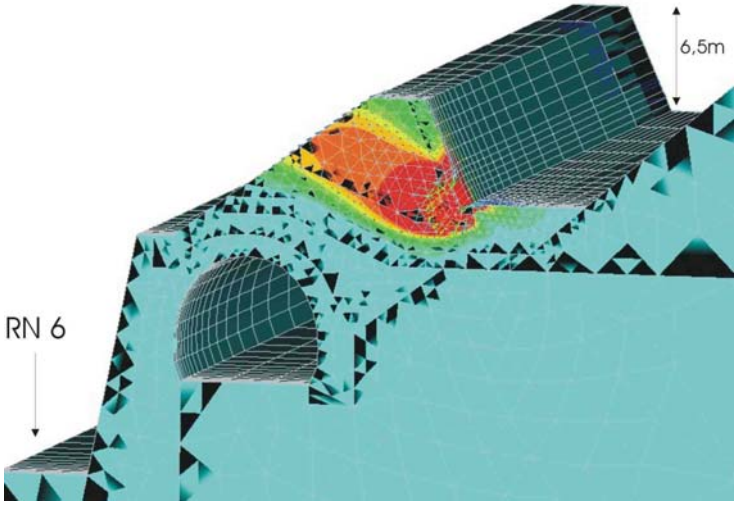


LRL Géotechnique

Figure 5.1. 4. Pomblières - Gestion déblais/remblais (un profil tous les 10m)

5.6. LA PRAZ (Savoie):

Projet de merlon de protection de la RN 6
L'ouvrage planifié se situe à l'aplomb d'une voûte maçonnée remblayée anciennement exploitée par la SNCF.
Une approche de type pseudo statique a été développée dans le cadre de la théorie du calcul à la rupture afin d'approcher les capacités d'arrêt du merlon de protection. Parallèlement des simulations numériques ont été engagées pour simuler la rupture sous impact.
Les résultats de l'étude ont conduit en première approche à proposer une couche "fusible" intercalée dans la structure du merlon pour plafonner les efforts transmis à la voûte en cas d'impact.



D.SUBRIN LRL Géotechnique (Calcul par éléments finis, logiciel CESAR)

Figure 5.1. 5: La Praz - Isovaleurs de déplacements induits en cas d'impact

5.7. Cas fréquent d'une simple levée de terre avec éventuellement barrière grillagée au sommet.

Photo 5.1.5 : Barrage constitué d'une simple levée de terre entre la route et le pied de talus (Cete Lyon).

Cliquer pour agrandir

5.8. Lieu-dit Grand Frayan, commune de Châtillon, vallée d'Aoste:

Le site de Grand Frayan a été toujours subi de nombreuses chutes de blocs. La protection de la RN 26 et de l'agglomération de Breil, situés en pied de versant, a été faite par l'administration régionale. Trois enrochements à gros blocs ont été disposés à différentes altitudes le long du versant et surmontés chacun par une barrière fixe de grillages.

Une importante chute de blocs en 2002 (volumes maximaux des blocs: 20, 35 et 80 m³, énergie cinétique estimée environ de 10'000 kJ) a sérieusement endommagé ces ouvrages. L'enrochement situé le plus en amont a été percé par deux grands blocs, ce qui a permis le passage des plus petits blocs. L'efficacité de cet ouvrage a été démontrée du fait que tous les blocs qui ont franchi le premier enrochement ont été interceptés et stoppés par les deux merlons situés plus en aval.

5.9. Lieu-dit Créton, commune de Rhêmes Saint-Georges, vallée d'Aoste.

Suite aux intempéries d'octobre 2000, de nouvelles chutes de blocs et des glissements de terrain ont affecté la rive droite de la vallée de Rhêmes à proximité du village de Créton (commune de Rhêmes Saint-Georges). Le versant est caractérisé par une couverture mixte de dépôts glaciaires et d'éboulis à gros blocs sur laquelle coule le torrent Regou.

Les mesures de protection du village et de la RR 24 ont été conçues par des experts mandatés par l'administration régionale. Ces mesures ont débouché sur la mise en œuvre de:

- Quatre levées en terre renforcées par un géotextile, ayant les caractéristiques géométriques suivantes:
  - Une section trapézoïdale asymétrique avec le parement aval plus haut que le parement amont.
  - Une largeur en crête de 2 m.
  - Un parement amont de 6 m de hauteur.
  - Un parement aval de 7.5 à 8 m de hauteur. Les deux parements ont une inclinaison de 63.4°
- Un déviateur de coulée formé par une chaussée à section trapézoïdale asymétrique ayant les caractéristiques géométriques suivantes:
  - Une largeur de 2m en crête et de 5.50 à 6.50 m à la base.
  - Un parement amont de 3 m de hauteur et 63.4° d'inclinaison.
  - Un parement aval en gabions métalliques.
  - Un chenal de récolte et une évacuation des coulées.
- Des pistes d'accès.

Le coût total de l'intervention terminée en octobre 2004 a été supérieur à 1.4 Mio €.

5.10. RR 47 (Km.7+000), lieu-dit Pont d'Ael, commune d'Aymavilles, vallée d'Aoste.

L'étude "Falaises de Pont d'Ael, étude structurale et géomécanique et carte de danger" rédigée par le CREALP en 1998 a mis en évidence les dangers liés aux instabilités rocheuses à proximité du km 7+000 de la route régionale n°47. Sur la base de cette étude, l'administration régionale a mandaté en 2001 des experts pour réaliser une intervention en vue de stabiliser la paroi menaçant directement la circulation routière ainsi que le hameau de Pont d'Ael. Le projet préliminaire a prévu la sécurisation de la paroi rocheuse par le biais des mesures suivantes:

- Construction d'un merlon en béton armé d'une longueur de 72 m.
- Fourniture et pose d'une barrière de grillage fixe de 3 m de hauteur en crête du merlon.
- Fourniture et pose de grillages plaqués de fil d'acier (2.7 mm de diamètre) à double torsion et à maille hexagonale (80x100 mm).
- Fourniture et pose de filets plaqués.

Le coût total de l'intervention est de 1 Mio €.

Photo 5.1.6. Vue d'ensemble du merlon en béton armé. A noter en aval du merlon la présence d'un écran déformable en anneaux pour protéger la RR 47 de Cogne.

Cliquer pour agrandir

5.11. Lieu-dit Buisson, commune d'Antey St-André, vallée d'Aoste.

Suite aux chutes de blocs liées aux intempéries de septembre 1993, quatre levées en terre et des écrans pare-blocs ont étés mis en place par l'administration régionale afin de sécuriser les hameaux de Buisson et Fiernaz, le téléphérique Buisson-Chamois et la route régionale n°46.

L'efficacité de ces ouvrages a été vérifiée lors des intempéries d'octobre 2000, lorsque des laves torrentielles se sont produites dans le couloir de Buisson et du cône de Fiernaz.

Les levées en terre mises en place en 1993 ont les caractéristiques géométriques suivantes:

- Une hauteur de 5 à 6 m.
- Une largeur en crête de 3 m.
- Un parement amont en gros blocs ayant une inclinaison de 35 à 38°.
- Une âme en béton armé de 1 m d'épaisseur au sein du remblai.

Le dimensionnement des ouvrages a été réalisé en considérant exclusivement la chute de blocs, sans prendre en compte d'éventuelles laves torrentielles. Le positionnement des parades a été réalisé à l'aide du software ROTOMAP, en faisant l'hypothèse d'une résistance au poinçonnement de l'ouvrage de 10'000 kJ.

5.12. Talus de craie de Rogerville (Seine Maritime):

Fosse de réception : déblai creusé à la pelle et au bouteur, sur une largeur moyenne de 8 m; le fond de fossé est laissé en craie nue; la fosse est complétée par un muret côté chaussée (fig. 1).

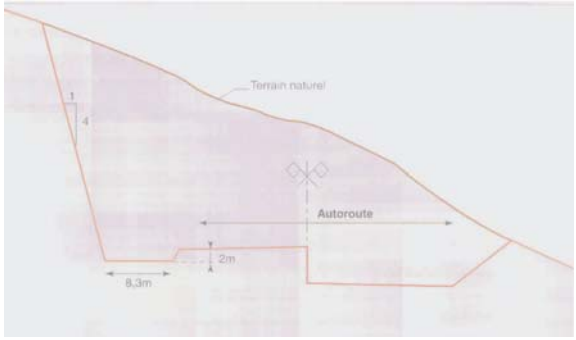


Figure 5.1. 6 - Profil en travers d'un piège à blocs. Talus de l'autoroute A16, à Rogerville (Seine Maritime).

Cliquer pour agrandir

5.13. RN 1 à la Réunion (route du littoral):

Fosse associée à un écran de gabions, au pied d'une falaise de formations volcaniques, elle protège (partiellement, car n'évitant pas certains lobs) contre les chutes de pierres et de petits blocs.

Photo 5.1.7 - Fosse aménagée en pied de falaise sur la RN (Ile de la Réunion).

Cliquer pour agrandir

5.14. RN 26 (Km. 55+500), commune de Bard, vallée d'Aoste.

La chute de blocs du 5 septembre 2000 (volume estimé: 300 m³) a endommagé le mur réalisé aux environs du km 55+500 de la route nationale n°26 dans la commune de Bard. L'ANAS a prévu la mise en sécurité de la route par:

- La construction d'un mur de 5.5 m de hauteur et d'environ 250 m de longueur. Le mur a été réalisé en béton armé et a été doublé de pierres maçonnées au mortier.
- La mise en œuvre d'une barrière fixe de grillage au sommet du mur.
- La réalisation d'une fosse de réception pour piéger et stocker d'éventuelles chutes de blocs.

Photo 5.1.8. Fosse de réception située à l'arrière du mur de protection de la RN 26.

Cliquer pour agrandir

6. BIBLIOGRAPHIE

Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (APAT, 2003): *" Atlante delle opere di sistemazione dei versanti"*. Manuali e linee guida 10/2002, pp 86-89.

BAYER H., GSELL A., SAUERMOSER S., SCHEIBER M. (2000), Planning of mitigation measures regarding the aggravated risk imposed by rockfall, Fellsbau 18, n° 1, pp. 30-35.

Brawner, C.O., 1994. Rockfall hazard mitigation methods, NHI course 13219, Participants workbook.

Ente Nazionale per le Strade - Gruppo Tecnico per la Sicurezza Stradale (2001) – *" La protezione del corpo stradale contro la caduta massi"*. ANAS.

GERBERT S., HESPEL M. (1999), Mur renforcé par géotextile dans les ouvrages de protection des risques naturels, Comptes-rendus des Rencontres géosynthétiques, 4è Colloque francophone (Bordeaux), volume 2, pp. 147-150.

LAPIERRE J.Y., MATHIEU Y., RAFFOUR J.P., CABANIS M. (1990), Déviation d'Aigue Blanche, Revue générale des routes et aérodromes, 671, pp. 20-28.

LEPERT P., J.F. CORTE Etude en centrifugeuse de l'impact de gros blocs rocheux sur un remblai de protection proceeding centrifuge 88 (corté ed.) 1988 Balkema Rotterdam.

Liste des prix de la Région Autonome Vallée d'Aoste, dernière mise à jour janvier 2006

NGUYEN THANH LONG (1985), *Le Pneusol*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, rapport des Laboratoires, série GT7,36 pages.

PELIZZA S., PEILA D., OGGERI C.: *"Tipologie di intervento per la bonifica di versanti rocciosi"*. Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

OGGERI C., PEILA D., RECALCATI P.: *"Rilevati paramassi"*. Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

Willie, D.C. and Norrish, N.I., 1996. Stabilization of rock slopes. In: A.K. Turner and R.L. Schuster (Editors), Landslides, Investigation and Mitigation. National Academy Press, Washington, D.C., pp. 474-504.

Spécifique aux fosses de réception

FOKES P.G., VELTMAN A.J. (1989), *Rock slopes: stabilization and remedial measures against degradation in weathered and fresh rock*. Proceedings Instn Civil Engineers, Part 1, 86, pp. 359-380.

RICHIE A.M. (1963), *Evaluation of rockfall and its control*, Highway Research record, vol. 17, NRC, pp. 13-28.

WHITESIDE P.G.D. (1986): *"Discussion on rockfall protection measures"*. Conference on rock and excavation engineering in an urban environment, Hong Kong, pp 490-492.

Parade 2a

Ecran à structure rigide

1. DESCRIPTION

1.1. Objectif

Cette parade consiste en une structure rigide ou faiblement déformable, qui présente la capacité de s'adapter aux déformations et/ou aux affaissements des terrains ou des massifs rocheux, sans risques de ruptures ou de dégâts importants.

1.2. Principe

Il s'agit de mettre en place une barrière verticale de hauteur variable, en pied de versant ou au-dessus d'un mur de soutènement, destinée à stopper et à recueillir les blocs de taille différente.

1.3. Description technique

Il existe de nombreux types d'écrans à structure rigide, dont les plus courants sont:

- Les écrans constitués par des traverses métalliques, ou plus rarement en bois, disposées horizontalement entre des profilés métalliques fixés sur des fondations en béton ou directement enfoncés dans le terrain.
- Les écrans de gabions (Figure 5.2a 1), qui sont des structures de soutènement modulaires constituées par des éléments parallélépipédiques en grillage à double torsion en acier, remplies de pierres. Le grillage est formé par des fils en acier à galvanisation variable (en Zn ou en alliage Al-Zn), parfois revêtus par une gaine en PVC pour augmenter la résistance à la corrosion. Le remplissage des gabions se fait à l'aide de matériaux (d'éboulis ou alluviaux) ayant une granulométrie et un poids spécifique leur permettant de remplir les exigences du projet et de garantir l'efficacité de l'ouvrage. Souvent, les matériaux utilisés sont trouvés sur place, ce qui permet de réduire les coûts. Les gabions doivent être remplis en utilisant des pierres ayant des diamètres variés, afin de minimiser la présence des vides. Les écrans de gabions sont des structures perméables, résistantes et flexibles en même temps, s'adaptant ainsi aux tassements et/ou aux affaissements du terrain suite à des phénomènes d'érosion ou d'éboulement.
- Dans certains cas, des plots de béton sont utilisés pour remplacer les gabions. Ils présentent l'avantage d'être faciles et rapides à mettre en place. Ils sont néanmoins souvent moins élastiques que des gabions.

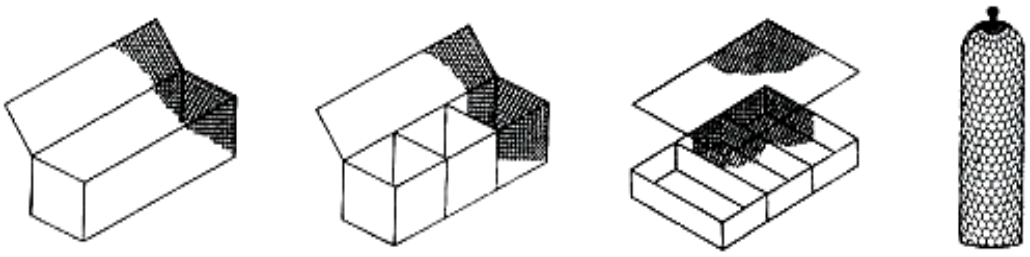


Figure 5.2a 1- Types de gabions

2. DOMAINE D'UTILISATION

Les écrans à structure rigide sont principalement utilisés pour l'aménagement et la consolidation des versants en mouvement. Ils peuvent également servir pour les ouvrages de génie civil, afin de stabiliser et de soutenir des terrains auxquels on ne peut pas donner une pente d'équilibre naturelle. Leur capacité d'absorption énergétique varie en fonction du type d'écran: de 50 à 100 kJ pour les traverses en bois ou métalliques, jusqu'à environ 1'000 kJ pour les écrans de gabions et de béton.

Les écrans de gabions sont utilisés comme ouvrages de soutènement dans les interventions suivantes:

- Une rapide remise en état des infrastructures détruites.
- Un aménagement et une stabilisation des pentes en mouvement (Figure 5.2a 2 A) sans modification de l'écoulement des eaux superficielles, permettant une revégétalisation du terrain.
- La protection des berges contre l'érosion par la réalisation de barrages sélectifs.
- La construction de murs de soutènement pour la construction des infrastructures routières et ferroviaires.
- La réalisation de merlons et de barrières paravalanches.

En outre, les écrans de gabions peuvent être utilisés comme:

- Eperons drainants, associés à des structures de soutènement réalisées elles-mêmes en gabions (Figure 5.2a 2 B).
- Ouvrage de protection pour les poteaux en acier qui constituent la structure de support des barrières fixes ou de filet.

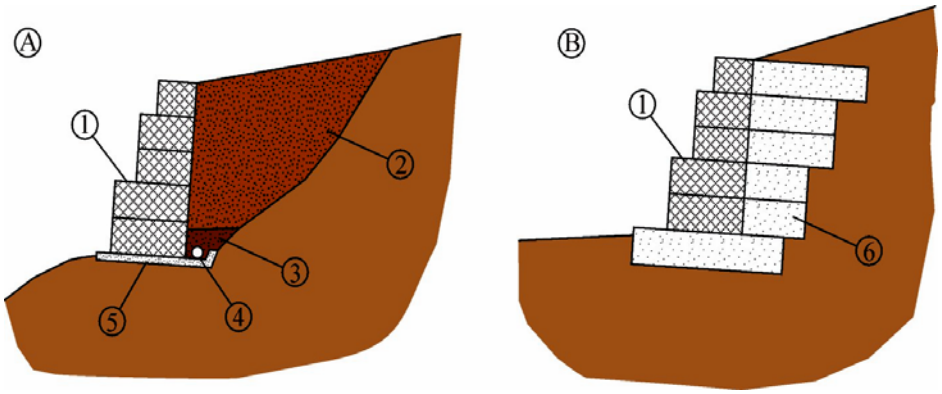


Figure 5.2a 2 : Schéma de principe de gabions (modifié d'après APAT, 2001). 1) Ecran de gabions; 2)Matériel de remplissage; 3) Matériel drainant; 4) Tuyau drainant; 5) Semelle de fondation; 6) Eperon drainant. Les gabions sont des structures perméables qui permettent un bon drainage du terrain. Dans les interventions d'aménagement et de stabilisation des pentes en mouvement (A), une couche de matériel drainant et une semelle en béton sont positionnées à la base du mur pour collecter et évacuer les eaux de la nappe à l'aide de tuyaux drainants. Les gabions peuvent être utilisés comme éperons drainants (B) associés à des structures de soutènement réalisées elles- mêmes en gabions.

2.1. Performances

Les techniques de construction, les matériaux, les caractéristiques techniques et mécaniques intrinsèques de la structure, la facilité de végétalisation permettent de minimiser l'impact visuel des écrans de gabions en favorisant, dans le même temps, le rétablissement et/ou la formation d'écosystèmes locaux.

2.2. Techniques associées

Les écrans à structure rigide sont le plus souvent associés à des fosses et à des merlons, ou installés, comme les barrières fixes de grillages ou de filet, en tête d'un mur de soutènement pour contrer l'effet de tremplin de mur (voir exemples).

3. REALISATION

3.1. Conception

Du point de vue statique, les écrans de gabions agissent comme un mur-poids, c'est-à-dire en s'opposant par leur propre poids aux sollicitations auxquelles ils sont soumises. Leur dimensionnement et les calculs de stabilité intérieure et extérieure sont effectués selon les méthodes normalement adoptées pour les ouvrages-poids (Coulomb, Rankine, méthode de l'équilibre limite).

3.2. Mise en œuvre

La mise en œuvre d'un écran de gabions consiste à réaliser un sol préparé, nivelé, sur lequel on dispose la structure en rangées parallèles: le coté le plus long du gabion est mis en place parallèlement à la section de l'ouvrage, de façon à présenter une plus grande stabilité et une plus grande résistance aux poussées des terres et aux efforts de cisaillement.

3.3. Eléments de coût

Fourniture et pose de gabions métalliques à mailles à double torsion de 10 x 12 cm en fil de fer galvanisé d'un diamètre de 3 mm, comprenant la mise en place du gabion, son remplissage manuel avec des pierres et la ligature des côtés avec du fil de fer galvanisé. Selon les dimensions des gabions, les prix sont variables:

- Gabion 2,00 x 1,00 x 0,50 m: 109,06 €/m^3.
- Gabion 2,00 x 1,00 x 1,00 m: 90,77 €/m^3.

4. ENTRETIEN

La pérennité des structures métalliques est généralement bonne, même en conditions agressives (la protection contre la corrosion est satisfaisante). Au contraire, pour les éléments en bois, même traité, le vieillissement est sensible après 10 à 15 ans.

La maintenance courante doit consister en un curage régulier de l'amont des structures rigides, pour éviter que les éléments accumulés à l'arrière puissent favoriser le franchissement de l'obstacle (tremplin).

5. EXEMPLES

5.1. RR 10, commune de Pontey, vallée d'Aoste.

Une structure rigide (Photo 5.2a.1) a été réalisée avec des traverses métalliques de 40 cm de largeur, disposées horizontalement entre des poteaux verticaux de 1,80 m de hauteur distancés de 2,5 m. La structure a été placée sur un mur de soutènement d'environ 4 m de hauteur, qui se trouve en aval d'un écran de filet déformable de type ASM (Anti Sous-Marin) à haute dissipation d'énergie.

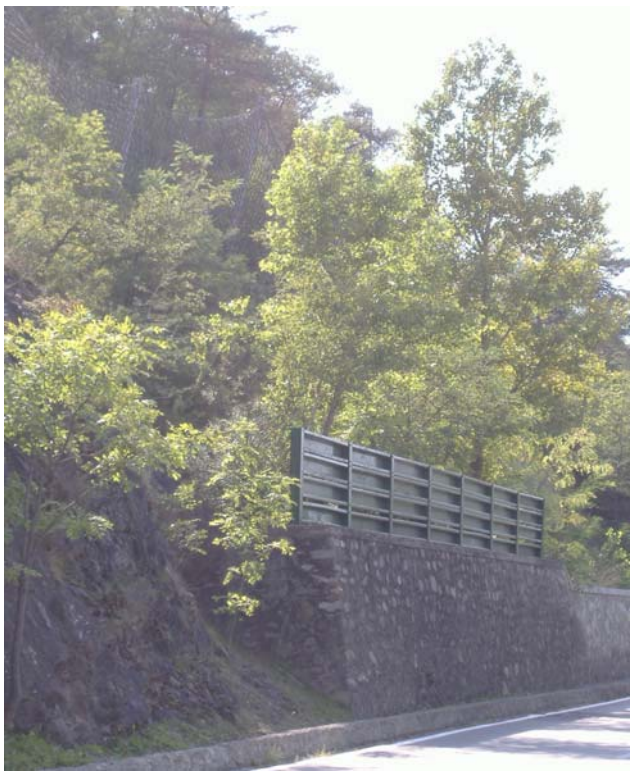


Photo 5.2a.1 – Ecran rigide en traverses métalliques. A noter l'écran déformable de filets à anneaux ROCCO® situé à l'arrière.

5.2. Lieu-dit Theilly, commune de Lillianes, vallée d'Aoste.

En 1961, un glissement de terrain a affecté le versant droit de la vallée du torrent Lys, à proximité du lieu-dit Theilly, dans la commune de Lillianes. L'aménagement et le confortement du versant ont été réalisés à l'aide de terrasses formées avec des écrans de gabions (Photo 5.2a.2) et de drainages, eux-mêmes faits à l'aide de gabions.

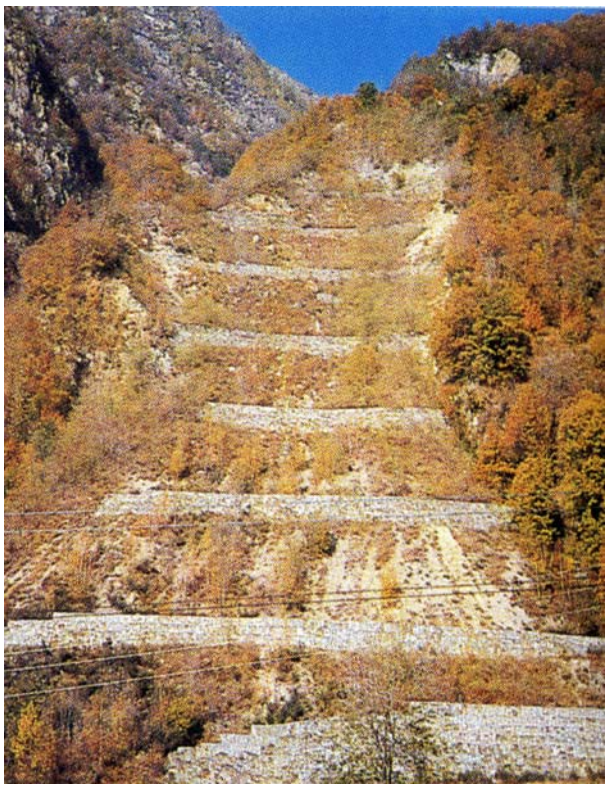


Photo 5.2a.2 – Eboulement de Theilly aménagé à l'aide de terrasses formées avec des écrans de gabions.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (APAT, 2003): *"Atlante delle opere di sistemazione dei versanti"*. Manuali e linee guida 10/2002, pp 38-66.
- Brawner, C.O., 1994. Rockfall hazard mitigation methods, NHI course 13219, Participants workbook.
- Liste des prix de la Région Autonome Vallée d'Aoste, dernière mise à jour janvier 2006.
- Pelizza S., Peila D., Oggeri C.: *"Tipologie di intervento per la bonifica di versanti rocciosi"*. Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.
- Willie, D.C. and Norrish, N.I., 1996. Stabilization of rock slopes. In: A.K. Turner and R.L. Schuster (Editors), Landslides, Investigation and Mitigation. National Academy Press, Washington, D.C., pp. 474-504.

Parade 2.b
Barrière fixe de grillage ou de filet

1. DESCRIPTION

1.1. Objectif

Parade passive, généralement implantée en pied de versant ou en crête de talus, dimensionnée et positionnée de manière à arrêter des chutes de blocs depuis une falaise ou depuis un éboulis.

1.2. Principe

L'ouvrage de protection est destiné à arrêter ou à ralentir les blocs en mouvement le long du versant. L'arrêt des blocs implique que la barrière puisse se déformer sans être endommagée, en assurant la dissipation de l'énergie d'impact.

1.3. Description technique

Une barrière fixe de grillage ou filet est constituée par:

- Une structure d'interception, formée par un grillage simple ou double torsion à maille hexagonale, ou un filet métallique de 6 à 18 mm de diamètre, à maille carrée, losangique ou circulaire, ayant la fonction d'absorber directement l'impact du bloc et de se déformer en transmettant les sollicitations aux structures de liaison, de support et de fondation.
- Une structure de support, constituée par des poteaux en acier tubulaires ou avec des profils ouverts ou fermés. Les poteaux ont une hauteur hors terrain de 2 à 4 m et une distance variable (entre 3 et 10 m). Selon la typologie du sol de fondation (terrain ou rocher), les poteaux peuvent être fichés directement dans le sol ou ancrés dans un massif de béton.
- Une structure de liaison, constituée par des câbles en acier de 18 à 20 mm de diamètre avec une distance de 20 à 25 cm, disposés à l'arrière de la structure d'interception (coté falaise). Les câbles ont comme fonction de transmettre les sollicitations à la structure de fondation. Pour augmenter la déformabilité de la structure de liaison (et par conséquent réduire les forces agissantes), des dissipateurs d'énergie sont généralement disposés entre les câbles et la structure de fondation.
- Une structure de fondation, constituées par des tirants d'ancrage ou des plinthes en béton, servant à transmettre au terrain les forces dérivants de l'impact des blocs.

2. DOMAINE D'UTILISATION

Les barrières fixes de grillage ou de filet sont utilisées dans des versant concernés par des chute des blocs ou des remobilisations d'éboulis. Elle ont pour objectif de freiner ou d'intercepter le matériel en mouvement. Dans un concept de protection, elle sont positionnées à l'amont d'autres mesures de protection passives et servent avant tout à ralentir les blocs.

Ce type d'ouvrage présente un impact visuel plutôt limité: les techniques d'installation ne nécessitent pas la réalisation de fouilles ou de terrassements à l'aide de moyens lourds et encombrants. D'autre part, l'impact visuel peut encore être diminué en peignant la structure avec des couleurs similaires à celles de la végétation, du terrain ou de la roche affleurante.

2.1. Performances

Les performances d'absorption d'énergie des barrières fixes de grillage et de filet sont très différentes: de l'ordre de quelque dizaine de kilojoules (maximum 200 à 250 kJ pour les barrières grillagées) à quelques centaines de kilojoules (jusqu'à 750 kJ pour les barrières de filet).

2.2. Techniques associées

Une barrière fixe peut être installée en tête:

- De murs soutènement, pour contrer l'effet de tremplin du mur.
- De merlons, dans le but d'intercepter et de retenir les éboulis susceptibles de se remobiliser.

3. REALISATION

3.1. Conception

Le projet d'une intervention comprenant des barrières fixes de grillage ou de filet doit comprendre les points suivants:

- Un relevé topographique et une étude géologique et géomorphologique visant à définir les caractéristiques physiques et mécaniques des terrains ou des roches destinées à recevoir les structures de fondation. Ce relevé doit entre autres comprendre le pendage des discontinuités et la distribution des pressions hydrauliques dans le terrain;
- La définition des blocs instables, de leur volume potentiel ainsi que de leurs trajectoires (étude des dépôts rocheux ou simulation trajectographique);
- La quantification de l'efficacité de l'ouvrage, en fonction de sa position et de sa résistance énergétique;
- Un projet de mise en œuvre, qui comprend la position de l'ouvrage et des infrastructures à protéger, les trajectoires des blocs qui peuvent être interceptées, ainsi que la position des fondations;
- Une fiche technique comprenant la résistance énergétique de la barrière (c'est à dire l'énergie qu'elle peut adsorber), sa hauteur utile, les forces agissant sur les fondations au moment de l'impact, etc.;
- Une note de calcul qui décrit les dispositifs de transmission des sollicitations au terrain (ancrages);
- Une fiche relative aux conditions de pérennité et de maintenance de la barrière;
- Des mesures de sécurité à observer durant les travaux.

3.2. Mise en œuvre

La mise en œuvre des barrières fixes de grillage ou de filet ne présente pas de difficultés techniques particulières. Les poteaux sont mis en place verticalement ou légèrement inclinés vers l'amont par rapport à la normale à la pente. Pour une mise en place optimale des poteaux, une caractérisation géotechnique du matériel affleurant (terrain ou rocher) doit être réalisée.

3.3. Eléments de coût

Sur la base de l'énergie absorbée par la barrière fixe de grillage (jusqu'à 250 kJ) ou de filet (jusqu'à 750 kJ), les prix sont compris entre 100 et 150 €/m². En Suisse, les prix varient entre 150 et 500 SFr./m'.

4. ENTRETIEN

La pérennité des barrières fixes dépend du choix du grillage. En conditions agressives, il conviendra d'utiliser des grillages inox ou à galvanisation riche en Al-Zn. Dans ces conditions, les câbles en acier revêtus par un alliage Al-Zn sont à préférer aux câbles en acier revêtus de Zn. En effet, malgré le fait que l'épaisseur du revêtement Al-Zn soit la moitié de celui de Zn, sa vitesse de corrosion est sensiblement inférieure.

Les barrières fixes sont sensibles aux impacts directs d'un bloc sur un poteau. Il conviendra si nécessaire de prévoir la mise en place de gabions en amont des éléments particulièrement menacés.

La maintenance doit comprendre le curage régulier des matériaux qui s'accumulent derrière la barrière fixe, le remplacement des poteaux et éléments de fixation endommagés par l'impact des blocs, ainsi que le remplacement des grillages/filets usés.

Les contrôles concernent principalement l'évaluation de l'état de corrosion des grillages, filets et câbles.

5. EXEMPLES

5.1. RN 26 (Km. 92+000), commune de Nus, vallée d'Aoste.

Pour éviter les dégâts dus aux chutes de blocs depuis le massif rocheux très fracturé surplombant la route, l'ANAS a réalisé un mur de soutènement de 5.5 m de hauteur, surmonté par une barrière fixe de 100 m de longueur constituée par un grillage à double torsion à maille hexagonale (60 x 80 mm), renforcée chaque 30 cm par des câbles horizontaux en acier (d'un diamètre de 12 mm). Les poteaux ont une hauteur d'environ 2 m et sont distants de 4 m. Une fosse de réception a été mise en place à l'arrière du mur.

Photo 5.2b.1: Vue d'ensemble du mur de soutènement et de la barrière fixe de grillage.

5.2. Route communale de Nus en lieu-dit Mazod, commune de Nus, vallée d'Aoste.

La route communale qui rejoint le lieu-dit Mazod a été l'objet d'une intervention qui a compris l'aménagement et la mise en sécurité de la route. De nouveaux murs de soutènement ont été réalisés. Ils sont surmontés par une barrière fixe, de longueur supérieure à 100 m, constituée par des grillages à double torsion à maille hexagonale (60 x 80 mm) et par des filets métalliques galvanisés d'un diamètre de 8 mm à maille carrée (25 x 25 cm). Les intersections entre le grillage et le filet sont liées avec des serre-câbles.

L'intervention a été complétée avec la mise en place sur la paroi très fracturée présente en amont de la route de filets plaqués, de type identique même à celui de la barrière.

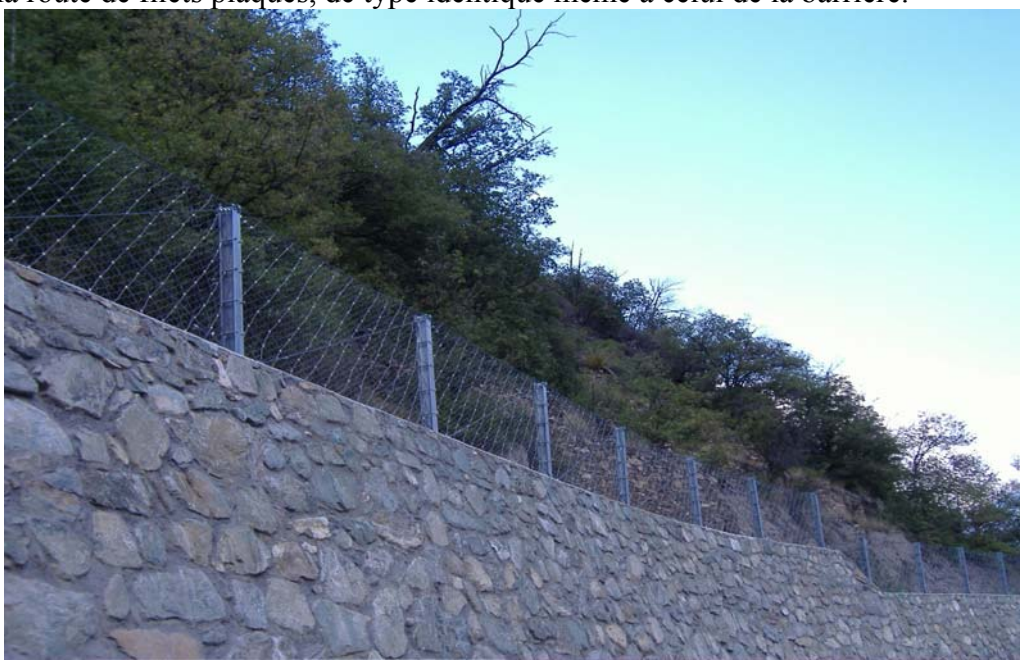


Photo 5.2b.2: Vue d'ensemble du mur de soutènement et de la barrière fixe de grillage et filet.

6. BIBLIOGRAPHIE

- R. Agostini, P. Mazzalai, A. Papetti (1988): *"Le reti metalliche a maglie esagonali nella difesa dei versanti"*. Officine Maccaferri S.p.A., pp. 43-46.
- E. Hoek & D. Wood (1988): *"Rock support"*. Article publié sur le magazine "Gallerie e grandi opera sotterranee", 4, pp. 39-44, 1990
- Peila D. & Pelizza S. (1998): *"Linee guida per la classificazione e la certificazione di comportamento di barriere paramassi a rete"*. Geoingegneria Ambientale e Mineraria, 94, pp. 197-200, GEAM, Torino.
- Ente Nazionale per le Strade - Gruppo Tecnico per la Sicurezza Stradale (2001) – *"La protezione del corpo stradale contro la caduta massi"*. ANAS.
- Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (APAT, 2003): *"Atlante delle opere di sistemazione dei versanti"*. Manuali e linee guida 10/2002, pp 76-82.
- Deflorian F., Rossi S., Bonora P., Sassudelli F.: *"Resistenza alla corrosione di funi per barriere paramassi e paravalanghe"*. Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.
- Mauro R., Sassudelli F, Cristoforetti S.: *"In tema di proporzionamento delle barriere paramassi a rete"*. Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

- Pelizza S., Peila D., Oggeri C.: *"Tipologie di intervento per la bonifica di versanti rocciosi"*. Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.
- Liste des prix de la Région Autonome Vallée d'Aoste, dernière mise à jour janvier 2006.
- Brawner, C.O., 1994. Rockfall hazard mitigation methods, NHI course 13219, Participants workbook.
- Willie, D.C. and Norrish, N.I., 1996. Stabilization of rock slopes. In: A.K. Turner and R.L. Schuster (Editors), Landslides, Investigation and Mitigation. National Academy Press, Washington, D.C., pp. 474-504.

Parade 3
Ecrans de filets pare-blocs déformables

1. DESCRIPTION

Les écrans de filets déformables sont des ouvrages pare-blocs qui rentrent dans la catégorie des parades passives.

1.1. Objectif

L'objectif de la parade est d'intercepter les blocs en dissipant leur énergie cinétique par différents procédés de déformation et de freinage.

1.2. Principe

Les écrans de filets déformables sont des structures souples, constituées de un ou plusieurs modules de filets généralement métalliques, maintenus en position par des supports de type poteaux. Ils sont disposés dans la pente dans une position ± perpendiculaire à l'axe moyen des trajectoires de blocs pour obtenir la surface d'interception maximale. Les blocs sont ainsi progressivement freinés puis arrêtés grâce à la déformation progressive de l'ouvrage.

1.3. Description technique

L'écran pare-blocs est constitué par un assemblage de plusieurs modules de filets dont la nature et les dimensions sont fonction de critères tels que la capacité d'arrêt de l'ouvrage (capacité géométrique ou capacité énergétique) ou les spécificités de conception industrielle. L'écran est maintenu en position « ouverte » par des supports de type poteaux et par un système de haubanage qui assurent le maintien de l'ouvrage. Le haubanage de maintien, ou plus généralement un dispositif analogue indépendant, assure la transmission des efforts au sol qui est un support réputé stable.
La dissipation d'énergie est assurée par des dispositifs de freinage ou de déformation très variables qui dépendent de critères énergétiques et technologiques. Ces freins sont disposés entre le filet qui assure l'interception des blocs en mouvement et les ancrages au sol qui permettent une réaction, donc généralement sur le dispositif de haubanage.
La fixation au sol est assurée par des ancrages dont les caractéristiques sont fonction à la fois de la nature du terrain et de l'intensité des efforts qui doivent être transmis au sol.

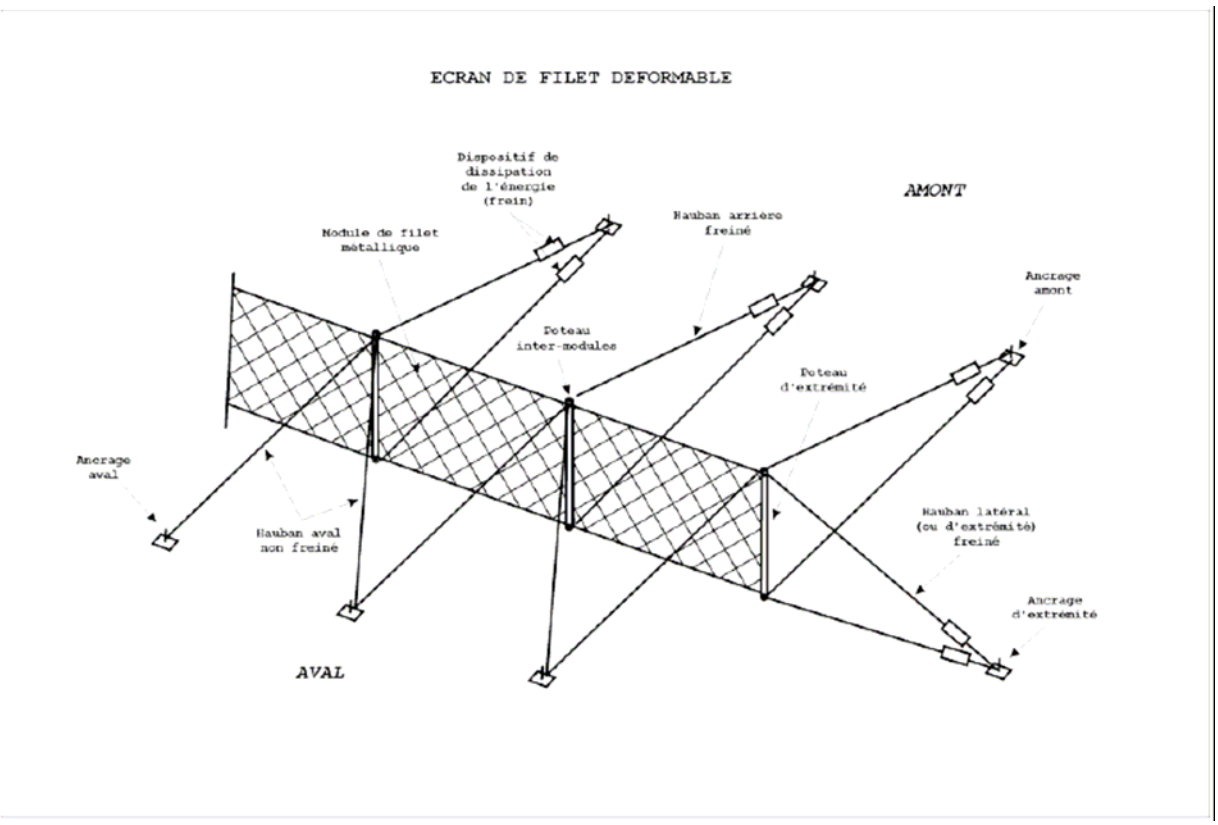


Figure 5.3. 1: Schéma type d'un écran de filets déformable

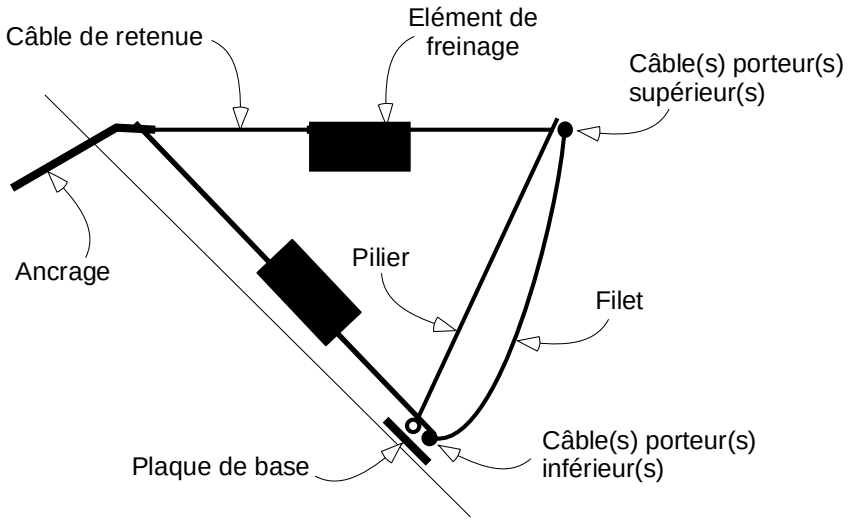


Figure 5.3. 2 : Ecran de filets déformable : profil au droit d'un poteau.

La nomenclature est celle qui est prônée par les recommandations fédérales helvétiques (Gerber, 2001)

En France, il existe six fabricants ou concepteurs d'écrans de filets pare-blocs déformables : CAN [www.can.fr], EI MONTAGNE (Groupe HEAVEN CLIMBER) [www.ei-montagne.fr] [www.heavenclimber.fr], GTS—ELITE [www.gts.fr], SIMECO [www.simeco.fr], SISYPHE [sisyphe.sa@wanadoo.fr] et TETRA [www.tetra.fr].

En Suisse c'est la société GEOBRUGG [www.geobrugg.com] qui, sur la base d'un brevet CAN, construit actuellement des filets déformables capables d'absorber des énergies atteignant 3000 kJ.

En Italie, il existe l'association ACAI [www.acaics.it] qui regroupe, actuellement, six fabricants italiens d'ouvrages en acier, dont les plus importants sont : Artigiana Costruzioni (www.artigianacostruzioni.com), Geobrugg Italia (www.it.geobrugg.com), Safe Geotecnologie (www.safegeo.it), Co.Pro.Ba.C. (www.coprobac.com). Co.Pro.Ba.C. (Certified rockfall barriers producers associates) correspond à un consortium formé par quatre fabricants: Metalsald (www.metalsald.com), Isofer (www.isofer.ch), DDM (www.ddmsrl.it) et Incofil (www.incofil,com).
Parmi les nombreux fabricants ou concepteurs d'écrans de filets pare-blocs déformables, on doit également citer Maccaferri (www.maccaferri.com) et Tubosider (www.tubosider.it), surtout pour leur présence sur le marché international.

Il existe par conséquent de nombreuses variétés de dispositifs avec des variations qui vont concerner tous les constituants des écrans : les filets, les poteaux, les dissipateurs ou freins, les accessoires ; ainsi que la géométrie des ouvrages et la position relative des différents éléments.

1.3.1. Les modules de filets

Différents types de filets composent ces ouvrages. Leur nature varie d'un producteur à l'autre ainsi que d'une classe d'énergie à une autre chez un même producteur. Ainsi, on pourra trouver :

- des filets composés de câbles d'acier Ø ≥ 7mm assemblés en mailles losange ≥ 200x200mm et dont l'assemblage au niveau des intersections est assuré par divers procédés tels que cavaliers, serre-câbles, fils torsadés, bagues serties, pièces métalliques embouties, etc. Généralement, un câble de plus gros diamètre ceint chaque module. Ce type de filet est le plus souvent réservé aux ouvrages de capacité modeste en raison de performances limitées pour une utilisation dynamique.
- des filets composés de câbles d'acier Ø ≥ 7mm assemblés par tricotage et composant des mailles "oméga" ou autres dont l'assemblage au niveau des intersections est assuré par pièces métalliques embouties spécifiques. Certains ce ces produits sont encore en cours de développements et de validation.
- des filets composés d'anneaux métalliques assemblés. Ce type de produit est le plus couramment utilisé en raison de ses performances dynamiques exceptionnelles et également pour des raisons historiques : les premiers filets utilisés provenaient de la récupération d'anciens stocks de filets anti-sous-marins (ASM) et étaient particulièrement économiques. Les stocks de filets ASM étant épuisés, de nouvelles fabrications voient le jour dans le monde entier.

En France, la dimension des modules varie en fonction la classe d'énergie considérée (Tableau 5.3. 2). Pour les classes 4 à 7, la longueur est fréquemment de 10m (maximum imposé par la norme, mais on trouve parfois des modules de 9m). Pour la classe 8, les longueurs sont de 10, 13 et 15m (15m étant le maximum autorisé par la norme). Pour la classe 9, les longueurs varient entre 10 et 20m (20m étant le maximum autorisé par la norme).

La hauteur des modules respecte avec précision la hauteur minimale imposée par la norme (hauteur minimale = hauteur utile + dimension du bandeau) avec fréquemment une marge de 0.5 à 0.7m pour assurer un réglage minimal correct quelle que soit la configuration topographique.

Les mailles des filets pare-blocs, quelle que soit leur conception, sont généralement d'une dimension qui ne permet pas d'arrêter les pierres de petite dimension (de l'ordre du 1/1000ème de m^3). Un filtre est alors disposé en doublage de l'écran principal (photo 5.3.1) sous forme d'un grillage dont la dimension est adapté aux nécessités (souvent du grillage double torsion maille 100x120, 80x100 ou 60x80mm).

Dans les zones où le relief est tel que la base des modules n'est pas en contact avec le sol, il est possible d'interposer des éléments appelés "bavettes" qui auront pour rôle d'intercepter les éléments en trajectoire rasante. Si l'espace entre le pied de filet et le sol est inférieur à quelques décimètres (à apprécier en fonction du contexte), il est possible de se contenter de bavettes constituées de grillage, éventuellement en double nappe, ligaturé sur l'ouvrage. Pour les espaces plus grands, dans un thalweg prononcé par exemple, la bavette sera constituée par un élément de filet de même nature que le reste de l'ouvrage (Photos 5.3.2, 5.3.3, 5.3.4), fixé à la base du module concerné et relié au dispositif de freinage de manière à assurer un fonctionnement normal de l'ouvrage en conditions de sollicitation ultime. Chaque produit ayant ses spécificités, l'adaptation des bavettes pour un fonctionnement dynamique est du ressort du fabricant.

Photo 5.3.1 : doublage grillage (Cete)

Photo 5.3.2 : Bavette EI (Cete)

Photo 5.3.3 : Bavette EI (Cete)

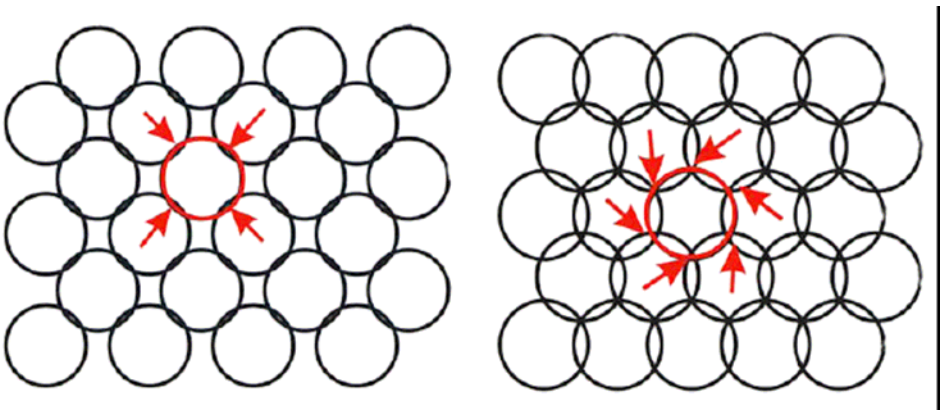
Photo 5.3.4 : Bavette EI (Cete)

Cliquer sur les images pour les agrandir

1.3.2. Les filets à anneaux

De nombreux produits existent actuellement sur le marché, avec des aciers, des structures d'anneaux, des dimensions et des types d'assemblage très différents. Concernant l'assemblage, on différencie deux types principaux :

- les anneaux à 4 contacts (notés aussi 1+4) (photos **5.3.5** et **5.3.6**)
- les anneaux à 6 contacts (notés aussi 1+6) (photos 5.3.7 et 5.3.8)



Anneaux à 4 contacts Anneaux à 6 contacts

Figure 5.3. 3 : deux types d'assemblage des anneaux

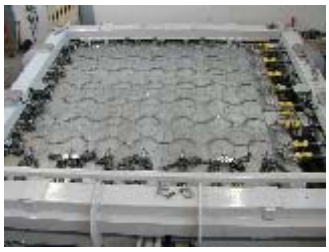


Photo 5.3.5 : anneaux 1+4 libre (Cete)

Photo 5.3.6 : anneaux 1+4 tension(Cete)

Photo 5.3.7 : anneaux 1+6 libre (Cete)

Photo 5.3.8 : anneaux 1+6 tension(Cete)

Cliquer pour agrandir

Lors d'un impact, les filets à anneaux présentent l'avantage d'absorber l'énergie cinétique par une déformation cumulée de tous les anneaux. Les forces sont ainsi transmises régulièrement au filet et à l'ensemble du système, sans solliciter excessivement les ancrages.

Le diamètre moyen des anneaux se situe entre 300 et 450mm. Le diamètre des torons varie généralement de 9 à 18mm de diamètre avec un nombre de spire qui dépendra du diamètre du fil de constitution (souvent entre 3 et 6mm). La mise en fonction de nouvelles unités de production de filets permet en fait de composer des structures sur-mesure.

En plus des dimensions, les anneaux comportent une grande variété de structure :

- mono-fil tourné un certain nombre de fois 5(toron) avec terminaison par épissure, par sertissage, par baguage, etc. (photos 5.3.9**,** 5.3.10**,** 5.3.11)
- structure tressée de type câble se bouclant sur lui-même par épissure (photo 5.3.12)
- enroulement non structuré d'un mono-fil maintenu par baguage (vrac bagué) (photo 5.3.13)
- etc.

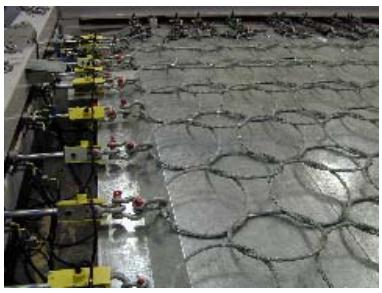


Photo 5.3.9 : toron bagué (Cete) *Photo 5.3.10 : toron épissuré (Cete)* *Photo 5.3.111 : toron épissuré 2(Cete)*

Photo 5.3.12 : câble épissuré (Cete) *Photo 5.3.13 :vrac baguéé (Cete)*

Cliquer pour agrandir

Les diamètres d'anneaux, les diamètres de toron, les diamètres de fil, la structure de l'anneau et la résistance mécanique de l'acier utilisé confèrent à l'anneau, pris comme entité, des caractéristiques mécaniques particulières. Des essais de traction sur divers anneaux ont été effectués par la société AVAROC à l'aide de bâtis spéciaux destinés à reproduite des sollicitations 4 et 6 contacts. Au total, 10 produits différents ont été testés (voir extraits dans le tableau ci-dessous) et les résultats montrent de grandes variations dans les performances qui sont liées à la structure de ces anneaux et à la qualité des matériaux utilisés.

Ø anneau (mm)	Ø toron (mm)	Ø fil (mm)	Résistance fil (daN/mm²)	Nb. tours de fil	Nb. points de contact	Charge rupture (kN)
350	9	3	155	7	6	126
350	13.5	4.5	145	7	6	235
420	13.5	4.5	145	7	6	245
420	17.5	3.5	150	19	6	420
380	12	4	112	19	6	160
300		3		12	4	210
300		3		19	4	230

Tableau 5.3. 1 : charge de rupture des anneaux selon leurs caractéristiques (essais AVAROC, F - 38240 MEYLAN)

Mais si ce type d'essai ne permet pas en soi de qualifier ou de préfigurer l'efficacité d'un assemblage complexe (module de filet) vis à vis d'une sollicitation dynamique, il peut permettre d'effectuer un contrôle qualité simple sur un produit qui aura été testé par ailleurs dans une configuration dynamique globale. Certains anneaux structurellement différents, soit par leur diamètre, soit par la section du toron, peuvent avoir des résistances unitaires analogues mais conduire à un comportement global du filet fondamentalement différent. Un aspect de ce comportement a été mis à jour dans des essais de traction confinée dans le plan effectués dans le cadre d'un marché

fournitures pour filets pendus destinés à un grand chantier de protection sur l'île de la Réunion **(Annexe 5.3.1 Essai de traction dans le plan)**.
D'après ces essais, il apparaît que les déformations extrêmes des filets sous sollicitation identique ont un rapport de 1 à 7.5 environ. On voit également l'influence de leur structure sur la distribution des forces dans le module (photos 5.3.14 à 5.3.17). Pour certains produits, l'application d'une force selon un axe distribue des efforts latéraux réduits de 50%, alors que pour d'autres produits, sous même sollicitation, la distribution des efforts est majorée de 40%.
Le comportement dynamique global de l'ouvrage sera donc nécessairement fortement orienté par les caractéristiques intrinsèques du filet.

Photo 5.3.14 :essai de traction 1 (Cete)

Photo 5.3.15 : :essai de traction 2 (Cete)

Photo 5.3.16 : :essai de traction 3 (Cete)

Photo 5.3.17 : essai de traction 4 (Cete)

Cliquer pour agrandir

En France, tout comme en Italie, tous les types d'anneaux et de filets sont utilisés. Le choix dépendra essentiellement des performances de l'ouvrage.
En Suisse, ce sont les filets comportant des anneaux de 300 mm de diamètre, composés de fil d'acier à haute résistance de 3 mm de diamètre qui sont le plus usités. Selon la capacité d'absorption d'énergie requise, les anneaux sont constitués de 5 à 19 spires.

1.3.3. Les poteaux (ou supports)

Les poteaux qui composent les écrans de filets pare-blocs ont pour rôle essentiel de maintenir la structure dans la meilleure position pour intercepter les éboulis. Leur position varie en fonction des produits :

- ✓ poteaux en position amont par rapport au filet (photos 5.3.18 et 5.3.19). Cette position est la plus courante. Le poteau situé en première ligne est plus exposé aux impacts, mais l'implantation de l'ouvrage est facilitée par l'alignement poteaux / filets.
- ✓ poteaux en position aval par rapport aux filets. Cette position met le support à l'abri des impacts, derrière le filet. Cette disposition implique une implantation et un réglage rigoureux de l'ouvrage

Photo 5.3.18 : poteaux à l'amont du filet (Crealp) *Photo 5.3.19 : détail (Crealp)*

Cliquer pour agrandir

Hors sollicitation, les efforts dans ces structures sont négligeables. Au moment de l'impact, deux types de sollicitations peuvent être considérés :

- ✓ la sollicitation à une énergie de service (noté SEL pour "Service Energy Level"), c'est à dire un niveau d'énergie que l'ouvrage doit pouvoir dissiper sans désordre majeur afin d'être en mesure de réitérer la performance. Au niveau de service, le poteau doit rester en état afin de maintenir une géométrie adaptée aux événements futurs
- ✓ la sollicitation à une énergie ultime (noté MEL pour "Maximum Energy Level"), c'est à dire un niveau d'énergie que l'ouvrage doit être en mesure de dissiper une fois, quelles que soient les conséquences sur l'ouvrage et quel que soit son état final. Dans ce type de sollicitation, le rôle du poteau se limite aux premiers instants de l'impact. Dans la phase de dissipation, sauf si la conception de l'ouvrage a des visées autres, le poteau peut s'effacer (photo 5.3.20).

Photo 5.3.20 :filet en actien de déformation = filet plein (Crealp) ***Cliquer pour agrandir***

Alors que le filet peut être sollicité à tous les stades de fonctionnement de l'ouvrage, jusqu'à l'extrême, les poteaux ont un rôle plus limité. Leur dimensionnement tient généralement compte du principe de fonctionnement.

Les poteaux, comme les filets, sont des composants dont la géométrie et l'aménagement vont varier en fonction du fabricant. Le matériau utilisé est généralement l'acier. Pour les structures à faible capacité d'arrêt, le bois est parfois utilisé, mais son emploi est reste limité, notamment dans les zones où les risque d'incendie existent.

En France, le profil du poteau est laissé à la libre création des fabricants tant que la géométrie permet l'établissement d'un écran conforme à la norme : profils en H, tubes cylindriques, tubes à section carrée, assemblages triangulés pour certains supports en position aval, structures auto-porteuses, etc.

Sur la structure principale se greffent des appendices fonctionnels tels que des platines de pied qui assurent une assise correcte au sol (dispositifs fixes ou mobiles ou articulés, etc.), des diabolos de passage de câble au travers du poteau et qui limitent les frottements destructeurs, des chevilles transversale de maintien de câbles qui évitent le glissement le long des profils, etc. Tous ces accessoires varient d'un fabricant à l'autre, voire d'un modèle à l'autre chez un même fabricant.

En Suisse, ce sont les piliers porteurs profilés en H, dont les hauteurs standard varient entre 2 et 7 m qui sont le plus courant. Les piliers sont fixés sur une plaque de base par l'intermédiaire d'une articulation qui joue le rôle de fusible mécanique: lors de l'impact d'un bloc sur le pilier, l'articulation cède, protégeant ainsi la plaque de base et les ancrages qui la maintiennent au sol.
Les poteaux sont maintenus dans la position requise en fonction de la topographie par des câbles en acier. Selon l'énergie à reprendre, le diamètre des câbles varie entre 12 et 22 mm. De plus, ils peuvent être doublés, voire quadruplés. D'autres câbles relient les poteaux entre eux à la base et au sommet, jouant le rôle de câbles porteurs pour les modules de filets, qui y sont fixés par des étriers.

1.3.4. Les dissipateurs d'énergie

Les dissipateurs sont les accessoires fondamentaux des écrans déformables. Ils sont positionnés généralement sur les dispositifs de liaison écran / sol, donc sur les systèmes de haubans (photo 5.3.21). Certains dispositifs peuvent être disposés en périphérie du filet afin de contrôler sa géométrie sous sollicitation.

Photo 5.3.21: système de dissipation sur haubans (Crealp) ***Cliquer pour agrandir***

Pour la France, les six fabricants ou concepteurs de filets pare-blocs ont chacun un dispositif de dissipation de l'énergie par freinage qui leur est propre mais qui peuvent cependant être classés en 3 grands groupes principaux :

1 - les freins à câbles alignés maintenus par serrage (EI Montagne, GTS Elite)
2 - les freins à câbles sinueux contrôlés par des piges de déviation, dispositif éventuellement complété par un serrage (CAN, Siméco, Tétra)
3 - les freins fendeurs de tube (Sisyphe)

1 – Les freins à câbles alignés et maintenus par serrage sont historiquement les plus anciens. Le maintien des câbles peut être assuré par serrage entre deux plaques métalliques à l'aide de boulons tarés à la clé dynamométrique (photo5.3.22). Sur certains dispositifs, le serrage des câbles sur la platine est assuré par de simples cavaliers (Frein GTS, photo 5.3.23). Sous sollicitation, le glissement des câbles commence à une certaine force calibrée et qui dépend de la conception et de la capacité de l'ouvrage. La dissipation d'énergie est assurée par le frottement des câbles sur les plaques métalliques. Plusieurs freins peuvent être montés en parallèle sur un même support afin d'assurer le niveau de dissipation requis (Photo 5.3.24 Freins EI divers).

2 – Les freins à câbles sinueux contrôlés par des piges de déviation comportent généralement des plaques externes qui assurent le maintien des câbles et les empêchent de sortir des guides. La dissipation d'énergie est assurée par le cheminement complexe du câble qui contourne les piges de déviation (Frein CAN, photo 5.3.25). Un complément de freinage est souvent assuré par serrage des plaques latérales ou par un dispositif complémentaire. Le tarage de la force seuil de glissement sous sollicitation est assuré par le serrage de ces plaques.

3 – Les freins fendeurs de tube sont un dispositif original mis au point par un seul fabricant (Frein Sisyphe, photo 5.3.26). Le frein se compose d'un tube métallique dont la géométrie est fonction du niveau d'énergie visé, au travers duquel passent deux câbles opposés terminés par des "fendeurs" (pièces métalliques coniques). Sous sollicitation, les câbles entraînent leurs fendeurs qui viennent écraser ou fendre le tube sur les deux extrémités opposées en dissipant l'énergie équivalente.

Photo 5.3.22 : freins à câble (Crealp)

Photo 5.3.23 : frein GTS (Cete)

Photo 5.3.24 : freins EI divers (Cete)

Photo 5.3.25 : frein Can(Cete)

Photo 5.3.26 : frein Sisyphe(Cete)

Cliquer pour agrandir

Quel que soit le frein considéré, le système ne peut fonctionner que si les parties libres des câbles de frein (longueurs disponibles pour les déformations) sont effectivement disponibles et <u>situées dans l'axe de traction</u> au moment de la sollicitation brutale. Dans le cas contraire (coude ou blocage du brin libre par exemple), le déplacement est contrarié et il peut se produire un blocage du système. La dissipation de l'énergie ne pouvant être assurée normalement, il peut se produire des ruptures de liaison, voire des ruines d'ouvrage, à des niveaux inférieurs aux capacités nominales.

<u>En Suisse</u>, les éléments de freinage des filets fournis par la société Geobrugg sont constitués par les divers câbles eux-mêmes (câbles porteurs, haubans et câbles de retenue), qui sont montés en forme de boucles munies de douilles serties. Lors de l'impact, les anneaux de freinage se referment, dissipant ainsi l'énergie non reprise par le filet sans que les câbles soient endommagés.

1.3.5. Les accessoires

Outre les accessoires spécifiques à chaque ouvrage et qui sont du ressort du concepteur, certains composants des ouvrages pare-blocs nécessitent quelques remarques particulières.
Les câbles qui constituent les liaisons entre l'ouvrage écran et le sol (haubans) doivent être à âme métallique (AM). En effet, les câbles à âme textile (AT) présentent le défaut de favoriser la corrosion interne des torons par rétention d'eau dans l'âme (sous certaines conditions) sans qu'il soit aisé de détecter aisément cette dégradation. Au niveau des liaisons, sous la pression des serre-câbles par exemple, l'âme textile risque également de fluer avec le temps et causer un desserrage incontrôlable de la liaison, avec toutes les conséquences que cela peut entraîner.
Autre point sensible : les serre-câbles. Ces accessoires qui permettent de réaliser des liaisons de câbles sur site sont des pièces métalliques dont les performances sont directement liées à la qualité de la fabrication. Les serre-câbles en acier coulé (exemple DIN 741 et 1142) sont des accessoires qui doivent être réservés à des ouvrages de capacité modeste (jusqu'à 1000 kJ?). Pour les énergies supérieures, il faudra privilégier des serre-câbles forgés dont la résistance mécanique est supérieure et plus en accord avec les sollicitations dynamiques mises en jeu. Certains modèles (Green-Pin par exemple [www.vanbeest.nl/catalogue/fr]) ou Crosby G450 [catalog.thecrosbygroup.com]) ont tous les composants forgés. Les écrans à très haute capacité (≥ 3000 kJ) devront être équipés de serre-câbles intégralement forgés. En outre, ce type de serre-câbles haute résistance forgés sont galvanisés à chaud et présentent une meilleure protection contre la corrosion.
Quel que soit le type de serre-câble considéré, le nombre d'unités à mettre en place par liaison doit respecter rigoureusement le minimum recommandé par le fabricant. Pour un câble de diamètre 16mm, le nombre de serre-câbles peut être de 3, 4 ou 5 unités selon le modèle considéré.
Le serrage des écrous du cavalier devra également respecter les couples préconisés par le fabricant. Tous les serre-câbles de liaison (sur site comme en atelier) devront impérativement être serrés à la clé dynamométrique.

2. DOMAINE D'UTILISATION

Les écrans pare-blocs sont des ouvrages linéaires qui permettent de traiter de grandes longueurs d'itinéraires ou d'infrastructures en interceptant des pierres et blocs dont l'origine peut ne pas être nécessairement bien précisée.

L'emprise de l'ouvrage est réduite et permet une installation dans tout type de pente, y compris en paroi, mais nécessite cependant un espace aval qui doit permettre une libre déformation du filet nécessaire à la dissipation de l'énergie cinétique des blocs.

Utilisés essentiellement pour se protéger contre les risques rocheux, les écrans pare-blocs peuvent accessoirement être efficaces contre la propagation d'arbres abattus (coupes forestières, tempêtes…) ou la chute de blocs de glace (ruptures de cascades glacées) voire même, dans une certaine mesure, contre des avalanches de neige accidentelles, tant que le niveau énergétique reste acceptable. Ce type de parade peut être utilisé dans le cas de laves torrentielles. Ils peuvent être utilisés tant en mesure définitive qu'en mesure provisoire, dans le cadre d'une protection temporaire de chantier par exemple.

Toutefois, certaines situations peuvent limiter leur emploi, du fait d'une part de leurs performances énergétiques plafonnées et d'autre part de leur mauvaise adaptation aux cas de chutes multiples plus ou moins simultanées (à moins de disposer de rideaux d'écrans parallèles pour les énergies maximales ou d'avoir dimensionné l'ouvrage à partir des énergies de service). Il ne semble pas par ailleurs qu'il existe actuellement de dispositifs mixtes pare blocs / paravalanches satisfaisants dans

les zones de départ d'avalanches, compte tenu des types et niveaux d'effort exercés sur des ouvrages de conception différente (poussée constante de la neige pour les uns = parade active, réponse à un effort brusque et limité dans le temps pour les autres = parade passive).

2.1. Performances

Les écrans pare-blocs étant des ouvrages destinés à stopper des blocs en mouvement, leur capacité d'arrêt va être, par conséquent, quantifiée en terme d'énergie. Pour ce qui concerne les écrans déformables, donc freinés, les énergies maximales sont de l'ordre de quelques centaines de kilo-joules à 5000 kilo-joules[1] pour les ouvrages les plus performants (données 2006).

Les six fabricants français proposent chacun une gamme de produits qui va de la classe 3 / 200 kJ (niveau d'énergie à partir duquel les ouvrages sont réellement considérés comme déformables car nécessitant des dispositifs de freinage) à la classe 8 / 3000 kJ, au sens de la norme NF P 95-308 (voir description ci-dessous). Cinq proposent des ouvrages de classe 9 / 5000 kJ (données début 2006)

Les performances des écrans de filets pare-blocs sont caractérisées par des essais ou définies par des notes de calcul. Depuis 1996, il existe une norme française relative aux "équipements de protection contre les éboulements rocheux – Ecrans de filets" (norme NF P 95-308) qui définit la terminologie ainsi que les caractéristiques géométriques et énergétiques des écrans en fonction de leur classe.

	Classe / **Qualification**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Écran	Hauteur utile minimale (m)	1,50	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	3,50	4,00	5,00
	Dimension minimale du bandeau (m)	0,40	0,40	0,40	0,60	0,60	0,70	0,80	0,80	1,00
	Longueur maximale d'un module fonctionnel (m)	10	10	10	10	10	10	10	15	20
	Capacité nominale (kJ)	12,5	50	200	500	1 000	1 500	2 000	3 000	5 000
Impact type	Masse M (1 000 kg)	0,25	0,5	1	2	3	4	5	7	10
	Diamètre d'une sphère équivalente de masse M et de masse volumique égale à 2 500 kg/m^3 (m)	0,58	0,73	0,91	1,15	1,32	1,45	1,56	1,66	1,97
	Vitesse de translation minimale (m/s)	10,0	14,2	20,0	22,4	25,9	27,4	28,3	29,3	31,7

Tableau 5.3. 2.a : caractéristiques des écrans en fonction des classes d'énergie en France

L'avantage de cette norme a été de simplifier le marché national des écrans pare-blocs dans la mesure où elle fixe des marges géométriques en fonction de la classe d'énergie considérée. La notion de "bandeau" (bande supérieure du filet dans laquelle la capacité nominale n'est pas garantie. La hauteur de bandeau additionnée à la hauteur utile donne la hauteur totale du module de filet)

[1] $E_c=1/2mv^2$: 5000 kJ correspondent à l'énergie cinétique d'un bloc de 13 tonnes (5m^3 pour une densité de 2.6) se déplaçant à 28m/s (environ 100 km/h).

s'adresse plus particulièrement aux bureaux d'études qui définissent les protections et permet de mettre l'accent sur la nécessité de tenir compte de la taille des blocs (leur rayon en l'occurrence) dans le dimensionnement géométrique de ce type d'ouvrage. Par contre, et c'est une des limites de cette norme, aucune exigence ne figure quant à la justification des capacités annoncées.

En attendant l'application du marquage CE, l'Italie applique actuellement une classification proche de la norme française (NF-P 95-308) et qui reprend notamment les notions de "hauteur minimale utile", de "bandeau" et de "longueur maximale du module fonctionnel".

Classe **Qualification**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Hauteur utile minimale (m)	2.00	2.50	3.00	3.50	3.50	4.00	5.00
Dimension minimale du bandeau (m)	0.40	0.60	0.60	0.70	0.80	0.80	1.00
Longueur maximale d'un module fonctionnel (m)	10	10	10	10	10	15	15
Capacité nominale (kJ)	<250	500	1'000	1'500	2'000	3'000	>5'000
Vitesse de translation minimale (m/s)	22	22	22	22	22	23	23

Tableau 5.3. 3.b : caractéristiques des écrans en fonction des classes d'énergie en Vallée d'Aoste

En Suisse, les homologations sont réalisées conjointement par l'institut fédéral de recherche WSL et la commission fédérale d'experts en avalanches et chutes de pierres (CEAC). Les essais grandeur réelle sont réalisés sur un site à lâcher vertical et la certification est ensuite délivrée par l'office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP).
Les essais se déroulent en 4 phases (détails en **Annexe 5.3.2**) qui permettent de classer les filets en 9 niveaux d'énergie variant entre 100 et 5 000 kJ (tableau ci-dessous).

		Essai 1 (capacité d'absorption = 50%)			Essai 2 (capacité d'absorption = 100%)				
Classe	Longueur du pilier (m)	Energie (kJ)	Masse du projectile (kg)	Longueur du côté du projectile (m)	Energie (kJ)	Masse du projectile (kg)	Longueur du côté du projectile (m)	Longueur max. de la trajectoire de freinage (m)	Hauteur min. du filet après impact (m)
1	1.5	50	160	0.41	100	320	0.52	4.0	0.90
2	2.0	125	400	0.56	250	800	0.70	5.0	1.20
3	3.0	250	800	0.70	500	1'600	0.88	6.0	1.80
4	3.0	375	1'200	0.80	750	2'400	1.01	7.0	1.80
5	4.0	500	1'600	0.88	1'000	3'200	1.11	8.0	2.40
6	4.0	750	2'400	1,01	1'500	4'800	1.27	9.0	2.40
7	5.0	1'000	3'200	1.11	2'000	6'400	1.40	10.0	3.00
8	6.0	1'500	4'800	1.27	3'000	9'600	1.60	12.0	3.60
9	7.0	2'500	8'000	1.51	5'000	16'000	1.90	15.0	4.20

Tableau 5.3. 4.c : caractéristiques des écrans en fonction des classes d'énergie en Valais

2.2. Essais au niveau européen

A partir de 2002, un groupe de travail européen (WG 06.01/02) réunissant la France, l'Italie, l'Autriche et l'Allemagne (la Suisse intervenant en tant qu'observateur car n'appartenant pas la CEE) a commencé à travailler sur un projet de Guide pour l'Agrément Technique Européen (ETAG). L'ETAG, dont la finalité est de définir les voies d'accès à l'Agrément Technique Européen (ETA) et de bénéficier du marquage CE[2] pour les écrans de filets pare-blocs (Falling rock protection kits), est

[2] Le marquage CE permet à un produit de circuler librement dans les états membres de l'Union Européenne dans la mesure où ce marquage atteste qu'il satisfait les exigences essentielles applicables aux ouvrages européennes.

basé sur un protocole d'essais en vraie grandeur destinés à évaluer et qualifier les ouvrages. Il introduit également de nouvelles notions en matière d'ouvrages pare-blocs qui sont le niveau d'énergie de service (SEL) et le niveau d'énergie maximale (MEL). Un site Internet sera probablement mis à disposition du public quand l'ETAG sera abouti, ce qui n'est pas le cas actuellement. Les éléments concernant l'ETAG figurent en **Annexe 5.3.3**.

2.3. Techniques associées

Dans certains cas, on peut être amené à reprofiler des irrégularités de terrain en amont d'un écran de filets pare-blocs lorsqu'il y a risque d'effet tremplin avec franchissement de l'ouvrage par des trajectoires trop aériennes.

Photo 5.3.27 Combinaison de parades: écran déformable surmontant le piège à blocs (fosse de réception).(Crealp)

Les masses dont l'éboulement pourrait induire un dépassement de la capacité d'arrêt de l'écran pare-blocs sont à traiter complémentairement par une parade active (purge/reprofilage avant mise en place de l'écran, stabilisation/confortement avant ou après son installation…).

3. MISE EN ŒUVRE DES ECRANS

3.1. Dimensionnement

Les écrans pare-blocs sont des parades passives qui, par définition, sont destinées à intercepter des blocs en mouvement. Le dimensionnement de ce type de parade va par conséquent s'appuyer sur une suite d'approches et d'investigations qui vont, dans un premier temps, permettre de caractériser les aléas d'éboulement et de propagation puis de positionner et dimensionner l'ouvrage :

- ✓ l'étude structurale et géomécanique du site conduit à la localisation et à la qualification des instabilités rocheuses. Celles-ci seront décrites en termes de probabilité de rupture et de délai d'occurrence, pour des volumes donnés (volume au départ et volume après fragmentation). On détermine ainsi le(s) bloc(s) de dimensionnants (blocs de référence) à prendre en compte dans le calcul trajectographique.
- ✓ l'étude de propagation, effectuée sur la base de plans détaillés qui permettront une prise en compte de la morphologie fine du site, va permettre de quantifier les trajectoires des blocs en terme de hauteurs de passage, de vitesse de déplacement et, par conséquent, en terme d'énergie à partir du ou des blocs de référence.
- ✓ le dimensionnement de la hauteur de l'écran va directement résulter de l'étude trajectographique.

- ✓ le dimensionnement énergétique de l'écran va résulter, quant à lui, des résultats de l'étude trajectographique pour les vitesses de d'impact et de ceux de l'étude structurale et géomécanique pour les blocs à prendre en compte pour calculer l'énergie de référence correspondante
- ✓ le dimensionnement doit être complété par une étude géotechnique du site d'implantation afin de définir les possibilités et conditions de réalisation des ancrages (avec, si nécessaire, des essais préalables), au vu des efforts exercés (majorés par un coefficient de sécurité tel qu'indiqué dans la norme)
- ✓ l'implantation de la parade dans le versant va tenir compte du résultat global des l'études géotechnique et trajectographique en privilégiant les zones où les énergies cinétiques sont les plus faibles, où les trajectoires sont compatibles avec la hauteur d'interception de l'ouvrage, où l'extension de la protection peut être optimisée, où l'ouvrage peut être masqué pour limiter l'impact visuel, etc.

3.2. Construction des écrans

Le montage des ouvrages interviendra bien entendu après que les travaux de purge éventuels ainsi que toutes les actions qui pourraient conduire à leur détérioration prématurée aient été réalisés.

Un élagage minimal est indispensable avant l'établissement des structures ainsi que pour la livraison des matériels sur place qui requiert souvent l'usage d'un hélicoptère. Les zones déboisées seront réduites autant que possible pour limiter l'impact visuel des ouvrages finis.

Les écrans pare-blocs sont des ouvrages qui sont confectionnés, pour l'essentiel, en usine sous forme de kits prêts à monter. Le travail sur le terrain consistera à assembler les différents constituants aux emplacements prévus par l'étude et à assurer leur liaison au sol par divers types d'ancrages. Le type d'ancrage requis pour la liaison ouvrage / sol va dépendre de la nature du substratum rencontré ainsi que de l'intensité des efforts transmis par les haubans à cet ancrage :

- ✓ Dans les sols meubles, sous sollicitation modérée (≤ 200 kN environ), l'amarrage pourra se faire sur des pieux explosés[3].
- ✓ Dans les mêmes matériaux, mais sous sollicitation supérieure, on aura recours à mes micro-pieux[4] dont le dimensionnement sera fonction des efforts qui peuvent y être appliqués.
- ✓ En milieu rocheux, on aura recours à des ancrages passifs[5] avec des barres d'acier dont le diamètre sera adapté aux sollicitations attendues.
- ✓ La flexibilité jouant un rôle crucial dans les écrans déformables de filets, la Suisse préconise la réalisation d'ancrages à câble spiral antichoc. Ce type d'ancrage est capable de transmettre les forces sans abaissement de la limite de rupture lorsque la direction de traction et l'axe de forage ne sont pas colinéaires (angle maximal: 30°).

[3] Pieux explosé : tube métallique affaibli en son extrémité inférieure, mis en place dans le sol à l'intérieur d'un forage et dans lequel on fait exploser une charge d'explosif destinée à créer un bulbe par compaction des matériaux périphériques. La barre métallique d'ancrage est alors scellée dans le pieu avec un produit adapté. Sous sollicitation, la traction exercée en tête d'ancrage est transmise au niveau du bulbe profond qui mobilise alors un cône de matériaux qui s'oppose à cette force.

[4] Micro-pieux : cylindre de mortier mis en place dans un forage de diamètre adapté dans lequel sera insérée une barre d'ancrage en acier. La réaction à l'effort de traction exercé sur la tête d'ancrage sera assurée par le frottement continu du cylindre de béton sur les matériaux encaissants.

[5] Ancrage passif : barre d'acier scellée directement dans un trou de diamètre réduit, foré au rocher, sans mise en tension préalable de la barre.

Comme il l'a déjà été dit précédemment, un des points cruciaux pour la qualité finale de l'ouvrage est la qualité des assemblages réalisés sur site. Il est donc rappelé que tous les serre-câbles de liaison (sur site comme en atelier) devront impérativement être serrées à la clé dynamométrique. Une attention particulière doit par ailleurs être portée à la qualité de réalisation des ancrages (avec, le cas échéant, essais de convenance et toujours essais de contrôle et dossier de recollement).

3.3. Coûts

En France, il se pose annuellement environ 2 à 3000 mètres d'écrans pare-blocs de capacité ≥ 500 kJ, tous maîtres d'ouvrages confondus. Le prix de ces ouvrages est estimé globalement au mètre linéaire fourni et posé, y compris le doublage par un filtre grillagé. Les prix figurant dans le tableau ci-dessous correspondent au marché 2005 et varient en fonction des fabricants, du modèle de la gamme, des circonstances économiques et des spécificités de certains sites.

Classe d'énergie	1 (12.5)	2 (50)	3 (200)	4 (500)	5 (1000)	6 (1500)	7 (2000)	8 (3000)	9 (5000)
Prix minimum (€)	140	175	230	300	400	600	600	620	1000
Prix maximum (€)	180	230	370	400	600	700	950	1000	1600

Tableau 5.3.3 : coût au mètre-linéaire d'un écran selon la classe d'énergie (en France,selon NF P 95-308)

En Suisse :
Actuellement les prix des filets Geobrugg (fourniture + pose; Hauteur 4 m) s'articulent comme suit :

- jusqu'à 1500 kJ : CHF 2000 /ml (env 1300 €);
- 2000 kJ : CHF 2500 à 3500 / ml (1600 - 2300 €);
- 3000 KJ : env. CHF 5000 / ml (3300 €).

En Vallée d'Aoste, les prix courants varient en fonction des fabricants, du modèle de la gamme, des circonstances économiques et des spécificités de certains sites. En particulier, les prix varient de 150 €/m^2 pour les classes d'énergie jusqu'à 750 kJ (soit environ 525€ par mètre linéaire pour un ouvrage haut de 3.50m) à 250 €/m^2 pour les écrans pare-blocs déformables 3000 kJ (soit environ 1250 € par mètre linéaire pour un ouvrage haut de 5.00m).

4. ENTRETIEN

Les premiers ouvrages pare-blocs déformables ont été posés en France dès le milieu des années 1970. La capacité maximale était alors de 900 kJ. Moyennant le remplacement de certaines pièces sensibles à la corrosion telles que les pièces fusibles telles qu'elles étaient préconisées à l'époque, certains de ces ouvrages peu sollicités sont encore en service actuellement.
Hormis les dépassements de capacité pour laquelle l'ouvrage est dimensionné, les problèmes d'alignement des câbles de frein et les problèmes spécifiques aux serre-câbles (problèmes soulignés précédemment et résolus actuellement), le parc d'ouvrages donne globalement satisfaction. Des adaptations sont localement réalisées en fonction des événements qui se produisent et des avancées technologiques (maintenance améliorative…).

Tous ces ouvrages étant composés de matériaux ferreux, leur entretien principal va s'orienter vers une limitation ou une interdiction de la corrosion. Cette protection va être mise en œuvre dès le stade de la fabrication en usine. Il existe sur le marché une protection par galvanisation alumino-zinguée (avec ajout de quelques p.p.m. de terres rares ou mischmetal) qui assure une protection contre la corrosion encore supérieure à celle de la galvanisation à chaud (zinc fondu). Il faut signaler que la protection par dépôt électrolytique de zinc (zingage) n'assure pas une protection

suffisante pour certaines pièces, telles que les serre-câbles par exemple, en raison de l'épaisseur réduite de zinc. La galvanisation alumino-zinguée est disponible pour les fils constituant les anneaux des filets. La galvanisation à chaud est disponible pour les serre-câbles et pour les câbles.

L'entretien sur site nécessite généralement son débroussaillement pour permettre l'accès et l'observation visuelle des différents organes constitutifs des filets ainsi que des ancrages ; une attention particulière sera portée à la protection des têtes d'ancrages et à la surveillance des points sensibles qui seront, si besoin, traités ou changés. Périodiquement, le serrage des serre-câbles au niveau des liaisons de câbles sera vérifié.
L'environnement immédiat de l'ouvrage sera suivi afin de s'assurer qu'une évolution intempestive n'a pas modifié la géométrie de l'écran par exemple ou affaibli ses capacités.
Ce diagnostic sera périodiquement complété par un examen des zones de départ, voire du versant (en cas de création de pistes par exemple), pour s'assurer que l'on est toujours dans le scénario de dimensionnement initial.
Après chaque événement relevé, un diagnostic de l'ouvrage doit être fait afin de préciser le niveau de sollicitation exercé et, le cas échéant, les mesures correctives ou amélioratives à apporter.

5. EXEMPLES

En France, les écrans de filets pare-blocs représentent une des parades les plus usitées Cet état de fait tient à l'aspect linéaire de la protection qui permet de traiter de grandes zones pour un coût acceptable et des capacités intéressantes. La discrétion de l'ouvrage, dans une certaine mesure et sous certaines conditions, permet des implantations qui restent relativement discrètes, même en zone urbaine. Ainsi, en 2004, plusieurs centaines de mètres d'écrans classe 7 (selon la norme NF P 95-308) ont été installées dans la ville de Besançon (France), sous un édifice classé du 17ème siècle, pour la protection d'une voie ferrée et des habitations situées en pied de versant. Cette réalisation a été possible grâce à un élagage réduit des zones boisées et à l'utilisation de matériels camouflés par des peintures de couleur neutre. En 2005, la protection a été complétée par le traitement actif des compartiments dont l'éboulement pourrait produire des éléments qui dépasseraient les capacités d'arrêt des écrans de filets.

Chaque année, plusieurs kilomètres d'écrans sont installés dans les versants qui dominent, des routes, des voies de chemin de fer ou d'autres infrastructures plus ponctuelles ainsi que des zones urbanisées. Il convient toutefois de signaler que l'évolution de la jurisprudence apparaît aujourd'hui particulièrement exigeante pour la protection des lieux habités et de leurs espaces de vie attenants ; aussi, les filets ne sont utilisés pour la protection de sites déjà urbanisés – et en aucun cas, pour des sites à urbaniser - que s'ils offrent un niveau de protection satisfaisant (par exemple, en cas de chutes de blocs de dimension importante : absence d'autres solutions offrant une marge de sécurité plus élevée, telles que merlons ; possibilité de traitement complémentaire de la zone de départ ; non justification d'un recours à l'expropriation ou à l'acquisition amiable).

5.1. Sortie nord de la ville de Saint Maurice, commune de Saint Maurice, Valais.

Pour protéger la zone à bâtir de la ville de Saint Maurice et la route cantonale, un écran de filets déformable de haute énergie a été érigé en 2004 sur une vire surplombant la sortie nord de la localité. Cet ouvrage de 4 m de haut se répartit sur trois rangées pour une longueur totale de 250 m. L'énergie d'absorption est de 1500 kJ. Il a été complété par un second de 120 m de long et de 2m de haut, placé au-dessous dans la paroi rocheuse. La capacité d'absorption de ce deuxième écran est de 150 kJ

Photo 5.3.28: Filets pare-pierres à haute énergie (1500 kJ) au dessus de l'Abbaye de Saint Maurice. Les tubes sur câble de haubanage servent de frein.

5.2. Route romaine des Gaulis, commune de Donnas, vallée d'Aoste.

Pour protéger la route romaine des Gaulis et sécuriser la RN 26 de la Vallée d'Aoste, un écran de filet déformable de haute énergie a été mis en place en 2005 sur une vire surplombant les deux routes dans la commune de Donnas. Cet ouvrage de 5 m de hauteur (photos 5.3.29 et 5.3.30), ayant une énergie d'absorption de 3000 kJ, a été disposé sur quatre rangées pour une longueur totale de 180 m. L'intervention a été complétée avec la mise en place :

- d'un écran de filet déformable de 2000 kJ disposé sur cinq rangées pour une longueur totale de 334 m, au-dessus de l'écran de 3000 kJ ;
- d'un placage de 777 m^2 de filets;
- d'ancrages pour une longueur totale des barres de 556 m.

A conclusion des travaux, à peu près de 2600 m^2 d'écran de filet déformable 2000 et 3000 kJ ont été mis en place.
Le coût total de l'intervention a été d'environ 1.8 Million d'euros.

Photo 5.3.29. Filets pare-pierres à haute énergie (3000 kJ) au-dessus de la route romaine des Gaulis.

Photo 5.3.30. Vue de détail du filet pare-pierres à haute énergie (3000 kJ). A noter les dispositifs de freinage.

6. BIBLIOGRAPHIE - REFERENCES

Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (APAT, 2003): " *Atlante delle opere di sistemazione dei versanti* ". Manuali e linee guida 10/2002, pp 76-82.

Collectif (mai 2004), Guide technique : Protection contre les risques naturels – Ancrages passifs en montagne : conception, réalisation, contrôle. MEDD, CEBTP et Cemagref. 146 p.

Ente Nazionale per le Strade - Gruppo Tecnico per la Sicurezza Stradale (2001) - " *La protezione del corpo stradale contro la caduta massi*". ANAS.

Gerber, W., 2001. Directive sur l'homologation des filets de protection contre les chutes de pierre. L'environnement pratique. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Institut fédéral de recherche WSL. Berne, 39 p.

Guillemin P., Pathologie et maintenance des ouvrages de protection contre les éboulements rocheux – Guide technique à paraître 2006.

Norme française NF P 95-301 (1994) Equipement de protection contre les avalanches – Ancrages passifs ponctuels en sol meuble – Méthode d'essais d'arrachement

Norme française NF P 95-308 (1996) Equipement de protection contre les avalanches – Ecrans de filets

Liste des prix de la Région Autonome Vallée d'Aoste, dernière mise à jour janvier 2006.

Parades contre les instabilités rocheuses – Collection Environnement / Les risques naturels - Editions du LCPC – ISSN 1151-1516

Paronuzzi P. & Coccolo A. (1995): *"Crollo di progetto e affidabilità delle barriere paramassi"*. GEAM, **86**, pp. 147-154.

Peila D., Pelizza S., Sassudelli F. (1995): *"Prove in scala reale su barriere paramassi deformabili a rete"*. GEAM, **86**, pp. 155-163.

Peila D. & Pelizza S. (1998): *"Linee guida per la classificazione e la certificazione di comportamento di barriere paramassi a rete"*. Geoingegneria Ambientale e Mineraria, **94**, pp. 197-200, GEAM, Torino.

Parade 4

Grillages ou filets pendus

1. DESCRIPTION

1.1. Objectif

Les grillages ou filets pendus sont des écrans passifs. Ils sont constitués par une natte amarrée en tête de falaise ou quelques mètres en retrait de celle-ci et suspendue contre la paroi. Son rôle est de dévier les blocs se détachant directement de la paroi ou en amont de celle-ci et de les guider le long de la falaise. Les blocs, qui ne peuvent ni prendre de la vitesse ni rebondir, sont collectés au bas de la paroi. Le type de natte (grillage ou filet) est choisi en fonction de la taille des blocs: les grillages permettent de guider des pierres (jusqu'à 1 m^3), alors que les filets sont utilisés pour des blocs de volume plus important (jusqu'à 5 m^3). Ces types de protection peuvent également être utilisés provisoirement lors de minage pour recouvrir les blocs et éviter les projections.

1.2. Principe

La natte est suspendue directement sur la paroi ou au moyen d'une structure porteuse. Elle joue le rôle de déflecteur: le frottement des blocs contre elle contribue à dissiper leur énergie cinétique. Ils sont ainsi stoppés le long de la paroi, ou collectés au bas de celle-ci.

1.3. Description technique

Deux variantes sont possibles, en fonction de la source des blocs:

- Le grillage ou filet pendu simple est amarré en tête de paroi et pendu le long de celle-ci. Il sert à dévier les blocs qui se détachent de la paroi elle-même.
- Dans le cas du grillage ou du filet pendu sur poteau, la nappe est éloignée de la tête de la paroi grâce à des poteaux. Les blocs se détachant à l'amont de la falaise équipée sont ainsi également déviés. Les poteaux peuvent avoir une hauteur variable et être haubanés ou non. Ils sont reliés par un câble sur lequel est fixé la nappe.

Les autres éléments du dispositif sont identiques, quelle que soit la variante choisie:

- Les nattes sont fixées sur un câble porteur reliant les ancrages situés dans la partie supérieure de la paroi. Les ancrages sont constitués soit par des barres d'acier scellées au rocher, soit par des pieux explosés en terrain meuble. Des ancrages de rappel, également reliés par des câbles lâches verticaux (les câbles horizontaux empêchent le passage des blocs), assurent le placage et empêchent le filet de s'éloigner de la paroi.
- La natte elle-même est constituée de filets ou de grillages métalliques simple ou double torsion, voire de filets PVC.
- En pied, la natte est soit laissée libre, soit lestée (par exemple, à l'aide de plots en béton ou de barres métalliques), soit encore maintenue par un câble horizontal amovible ancré de façon plus ou moins lâche.

2. DOMAINE D'UTILISATION

2.1. Performances

Les grillages pendus permettent de guider des pierres (volume < 1 m^3) qui tombent de manière récurrente, principalement sous l'action de l'altération météorique (fortes précipitations, cycles de gel-dégel). Les filets peuvent stopper des blocs plus gros (volume < 5 m^3). Les nattes

peuvent être posées sur tous les types de pentes. Néanmoins, des ancrages de rappel reliés par les câbles verticaux doivent être réalisés sur des falaises de grande hauteur. Cette méthode comporte plusieurs limites:

- Le grillage peut être arraché par des blocs de volume important (> 1 m^3).
- Contrairement au filets ou grillages plaqués, le grillage pendu n'assure pas la stabilisation de la paroi (**Parade 11 "filets ou grillages plaqués"**).

Il est indispensable de réaliser une fosse à l'aval des nattes qui ne sont pas plaquées. Si la place à disposition est insuffisante, la natte doit être plaquée au pied de la paroi au moyen de câbles. Il faut néanmoins relever que dans ce cas, les risques de formation de "poches" de matériel sont plus importants.

D'autre part, les accumulations de glace peuvent détériorer les grillages lors de leur chute. Comme les périodes de gel-dégel sont celles qui sollicitent le plus les nattes, les ancrages doivent être dimensionnés en conséquence. De plus, une vigilance accrue doit être de rigueur lors de ces périodes. Les nattes endommagées doivent rapidement être réparées.
D'une manière générale, les possibilités de rupture de l'ensemble du dispositif doivent être réduites par l'utilisation de filets à double torsion ou de parties fusibles.

2.2. Techniques associées

Plusieurs techniques peuvent être associées:

- La réalisation d'une fosse au pied de la paroi est indispensable si le filet n'est pas plaqué (**Parade 1 "Digues et merlons"**). L'efficacité de cette fosse peut au besoin être améliorée par la construction d'écrans en pied de talus (Parades **2a**, **2b** et **3**).
- Une purge (pour les éléments de faible volume), ainsi que l'ancrage ou le soutènement (pour les volumes plus élevés) des masses les plus instables doit s'effectuer avant la pose de la natte.

3. REALISATION

3.1. Conception

La conception doit s'appuyer sur une étude de la fracturation et de la blocométrie, effectuée par un géologue. Ces informations, liées à la configuration locale du terrain, dicteront le choix:

- Du type de natte (filet ou grillage) et de ses caractéristiques (type et taille de la maille).
- Du dimensionnement des ancrages nécessaires. Ceux-ci dépendent également du poids du filet. Des dispositifs complexes peuvent être envisagés (per exemples, câbles de renvoi).
- Le type d'infrastructure au pied de la natte (fosse de réception, …).

De même, une attention particulière doit être portée au terrain dans lequel seront mis les ancrages.

3.2. Mise en œuvre

La mise en œuvre doit être réalisée par une entreprise spécialisée dans les travaux acrobatiques. Elle débute par la purge et le débroussaillage de la zone à recouvrir. Cette opération a pour buts à la fois de sécuriser le chantier et d'éliminer les blocs a priori instables qui pourraient détériorer la natte.

Il s'agit ensuite de mettre en place le câble porteur, retenu par des ancrages passifs. La natte est ensuite attachée au câble porteur, puis déroulée le long de la paroi. En fonction du type de filet retenu, celui-ci peut être déroulé au plat, puis accroché au câble porteur. Cette opération nécessite en général le recours à un treuil ou à un hélicoptère. Si la hauteur de la falaise dépasse 40 m, il est en général nécessaire de mettre en place des câbles verticaux fixés à des ancrages de rappel. Enfin, les infrastructures du pied du filet doivent être construites (piège à blocs, lestage ou pose d'un câble plaquant le filet à la base de la paroi).

3.3. Eléments de coût

Les coûts peuvent se décomposer de la manière suivante:

- Travaux préparatoires (purge, débroussaillage)
- Fourniture et pose
  - Grillage
  - Câble
  - Ancrages
  - Poteaux de support

4. ENTRETIEN

Les travaux d'entretien comprennent:

- La vidange des poches d'accumulation situées au pied du talus ou dans le talus lui-même, afin d'éviter toute mise en tension du grillage. Cette opération est facilitée si les câbles de rappel peuvent facilement être détendus.
- Le dégagement de la végétation, qui empêche les inspections visuelles et peuvent provoquer une mise en tension de l'ouvrage.
- La réparation des déchirures causées par les blocs de plus grand volume.
- La vidange des poches.

5. EXEMPLES

5.1. Route Martigny-Grand Saint Bernard, commune de Sembrancher, Valais :

Après l'écrasement de la galerie des Trappistes par 600 m3 de roche, en novembre 2001 sur la route Martigny - Grand Saint Bernard, des travaux d'urgence ont été entrepris pour rétablir la circulation et sécuriser la rénovation de l'ouvrage. Parmi ceux- ci, la pose de 600 m^2 de treillis double torsion suspendus sur la niche d'arrachement, a permis de canaliser la chute des blocs à l'amont d'un écran de filets pare-pierres de moyenne énergie (photo 5.4.1).

5.2. Zone à bâtir de Saint Maurice, commune de Saint Maurice, Valais :

Des treillis métalliques double torsion et des filets PVC ont été utilisés dans la zone à bâtir de Saint Maurice pour limiter les projections dues au minage de 60 m3 de roche. Le filet métallique a été posé en recouvrement sur le bloc, par dessus un géotextile et le filet PVC tendu entre deux poteaux devant la façade du bâtiment le plus proche (photos 5.4.2 et 5.4.3).

6. BIBLIOGRAPHIE

- Brawner, C.O., 1994. Rockfall hazard mitigation methods, NHI course 13219, Participants workbook.
- Willie, D.C. and Norrish, N.I., 1996. Stabilization of rock slopes. In: A.K. Turner and R.L. Schuster (Editors), Landslides, Investigation and Mitigation. National Academy Press, Washington, D.C., pp. 474-504.

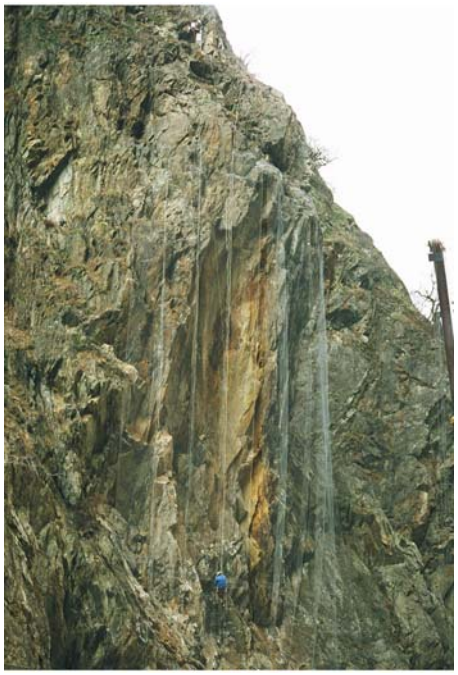


Photo 5.4.1: Treillis métalliques suspendus placés sur la niche d'arrachement de l'éboulement de novembre 2001 sur la galerie des Trappistes (Route Martigny-Grand Saint Bernard) pour canaliser les blocs à l'amont d'un filets pare-pierres.

Photo 5.4.2: Treillis métallique et géotextile de recouvrement pour limiter les projections dues au minage de 60 m^3de roche dans la zone à bâtir de Saint Maurice.

Photo5.4. 3: Filets PVC contre les projections dues au minage (commune de Saint Maurice)

Parade 5

GALERIE DE PROTECTION

1. Description

Les galeries de protection sont une parade qui intervient principalement sur les axes de circulation routiers ou ferroviaires. Ce sont des constructions linaires, de largeurs modérées (6 à 12 ou 15 m) et d'assez grandes longueurs (50, 100, 500 m), constituant en soi une toiture sur les objets à protéger.

1.1. Objectif

La galerie est une protection passive destinée soit à absorber des impacts, soit à dévier par rebond les trajectoires de pierres ou de blocs (Figure 5.5. 1)

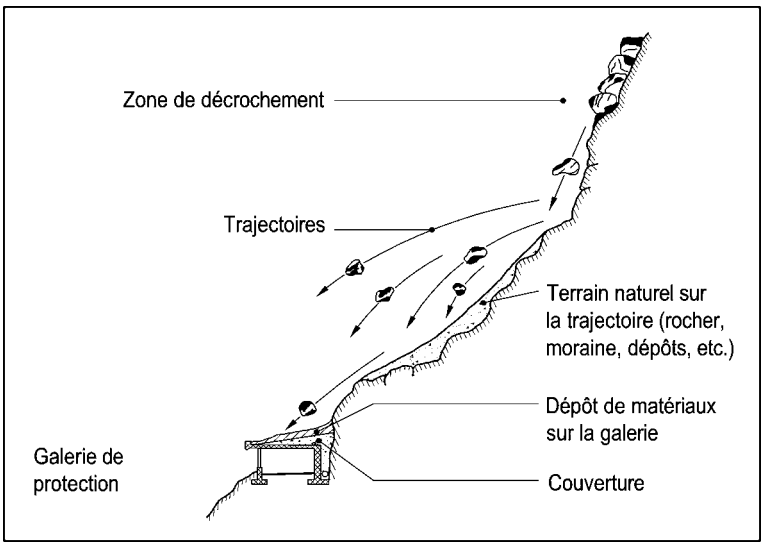


Figure 5.5. 1: Exposition d'une galerie de protection et terminologie générale

1.2. Principe

Physiquement, les galeries de protection contre les chutes de pierres doivent reprendre les efforts d'impulsion induits par les impacts de différentes masses à différentes vitesses. Le fonctionnement mécanique est basé sur deux principes distincts :

- tout d'abord provoquer un amortissement direct avec une dissipation d'énergie par une couche de protection supérieure compressible et/ou plastifiable pour augmenter les durées et réduire les forces d'impact (choc mou)
- obtenir ensuite un pseudo-amortissement dynamique par une structure élasto-plastique rigide mais ductile ayant une période propre beaucoup plus élevée que la durée d'impact.

Avec ces deux mécanismes, on vise à amortir au mieux l'effet d'impact pour minimiser les efforts internes induits dans la structure, donc ses dimensions, donc ses coûts.

1.3. Description technique

A) Galeries en cadre

Le schéma de principe des galeries usuelles pouvant résister à des impacts d'intensité moyenne à élevée (cf. ch. 2.1) est donné à la Figure 5.5. 2.

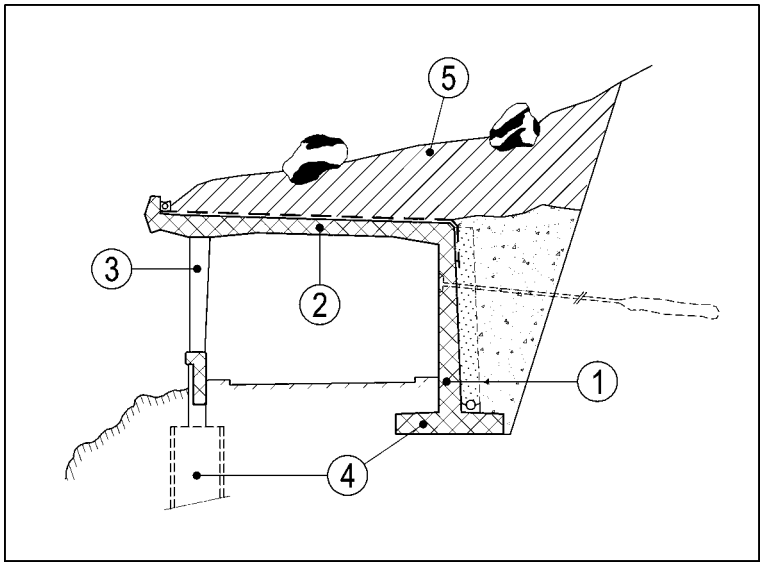


Figure 5.5. 2 Schéma de principe des galeries usuelles LEGENDE : ① Mur amont ép. 0.40 m à 0.70 m, év. ancré, avec drainage arrière - ② Dalle de toiture en béton armé, avec étanchéité, ép. 0.40 m à 1.0 m, avec év. sommier noyé sur les piliers - ③ Piliers aval, 50 x 50 à 80 x 80, distants de 5 m à 8 m, avec parapet en pied - ④ Fondations, en général superficielles à l'amont, sur puits ou sur pieux à l'aval - ⑤ Couche de couverture ép. 0.50 m à 1.50 m, en matériaux calibrés, avec drainage vers bord aval

Le système transversal forme un cadre monolithique résistant aux efforts horizontaux. Le cas échéant, il peut être ancré dans le versant par des tirants précontraints.

Les murs et dalles sont en béton armé; la précontrainte n'est pas recommandée. La dalle peut aussi être constituée d'éléments préfabriqués ou de poutres et sommiers, mais un effet bi-dimensionnel est impérativement à rechercher, et les joints transversaux sont à éviter.

Les matériaux de couvertures, en principe des graves, doivent être le moins cohésifs possibles et d'une granulométrie maximum réduite. La référence [1] donne plus de détail sur la conception et les équipements nécessaires.

B) Galeries en console ou casquette

Une conception différente en console ou casquette peut être utilisée en présence d'impacts d'une intensité réduite (cf. ch. 2.1) (Figure 5.5. 3).

Ce système s'applique en particulier dans des falaises abruptes surplombant la voie de circulation.

Les sommiers, dallettes et butons peuvent être en partie ou totalement préfabriqués. Les sommiers sont à ancrer fortement par des tirants précontraints permanents indispensables à l'équilibre même sous poids-mort.

Les éléments de couverture sont de préférence des composites compressibles artificiels.

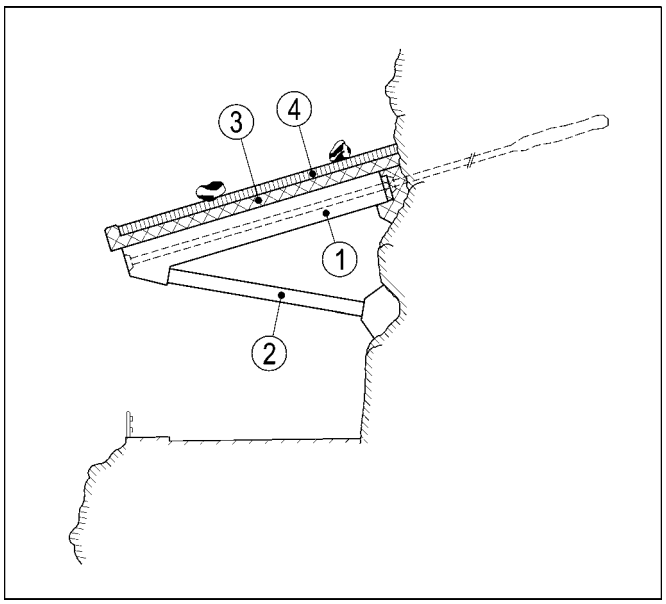


Figure 5.5. 3 Galeries en console ou casquette LEGENDE : ① Sommiers ancrés en rocher, espacement 2.0 m à 4.0 m - ② Butons de compression - ③ Dallettes de couverture - ④ Couche de protection amortissante.

Une variante de galerie en console a été mise à point et brevetée par la société Tensiter® (www.tensiter.it) de Turin et utilisée, pour la première fois, dans le cadre du projet d'aménagement de la route nationale n.45 bis "Gardesana Occidentale" (commune de Trento), endommagée et fermée au trafic suite à une importante chute de blocs survenue en février 1999.

Cette galerie se compose de trois éléments préfabriqués en béton (Figure 5.5. 4), liés entre eux par des anneaux en acier. La construction est réalisée à l'aide d'une poutre de répartition en acier qui permet de garantir:

- La mise en place des éléments préfabriqués selon les angles désirés.
- Le soutien provisoire de la structure pendant la phase d'assemblage et son parfait alignement après sa construction.

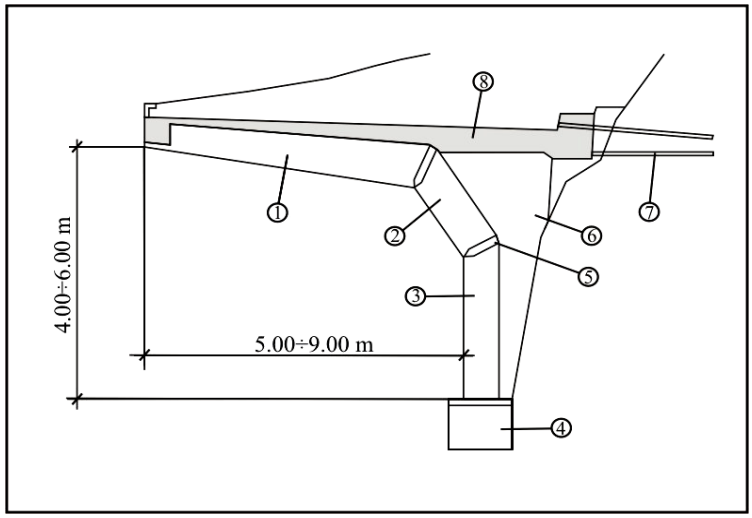


Figure 5.5. 4 / Variante de galerie en console de la société Tensiter LEGENDE : Eléments composant la structure préfabriquée : ① Console - ② «oblique»- ③ Piédroit. ④ Fondation en béton armé - ⑤ Scellement - ⑥ Matériel compacté - ⑦ Tirants du type Diwydag - ⑧ Dallette en béton armé.

La mise en place des éléments préfabriqués est précédée:

- Du déblaiement des matériaux éboulés et le profilage du rocher en amont de la route afin de permettre la pose du piédroit.

- De la réalisation de la fondation en béton armé, sur laquelle sera posée la structure préfabriquée.
- De la réalisation des tirants horizontaux en barre du type Diwydag avec une tension de 90 T.
- De la réalisation d'une poutre de répartition en acier, ancrée aux tirants, pour l'amarrage des éléments préfabriqués.

Les travaux de finition comprennent:

- Le remplissage de l'espace entre la structure préfabriquée et la paroi rocheuse avec du matériel sablo-graveleux compacté.
- Le forage d'une deuxième série de tirants pour l'ancrage définitif de la structure.
- La réalisation et l'imperméabilisation de la dallette en béton armé, qui assure la liaison des tirants et des éléments préfabriqués.
- La réalisation de la couverture de protection de la dallette.

C) Galerie en voûte

En prolongation de tunnels dans les zones de portails les structures en voûtes peuvent être favorables (Figure 5.5. 5).

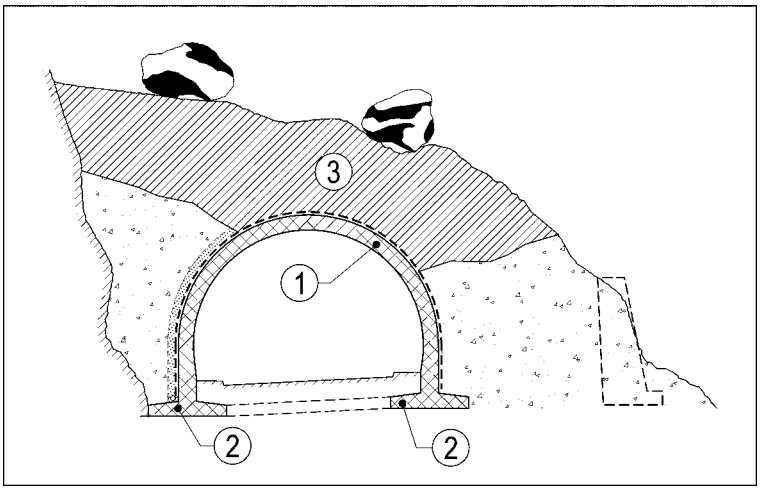


Figure 5.5. 5 Galerie en voûte LEGENDE : ① Voûte pleine en béton armé avec étanchéité ép. 0.40 à 0.90 m. - ② Fondations, en général sur semelles filantes, év. liées par des sous-tirants - ③ Couche de couverture, ép. 1.50 à 3.0 m en matériaux calibrés

Les voûtes sont en béton armé et peuvent en principe être exécutées sur les mêmes coffrages que le revêtement du tunnel.

Les sous-tirants sont en principe passifs et enrobés de béton.

Le remblai doit être épais afin de mobiliser principalement le principe d'amortissement direct (cf. ch. 1.2), car la structure en voûte n'est pas particulièrement favorable pour résister aux charges concentrées. Il ne doit pas être trop fortement asymétrique.

Ce système est favorable lorsque des éboulement ou effondrement de parois sont à prévoir. La tenue du remblai aval peut nécessiter en plus un mur de soutènement partiel ou sur toute la hauteur.

D) Variantes

De multiples variantes peuvent être envisagées sur ces systèmes de base en veillant toutefois à se conformer aux principes énoncés sous 1.2. En particulier les toitures à béton apparent ou très faible couverture, inférieure à 50 cm, conduisent à des chocs durs et ne paraissent pas appropriées.

2. Domaine d'utilisation

Les galeries représentent une parade favorable dans les situations suivantes:

- Lorsque le tracé de la voie de circulation ne peut pas être déplacé hors des zones de danger et que l'espace entre la pente ou la falaise à l'amont est réduit.
- En présence d'aléas diffus et d'aléas fréquents d'intensité faible ou modérée (voir ch. 2.1).
- Le plus souvent elles ont un rôle combiné avec une protection contre les avalanches ou les chutes de glaçons, ou aussi d'accumulation importante régulière de neige météoritique en haute altitude.
- Elles se justifient particulièrement sur des voies de circulations importantes et à fort trafic.

2.1. Performances

Les galeries de protection offrent une excellente protection pour les aléas d'intensités faibles et moyennes.

Les intensités sont à caractériser par le couple "masse-vitesse", mais en aucun cas par le paramètre "énergie" usuellement utilisé pour les autres parades contre les chutes de pierres. Le paramètre présentant la meilleure corrélation entre les données des aléas et les résistances des galeries est le Facteur d'Intensité "FI" défini comme:

$$FI = \frac{m \cdot v_z}{R}$$

avec m : masse du bloc en [to]
v_z : vitesse verticale d'impact en [m/s]
R : rayon de la sphère de masse équivalente au bloc réel

Ce paramètre résulte de la relation semi-empirique déterminant les forces d'impact selon [2]. Il est impérativement à utiliser en lieu et place de l'énergie, qui elle a trop peu de corrélation avec les forces d'impacts induites par des blocs de différentes tailles et de différentes vitesses. Les graphiques de la Figure 5.5. 6 caractérisent les performances des galeries usuelles:

- Chaque courbe délimite le domaine des "masses-vitesses" absorbables par une galerie donnée. Les aléas (m;v) situés au-dessus de la courbe dépassent la capacité de résistance de la galerie; les aléas (m;v) situés au-dessous de la courbe sont absorbés par la parade.
- Chaque courbe caractérise une galerie donnée, selon la force d'impact "F_z" qu'elle peut absorber avec ses résistances statiques internes, et selon l'épaisseur de la couche de couverture "e".
- Chaque courbe est caractérisée mathématiquement par un facteur d'intensité "FI" constant.
- Les zones en trait tillé signifient que la couche de couverture est insuffisante selon [2] pour l'enfoncement prévisible du bloc.

Limites

- Pour les aléas de très grandes intensités, masses de plusieurs dizaines ou centaines de tonnes avec des vitesses de plus de 10 à 20 m/s, la parade "galerie" n'est plus raisonnable tant statiquement et constructivement qu' économiquement.
- La longueur des galeries n'est pas limitée techniquement, mais économiquement les coûts peuvent devenir prohibitifs.

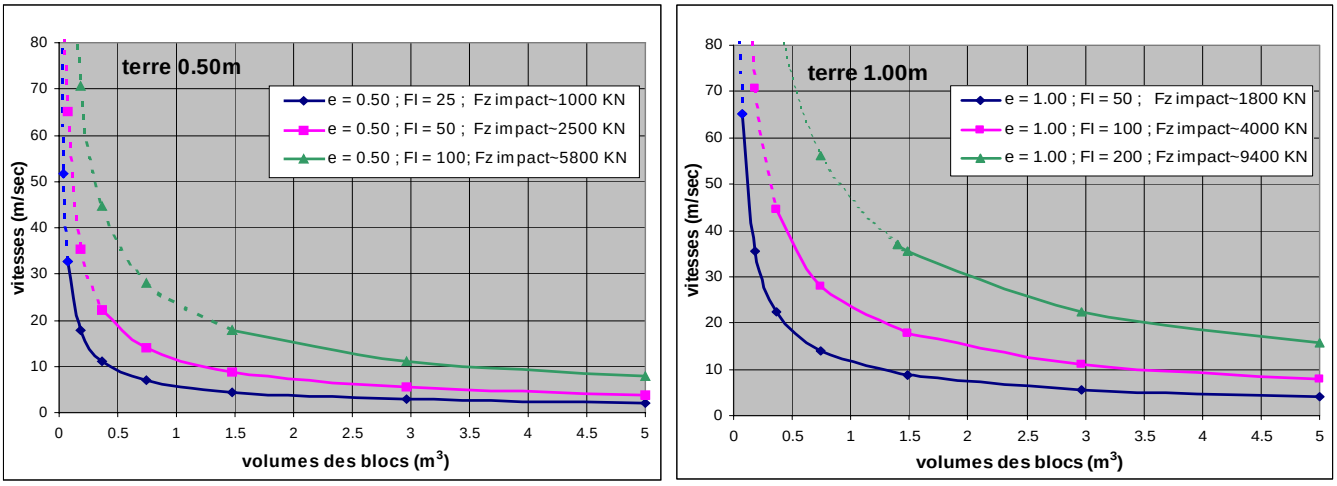


Figure 5.5. 6: Diagrammes définissant les capacités d'absorption des galeries usuelles

Contraintes

- Selon la topographie les fondations peuvent devenir très coûteuses
- Les passages de ruisseaux et torrents sont des points difficiles
- Les excavations nécessaires dans les versants meubles peuvent être critiques pour la stabilité de ces versants
- Les trajectoires par rebonds possibles à l'aval des galeries ne doivent pas mettre en danger d'autres équipements.

2.2. Techniques associées

Dans la plupart des cas le site est complexe et peut générer, à part les chutes de blocs fréquentes, des éboulements plus rares mais de très hautes intensités. La prévention de ces événements nécessite l'utilisation d'autres parades en falaises, allant de la surveillance visuelle ou instrumentée (**Activités 3 et 4**) à la pose de filets (**Parade 3**), aux minages et purges (**Parade 7**), à la consolidation ou à l'ancrage d'instabilités (**Parade 9**).

3. Réalisation

3.1. Conception

Etudes préliminaires nécessaires

- Etude géologique et géomorphologique des falaises et versants, levé structural et identification des aléas. La réf. [3] donne une méthodologie cohérente pour la réalisation de ces études.
- En général études trajectographiques pour déterminer les propagations, les probabilités d'atteinte et les vitesses d'impact. Ces études impliquent un relevé topographique ou photogramétrique du terrain.
- Ev. étude des conditions et actions d'avalanches dans le secteur.
- Etude géologiques des terrains de fondation, position du rocher, caractéristiques des terrains meubles pour définir le type et l'implantation de ces éléments.
- Analyse des terrains meubles susceptibles d'être utilisés comme couche de couverture sur la galerie pour déterminer les M_E, φ, c, et $Ø_{max}$, nécessaires à l'estimation des forces d'impacts selon [2].

Implantation de la parade

- L'implantation est en principe donnée par le tracé routier. De légères adaptations sont parfois possibles pour optimaliser les fondations ou les excavations.
- La question essentielle à répondre est la longueur de la galerie, en fonction des propagations et des probabilités d'atteintes réalistes à prendre en compte.

Dimensionnement

Pour le dimensionnement deux volets distincts sont à considérer, soit tout d'abord le choix de l'aléa de dimensionnement et ensuite le calcul des actions sur la structure:

- La définition de l'aléa de dimensionnement résulte de l'étude géomorphologique. Il est caractérisé par sa masse, sa vitesse (vectorielle) d'impact et sa probabilité d'occurrence. Le choix de l'aléa de dimensionnement devrait être fondé sur une étude de risque spécifique à chaque situation. Des modèles pour la réalisation de telles études sont en cours de développement.
- Calcul des actions sur la structure : de nombreuses méthodes et des approches très différentes ont été utilisées par le passé. Depuis 1998, une directive Suisse [2] donne une relation semi-empirique qui fait référence en la matière et selon laquelle la force d'impact F vaut:

$$F = 2.8 \cdot e^{-0.5} \cdot R^{0.7} \cdot M_E^{0.4} \cdot \mathrm{tg}\ \varphi \cdot \left(\frac{m \cdot v^2}{2}\right)^{0.6}$$

en fonction de l'épaisseur de la couche de couverture "e", du rayon de la sphère équivalente au bloc "R", du module de compressibilité du matériau de couverture "M_E", de l'angle de frottement interne de ce même matériau "φ" ainsi que des masses et vitesses verticales d'impact du bloc.

Pour le dimensionnement la force d'impact F est majorée/minorée par un coefficient "C_K" appelé coefficient de construction pour évaluer une force statique de remplacement Q avec

$$Q = C_K \bullet F$$

Le coefficient de construction constitue une fonction de transfert entre les effets et les résistances dynamiques et les valeurs statiques de dimensionnement correspondantes. Sa valeur est essentiellement dépendante du mode de rupture fragile ou ductile, entre 1, 2 et 0.4.

Avec cette force Q, le dimensionnement de la galerie se déroule selon les règles usuelles de la statique et de la résistance des matériaux.

Il est à relever en sus que la profondeur de pénétration "d" doit être vérifiée selon l'épaisseur de la couche de couverture, et que par ailleurs des efforts négatifs importants de l'ordre de 50 % de F se produisent aussi après un impact, nécessitant une disposition adéquate des appuis.

3.2. Mise en œuvre

La construction de galeries de protection relève des entreprises de génie civil selon leur expérience et leur savoir-faire usuel.

Les travaux principaux à réaliser sont des terrassements, des soutènement de fouille, des fondations spéciales éventuelles, du béton armé et divers équipements.

Dans presque tous les cas, le chantier doit se dérouler en présence du trafic, ce qui constitue une difficulté principale à prendre en compte.

La purge des parois et la protection du site durant le chantier sont des éléments de sécurité essentiels de la mise en œuvre.

La remise en état des lieux, des plantations et un ensemencement adapté au lieu méritent aussi une attention particulière.

3.3. Eléments de coûts

Les galeries de protection sont des ouvrages d'envergure coûteux. Il faut compter en moyenne un prix hors taxe de 16'000 à 20'000 €/m', soit 1.6 à 2 millions €/100 m'.

Dans la vallée d'Aoste, les prix hors taxe sont généralement de 12'000 à 16'000 €/m'.

4. Entretien

Les galeries de protection entrent dans la catégorie des ouvrages d'art et sont à concevoir, surveiller et entretenir comme tels.

Leur durée de vie doit être élevée, conventionnellement de 50 à 100 ans. Leur surveillance et leur entretien sont à planifier et exécuter comme celle des autres ouvrages d'art, selon les règles usuelles en vigueur (pour la Suisse voir [4]).

Des particularités techniques spécifiques à ces ouvrages sont données dans [1]. Pour des galeries existantes, souvent réalisées d'abord pour la protection contre la neige et les avalanches, une première estimation de la capacité de résistance à des chutes de pierres données peut être faite selon la méthodologie donnée dans[5].

Les coûts d'entretien prévisibles sont de l'ordre de 0.5 à 1 % du coût d'investissement à la construction par année.

5. Exemples

5.1. Galerie Gondo (Zusammenschluss) – Route nationale A9 – Simplon, VS, CH

Photo 5.5.1 Galerie Gondo (Zusammenschluss) – Route nationale A9 – Simplon, VS, CH ***Cliquer pour agrandir***

Galerie de 98 m de longueur, construite en 2001-2002 entre deux galeries de protection avalanches déjà existantes.

Caractéristiques et particularités constructives

- Dalle de 0.90 à 1.10 m d'épaisseur en béton armé, sommier noyé en béton précontraint sur les colonnes avales.

- Couverture de matériaux meubles pris sur place de 1.0 à 1.50 m d'épaisseur avec un M_E nominal de 30'000 KN/m^2, un φ de 35° et une granulométrie maximum de 0.10 m.
- La disposition des colonnes aval en V permet de diminuer de moitié le nombre des fondations en puits nécessitées par la topographie et la géologie du site. Elle apporte également un aspect architectural plus dynamique.

Performances

La galerie a été dimensionnée selon [2] pour un événement potentiel de masse 1.4 T avec une vitesse d'impact de 41 m/s sous un angle d'impact de 51° (soit correspondant à une chute libre verticale de 52 m). Le domaine des intensités "masses-vitesses" couvert par ce dimensionnement correspond à celui défini par un facteur d'intensité FI ≅ 100 selon la figue 5 (ch. 2.1), pour un cas normal et un FI ≅ 170 pour un cas accidentel.

5.2. **Galerie du contour Noir –** Route cantonale St-Maurice – Mex, VS, CH

Photo 5.5.2 ***Galerie du contour Noir –*** *Route cantonale St-Maurice – Mex, VS, CH* ***Cliquer pour agrandir***

Couverture d'un lacet sur 120 m de longueur, construite en 1984-1985 au bas d'une falaise de plus de 100 m de hauteur.

Caractéristiques et particularités constructives

- Dalle en béton armé de 50 cm d'épaisseur appuyée sur des piliers et murs en béton armé.
- Couverture de sable, gravier et terre d'une épaisseur totale de 0.40 m, uniforme sur la toiture.
- Piliers écartés de 5.5 m longitudinalement et de env. 8.0 m transversalement.

Performances

La galerie a été dimensionnée pour un événement potentiel de masse 0.2 to avec une vitesse d'impact quasi verticale de 47.5 m/s (correspondant à une chute libre de 115 m). Le domaine des intensités "masses-vitesses" couvert par ce dimensionnement correspond à celui délimité par un facteur d'intensité FI ≅ 37 selon la fig.5 (ch. 2.1) pour un cas normal et un FI ≅ 50 pour un cas accidentel.

Il est remarquable de constater que le dimensionnement de cette galerie, réalisée en 1984-1985 avant l'édition de la directive [2] datant de 1998, correspond assez bien aux exigences actuelles. Selon celles-ci cependant les dispositions pour prévenir le poinçonnement devraient être renforcées et la couche de couverture devrait être légèrement épaissie.

5.3. Galerie de Percelette, commune de Pontboset, vallée d'Aoste.

Suite aux intempéries d'octobre 2000, l'administration communale de Pontboset a décidé de sécuriser la route communale de Percellette à l'aide d'une galerie pare-blocs. Dans un premier moment, les experts mandatés par la commune avaient prévu la mise en œuvre d'une galerie du type Tensiter (voir §1.3 B). Les forages réalisés ensuite ont relevé une mauvaise qualité de la roche qui ne permettais pas la mise en place des tirants pour l'ancrage de la structure. Le projet exécutif a prévu la mise en œuvre d'une galerie en cadre au pied d'une falaise verticale d'environ 30 m de hauteur.

Caractéristiques et particularités constructives

- Dalle en béton armé de 60 cm d'épaisseur appuyée sur des piliers en amont et mur en béton armé en aval.
- Couverture de terrain végétal disposé avec une pente de 30°.
- Piliers circulaires de 60 cm de diamètre, distancés d'environ 4.9 m.

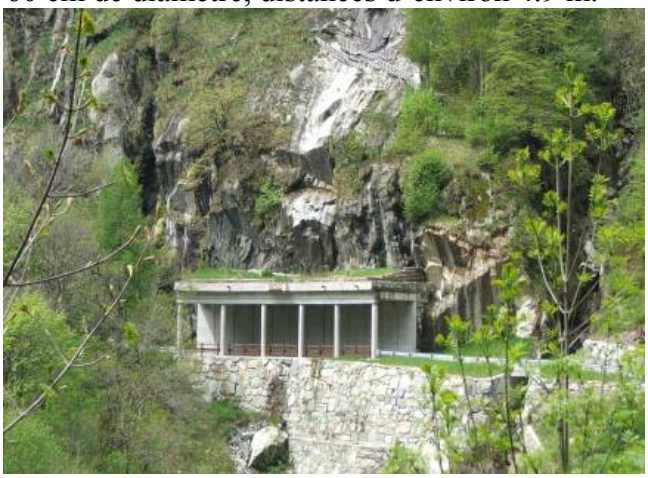


Photo 5.5.3 Galerie de Percelette, commune de Pontboset, vallée d'Aoste **Cliquer pour agrandir**

5.4. RN 26 (Km. 108+350), communes de Sarre – Saint-Pierre, vallée d'Aoste.

Pour éviter les dégâts dus aux chutes de blocs s'écroulant depuis la falaise rocheuse très fracturée surplombant la route nationale, l'ANAS a réalisé une galerie pare-blocs de section rectangulaire, d'environ 160 m de longueur, 7 m de largeur et 4 m de hauteur, comprenant des piliers en béton armé distancés d'environ 5 m.

Photo 5.5.4.Galerie desection rectangulaire sur la RN 26 (Km. 108+350), communes de Sarre – Saint-Pierre, vallée d'Aoste ***Cliquer pour agrandir***

6. Bibliographie – références

[1]* "Projet, construction et entretien des galeries de protection contre les chutes de pierres et les avalanches : Documentation"; Office Fédéral des routes, Direction des travaux CFF, 1998; OFROU, 3003 Berne (CH)

[2]* "Actions sur les galeries de protection contre les chutes de pierres : Directive"; Office Fédéral des routes, Direction des travaux CFF, 1998 (révis. 2006); OFROU, 3003 Berne (CH)

[3] "Etude structurale et géomécanique, et établissement de la carte de danger chutes de pierres et éboulements : Rapport type"; Centre de recherche sur l'environnement alpin, 2004; CREALP, 1951 Sion (CH)

[4]* "Surveillance et entretien des ouvrages d'art des routes nationales : Directive"; Office Fédéral des routes, 2005; OFROU, 3003 Berne (CH)

[5]* "Vérification des galeries existantes, vérification générale : Documentation"; Office Fédéral des routes, 2004; OFROU, 3003 Berne (CH)

[6] Chiaves C.: *"Soluzione innovativa per le gallerie paramassi"*. Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

[7] Montani Stoffel S., Labiouse V. & Descoeudres F.: *"Impatto di blocchi rocciosi su un modello di galleria di protezione caduta massi"*. Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

[8] Ente Nazionale per le Strade - Gruppo Tecnico per la Sicurezza Stradale (2001) – *" La protezione del corpo stradale contro la caduta massi"*. ANAS.

[9] Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (APAT, 2003): *" Atlante delle opere di sistemazione dei versanti"*. Manuali e linee guida 10/2002, pp 90-92.

[10] Martorano L.(2005): *"Sistemazione e rettifica di un tratto della strada statale n. 612 della Val di Cembra con una galleria prefabbricata a sbalzo"*. Geoingegneria Ambientale e Mineraria, 114, pp. 69-74, GEAM, Torino.

* téléchargeable sous : www.astra.admin.ch

Parade 6
Boisement de protection

1. DESCRIPTION

Maintien ou renforcement de la protection naturelle des versants par la gestion durable du couvert végétal, principalement constitué par des arbres, ou éventuellement sa création.

1.1. Objectif

Protection passive ayant pour but :
- de réduire la hauteur de passage, d'augmenter le nombre d'impacts au sol et de réduire l'énergie cinétique des blocs au cours de leur trajectoire, si possible jusqu'à l'arrêt ;
- de retenir les blocs situés dans le versant.

1.2. Principe

Obtenir, dans la zone de propagation des blocs, un grand nombre d'arbres avec des dimensions suffisantes. Les blocs au cours de leur chute rencontrent des arbres ; lors de ces chocs, une partie de l'énergie est dissipée lors de la rupture des fibres au niveau du tronc, lors du cisaillement des racines et lors de l'oscillation de l'arbre (Figure 5.6.1).

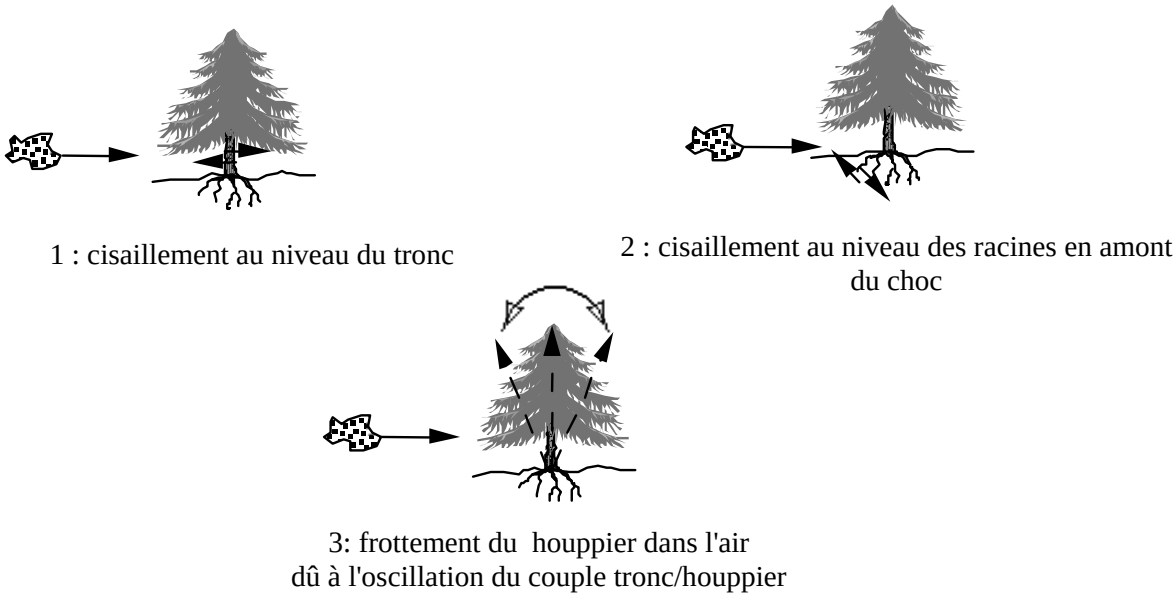


Figure 5.6.1. Schémas des 3 modes de dissipation de l'énergie d'un bloc par un arbre (Cemagref, 1999)

Ces chocs occasionnent une décélération des blocs, avec une diminution de la distance d'arrêt et une diminution des hauteurs de rebonds. Ainsi, les arbres de faibles dimensions présents dans un peuplement peuvent ils être en mesure d'arrêter les blocs ayant été décélérés par les plus gros ; on parle alors d'effet « bourrage »

1.3. Description technique

Aménagement et/ou entretien d'une forêt existante, ou plantation nouvelle.

La forêt doit être, dans les zones de transit et d'arrêt :

- dense : surface terrière élevée (surface cumulée des sections des troncs à 1,30 m de hauteur, en m²/ha) ; valeur minimale préconisée : 25 m²/ha d'arbres de diamètre de 20 cm et plus. Attention : la présence d'arbres de fort diamètre limite celle d'arbres de faible diamètre et peut être ainsi un frein au renouvellement du peuplement et donc à sa stabilité.
- stable (branchage développé) : rapport hauteur totale sur diamètre à 1,30 m inférieur à 65 ; couronne symétrique et peuplement hétérogène (essence, âge, diamètre), ce qui favorise le renouvellement et la permanence dans le temps de l'effet de la forêt.
- si possible, à dominante d'essences feuillues qui, à diamètre égal sont plus résistantes que les essences résineuses.
- avec le haut de la zone boisée le plus proche possible de la zone de départ des blocs.
- avec une épaisseur de la bande boisée suffisante : de l'ordre de 250 m pour des blocs de l'ordre du mètre cube.

2. DOMAINE D'UTILISATION

Le boisement est efficace contre :

- des chutes fréquentes et diffuses de pierres (quelques décimètres cubes),
- des chutes ponctuelles de blocs d'un volume pouvant aller jusqu'à quelques mètres cubes (inférieur à 5), en fonction de l'épaisseur de l'écran forestier (photos 5.6.1 à 5.6.3).

Photo 5.6.1 : Bloc de 0,4 m3 arrêté par une cépée de hêtres

Photo 5.6.2 : Bloc de 1 m3 arrêté par un épicéa de diamètre 50cm

Photo 5.6.3 : Bloc de 5 m3 arrêté par un épicéa de diamètre 60cm (photos Cemagref, F. Berger, 2005)

Cliquer pour agrandir

L'effet du boisement est d'autant plus efficace que la pente est faible (inférieure à 35° environ).

2.1. Performances

Elles sont fonction du potentiel d'impact du bloc avec un arbre et de la capacité de dissipation d'énergie de chacun des arbres constituant l'écran (**Annexe 5.6.1**).

La **protection** est **illusoire** contre :

- des éboulements en masse et en grande masse,
- des blocs très énergétiques (plusieurs mètres cubes, tombant d'une falaise haute) : exemple à Barjac (Lozère), où un bloc de 25 m³ avec une vitesse de l'ordre de 25 m/s a ouvert une tranchée sur 300 m de forêt en étêtant les arbres à 3-4 m de hauteur (photo 5.6.4).

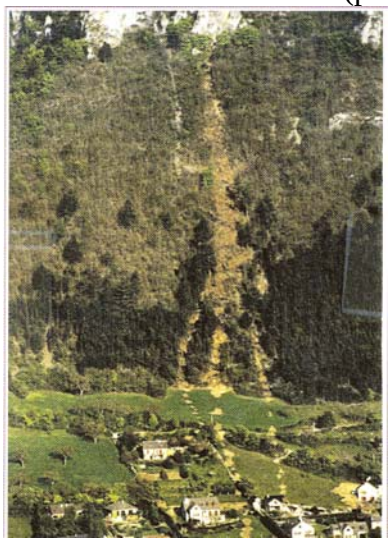


*Photo 5.6.4 : tranchée laissée par les blocs à Barjac (*CETE)

Remarques :

- Dans le cas d'une plantation, l'efficacité est assurée seulement à long terme (plusieurs dizaines d'années selon les essences) ; cette solution est envisageable pour combler des vides en forêt, et/ou en complément d'ouvrages de protection installés dans un premier temps ou éventuellement pour leur substitution à plus long terme.
- Pour les arbres situés dans la zone de départ, l'effet recherché de parade active (voir fiche VG 1) peut devenir défavorable lorsque les plants grandissent : les racines ont tendance à déchausser les blocs en s'insinuant dans les discontinuités du massif (effet de levier).
- Le boisement améliore la stabilité de la pente d'éboulis située au pied des falaises, vis-à-vis de l'érosion et du déchaussement de blocs en équilibre précaire.
- La protection peut disparaître en cas d'**incendie** ; le risque peut même être amplifié du fait des blocs qui étaient arrêtés dans le versant et qui sont susceptibles de se remettre en mouvement (érosion plus active, suppression du support des troncs).

2.2. Techniques associées

Toute parade complémentaire contre les chutes de blocs.

Ecrans à l'aval pour arrêter les blocs que la forêt n'a pu retenir ou, en complément d'écrans, pour se donner une marge de sécurité supplémentaire.

3. REALISATION

Réaliser un diagnostic du risque puis du rôle actuel ou potentiel de la forêt.
Travailler au profit de l'existant avant d'envisager des plantations.

3.1. Conception

Contacter les gestionnaires forestiers locaux qui orienteront vers les essences et les techniques sylvicoles les plus appropriées.
Pour la Suisse, les gestionnaires forestiers utilisent déjà l'ouvrage de référence "Gestion durable des forêts de protection" édité en 2005. Pour la France, un document comparable, le "Guide des sylvicultures de montagne", sera disponible à compter de juin 2006. Ces deux guides ont été présentés et validés lors de sessions de formation sur le terrain organisées dans le cadre du projet INTERREG "Gestion durable des forêts de montagne à enjeux de protection".
Le centre de sylviculture de montagne de Maienfeld en Suisse est à disposition pour l'organisation de telles sessions. En France, c'est l'Office National des Forêts (Direction Territoriale Rhône-Alpes) qui en a la charge.

3.2. Mise en oeuvre

- Sylviculture :
  La pérennité est pratiquement illimitée lorsque la forêt est bien installée et se régénère. La fréquence des chutes de blocs peut toutefois fragiliser la forêt (blessures occasionnées aux arbres lors des impacts, pouvant provoquer une mortalité importante). Si l'activité sylvicole est maintenue, on évitera bien entendu les coupes rases et l'ouverture de bandes de régénération ou de pistes dans la ligne de la plus grande pente.
  On recherchera l'obtention de peuplements irréguliers afin d'assurer une permanence dans le temps de l'effet de la forêt : jardinage par bouquets de structure, d'âge et d'essences différents; pour les structures régulières (taillis, futaie), réalisation de coupes en favorisant soit une approche pied par pied soit par trouées non contiguës n'excédant pas 30 m d'épaisseur dans le sens de la ligne de plus grande pente. Les deux guides cités précédemment présentent dans le détail les interventions sylvicoles à réaliser et ce en fonction des peuplements.
- Création d'un peuplement :
  S'agissant de réalisations en milieu difficile, il est nécessaire d'avoir recours à des spécialistes maîtrisant ces techniques (choix des essences, pépinières et provenances reconnues, techniques de plantation, mesures provisoires de protection, ...).
- Voiries forestières : prendre en compte l'impact éventuel (positif ou négatif) sur la propagation des blocs

3.3. Eléments de coût

On peut l'estimer, dans le cas d'un boisement existant, à partir du surcoût de déficit de gestion ; cette estimation ne peut se faire que localement à partir de différents éléments, tels que accessibilité du massif, desserte existante, prix de vente des bois ... Les Services forestiers concernés disposent des bases de calcul nécessaires pour établir de tels bilans économiques.

4. ENTRETIEN

Il fait partie des opérations normales de sylviculture et doit être planifié à long terme (cf. 3.2). La mise en place de placettes sylvicoles témoins est fortement recommandée et ce afin de bien documenter les interventions et d'en suivre les effets dans le temps (controlling et monitoring).

5. EXEMPLE

Saint-Martin-le-Vinoux (Isère, France) : canton forestier de la Saucisse :
Le boisement préexistant sur le versant (taillis de chênes et parquet de pins noirs adultes proche d'un état critique en terme de stabilité) a été conforté il y a une dizaine d'années pour arrêter les petites pierres et blocs, dans l'espoir que les filets installés alors à l'aval soient moins sollicités : 2500 pins noirs, 1660 robiniers et autres feuillus ont été plantés en bandes (avec un effort d'intégration paysagère) ; malgré les regarnis effectués, les plantations ont beaucoup souffert du fait du gibier, de la sécheresse et de la concurrence de la ronce ... et le résultat escompté est loin d'être atteint. Aujourd'hui, il est envisagé , outre le besoin de comprendre pourquoi la plantation initiale qui a donné le parquet de pins adultes a si bien réussi, de travailler au profit des plants qui ont survécu ainsi qu'à la régénération (par damiers) du taillis de chênes et à sa densification. A terme, la protection par filets devra être maintenue, voire renforcée, compte tenu des enjeux et de l'évolution jurisprudentielle en matière de sécurité vis à vis des lieux habités.

6. BIBLIOGRAPHIE - REFERENCES

Berger F. et Dorren L. (2005). *www. rockfor.net* : un outil de diagnostic rapide du rôle de protection des forêts de montagne contre les chutes de blocs.

Cemagref (1999) : Convention DPPR n°5/99 du 1/3/99 – Etude 5.1 Partie 1, 51 pages

Collectif (1992). *Techniques de reboisement. Guide technique du forestier méditerranéen français*. Cemagref, 48 p.

Collectif (2005). *Gestion durable des forêts de protection*. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne. Classeur de 564 p.

Collectif (2006 à paraître). *Guide des sylvicultures de montagne*. Editions Office National des Forêts.

Mullenbach P. (2000). *Reboisements d'altitude*. Editions Cemagref, 335 p.

Zeller E. (1996). *Résoudre les problèmes en forêt de montagne : reboiser, stabiliser, rajeunir, assainir*. Ecole intercantonale des gardes forestiers, Maienfeld, Suisse. 55 p.

Parade 7

Suppression de l'aléa

1. DESCRIPTION

1.1. Objectif

Cette parade vise à supprimer les compartiments rocheux ou les blocs arrêtés dans une pente. Ce type d'intervention active consiste en deux opérations bien distinctes:

- La première, légère, vise à supprimer les petites écailles ou compartiments instables (≤ 5 m^3) identifiés comme générateurs potentiels de chute de pierres. On mène aussi ce type d'opération dans les pierriers instables ou dans les secteurs fortement affectés par le fauchage.
- La seconde, plus lourde, vise à supprimer de gros compartiments rocheux allant de quelques dizaines à quelques centaines de m^3, plus rarement supérieurs au millier de m^3. Dans ce cas, il s'agit presque toujours de supprimer ou de réduire l'aléa d'éboulement, plus rare mais plus destructeur que la chute de pierres.

1.2. Principe

La **purge** consiste à détacher les éléments instables à l'aide d'une barre à mine ou de petites charges d'explosif. Il s'agit soit de charges appliquées, soit de charges forées (les trous, de faible diamètre, sont en général réalisés au perforateur à air comprimé).

Le **minage** des gros compartiments rocheux nécessite la perforation de la roche au marteau-fond-trou pour y déposer l'explosif, afin de fragmenter au maximum la roche. La fragmentation sert autant à limiter les dégâts à l'aval qu'à faciliter l'évacuation des débris de roche. Pour ce faire - comme pour l'abattage en carrière ou le profilage routier à travers un massif rocheux - la roche est perforée et les charges sont disposées dans les forages sur la base d'un plan de minage établi par un mineur dûment patenté. Le minage doit toujours être réalisé sur la base d'une analyse structurale de la falaise. En effet, il y lieu d'utiliser au mieux l'agencement structural afin que l'ébranlement ne déstabilise pas le massif alentour, favorisant de la sorte des conditions propices à générer d'autres éboulements. L'utilisation d'explosifs brisants permet de réaliser de la pré- ou post-fissuration. Dans ce cas, la niche d'arrachement est plus "saine", et le risque de nouveaux éboulements est limité.

1.3. Techniques et outillage

En dehors des techniques mentionnées ci-dessus, on peut utiliser toute la panoplie des méthodes et outils servant à découper ou à briser la roche en carrière ou dans des environnements spécifiques (difficultés d'accès, milieu confiné, etc.). L'intervention est en général conditionnée par le coût et le risque qui en découle pour des objets tiers. La procédure habituelle veut que l'on utilise d'abord les techniques manuelles, plus simples à mettre en œuvre, puis si nécessaire le minage.

Selon les habitudes, les techniques suivantes sont utilisées: barre à mine, écarteur/vérin pneumatique ou hydraulique, éclateur hydraulique, éclateur type booster, ciment expansif, sciage au câble, etc. Pour autant que l'accès le permette (bordure de route, etc.) on mobilise de préférence des brise-roche montés sur des engins de chantier (par exemple MONTABERT®).

2. DOMAINE D'UTILISATION

2.1. Avantages et limites de la parade

En région de montagne, l'assainissement des falaises par suppression ou réduction de l'aléa est couramment utilisé à titre préventif ou après un événement imprévu. Souvent il accompagne la réalisation d'autres mesures de protection (par exemple: pose d'écrans, de filets couvrants, confortements). Ces méthodes réclament un certain nombre de précautions:

- **Dans la zone de départ**, il faut veiller à ne pas aggraver la situation: le risque d'érosion régressive est important dans le cas de la purge (par exemple pour un massif très disloqué). La purge est avant tout une intervention de nettoyage périodique d'une falaise que les qualités pétrographiques et les contraintes tectoniques ont rendue particulièrement sensible à l'altération météorique. Dans le cas d'un minage, il est indispensable de vérifier la stabilité des compartiments situés à l'arrière de la masse à supprimer. La suppression du pied de la masse peut en effet fortement diminuer la stabilité des compartiments situés à l'arrière! D'autre part, il faut prêter attention aux ébranlements provoqués par l'utilisation d'explosifs ou par les travaux préparatoires (par exemple les forages).
- **Dans la zone de propagation**, il est impératif de disposer de suffisamment de place pour récolter les matériaux. Ces méthodes sont donc à proscrire si elles mettent en danger la sécurité des infrastructures situées à l'aval (par exemple une route à fort trafic ne pouvant pas être fermée durant la durée des travaux ou une zone d'habitation proche de la falaise).

Néanmoins, la suppression de l'aléa présente de nombreux avantages:

- La possibilité d'interventions sur des compartiments instables de volume élevé, situés dans des zones présentant des difficultés d'accès (en général, le point problématique est le transport des perforatrices).
- La vitesse d'exécution relativement élevée.
- Les coûts raisonnables.
- La précision "chirurgicale" de l'intervention et le fait que le problème soit définitivement réglé.

2.2. Mesure d'accompagnement

La suppression d'aléa précède ou accompagne la mise en place d'autres mesures de protection actives ou passives. Il est indispensable de vérifier la capacité d'absorption d'éventuels ouvrages de protection existants au bas d'une zone que l'on désire assainir par purge ou par minage.

3. REALISATION

3.1. Concept d'assainissement

La mise en œuvre d'une purge ou d'un minage nécessite l'intervention du géologue aussi bien pour établir le concept d'assainissement que pour diriger les travaux. En effet, si le concept d'assainissement est avant tout basé sur l'interprétation de l'agencement structural de la falaise, la complexité pétrographique de certaines roches fait que des adaptations du mode d'assainissement doivent être réalisées en cours d'exécution des travaux. D'autre part, la présence inévitable d'ouvrages anthropiques à l'aval du chantier nécessite que le dimensionnement du minage soit couplé avec un calcul trajectographique des débris générés par le minage.

Le concept d'assainissement doit par conséquent permettre de délimiter les éléments à supprimer, ainsi que de déterminer les éventuelles conséquences néfastes immédiates ou à long terme de la purge ou du minage sur la stabilité de la falaise et sur les infrastructures situées à l'aval du chantier.

3.2. Mise en œuvre

Durant tout le déroulement du minage ou de la purge, plusieurs points importants sont à observer par le géologue en charge de la direction des travaux:

- **Dans la zone de départ**: la mise en œuvre nécessite la plupart du temps l'engagement d'équipes spécialisées dans les travaux acrobatiques. Une attention particulière devra être portée à la sécurité des ouvriers lors de l'exécution des travaux. Suivant l'accessibilité du site, divers moyens de déplacement pourront être utilisés, comme par exemples nacelles, hélicoptère, techniques alpines. Un système de surveillance doit être réalisé durant toute la durée des travaux, particulièrement si des forages sont nécessaires: un bloc instable peut en effet se détacher sous l'effet des vibrations dues aux forages. Afin de limiter ces risques, les forages par rotation seront préférés aux forages par percussion. De même, les forages à l'air remplaceront les forages à l'eau si des niveaux argileux ont été mis en évidence. Parfois, le compartiment instable peut être retenu à la falaise par des câbles jusqu'à la réalisation du minage proprement dit.
- **Dans la zone d'atteinte**: la sécurité des infrastructures situées à l'aval du chantier est prioritaire. Celles-ci peuvent être sécurisées par des mesures de protection provisoires (filets, épandage de matériel meuble, pneus, bottes de paille, …). D'autre part, la masse à supprimer peut être emmaillotée pour éviter les projections lors du minage proprement dit. Un réglage de la circulation (feux alternés, déviation) doit être mis en place durant toute la durée des travaux.

Le travail du géologue se poursuit après le minage ou la purge:

- **Dans la zone de départ**: il est indispensable de surveiller la niche d'arrachement après un minage, afin d'éviter tout risque d'éboulement, Au besoin, le minage doit être complété par une purge des blocs instables restés dans la niche d'arrachement.
- **Dans la zone d'atteinte**: les matériaux purgés ou minés doivent être évacués. Au besoin, une réfection de la chaussée doit être entreprise.

3.3. Eléments de coût

Le coût peut se décomposer en plusieurs postes:

- Protection des infrastructures.
- Interventions d'équipes spécialisées dans les travaux acrobatiques:
  - Travaux préparatoires (débroussaillage, forages, sécurisation des infrastructures menacées…)
  - Purge, minage ou utilisation de pelle mécanique
- Accès (location de nacelle, héliportage du matériel).
- Remise en état des lieux.

A titre d’exemple :

- Purge des éléments instables d'un volume < 1 m³ et transport du matériel en décharge. Prix : 1.43 €/m².
- Explosif: selon la typologie, les prix varient de 7.97 à 12.54 €/Kg.

4. PERENNITE

Dans le cas d'une purge, la pérennité des travaux dépend des conditions climatiques locales (i.e. de l'érodabilité du massif). Le massif doit par conséquent être régulièrement observé. La purge

doit au besoin être renouvelée, sauf si des mesures complémentaires ont été prises. Dans le cas d'un minage bien fait, la pérennité nécessite peu d'attention.

5. EXEMPLE

5.1. Gorges du Trient à Vernayaz (Valais)

En 2002, la rénovation des passerelles des Gorges du Trient à Vernayaz a nécessité d'importantes purges des parois rocheuses. L'objectif de ces travaux était double:

- Supprimer les blocs instables.
- Etudier les trajectoires des blocs purgés et déterminer les zones atteintes au niveau des passerelles. Cette fonction a joué un rôle important, puisqu'elle est à l'origine d'une modification du projet de protection initial, qui avait considéré comme protégés des tronçons de passerelles qui ont pourtant été totalement détruits par les purges.

Photo 5.7.1: Dommages aux passerelles des gorges du Trient après les purges de 2002.

Cliquer pour agrandir

5.2. Lieu-dit Chateigne, commune de Pontboset, vallée d'Aoste

La sécurisation de la route régionale n°2, qui a été touchée par la chute de blocs du mois de mai 1996 qui a affecté le versant gauche de la vallée de Champorcher, à proximité du lieu-dit Chateigne, a exigé une purge manuelle et une surveillance des volumes instables.

Photo 5.7.2. Purge manuelle d'un bloc instable.

Cliquer pour agrandir

En outre, les blocs se sont arrêtés sur la galerie paravalanche qui avait été réalisé pour le compte de l'administration régionale afin de limiter les risques pour les usagers de la route.

6. BIBLIOGRAPHIE

Brawner, C.O., 1994. Rockfall hazard mitigation methods, NHI course 13219, Participants workbook.

Cardu M., Oggeri C., Peila D., Casale M. :"*Bonifiche con esplosivo*". Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

Ente Nazionale per le Strade - Gruppo Tecnico per la Sicurezza Stradale (2001) – "*La protezione del corpo stradale contro la caduta massi*". ANAS.

Liste des prix de la Région Autonome Vallée d'Aoste, dernière mise à jour janvier 2006.

Mancini R. & Cardu M. (1998): "*Ingegneria degli scavi*", Politeko, Torino.

Pelizza S., Peila D., Oggeri C.: "*Tipologie di intervento per la bonifica di versanti rocciosi*". Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

Willie, D.C. and Norrish, N.I., 1996. Stabilization of rock slopes. In: A.K. Turner and R.L. Schuster (Editors), Landslides, Investigation and Mitigation. National Academy Press, Washington, D.C., pp. 474-504.

Parade 8

Soutènement

1. DESCRIPTION

1.1. Objectif

Parade active ayant pour objectif le confortement de volumes rocheux potentiellement instables, surplombants ou sous-cavés par l'altération.

1.2. Principe

Mise en place d'une structure en maçonnerie ou en béton, armé ou non, afin de reprendre les efforts de compression qui agissent sur une masse instable surplombante ou sous-cavée par l'altération due aux agents atmosphériques (*splash-erosion*).

1.3. Description technique

Il existe nombreuses variations de réalisation (figure 1). Les plus courantes sont:

- Les butons en béton, généralement non ferraillé, appliqués sous les surplombs de faible hauteur.
- Les piliers en béton ou en maçonnerie de forme parallélépipédique ou circulaire, adossés ou non au massif, utilisés pour le soutènement des blocs instables.
- Les contreforts réalisés quand la hauteur de l'ouvrage dépasse 10 m.

Afin de garantir la stabilité de l'ouvrage, il est nécessaire de réaliser un système de drainage à l'arrière (barbacanes, colonnes de géotextile, etc.) afin de limiter ou d'empêcher l'augmentation des pressions hydrauliques et des poussées du massif. Ces systèmes de drainage doivent être entretenus (curages réguliers).

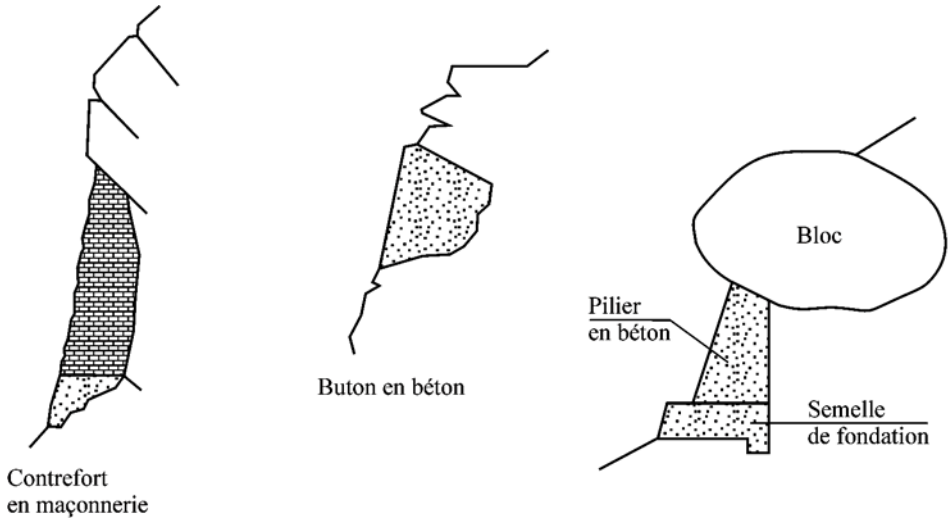


Figure 5.8. 1 Figure 1: Types de soutènement.

2. DOMAINE D'UTILISATION

Cette parade est souvent associée à des ancrages, qui reprennent les efforts horizontaux qui ne sont pas pris en compte par le béton (qui travaille en compression).

2.1. Performances

Les contraintes principales de cette parade sont d'ordre:

- Economique: les coûts augmentent selon la hauteur et la complexité de l'ouvrage, la difficulté d'accès de la zone, etc.
- Mécanique: les structures en béton ont un bon comportement en compression, mais résistent mal aux efforts horizontaux et nécessitent par conséquent des ancrages.
- Esthétique: ces ouvrages ont un fort impact visuel, qui doit être limité parmi des mesures architecturales, comme par exemple le doublage du parement extérieur avec des pierres, le recouvrement par une végétation grimpante qui contribue à camoufler l'intervention.

2.2. Techniques associées

Cette technique est souvent associée à des interventions qui modifient la résistance mécanique du massif rocheux, tels que emmaillotage, béton projeté, ancrages (Figure 5.8. 2).

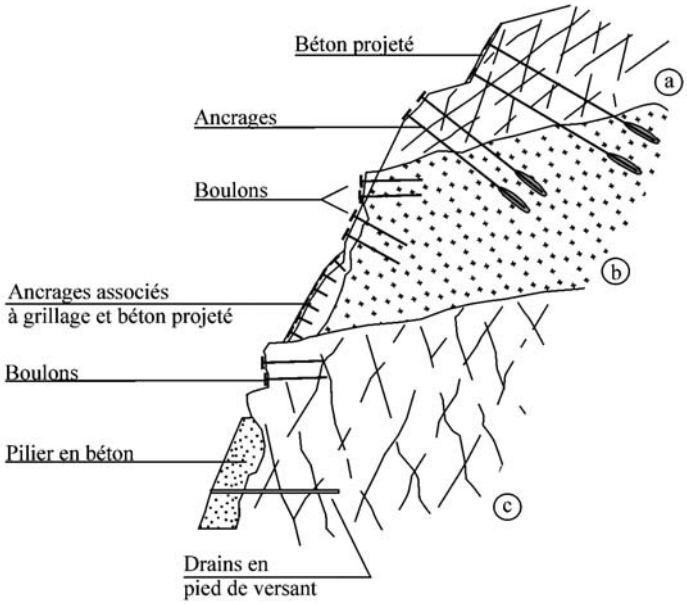


Figure 5.8. 2: Types d'interventions de confortement.

3. REALISATION

3.1. Conception

La conception du soutènement se base sur des études qui concernent la définition du modèle géologique, structural et géomécanique du massif rocheux. Les éléments de base à définir sont:

- La situation topographique, qui doit être préalablement définie à l'aide d'un relevé planimétrique et altimétrique.
- Le cadre géologique, à travers la définition des caractéristiques:

- Géomorphologiques du milieu, contenant un repérage des instabilités existantes ou potentielles, ainsi qu'une estimation de leur évolution (glissement plan, dièdre, basculement).
- Lithologiques, structurales et mécaniques du massif (résistance au cisaillement, déformabilité et perméabilité).
- Hydrogéologiques générales du milieu, avec des indications sur les pressions hydrauliques du massif.

➢ La situation sismique, qui peut conditionner la stabilité de l'ouvrage.

3.2. Mise en œuvre

La mise en œuvre de ces ouvrages nécessite le recours à des entreprises spécialisées, dans le cas où les masses instables sont difficiles d'accès (parois rocheuses).

Un plan de sécurité doit être réalisé avant le début des travaux, soit pour le personnel qui travaille dans des conditions difficiles, soit pour les infrastructures à protéger (routes, bâtiments, etc.) qui se trouvent à proximité de la zone d'intervention. Dans tous les cas, des ouvrages de protection provisoires doivent être mis en place.

3.3. Eléments de coût

Les coûts des ouvrages en béton sont généralement compris entre 300 et 500 €/m³. Ils peuvent être majorés si l'accès est difficile (recours à l'hélicoptère).

4. ENTRETIEN

La pérennité de ces ouvrages est généralement très bonne, sauf dans le cas de déclenchement de nouveaux phénomènes aux alentours des ouvrages. Une attention particulière doit être protée à la maintenance du système de drainage, qui doit être régulièrement contrôlé. Les barbacanes doivent au besoin être débouchées.

5. EXEMPLES

5.1. Paroi de "La Becca", commune de Villeneuve, vallée d'Aoste

Suite à de nombreuses chutes des blocs depuis la paroi de "La Becca", située dans la commune de Villeneuve, l'administration régionale a mandaté des experts en 1993 pour réaliser une étude en vue de stabiliser la paroi, qui menaçait directement le bourg et la circulation routière. Le projet a prévu la sécurisation de la paroi rocheuse à l'aide d'une purge des volumes instables et la mise en œuvre des mesures suivantes:

➢ Des écrans déformables de filets ayant une absorption d'énergie élevée, avec une hauteur de 5 m et une distance entre les poteaux de 8 m.
➢ Des ancrages de longueur variable (entre 3 et 20 m) et d'un diamètre de 26.5 mm, généralement disposés sur trois lignes.
➢ Une barrière de filets faiblement déformable, avec une hauteur de 4 m et une distance entre les poteaux de 5.5 m.
➢ Des filets et grillages plaqués.
➢ Des contreforts en béton.

Le cout total de l'intervention a été supérieur à 1.0 Mio €.

Photo 5.8.1 – Vue d'ensemble de la paroi confortée. On y distingue des ancrages passifs, des filets et grillages plaqués, des butons en béton et une barrière de filets faiblement déformable.

5.2. Lieu-dit Thomasset, commune de Avise, vallée d'Aoste

Suite aux chutes de blocs du 23 janvier 1994 (volume estimé: 300 m³) et du 26 novembre 1996 (volume estimé: 100 m³) qui ont affecté la route communale Avise-Thomasset, l'administration régionale a conçu et réalisé la stabilisation de la paroi à l'aide d'une purge des volumes instables, de la mise en place de filets et de grillages plaqués, ainsi que d'un contrefort en maçonnerie (photos 5.8.2 et 5.8.3).

Photo 5.8.2 – Combinaison de mesures de protection le long de la route communale Avise-Thomasset. On y distingue des filets et grillages plaqués et un contrefort en maçonnerie.

Photo 5.8.3 – Détail du contrefort en maçonnerie.

5.3. Bourg de Donnas, vallée d'Aoste

Suite à une chute de blocs depuis une paroi rocheuse située dans la commune de Donnas, l'administration régionale a mandaté en 1986 des experts pour réaliser une étude en vue de stabiliser la paroi, qui menaçait directement le bourg, la RN 26 et la "Route romaine des Gaules". Le projet a prévu la sécurisation de la paroi rocheuse à l'aide d'une purge des volumes instables et la mise en place d'un contrefort en béton armé (Photo 5.8.4).

Photo5.8. 4 – Contrefort en béton armé

Photo 5.8.5 – Vue d'ensemble de la paroi confortée durant les années '90. A noter les ancrages passifs mis en place sur la paroi et masqués avec des coffres en béton.

De nouvelles interventions de stabilisation de la paroi ont été faites dans cette zone par l'administration régionale durant les années '90. Un contrefort en béton armé, à côté de celui réalisé en 1986, et des ancrages passifs ont étés mis en place (Photo 5.8.5).

6. BIBLIOGRAPHIE

Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (APAT, 2003): "*Atlante delle opere di sistemazione dei versanti"*. Manuali e linee guida 10/2002, pp 42-49.

Brawner, C.O., 1994. Rockfall hazard mitigation methods, NHI course 13219, Participants workbook.

Ente Nazionale per le Strade - Gruppo Tecnico per la Sicurezza Stradale (2001) – "*La protezione del corpo stradale contro la caduta massi"*. ANAS.

Liste des prix de la Région Autonome Vallée d'Aoste, dernière mise à jour janvier 2006

Pelizza S., Peila D., Oggeri C.: *"Tipologie di intervento per la bonifica di versanti rocciosi"*. Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

Willie, D.C. and Norrish, N.I., 1996. Stabilization of rock slopes. In: A.K. Turner and R.L. Schuster (Editors), Landslides, Investigation and Mitigation. National Academy Press, Washington, D.C., pp. 474-504.

Parade 9

Ancrages

1. DESCRIPTION

1.1. Objectif

Parade active visant à la stabilisation de pentes en terrain meuble, de talus rocheux ou des parois d'une fouille.

1.2. Principe

Les ancrages agissent à la surface du massif rocheux. Une fois installés, ils contribuent à améliorer les caractéristiques géotechniques globales du versant. Ils transmettent les efforts auxquels ils sont soumis au terrain qui, pour sa part, fournit la résistance nécessaire pour la réaction à l'équilibre. Selon la typologie de l'ancrage (ponctuel ou réparti), la transmission des efforts de l'ancrage au terrain s'effectue à travers:

- Un système mécanique, réalisé avec des dispositifs d'expansion qui agissent lors du vissage de l'écrou. On parle alors d'**ancrages ponctuels**.
- Le scellement de l'espace situé entre le trou du forage et la barre d'ancrage. Le scellement de la barre peut être effectué soit seulement au fond du trou de forage, soit sur toute la longueur de la barre. On parle alors d'**ancrages répartis**.

1.3. Description technique

En fonction de leur typologie et du travail qu'ils vont exercer, les ancrages se classifient en clous, boulons et tirants d'ancrage.

Les clous et les boulons sont des barres métalliques insérées dans des trous forés dans le rocher ou directement fichés dans le terrain. Ils sont sollicités lors des efforts de cisaillement. Les clous et les boulons sont fixés à la surface extérieure par une plaque de répartition et un dispositif de blocage (écrou) et scellés au terrain à l'aide d'une cimentation (mélanges de ciment divers ou résines), ou par l'intermédiaire de moyens mécaniques. Les clous ont un diamètre inférieur à 25 mm, et peuvent parfois être construits en plastique renforcé de fibres de verre. Ils sont scellés sur toute leur longueur au terrain (Figure 5.9. 1). Les boulons ont un diamètre supérieur à 25 mm et des longueurs variables (maximum 12 m)(Figure 5.9. 1 et Figure 5.9. 3.)

Les tirants d'ancrage sont sollicités lors des efforts de traction. Ils sont capables de transmettre les forces résistantes au massif rocheux ou au terrain dans lequel ils sont insérés. Un tirant d'ancrage est constitué par une tête équipée d'une plaque de répartition et d'un système de blocage. Ces éléments sont liés à une partie libre, qui comprend la portion qui peut être mise en tension, et la gaine de revêtement, et à une fondation armée (Figure 5.9. 4). La tête du tirant est d'habitude cimentée à une structure de soutènement (mur, barrière ou poteau).

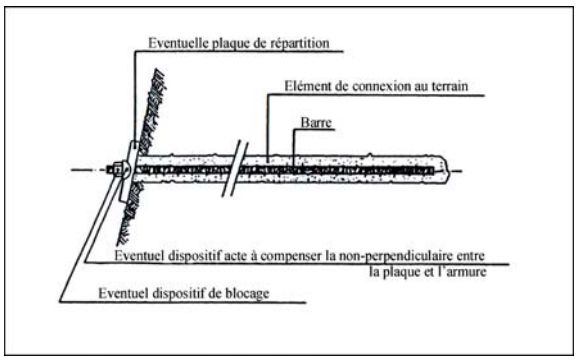


Figure 5.9. 1*: Clou d'ancrage (AICAP, 1993).* ***Cliquer pour agrandir***

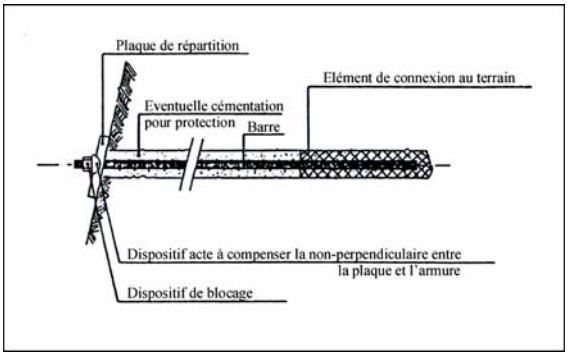


Figure 5.9. 2*: Boulon d'ancrage: ancrage par cimentation (AICAP, 1993).* ***Cliquer pour agrandir***

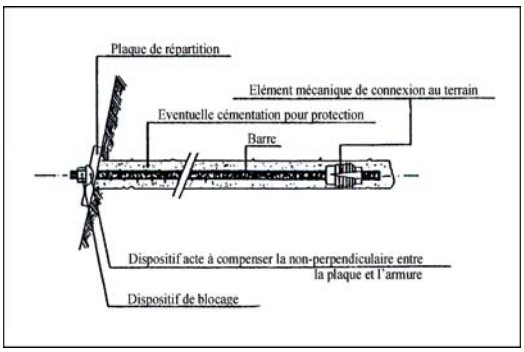


Figure 5.9. 3*: Boulon d'ancrage: ancrage par expansion mécanique (AICAP, 1993).* ***Cliquer pour agrandir***

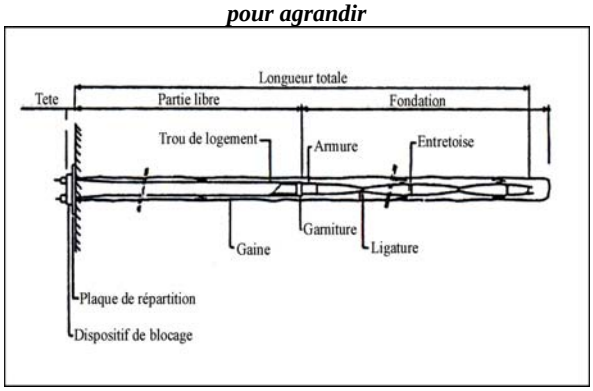


Figure 5.9. 4: Tirant d'ancrage (AICAP, 1993).

Cliquer pour agrandir

Les tirants d'ancrage peuvent être:

- **Présollicités** (ou actifs): quand ils sont mis en tension lors de la réalisation de l'ancrage.
- **Non présollicités** (ou passifs): quand ils sont sollicités par des efforts de traction liés à des mouvements ou des déformations du massif rocheux.
- **Partiellement présollicités**: quand ils sont mis en tension lors de la réalisation de l'ancrage, avec une tension inférieure à celle prévue durant le fonctionnement.

2. DOMAINE D'UTILISATION

Les ancrages sont largement utilisés pour la stabilisation et le renforcement des structures (murs de soutènement, barrières, quais portuaires, palplanches, digues, pylônes), des pentes et des talus rocheux, ainsi que des terrains meubles. En particulier, les ancrages sont efficaces dans:

- Des terrains naturellement cohésifs (argiles et silts à basse plasticité et donc peu déformables).
- Des terrains naturellement cimentés ou des sables et des graviers présentant une cohésion réelle (due à la fraction fine) ou apparente (fournie par l'humidité).
- Des roches disloquées.
- Des terrains situés au-dessus de roches de mauvaise qualité.

L'utilisation des ancrages est au contraire moins indiquée pour les interventions qui concernent la stabilisation des terrains meubles présentant un comportement cohésif.

2.1. Performances

Les performances des ancrages sont liées au diamètre des barres utilisées et à la résistance de l'acier. La résistance peut atteindre plusieurs centaines de kN. L'impact visuel des ancrages est généralement limité, à cause des caractéristiques intrinsèques de ce type d'ouvrage, qui se

développe principalement à l'intérieur du massif rocheux ou du terrain meuble. L'impact visuel peut par ailleurs être facilement minimisé au travers de l'emploi des mêmes techniques utilisées pour les murs de soutènement.

Les limites des ancrages sont principalement:

- L'impossibilité de réaliser des forages dans des terrains saturés.
- Les difficultés associées à l'érosion des terrains peu cohésifs constitués principalement de sables et de graviers.
- Les problèmes liés à une grande densité de lignes souterraines (réseau électrique, téléphone, gaz, etc.).
- Des problèmes potentiels de fonctionnement optimal en terrain gelé.

2.2. Techniques associées

Cette technique est souvent associée à des interventions qui modifient la résistance mécanique du massif rocheux (emmaillotage, béton projeté) et/ou à des mesures de soutènement (poutre et piliers en béton). Toutes ces mesures visent à la stabilisation de talus naturels ou artificiels constitués par des massifs rocheux fracturés et stratifiés, affectés par des glissements, des basculements et/ou des chutes des blocs. En outre, les ancrages sont associés à des interventions destinées à empêcher l'initialisation de phénomène d'altération superficielle du massif rocheux (filets et grillages plaqués).

3. REALISATION

3.1. Conception

La conception d'ancrages se base sur des études qui concernent:

- La définition du modèle géologique et géotechnique du sous-sol.
- L'identification des conditions environnementales (agressives ou non) dans lesquelles seront mis en place les ancrages.

Les éléments de base à définir sont:

- La situation topographique, qui doit être préalablement définie à l'aide d'un relevé planimétrique et altimétrique.
- La situation géologique, à travers la définition des caractéristiques:
  - Géomorphologiques du milieu, contenant un repérage des éventuelles instabilités existantes ou potentielles et une estimation de leur évolution.
  - Lithologiques des terrains ou des roches.
  - structurales, autant à l'échelle du volume de sous-sol concerné par l'ouvrage à bâtir, que par celle du volume de terrain concerné par l'ancrage.
  - Hydrogéologiques générales du milieu, avec des indications sur les caractéristiques des aquifères (libre ou en pression).
- La situation géotechnique, avec définition des propriétés physiques et mécaniques des terrains (résistance au cisaillement, déformabilité et perméabilité) et des pressions hydrauliques dans le sous-sol.
- La situation environnementale, avec l'identification d'éventuelles conditions agressives (risque de corrosion) de l'environnement dans lequel seront mis en place les ancrages.

3.2. Mise en œuvre

Dans le cas de terrains à cohésion nulle ou faible ou dans le cas de roches disloquées, deux méthodes différentes de forage peuvent être utilisées:

- Le **chemisage des trous**: afin de stabiliser les parois du trou de forage, on réalise une

chemise temporaire, à l'intérieur de laquelle seront introduites la barre et l'injection. Après avoir positionné correctement la barre à l'intérieur de la chemise, on extrait cette dernière.

- Le **Self Drilling Anchors (SDA)**: la barre de forage se comporte comme une barre installée et injectée. Ce système est constitué par une barre qui peut être utilisée soit pour le forage, soit pour l'injection à l'intérieur de terrains à faible cohésion sans l'utilisation d'un chemisage. Cette barre est caractérisée par la présence d'un trou longitudinal pour l'injection et un filetage pour le montage sur le matériel de forage standard.

3.3. Eléments de coût

Clou d'ancrage: fourniture et installation de clous d'ancrage, qui comprend l'enfoncement et la cimentation de barres de fer rondes type Fe 32K de 30 mm de diamètre, de longueur variable, à l'intérieur de forages de 40 mm de diamètre et de profondeur moyenne équivalente au 2/3 de la longueur de barres de fer rondes: 14,60 Euros/m'.
Tirant d'ancrage: fourniture et installation de tirants d'ancrage, qui comprend le forage par roto-percussion en terrains de n'importe quelle nature ou consistance, même en présence d'eau à une profondeur de 30 m, l'éventuelle utilisation de boues de bentonite, la fourniture et la mise en œuvre de l'armure en acier harmonique constituée de torons de 6,6" de diamètre revêtus à l'origine par des gaine en P.V.C. et le matériel anticorrosif. Sont en outre compris les têtes des ancrages complètes avec les dispositifs de blocage, les opérations d'enfoncement des câbles, les injections du mélange de ciment, le mise en tension du tirant à l'aide de marteaux oléopneumatiques et le scellement final de la tête du tirant. Selon la mise en tension du tirant (entre 60 T et 150 T), les prix sont variables:

- Mise en tension 60 T: 105,27 Euros/m'.
- Mise en tension 150 T: 176,46 Euros/m'.

4. ENTRETIEN

Les tirants d'ancrage se classifient, selon la durée d'exercice, en:

- **Provisoires**: tirants destinés à exercer leur fonction pendant une période inférieure à deux ans.
- **Permanents**: tirants destinés à exercer leur fonction pendant une période égale ou supérieure à deux ans. Pour cette catégorie, un plan de surveillance de l'ouvrage dans le temps doit être prévu. Ce plan doit faire partie du projet complet, qui doit en outre comprendre:
  - La typologie et la durée de fonctionnement du tirant.
  - Le nombre et la distance entre les tirants.
  - La longueur de la fondation et celle de la partie libre du tirant.
  - La position et inclinaison des tirants.
  - Le diamètre du forage.
  - Les mesures de protection anticorrosion.
  - Les caractéristiques des mélanges d'injection, etc.

5. EXEMPLES

5.1. RN 26 (Km. 70+750) près de Montjovet , vallée d'Aoste.

Ancrages passifs en clouage sur une dalle rocheuse (*" Zone des calcschistes avec pierres vertes")* à fort pendage. Les clous sont disposés selon une maille rectangulaire, avec une distance horizontale d'environ 50 cm, et une distance verticale d'environ 80 cm (photo 5.9.1). La partie gauche de la paroi a été recouverte par des grillages en acier inoxydable à double torsion à mailles hexagonales (60x80 mm), renforcés avec des câbles croisés entre eux et ancrés au massif.

Photo 5.91: Vue d'ensemble de la paroi avec les ancrages passifs (au centre) et les grillages plaqués. **Cliquer pour agrandir**

5.2. RN 26 Km (83+600), commune de Chambave, valle d'Aoste.

L'alluvion de novembre 1994 a complètement emporté la route nationale sur une longueur d'environ 100 m et partiellement détruit le mur de soutènement situé à l'amont de celle-ci; dans le même temps, cet événement a provoqué un tassement de l'ensemble du versant et en particulier des bâtiments situés 30 m en amont de la route. Afin d'éviter une éventuelle accélération du phénomène, un nouveau mur de soutènement (photos 5.9.2 et 5.9.3) a été réalisé en 2004. Ce mur a été ancré, à l'aide de tirants, au mur qui avait été reconstruit suite aux événements de 1994. A noter, au dessus du mur, la présence de la terre armée.

Photo 5.9.2: vue d'ensemble du mur de soutènement et des ancrages actifs (dans les trous). **Cliquer pour agrandir**

Photo 5.9.3: Détail du tirant avec les trois torons et la plaque de répartition. **Cliquer pour agrandir**

5.3. A21 Martigny – Grand Saint Bernard, commune de Sembrancher, Valais.

Après l'éboulement dramatique de 600 m3 de roche sur la galerie de la Monnaie en novembre 2001, la paroi instable a été stabilisée à l'aide de 46 ancrages passifs de 6 à 8 m de profondeur, composés de barres d'acier préinjectées de 32 mm de diamètre et équipées de chaussettes en coton. Les ancrages ont été implantés sur la base d'un modèle géomécanique et structural 3D obtenu par levé laser.

Photo 5.9.4: Mise en place des ancrages passifs dans les parois surmontant la route Martigny – Grand Saint Bernard au lieu dit "Les Trappistes". **Cliquer pour agrandir**

6. BIBLIOGRAPHIE

A.I.C.A.P. (1993): *"Ancoraggi nei terreni e nelle rocce: raccomandazioni"*. Edigraf, Roma.

Airoldi S. : *"I bulloni d'ancoraggio nel consolidamento delle scarpate"*. Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (APAT, 2003): *"Atlante delle opere di sistemazione dei versanti"*. Manuali e linee guida 10/2002, pp 71-73.

Agostini R., P. Mazzalai, A. Papetti (1988): *"Le reti metalliche a maglie esagonali nella difesa dei versanti"*. Officine Maccaferri S.p.A., pp. 25-31.

Bidaut P., Durville J.-L., Guillemin P., Richard J.-C., Viktorovitch M.(2006). Essais de cisaillement sur discontinuités armées par ancrages passifs : utilisation d'une boîte de cisaillement de grandes dimensions. Bull. Labo. P. et Ch. n°spécial à paraître

Brawner, C.O., 1994. Rockfall hazard mitigation methods, NHI course 13219, Participants workbook.

Cravero M., Iabichino G., Oreste P.P., Teodori S.P.: *"Metodi di analisi e dimensionamento di sostegni e rinforzi per pendii naturali o di scavo in roccia"*. Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

Collectif (Mai 2004). *Guide technique : Protection contre les risques naturels – Ancrages passifs en montagne : conception, réalisation, contrôle*. MEDD, CEBTP et Cemagref. 146 p.

Ente Nazionale per le Strade - Gruppo Tecnico per la Sicurezza Stradale (2001) – *"La protezione del corpo stradale contro la caduta massi"*. ANAS.

Hoek E. & D. Wood (1988): *"Rock support"*. Article publié dans le magazine *"Gallerie e grandi opera sotterranee"*, 4, pp. 39-44, 1990.

Liste des prix de la Région Autonome Vallée d'Aoste, dernière mise à jour janvier 2006.

Pelizza S., Peila D., Oggeri C.: *"Tipologie di intervento per la bonifica di versanti rocciosi"*. Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

Willie, D.C. and Norrish, N.I., 1996. Stabilization of rock slopes. In: A.K. Turner and R.L. Schuster (Editors), Landslides, Investigation and Mitigation. National Academy Press, Washington, D.C., pp. 474-504.

Parade 10

Béton projeté

7. DESCRIPTION

7.1. Objectif

Parade active utilisée en association avec d'autres mesures de confortement (tirants, boulons et clous) dans les interventions de stabilisation et de soutènement de parois rocheuses instables ou en terrains meubles liés à la construction d'ouvrages de génie civil (routes, galeries, chemins de fer, fouilles pour bâtiments, etc.).

7.2. Principe

Empêcher (ou limiter) l'altération due à l'action des agents atmosphériques (*splash-erosion*) ou les chutes de blocs superficielles dans un massif rocheux tendre ou fracturé, en projetant sur la paroi une couche de béton d'épaisseur variable (normalement 60-150 mm, mais pouvant atteindre jusque à 200 mm).

7.3. Description technique

Le béton projeté est constitué par une mélange de ciment, d'eau et de granulats (diamètre maximum 25 mm). Un additif accélérateur de prise (environ 5%) peut être ajouté lorsqu'une résistance élevée initiale pour la prise est requise. La gunite présente la même composition que le béton projeté, mais le diamètre maximal des agrégats est de 5 m.

Composition	Kg/m³	%
Ciment	420	18.6
Micro-silice	42	1.9
Mélange d'agrégats	1.735	76.9
Fibres	59	2.6

Mélange de béton projeté (*Hoek & Wood, 1988*)

Le béton est projeté sur une nappe de treillis soudés ancrée à la paroi. Il présente une flexibilité qui lui permet de s'adapter aux déformations du massif rocheux sans se fracturer. Actuellement, les nouvelles technologies ont permis d'utiliser un système de revêtement et de soutènement plus résistant et plus flexible. L'adjonction de micro-silice et de fibres en acier (longueur moyenne 20 à 38 mm, diamètre 0.5 mm) au mélange de ciment et de granulats, présente plusieurs avantages:

- La réduction du rebond du matériel projeté permet d'obtenir une meilleure qualité du revêtement à cause d'un meilleur remplissage et scellement des vides.
- L'augmentation des épaisseurs de la couche de béton (jusque à 200 mm).
- Une meilleure protection contre l'altération.
- L'augmentation de la résistance et des caractéristiques de déformabilité du revêtement, l'utilisation de la nappe de treillis soudés n'étant, dans certains cas, plus nécessaire.

8. DOMAINE D'UTILISATION

Cette technique de protection est utilisée en association avec d'autres interventions d'amélioration des caractéristiques géomécaniques, pour la stabilisation de talus naturels ou artificiels constituées par des massifs rocheux fracturés et stratifiés. Par exemple, le béton projeté sur une nappe de treillis soudé à mailles hexagonales peut être associé à des poutres en béton armé disposées (en sens horizontal ou vertical) sur une pente, afin de répartir les sollicitations provoquées par les ancrages qui sont mis en place pour le soutènement du talus.

Le béton projeté est souvent utilisé comme revêtement temporaire pour les parois d'un fouille ou pour les voûtes lors de la réalisation d'ouvrages souterrains (galeries, tunnels, etc.).

8.1. Performances

Les limites liées à cette technique sont principalement:

- Le risque de corrosion de l'armature.
- Les limites des autres parades avec lesquelles elle est associée.
- Les risques liés à l'étanchéification du front de falaise par le béton.
- Les irrégularités de la couche en béton.
- Un fort impact visuel; le recouvrement par une végétation grimpante contribue à camoufler l'intervention, en favorisant une meilleure intégration environnementale de l'ouvrage.

8.2. Techniques associées

Cette technique est utilisée pour la stabilisation des talus naturels ou artificiels constitués par des massifs rocheux fracturés ou du terrain meuble. Elle est souvent utilisée en association avec des interventions qui modifient la résistance mécanique du massif rocheux (ancrages) et/ou appliquent des efforts de soutènement (poutre et piliers en béton). De plus, le béton projeté peut être utilisé en association avec des interventions qui modifient les conditions piézométriques d'un versant rocheux (drainage par drains forés).

9. REALISATION

9.1. Conception

Les études à réaliser avant la mise en œuvre de la parade sont:

- Une étude géomécanique, devant définir l'état de fracturation de la roche, ainsi que la stabilité du massif rocheux ou du talus;
- Une étude hydrogéologique, destinée principalement à fournir des valeurs de perméabilité de la roche ou du talus. Cette étude doit permettre de réaliser un système de drainage approprié pour l'évacuation des eaux.

9.2. Mise en œuvre

Les recommandations suivantes sont à suivre pour l'application du béton projeté, soit renforcé avec fibres en acier, soit projeté sur une nappe de treillis soudés:

- Un nettoyage eau-air doit être réalisé avant l'application de la couche de béton;
- L'application du béton sur une surface sèche, sale ou congelée doit être évitée;
- Un approvisionnement constant d'air comprimé doit être garanti durant l'application du béton;
- L'application du béton projeté sur une surface déjà consolidée doit être évitée;
- Une distance de jet constante, inférieure à 1.0 m, voire 1.5 m doit être maintenue;
- Dans le cas de venues d'eau dans le massif rocheux, un drainage doit être réalisé avant

l'application du béton (par exemple barbacanes en plastique ou natte avec exutoire) pour éviter une mise en charge.

Si le béton est projeté sur une nappe de treillis soudé, on devrait en plus veiller à:

- Garantir l'absence d'air ou d'eau entre la couche de béton et le massif rocheux, afin d'éviter la corrosion du treillis soudé.
- Vérifier que le béton projeté est directement en contact avec le massif rocheux et recouvre suffisamment le treillis.

La mise en œuvre du béton projeté peut être réalisée selon deux techniques:

- Par **voie sèche**: les composants solides sont malaxés, puis le mélange sec est expulsé par un flux d'air comprimé jusqu'au gicleur de la pompe, où l'eau est ajoutée avant la projection. Les premières applications de cette technique, appelée gunite (de l'anglais *to gun*), datent de 1910;
- Par **voie humide**: tous les composants, y compris l'eau, sont malaxés, puis le mélange humide arrive jusqu'au gicleur de la pompe, où il est projeté. Les premières applications de cette technique, appelée shotcrete (de l'anglais *to shot concrete*), datent des années 1960.

9.3. Eléments de coût

Le coût peut être décomposé de la manière suivante:

- Béton de résistance garantie (Rck variable entre 20- 40 N/mm²): 115.18-136.60 €/m³
- Additif liquide pour béton (accélérateur de prise): 2.47 €/Kg
- Treillis soudé en acier: 1.30-5.40 €/Kg

Selon l'accessibilité du site, la typologie et la mise en œuvre des ouvrages, les coûts peuvent subir une majoration moyenne de l'ordre de 3 à 4 %.

10. ENTRETIEN

La durée du béton projeté est variable selon la qualité de la mise en œuvre. Les défauts suivants peuvent se produire:

- Dégradations dues aux agents atmosphériques (surtout aux cycles de gel-dégel): écaillage, décollement, gonflement de la couche de béton sous l'action des pressions hydrauliques agissants à l'intérieur de l'amas rocheux.
- Touts les problèmes liés à une mise en œuvre non optimale.

11. EXEMPLES

11.1. Bourg de Chatillon, vallée d'Aoste.

Suite à la chute d'un bloc de gneiss (volume d'environ 0.5 m³) en 1992, la commune de Châtillon a décidé de projeter, sur la paroi très fracturée, une couche de béton sur une nappe de treillis soudé afin de prévenir de nouveaux dégât. Malheureusement, une chute de bloc a eu lieu dans le seul endroit où aucune projection de béton n'a été faite. Le bloc, d'un volume de 1 m³, s'est arrêté près de la maison située au premier plan sur la photo 5.10.1.

Photo5.10.1 – Paroi rocheuse stabilisée à l'aide de gunite dans le bourg de Châtillon. ***Cliquez pour agrandir***

11.2. RN 26 (Km.112+100), commune de Villeneuve, vallée d'Aoste.

Pour éviter la chute de blocs en provenance du talus rocheux à l'amont de la RN 26, environ 500 m^2 de calcschistes fracturés ont été recouverts de gunite. Cette couche de béton a été projetée sur un treillis d'armature ancré au talus. La sécurisation de la route nationale a été complétée par la réalisation d'une barrière fixe de grillage positionnée en tête du mur de soutènement.

Photo5.10. 2 – Talus rocheux stabilisé à l'aide d'une couche de béton projetée sur un treillis d'armature ancré au talus. On observe, au premier plan de la photo, la barrière fixe de grillage. ***Cliquez pour agrandir***

11.3. Route cantonale Vouvry – Chavalon, commune de Vouvry, Valais.

Pour éviter la chute de blocs en provenance du talus rocheux à l'amont de la route, environ 3'000 m^2 de calcaires fracturés ont été recouverts de gunite. Cette couche de béton ayant malheureusement été projetée sur une majeure partie de la surface sans treillis d'armature, de

nombreuses plaques sont actuellement décollées et menacent de tomber sur la route. La faiblesse du réseau de drainage est également à l'origine du démantèlement de la gunite.

Photo 5.10.3: Talus rocheux calcaire stabilisé à l'aide de gunite sur la route Vouvry – Chavalon (commune de Vouvry). On observe le décollement de plaque de béton et l'absence de treillis d'armature. ***Cliquez pour agrandir***

12. BIBLIOGRAPHIE

Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (APAT, 2003): "*Atlante delle opere di sistemazione dei versanti"*. Manuali e linee guida 10/2002, pp 74-75.

Brawner, C.O., 1994. Rockfall hazard mitigation methods, NHI course 13219, Participants workbook.

Collepardi M. (2001): *"Il nuovo calcestruzzo"*. Edizioni Tintoretto, Treviso, pp. 281-291.

Cravero M., Iabichino G., Oreste P.P., Teodori S.P.: *"Metodi di analisi e dimensionamento di sostegni e rinforzi per pendii naturali o di scavo in roccia"*. Atti Convegno su "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

Ente Nazionale per le Strade - Gruppo Tecnico per la Sicurezza Stradale (2001) – "*La protezione del corpo stradale contro la caduta massi"*. ANAS.

Hoek E. & D. Wood (1988): "*Rock support"*. Article publié sur le magazine "Gallerie e grandi opera sotterranee", 4, pp. 47-48, 1990.

Liste des prix de la Région Autonome Vallée d'Aoste, dernière mise à jour janvier 2006

Pelizza S., Peila D., Oggeri C.: *"Tipologie di intervento per la bonifica di versanti rocciosi"*. Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

Willie, D.C. and Norrish, N.I., 1996. Stabilization of rock slopes. In: A.K. Turner and R.L. Schuster (Editors), Landslides, Investigation and Mitigation. National Academy Press, Washington, D.C., pp. 474-504.

Parade 11

Filets et grillages plaqués

1. DESCRIPTION

1.1. Objectif

Les treillis et filets plaqués – métalliques ou en PVC – constituent une parade active. Il s'agit d'une natte de filets ou de grillages plaqué contre la paroi, destinée à en assurer la stabilité superficielle ou locale. Les filets sont utilisés contre les chutes de blocs (volume inférieur à 5 m^3). Les grillages conviennent aux pierres dont le volume ne dépasse pas 1 m^3. Le placage des nattes contre la paroi vise à enrayer rapidement tout mouvement consécutif à une rupture.

1.2. Principe

Le principe consiste à plaquer une natte de filets ou de grillages contre la paroi à l'aide de câbles et d'ancrages répartis sur le pourtour de la zone instable. Un placage efficace permet de retenir les blocs en place ou d'enrayer rapidement le mouvement suivant la rupture. Les efforts à reprendre sont ainsi moins importants: ils dépendent uniquement d'une partie du poids du bloc instable, alors que lorsque le bloc prend de la vitesse, les efforts dépendent de l'énergie cinétique du bloc, soit de son poids intégral.

1.3. Description technique

Trois variantes sont possibles:

- Les filets sont utilisés contre les chutes de blocs (volume < 5 m^3). Ils sont plaqués contre la paroi au moyen d'ancrages, puis mis en tension. Des câbles et des ancrages sont ensuite ajoutés au besoin pour améliorer le placage. La dimension standard d'une natte de filet est de 2 à 3 mètres de côté. Elle est entourée d'un câble de ceinture muni de boucles d'amarrage. Plusieurs nattes peuvent être ajoutées l'une à l'autre en ligaturant les câbles de ceinture. Les filets sont constitués par des câbles de différents diamètres (diamètre standard: 8 mm), en acier zingué ou recouvert d'un alliage Al-Zn. La maille (d'un diamètre standard de 20 x 20 ou 25 x 25 cm) peut être hexagonale, losangique ou circulaire.
- Les grillages (double torsion ou TECCO®) sont utilisés contre les chutes de pierres (volume < 1 m^3). Les grillages à double torsion sont constitués de fils (en acier zingué ou revêtus d'un alliage Al-Zn) d'un diamètre de 2.7 à 3.0 mm à mailles hexagonales. Ils doivent être plaqués à la paroi. Néanmoins, le placage est plus souple que dans le cas des filets, car il n'y a pas de mise en tension. Les grillages TECCO® ont une structure à simple torsion à maille losangique 83 x 143 mm. Ils ont une résistance à traction de 150 kN/m dans le sens longitudinal et de 60 kN/m dans le sens transversal. Les plaques de répartition des efforts des ancrages permettent de fixer le grillage très proche du terrain, en effectuant si possible une éventuelle présollicitation du grillage aux alentours du point d'ancrage.
- Les câbles de ceinture permettent de stabiliser des blocs volumineux et massifs. Il s'agit d'un ou de plusieurs câbles ancrés et mis sous tension qui emmaillotent un bloc.

Quel que soit la variante retenue, l'important est de tirer profit du relief. Les ancrages doivent évidement être réalisés en terrain stable. Ils sont constitués de barres d'acier scellées au rocher, de boulons à expansion ou, en terrain meuble, de pieux explosés.

2. DOMAINE D'UTILISATION

2.1. Performances

Les filets ou les câbles servent à stabiliser localement une masse instable, souvent en saillie, qui ne peut pas être purgée ou stabilisée directement. Les filets ou les grillages sont utilisés sur de plus grandes surfaces, tel un pan de rocher disloqué ou un talus d'éboulis. Quelle que soit la variante utilisée, cette parade n'est pas destinée à retenir des volumes importants. Elle présente de nombreux avantages, ce qui implique qu'elle a tendance à remplacer d'autres techniques, comme le béton projeté:

- Elle a un coût raisonnable (sauf en cas de plus value liée à l'accessibilité).
- Sa mise en œuvre est rapide ou très rapide.
- La structure du filet ou du grillage ne modifie pas les caractéristiques hydrogéologiques du massif rocheux, contrairement au béton projeté.
- Elle permet en outre la reprise de la végétation, ce qui limite l'impact visuel de la parade.

L'efficacité de la parade dépend de la qualité du placage de la natte et de la pente du talus stabilisé. La qualité du placage dépend à moyen terme en grande partie de la position des ancrages, qui doivent se trouver hors de la zone instable.

2.2. Techniques associées

Parmi les techniques qui peuvent être associées:

- Les purges légères (**Parade 7**). Les purges à l'explosif, qui peuvent mettre en mouvement l'ensemble de la zone instable, sont déconseillées.
- Les ancrages (**Parade 9**).
- Le gunitage éventuel des parties altérées (**Parade 10** "béton projeté").

3. REALISATION

3.1. Conception

La conception doit s'appuyer sur les travaux d'un géologue. Ceux-ci doivent consister en une étude de la fracturation et en un relevé des instabilités. Ces études permettront de déterminer les zones à purger, ainsi que de dimensionner les nattes (type, diamètre du fil et taille de la maille) et les ancrages. En règle générale, les ancrages seront distribués avec un espacement maximal de 3 m dans le rocher et de 2 m dans les terrains meubles.

3.2. Mise en œuvre

La mise en œuvre nécessite les services d'une entreprise spécialisée dans les travaux acrobatiques. Elle comprend les étapes suivantes:

- La purge et le débroussaillage, qui permettent la mise en sécurité du chantier.
- La réalisation des ancrages (**Parade 9**). Il faut prêter attention au fait que les plaques de tête doivent être bien plaquées contre le rocher.
- La pose des filets ou des grillages s'effectue depuis le haut du versant. En fonction de l'accessibilité, il faut envisager d'avoir recours à un treuil ou à un hélicoptère. Le recours à l'hélicoptère permet d'accélérer la pose: alors qu'une grue permet de mettre en place entre 5 et 7 rouleaux de grillages de 25 m de long et de 3 m de largeur en une heure, l'utilisation

judicieuse et bien préparée de l'hélicoptère permet de poser 35 à 40 rouleaux dans le même temps.

- Dans le cas des filets, les ancrages doivent être positionnés précisément sur le pourtour de la natte. Celle-ci sera ensuite mise en tension à l'aide d'un tire-fort. Les ancrages de placage complémentaires seront réalisés ensuite au travers de la natte.

3.3. Eléments de coût

Les coûts peuvent se décomposer de la manière suivante:

- Installation du chantier et travaux préparatoires (purge).
- Fournitures et pose
  - Filets:
  - Grillages
  - Câblages
  - Ancrages
- Plus-values liées à l'accessibilité (utilisation de l'hélicoptère).

A titre d'exemple:

- La purge des éléments instables coûte 1.43 €/m²
- La fourniture et la pose d'un grillage métallique double torsion en fil de fer galvanisé d'un diamètre de 2.7 mm, à mailles hexagonales de 80 x 80 mm, comprenant l'ancrage du grillage au sommet de la paroi à l'aide de clou et le placage du grillage au terrain à l'aide de pieux en acier revient à 8.16 €/m^2.
- La fourniture et la pose de filets formés de câbles de 8 mm de diamètre en acier zingué ou revêtus d'un alliage Al-Zn, ayant des mailles de 20 x 20 cm hexagonales, losangiques ou circulaires varient entre 39.00 et 44.56 €/m^2.
- L'utilisation de l'hélicoptère se monte à 25 €/min

4. ENTRETIEN

La durée de vie de ce type de parade est estimée à plusieurs décennies, la rupture de certains éléments n'entraînant pas systématiquement la destruction de l'entier du dispositif. Des dégâts peuvent également être causés par de la glace.

La maintenance consiste en une purge régulière des éléments détachés, qui empêchent le placage correct du filet et réduisent ainsi son efficacité. Les ligatures et mailles défectueuses doivent être réparées dès la constatation des dégâts. Un contrôle périodique doit par conséquent être effectué. Outre les dégâts à la structure, une attention sera portée aux problèmes liés à la corrosion ou à l'altération différentielle. Des mesures adéquates seront prises (par exemple gunitage).

5. EXEMPLES

5.1. Parois de Fingles, commune de Saint Maurice, Valais:

Dans le cadre d'un projet défense, les parois calcaires à l'ouest de la ville de Saint Maurice ont fait l'objet de plusieurs mesures de protection. Parmi celles-ci, des filets PVC ont été plaqués sur la bordure sommitale d'un ressaut rocheux surmontant la route cantonale, pour éviter la mobilisation de blocs de volume inférieur à 0.5 m^3. Le plaquage a été réalisé par des ancrages de 1.2 à 2 m dans le rocher selon une maille approximative de 2 x 2 m.

Photo 5.11.1: Filets PVC plaqués sur la bordure sommitale d'une paroi à la sortie nord de la ville de Saint Maurice

Cliquez pour agrandir

5.2. Route de Martigny-Salvan, commune de Salvan, Valais:

Des filets PVC ont été disposés en application contre le rocher, pour réduire les chutes de pierres dans un lacet routier récemment élargi. Posé par bandes de 2 m de largeur, reliées entre elles par des lanières tissées. Le fond du filet est fixé par un câble. La vidange de poches entre les clous n'est malheureusement pas possible, mais la souplesse du filet permettant d'épouser au mieux le profil du rocher, la mobilisation des blocs est restreinte et les amas quasi inexistants.

5.3. Route A21 Martigny – Grand Saint Bernard, commune de Sembrancher, Valais:

Parmi les multiples mesures de protections prises pour stabiliser les parois rocheuses surmontant la galerie de la Monnaie au lieu-dit "Les Trappistes" sur la route principale Martigny-Grand Saint Bernard, des câbles d'acier de 21 mm de diamètre ont été tressés entre des ancrages passifs en acier de 1.5 m de profondeur et de 22 mm de diamètre (photo 5.11.2). L'objectif est de bloquer la mise en mouvement de compartiments rocheux disloqués, trop instables pour être forés.

5.4. Rue de Rome, commune de Aoste, Vallée d'Aoste :

Suite à une chute de blocs arrivée au mois de décembre 2004 depuis la parois située en amont de la rue de Rome, dans la commune de Aoste, l'administration régionale a conçu la sécurisation de la route par la pose de filets plaqués constitués par des fils en acier zingué de 8 mm de diamètre, à maille carrée 20 x 20 cm et par la réalisation d'ancrages (photo 5.11.3). Afin d'éviter la mobilisation des petites pierres, un grillage a été installé derrière les filets plaqués. Le coût de l'intervention a été de 150'000 € environ.

Photo5.11.2: Combinaison de mesures de protection au dessus de la galerie de la Monnaie au lieu-dit "Les Trappistes" : filets pare-pierres de moyenne énergie, ancrages passifs et câblages.

Photo 5.11.3. Combinaison de mesures de protection en amont de la route communale au lieu dit Rue de Rome, commune de Aoste.

Cliquez pour agrandir

5.5. Lieu-dit Chef-Lieu, commune d'Arvier (Savoie):

Suite à une chute de blocs d'environ 10 m^3 ayant fortement endommagé l'angle d'une maison ainsi qu'une voiture, l'administration régionale a conçu la mise en sécurité des infrastructures menacées par la pose d'un filet plaqué sur la paroi ainsi que la réalisation d'un écran déformable de filet à l'aval de la falaise.

Photo 5.11.4. Combinaison de mesures de protection en amont de la route nationale RN26, au lieu dit Chef-Lieu, commune d'Arvier.

Cliquez pour agrandir

6. BIBLIOGRAPHIE

Abramson L, Lee T., Sharma S., Boyce G. (2002): "*Slope stability and stabilization methods"*. Wyley & Sons, New York.

Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (APAT, 2003): *"Atlante delle opere di sistemazione dei versanti"*. Manuali e linee guida 10/2002, pp 83-85.

Agostini, R., P. Mazzalai, A. Papetti (1988): "*Le reti metalliche a maglie esagonali nella difesa dei versanti"*. Officine Maccaferri S.p.A., pp. 32-39.

Brawner, C.O., 1994. Rockfall hazard mitigation methods, NHI course 13219, Participants workbook.

Cravero M., Iabichino G., Oreste P.P., Teodori S.P.: *"Metodi di analisi e dimensionamento di sostegni e rinforzi per pendii naturali o di scavo in roccia"*. Atti Convegno su "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

Deflorian F., Rossi S., Bonora P., Sassudelli F.: *"Resistenza alla corrosione di funi per barriere paramassi e paravalanghe"*. Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

Ente Nazionale per le Strade - Gruppo Tecnico per la Sicurezza Stradale (2001) – "*La protezione del corpo stradale contro la caduta massi"*. ANAS.

Ferraiolo F. (2005): *"I rivestimenti corticali"*. Geoingegneria Ambientale e Mineraria, **1**, pp. 45-53, GEAM, Torino.

Ferraiolo F., Giacchetti G.: *"Rivestimenti corticali: alcune considerazioni sull'applicazione delle reti di protezione in parete rocciosa"*. Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

Flum D., Ruegger R., Guasti G.: "*Dimensionamento di sistemi di consolidamento flessibili superficiali costituiti da reti in acciaio ad alta resistenza in combinazioner a elementi di ancoraggio in barra"*. Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

Liste des prix de la Région Autonome Vallée d'Aoste, dernière mise à jour janvier 2006

Pelizza S., Peila D., Oggeri C.: *"Tipologie di intervento per la bonifica di versanti rocciosi"*. Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

Willie, D.C. and Norrish, N.I., 1996. Stabilization of rock slopes. In: A.K. Turner and R.L. Schuster (Editors), Landslides, Investigation and Mitigation. National Academy Press, Washington, D.C., pp. 474-504.

PARADE 12
VEGETALISATION DES TALUS

1. DESCRIPTION

Etablissement ou reconstitution d'un couvert végétal herbacé ou arbustif sur un talus formé de pierres et de blocs enchâssés dans une matrice meuble.

1.1. Objectif

Protection active ayant pour but de limiter l'érosion superficielle (liée au gel-dégel et aux eaux de ruissellement) de la matrice meuble des talus, responsable du déchaussement de pierres ou de petits blocs lors de fortes précipitations.
Effet complémentaire positif en matière de lutte contre le ravinement.

1.2. Principe

(Ré)installer un couvert végétal sur une pente mise à nu par l'érosion ou par des travaux de terrassement : par son emprise au sol (racines, couvert aérien), la végétation fixe le talus et limite ainsi le départ de pierres.
Des dispositifs peuvent être installés en parallèle pour stabiliser les terrains et assurer la prise de la végétation.

1.3. Description technique

La végétalisation peut être réalisée par engazonnement (semis d'espèces herbacées) ou embroussaillement (plantation ou bouturage d'espèces ligneuses arbustives).

Pour protéger les sols des facteurs érosifs, limiter le déchaussement des pierres, maintenir en place le semis et éviter l'arrachement des jeunes pousses les premières années, des protections peuvent être envisagées :

- grillage plaqué sur le talus en fonction des risques et délais de départ d'éléments ; les ancrages, en tête de talus et dans la pente, peuvent être des fers à béton ou des barres d'acier (Figure 5.12. 1 et photo 5.12.1) ;
- panneaux tridimensionnels, en acier, bois… convenablement ancrés dans la pente et remplis d'un substrat adapté (généralement gravier et terre végétale) ; cette technique est plutôt réservée aux talus à pente forte ;
- géotextiles biodégradables (toile de jute ou de coco) (photo 5.12.2) ou géosynthétiques (notamment alvéolaires).

En cas d'engazonnement, pour assurer à la jeune végétation de meilleures chances de prise, les semis sont en général associés à différents produits d'accompagnement :

- fixateur et conditionneur ;
- matière organique : terre végétale, mulch (paille) ou amendement (compost) ;
- matière minérale : engrais.

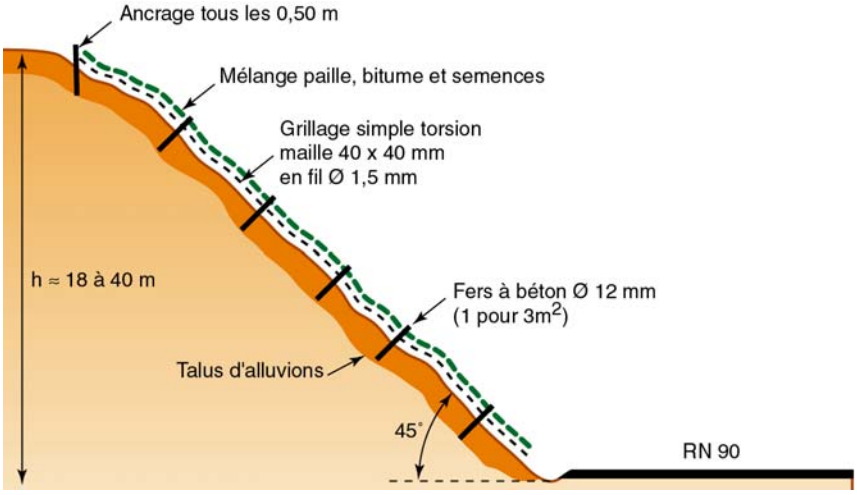


Figure 5.12. 1 Exemple de semis sur grillage (RN 90 près d'Aime en Savoie). Le grillage initial a été remplacé au bout de dix ans par un grillage plus résistant à la corrosion. D'après Rivet.

Photo 5.12.1 : Talus revégétalisé et protégé par un grillage. (Cemagref.)

Photo 5.12.2 : Géotextile (toile de jute) posé avant revégétalisation. (Cemagref).

Cliquer pour agrandir

En cas de plantation et de pose de grillage sur un versant, les plants doivent être installés après le grillage et au travers des mailles, pour éviter toute destruction des plants lors du déroulement du grillage.

Sur les fortes pentes, afin de limiter le ruissellement et le décapage du versant tant que la végétation n'est pas installée, on peut mettre en place des terrasses ancrées dans le terrain, de faible hauteur (30-50 cm), disposées suivant les courbes de niveau. Ces ouvrages de stabilisation peuvent être :

- des banquettes : terrassées ou grillagées ;
- des fascines ou palissades : petites barrières constituées de pieux, vivants ou morts, derrière lesquels des boutures sont empilées sous forme de fagots (fascines) ou en rangées verticales (palissades).

2. DOMAINE D'UTILISATION

Type de parade bien adapté aux talus formés de pierres et de blocs dans une matrice meuble : alluvions à blocs, moraines, éboulis rocheux, terrains pouvant conduire à des altérations en boule (terrains de couverture de certains grès ou granites).

La végétalisation est efficace :

- pour la stabilisation générale des talus, grâce à la fixation de la matrice meuble qui permet de limiter les départs de pierres ;
- pour l'intégration dans le paysage des ouvrages de génie civil (tranchées, terrassements routiers, merlons...).

2.1. Performances

La végétalisation est :

- en général bonne à très bonne, quand la végétation a pris, contre des départs de pierres de petite dimension (de l'ordre du décimètre cube), sur des talus n'excédant pas une pente de 45° ;
- d'autant plus marquée que l'intervention a été précoce, avant le déclenchement du phénomène d'érosion (immédiatement après la création du talus s'il s'agit d'un terrassement) ;
- fonction également beaucoup de la qualité du suivi les premières années (voir paragraphe 4).

Les limites du procédé résident dans :

- le délai : l'action de protection réelle n'est pas toujours immédiate,
- la pente : la prise de la végétation est difficile au-delà de 40-50°,
- la présence nécessaire d'un minimum de terre végétale (même s'il est possible d'en rajouter),
- les conditions de site :
    - altitude : succès problématique au-delà de 2000 m,
    - exposition : ensoleillement, humidité, température,
    - pluviosité,
- l'agressivité du site : des chutes de blocs fréquentes venues d'une zone supérieure peuvent détruire le dispositif avant que la végétation ne soit suffisamment implantée,
- l'existence d'un mouvement d'ensemble : la végétalisation protège seulement contre l'érosion et les glissements superficiels.

L'aspect esthétique d'un talus est enfin largement amélioré par la végétation, sous certaines conditions (utiliser des espèces locales, mélanger les espèces pour donner un aspect naturel, ne pas aligner les rangées d'arbustes...) ; le grillage ou les banquettes sont en général cachés au bout de quelques années.

2.2. Techniques associées

Purge manuelle avant pose du grillage (**Parade 7**).
Grillage plaqué (**Parade 11**).
Ecran en tête de talus pour contenir des chutes de blocs venus de zones supérieures (**Parades 2a** et **2b**).
Barrière fixe en pied (**Parade 2b**).
Drainage de surface (**Parade 13**)

3. REALISATION

3.1. Conception

Etude de stabilité de talus (stabilité d'ensemble et stabilité des blocs rocheux isolés) ; détermination des zones sensibles à purger ; dimensionnement du grillage.

Etude hydrogéologique : prise en compte des écoulements superficiels.
Etude pédologique et écologique, : détermination des espèces végétales les plus adaptées (facteur essentiel de la réussite de l'opération), ainsi que la technique de semis à employer.

3.2. Mise en oeuvre

Nettoyage du talus (souches, produits ligneux) ; purge des blocs les plus déchaussés.

Maîtrise des écoulements superficiels, mise en place si besoin d'un système de drainage et d'évacuation des eaux de ruissellement (photo 5.12.3)

Photo 5.12.3. Massif drainant et géotextile avant revégétalisation (RD 525 à Pinsot). Cemagref.).

Cliquer pour agrandir

La pose du grillage, la réalisation des banquettes et fascines et l'ensemencement seront confiés à des entreprises spécialisées.

3.3. Eléments de coût

Ils sont donnés à titre tout à fait indicatif, compte tenu de la grande diversité des situations rencontrées dans les trois pays concernés.

Semis simple : 0,1 à 8,5 €/m², selon la surface à traiter.
Semis hydraulique : 0,6 à 6,5 €/m², selon la surface à traiter, les produits d'accompagnement.
Semis hydraulique + toile de jute : 5 à 13 €/m².
Stabilisation par grillage et semis : 5 à 15 €/m².
Plantations : 2 à 20 €/plant, selon la hauteur des plants.
Toile de jute ou de coco: 2 à 8 €/m².
Fascines : 14 à 40 €/m.
Banquettes grillagées : 60 à 83 €/m.
Caisson forestier: 136 €/m' (simple) à 158 €/m' (double).

4. ENTRETIEN

La qualité du suivi les deux ou trois premières années augmente considérablement les chances de réussite de la végétalisation : fertilisation, semis/plantations complémentaires dans les zones clairsemées, contrôle/entretien des mailles et ancrages du grillage, réparation des banquettes endommagées… Si la végétation refuse de prendre de façon évidente, il convient dereprendre rapidement le dispositif : essais avec de nouvelles espèces, ou changement de parade si les caractéristiques du terrain s'avèrent vraiment trop pauvres.
Passé ce délai, la végétation s'entretient par elle-même, s'enrichit et se stabilise (stabilité assurée sans l'aide du grillage), les besoins en maintenance deviennent pratiquement nuls.

On surveillera particulièrement toute nouvelle forme d'érosion dans la zone traitée et à l'amont immédiat ; des interventions complémentaires pourront si nécessaire être réalisées.

Au bout de 10 à 20 ans, la corrosion du grillage peut conduire à le remplacer, dans le cas où la végétation ne s'est pas suffisamment développée pour que le grillage soit devenu inutile.

5. EXEMPLES

5.1. Col de La Cayolle (Alpes de Haute-Provence) - RD 902 – 1992 :

Le but est de stabiliser des talus raides (40-50°) soumis à des chutes de pierres, dans le cadre de la restauration de l'itinéraire routier du col de la Cayolle.
Les formations (éboulis et moraines sur un substratum de calcaires argileux) sont sensibles à la gélifraction et à l'érosion ; la fracturation (à grande et petite échelle) favorise la pénétration des eaux de ruissellement et une forte altération superficielle.
Technique retenue : purge des éléments les plus instables, pose d'un grillage et revégétalisation rapide :

- ancrages en tête et sur toute sa périphérie d'une couverture grillagée double torsion, maille 100x80 ou 100x120 mm en fil 3 mm ;
- sur certains profils, mur de type cyclopéen en pied de versant pour conserver la pente générale du talus ;
- projection hydraulique du semis (la forte déclivité ne permet pas le semis simple), réalisée en deux phases séparées de plusieurs mois pour optimiser la réussite ; le choix des végétaux (mélange d'espèces sauvages et d'espèces cultivées) a été établi pour résister aux contraintes du milieu (déclivité, enneigement, gel) ;
- les plantations (jeunes plants forestiers, au plus âgés d'une année) sont réalisées ensuite, après la pose du grillage.

Coût :
- végétalisation par semis : 1,5 € HT/m²
- plantations à 7,5 € HT/m².

L'ensemencement par projection hydraulique est la technique la plus couramment utilisée aujourd'hui pour la végétalisation des talus.

5.2. Lieu-dit Chef lieu, commune de Champdepraz, vallée d'Aoste :

En 1996, un glissement de terrain a affecté les dépôts d'éboulis situés en rive droite du torrent de Lavà. Le glissement d'une largeur de 27 m et d'une longueur de 12 m, a entraîné une épaisseur de 1 à 1.50 m de dépôts de pente.
L'aménagement du site, réalisé en 1998, a consisté à la réalisation :

- D'un caisson forestier double avec des boutures au pied du versant;
- D'un caisson forestier avec des boutures à mi-hauteur de l'éboulement ;
- De toiles de jute le long du talus, afin d'éviter des phénomènes d'érosion accélérée;
- De plantation de jeunes plants forestiers, âgés de moins d'une année.

Photo 5.12.4. Vue d'ensemble du caisson forestier construit en pied de versant.

Cliquer pour agrandir

5.3. Lieu-dit Frantze, commune de Ayas, vallée d'Aoste :

Cet exemple, bien que ne relevant pas directement du domaine des instabilités rocheuses, a été retenu car illustrant bien les techniques de parade contre les reprises d'érosion.

Les intempéries d'octobre 2000 sont à l'origine d'un glissement de terrain qui a touché une surface d'environ 800 m², située en amont du lieu-dit Frantze, dans la commune d'Ayas. Le glissement, dont la niche d'arrachement a une largeur de 5 à 6 m, a mobilisé environ 200 m^3 de dépôts morainiques et a endommagé des terrassements réalisés le long du versant.
Afin d'éviter la réactivation du glissement et les phénomènes d'érosion associés, cette zone a été réaménagée en 2002. Les travaux suivants ont été réalisés:

- ✓ Le rétablissement des murs de soutènement détruits par le glissement de terrain et la réalisation de 2 rangées superposées de caissons forestiers doubles avec des boutures ;
- ✓ La végétalisation de la pente à l'aide d'un semis à la volée et l'installation, à proximité de la niche d'arrachement, d'une toile de jute ;
- ✓ Le rétablissement et l'optimisation du système de drainage et d'évacuation des eaux de ruissellement.

Photo 5.12.5. Glissement de Frantze avant les travaux d'aménagement

Photo 5.12.6. Glissement de Frantze après les travaux d'aménagement

Cliquer pour agrandir

6 - BIBLIOGRAPHIE

Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (APAT, 2003) : "*Atlante delle opere di sistemazione dei versanti*". Manuali e linee guida 10/2002, pg. 1-37.

Collectif. (1994). *Végétalisation : la végétation, un outil d'aménagement : guide technique*. SETRA, réf. B 9418, 112 p.

Dinger F. (1997). *Végétalisation des espaces dégradés en altitude*. Editions Cemagref, 144 p.

Hénensal P. (1993). *Lutte contre l'érosion avant, pendant et après les travaux. Les protections végétales et structurelles des surfaces et des pentes*. Etudes et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, GT 54, 111 p.

Liste des prix de la Région Autonome Vallée d'Aoste, dernière mise à jour janvier 2006

Manuale tecnico di Ingegneria Naturalistica della Provincia di Terni (2003) - *Applicabilità delle tecniche, limiti e soluzioni.*

Pénelon L., Dinger F., Rey F., Falcy JP. (2004). *Végétalisation des talus routiers en Isère*. CD-ROM. Cemagref - Conseil Général de l'Isère.

Rey F. (sous presse). *Génie biologique pour le contrôle de l'érosion dans les bassins versants torrentiels*. Editions Cemagref.

Parade 13
DRAINAGE DE SURFACE

1. DESCRIPTION

Collecte et évacuation des eaux superficielles en amont et au droit des zones à traiter.

1.1. Objectif

Parade active ayant pour but de limiter le ruissellement et les infiltrations d'eau dans le massif, et donc :

- de réduire l'érosion superficielle,
- d'éviter l'éclatement de la roche sous l'effet du gel, ou la détérioration de dispositifs tels que grillages pendus par surcharge de glace,
- de limiter les pressions interstitielles.
- pour les falaises longeant (ou surplombant) des voies de circulation, de limiter la formation de chandelles de glace pouvant être extrêmement dangereuses pour les usagers en cas de chute.

1.2. 1.2 - Principe

Collecter les arrivées d'eaux superficielles le plus tôt possible :

- à l'amont en crête de massif,
- au niveau des exutoires à la surface du massif.

Diriger et évacuer les eaux collectées en dehors de la zone sensible.

1.3. Description technique

En crête de talus, ou même plus à l'amont :

- récupérer les eaux superficielles dans des tranchées perpendiculaires à la pente, creusées sur 30 à 50 cm de profondeur, avec une pente régulière pour éviter les stagnations d'eau :
    - pavées d'argile ou bétonnées,
    - en éléments de chenaux préfabriqués (plastiques, métalliques, béton...),
    - équipées de matériaux filtrants et drainants (géotextiles).
- boucher les fissures ouvertes pour éviter les infiltrations : utiliser un matériau étanche mais "souple" (argile, membrane plastique) ; l'eau doit, si elle a pu s'infiltrer, pouvoir ressortir (sinon risque de mise en pression !) ; ne jamais boucher par du béton.

Dans le versant :

- pour des talus en terrain meuble, ou en roche tendre ou altérée : drains dans le sens de la pente, dans une tranchée :
    - peu profonds (50-100 cm), surtout pour prévenir l'effet du gel,
    - plus profonds pour mettre hors d'eau des surfaces de glissement,
- en paroi : système permettant de capter les eaux dès leur exutoire, et de les canaliser au mieux (photo 1) :
    - rigole de béton, faiblement pentée, coulée sur le rocher en utilisant les reliefs favorables (vires, fissures),
    - gouttière PVC, avec le moins de raccords possibles, fixée en paroi par des moyens adaptés (support, ancrage).

Photo 5.13.1 - Evacuation des eaux superficielles le long d'une paroi rocheuse (RN 205 à Servoz, Haute-Savoie)

Cliquer pour agrandir

Cas de venues d'eau diffuses : elles peuvent être canalisées vers la rigole/gouttière avec une membrane étanche plaquée au rocher.

2. DOMAINE D'UTILISATION

2.1. Performances

L'**efficacité** est variable suivant les conditions :

- hydrogéologiques : ruissellement individualisé à l'amont, émergences ponctuelles ou linéaires en paroi,
- topographiques : possibilité d'acheminer par gravité les eaux captées hors du secteur sensible,
- météorologiques : endommagement ou obstruction du dispositif par le gel ou la neige.

En cas de succès, l'assèchement, au moins partiel, du rocher de surface réduit considérablement les dégradations superficielles.
L'efficacité dépend aussi de l'entretien des systèmes de drainage : une rigole bouchée, une gouttière percée, déboîtée, provoque une concentration des eaux dans le terrain et aggrave le problème qui devait être traité !

2.2. Techniques associées

Drainage profond (**Parade 14**).
Le drainage devrait être associé plus systématiquement à toutes les techniques de confortement.

3. REALISATION

3.1. Conception

Elle est surtout basée sur l'observation du site (arrivées et cheminements de l'eau, topographie), qui doit être faite en saison pluvieuse.
Laisser une distance suffisante entre les fissures de tête et le dispositif drainant amont (distance égale à 3 m minimum) afin de limiter les risques de destruction en cas de régression du phénomène.

3.2. Mise en oeuvre

Pour les tranchées en crête :

- en terrain meuble, utilisation conseillée d'une pelle, si l'accès le permet ;
- en terrain rocheux, un brise-roche peut être nécessaire.

Pour les gouttières, utiliser des matériaux qui ne sont sensibles ni à la corrosion, ni au gel.

Problèmes fréquents d'accès en paroi : faire appel à une entreprise spécialisée (travaux acrobatiques de grande hauteur).

3.3. Eléments de coût

Réalisation d'une tranchée : coût extrêmement variable selon les conditions d'accès au chantier.
Matériaux : généralement négligeable par rapport à la mise en œuvre.
Canal d'évacuation des eaux en bois: 38 €/m'.
Canal d'évacuation des eaux en pierres et en bois: 70 €/m'.
Intervention en falaise (personnel spécialisé, nacelle…) : 1 à 2 k€ par jour.

4. ENTRETIEN

Pérennité aléatoire, qui dépend essentiellement de l'entretien :
- curage régulier des rigoles pour éviter la formation de barrages (surtout après des épisodes de pluviométrie intense),
- surveillance des systèmes collecteurs : réparation rapide nécessaire en cas de fuite (tuyaux percés, bouchés, éléments déboîtés),
- contrôle souhaitable après les périodes de gel, particulièrement dommageables.

Remarque : L'entretien, pourtant indispensable, se heurte aux mêmes problèmes d'accès que la mise en œuvre.

5. EXEMPLE

5.1. Descente des Egratz (Haute-Savoie) - R.N. 205 :

Dans le versant surmontant la route, l'eau ruisselle et suinte à plusieurs niveaux, entraînant des chutes de pierres ainsi qu'en hiver, la formation de cascades de glace dommageables pour les grillages pendus et préoccupantes pour la sécurité des automobilistes. Un système de drainage superficiel a été installé pour récupérer ces eaux (schéma 1) : membrane en PVC souple plaquée au rocher, goulotte subhorizontale et collecteur vertical qui évacue les eaux le long de la chaussée.

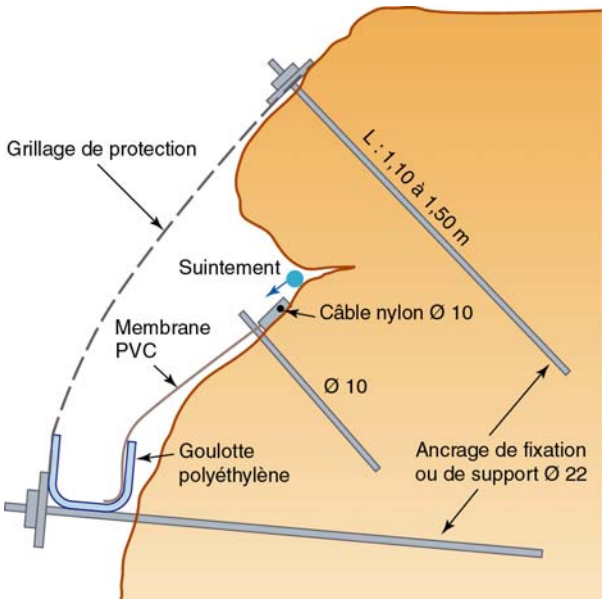


Figure 5.13. 1 Exemple de dispositif de collecte des eaux de paroi (descente des Ergratz, Haute-Savoie). D'après [DRM]

5.2. Eboulement du couloir Belvédère de Gimillian, commune de Cogne, vallée d'Aoste :

Dans le cadre du projet de stabilisation de l'éboulement de Gimillian (**Parade 14 § «drainage profond- exemples»**), des chenaux métalliques et des toiles de géotextiles, ensuite végétalisées par projection hydraulique du semis, ont été mises en place afin de limiter le ruissellement et l'infiltration des eaux dans le versant.

Photo 5.13.2. Vue d'ensemble de l'intervention.

Cliquer pour agrandir

5.3. Glissement du Bois de Goubelin, commune de Morgex, vallée d'Aoste :

Cet exemple, bien que ne relevant pas du domaine des instabilités rocheuses, a été retenu car illustrant bien un mode de drainage de surface.

Suite aux intempéries d'octobre 2000, un glissement de terrain s'est produit au lieu-dit Bois de Goubelin dans la commune de Morgex. L'aménagement de cette zone a été conçu par l'administration régionale. Les travaux ont consisté en la réalisation d'une palissade en bois à doubles parois dans la niche d'arrachement, la mise en œuvre d'une cunette mixte (pierres au fond et troncs de sapin sur les deux flancs) pour l'évacuation des eaux de ruissellement et l'engazonnement de la pente avec un semis à la volée.

Photo 5.13.3. Aménagement du glissement.

Cliquer pour agrandir

6 - BIBLIOGRAPHIE

DRM (1987) – *Plan d'exposition aux risques, Mesures de Prévention, Mouvements de terain* , document rédigé par le CEMAGREF Grenoble, l'IRIGM et Simecsol pour la Délégation aux Risques Majeurs- La documentation française - fiche 1.2.2.4

Franklin J. A., Dusseault M. B. (1989). *Rock engineering* (Chap. 18 *: Drainage, grouting and freezing)*. Mac Graw Hill, 600 p.

Liste des prix de la Région Autonome Vallée d'Aoste, dernière mise à jour janvier 2006

Parade 14

DRAINAGE PROFOND

1. DESCRIPTION

1.1. Objectif

Parade active ayant comme objectifs de:

- Contrôler et diminuer les pressions d'eau à l'intérieur du massif rocheux ou dans des terrains de fondation à consolider ou à améliorer.
- Abaisser le niveau de la nappe afin de garantir la stabilité des ouvrages importants.

1.2. Principe

Il s'agit de capter et de réduire la quantité d'eau à l'intérieur d'un massif rocheux ou d'un terrain meuble en favorisant l'écoulement gravitaire à l'aide de réseaux de drains subhorizontaux ou d'ouvrages de grande extension et/ou de grand diamètre (drains ou puits verticaux, galeries drainantes, etc.).

1.3. Description technique

Les types de drainages profonds le plus couramment utilisés sont:

- Les drains subhorizontaux: ce sont généralement des tubes en PVC crépinés d'un diamètre de 44 à 118 mm, introduits dans des forages de diamètre approprié et inclinés de 5 à 10°, afin d'assurer l'écoulement gravitaire et l'autocurage. Les drains sont généralement revêtus de nappes géotextiles pour éviter l'engorgement ou le colmatage par les particules fines. Les profondeurs maximales atteignables sont de l'ordre de 50 à 60 m.
- Les galeries drainantes (Figure 5.14. 1) ont en général des sections modestes (hauteur 1.80 à 2.00 m, largeur 1 à 2 m) afin de permettre le contrôle et la maintenance des ouvrages. La base de la galerie est positionnée à une profondeur légèrement inférieure à celle du niveau moyen des eaux souterraines, tandis que son sommet intercepte ce niveau. Dans certains cas, un réseau de drains subhorizontaux peut être foré à partir de la galerie pour rendre le drainage plus efficace. Les galeries drainantes peuvent soit être laissées vides, soit être remplies avec du matériel drainant.

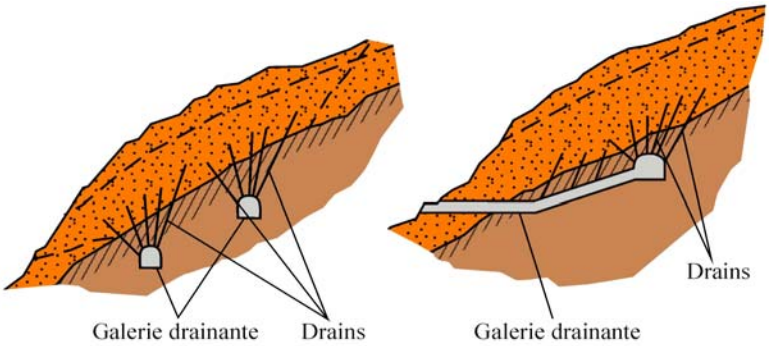


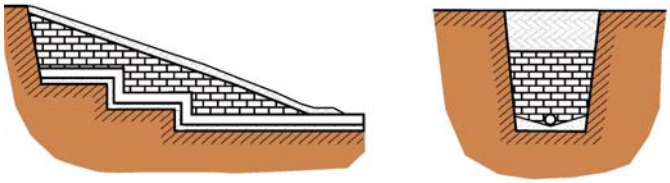
Figure 5.14. 1 – Galerie drainante (APAT, 2001).

- Les éperons drainants (Figure 5.14. 2) sont des excavations étroites (environ 1 m) mais pouvant atteindre une profondeur supérieure à 7 m, qui comportent une cunette bétonnée surmontée par un système de drainage de section variable et par une structure porteuse perméable. Les éperons drainants sont disposés selon la plus grande ligne de pente du versant, avec une distance entre eux qui dépend à la fois de la hauteur de l'éperon, de la

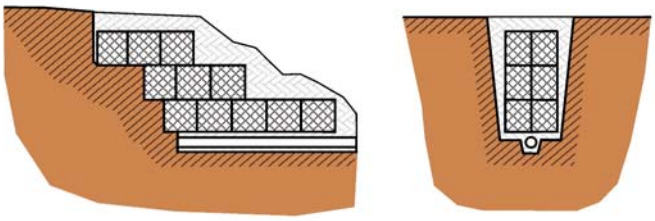
longueur du drainage et de la profondeur de la surface de glissement. La structure porteuse de l'éperon peut être constituée par:

- Un mur en pierres sèches, disposées en couches inclinés d'environ 30° vers le terrain, avec un niveau de graviers et de sable entourant le tube drainant.
- Un écran de gabions revêtu d'une couche de sable ou protégé par un géotextile.
- Une cloison centrale en béton séparant des parties latérales en matériel drainant sablo-graveleux, protégée ou non par du géotextile.

Eperon en maçonnerie recouvert par sable lavé et gravier. Le tube drainant est positionné au fond de l'excavation.



Eperon en gabions revêtu par géotextile.



Eperon avec cloison central en béton ; la cloison est réalisée au centre de l'excavation, tandis que les parois sont recouvertes par géotextile. Le matériel drainant est constitué par sable et gravier.

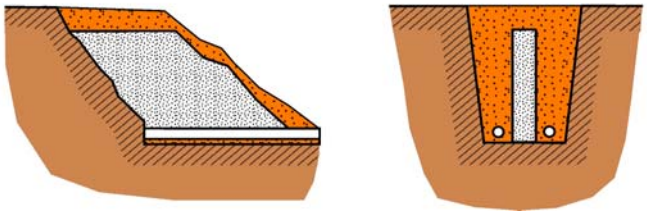


Figure 5.14. 2– Types d'éperons drainants (APAT, 2001).

- Les puits drainants (Figure 5.14. 3) sont constitués par une structure verticale en béton, armé ou non, et une couronne extérieure de drains forés subhorizontaux. Les puits drainants peuvent servir pour le drainage des nappes phréatiques à des fins de stabilisation ou pour l'alimentation en eau potable. Ils peuvent également avoir une fonction de soutènement dans les interventions de confortement et de stabilisation des pentes en mouvement.

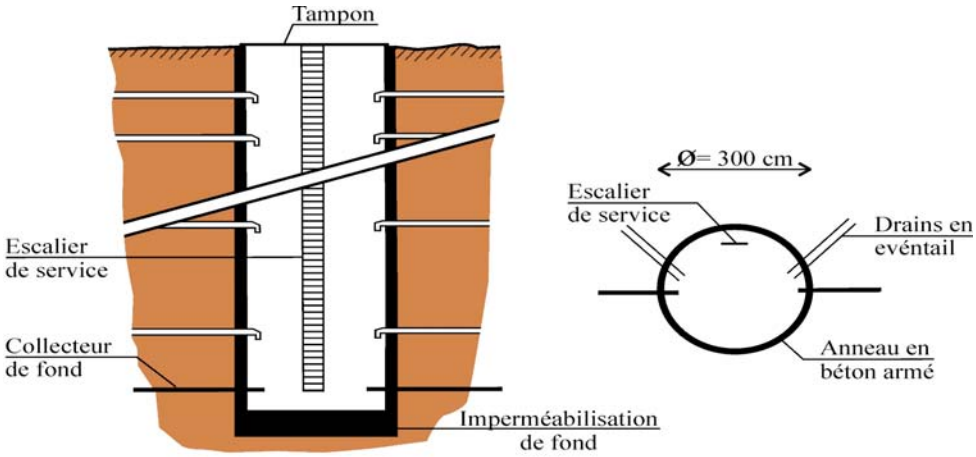


Figure 5.14. 3 – Puit drainant (APAT, 2001).

- Les tranchées drainantes (Figure 5.14. 4) sont des structures allongées, disposées perpendiculairement aux écoulements. Elles ont une profondeur de 4 à 6 m et une largeur d'environ un mètre (0.80 à 1.20 m). Dans le cas des versants peu inclinés (5 à 10º), le fond de l'excavation peut avoir une pente uniforme. Pour les pentes plus élevées ou pour des tranchées très longues, un terrassement doit être réalisé. Le fond de la tranchée est constitué par un exutoire en béton, sur lequel on dispose un tube en PVC, en béton ou en métal. Le tube est recouvert par un corps drainant, qui peut être constitué par:
    - Des graviers et des sables lavés, contenant peu de particules fines (< 3 % poids) recouverts par une couche de terrain végétal d'environ 50 cm d'épaisseur.
    - Une couche de graviers lavés d'une épaisseur de 5 à 20 mm, complètement enveloppée dans un géotextile mis à contact avec le terrain à drainer. Le remplissage de la tranchée est ensuite complété par une couche de sable, puis par du terrain végétal.

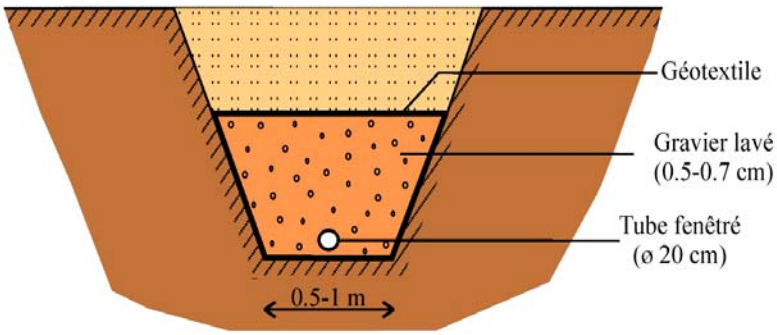


Figure 5.14. 4 – Tranchée drainante (APAT, 2001).

- Le principe des parois drainantes (Figure 5.14. 5) est identique à celui des tranchées drainantes. Par contre, les profondeurs atteignables sont supérieures à 30 m, pour une largeur de 60 à 120 cm. En fonction du type de soutènement adopté et du mode d'excavation, les parois drainantes peuvent être:
    - A poteaux: ce type est utilisé pour des sols qui peuvent être excavés sans soutènement. Un coffrage est ensuite introduit dans l'excavation, puis rempli avec du matériel drainant.
    - A panneaux: dans des terrains qui nécessitent de soutènement, l'excavation est réalisée avec de la bentonite. Le coffrage est ensuite introduit, puis rempli avec du

matériel drainant. L'excavation peut au besoin être réalisée à l'intérieur d'un coffrage rectangulaire enfoncé progressivement dans le terrain, à l'aide d'un jet d'eau à haute pression. Le matériel peut ensuite être extrait à l'air comprimé.

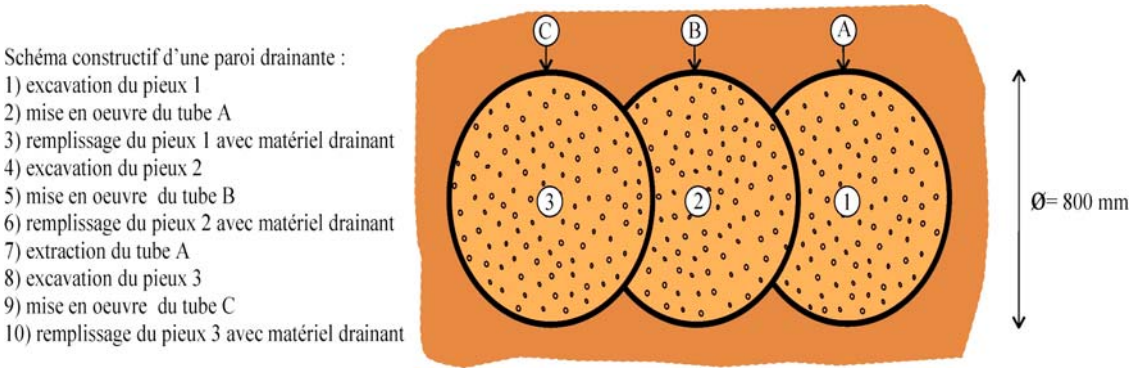


Figure 5.14. 5– Paroi drainante (APAT, 2001).

2. DOMAINE D'UTILISATION

Les drains subhorizontaux sont principalement utilisés:

- Dans les interventions de confortement des glissements rotationnels. Ils sont alors placés à la hauteur des zones d'arrachement.
- Dans tous les cas où l'inclinaison du versant est élevée.

Les drains subhorizontaux sont couramment associés à des puits verticaux de grand diamètre (Figure 5.14. 6) ou à des galeries drainantes. Ils sont alors disposés en éventail sur un ou plusieurs niveaux, ou parallèlement entre eux.

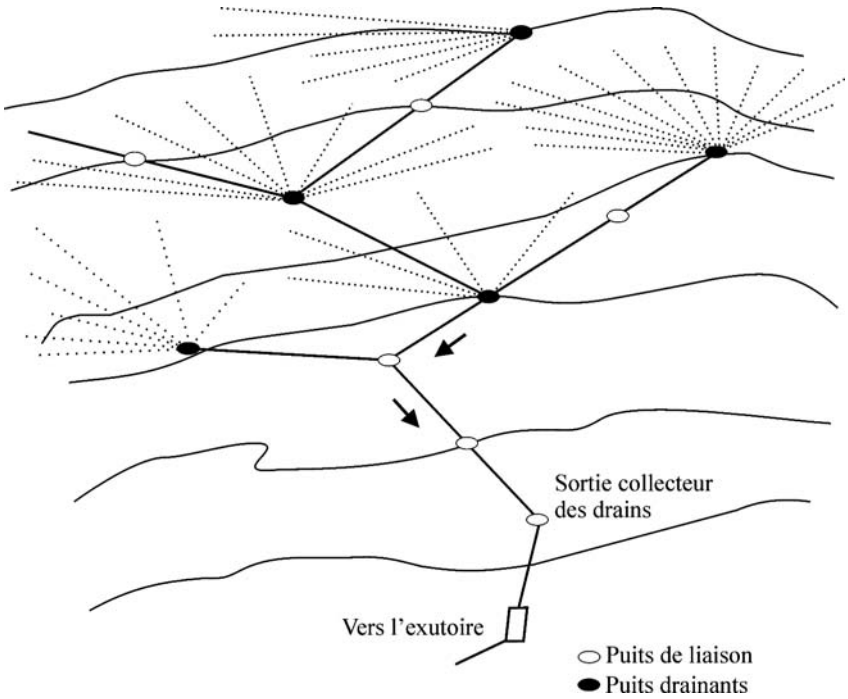


Figure 5.14. 6 – Association de drains subhorizontaux et puits drainants (APAT, 2001).

Les éperons drainants sont utilisés dans les interventions de confortement des pentes en mouvement qui nécessitent, à cause de la profondeur du plan de glissement, des caractéristiques lithologiques ou de l'inclinaison du terrain, l'association d'une action résistante par rapport aux poussées des terrains en mouvement à l'action drainante elle-même. Un système auto-consolidant peut ainsi être réalisé sans faire appel à d'autres ouvrages de soutènement.

Les galeries drainantes sont couramment associées aux drains subhorizontaux et aux puits. Elles sont utilisées dans les interventions de confortement et de stabilisation des pentes en mouvement, dans le cas de conditions hydrogéologiques particulières (présence de zones de failles ou d'intense fracturation, contact entre le substratum rocheux et les dépôts de couverture, etc.). Afin de garantir la stabilité des ouvrages importants, ces situations requièrent toutes un abaissement du niveau de la nappe.

Les tranchées drainantes sont utilisées pour le drainage des eaux d'infiltration et de la nappe. L'abaissement du niveau piézométrique et la réduction des pressions d'eau dans le terrain permettent d'obtenir une augmentation de la cohésion, améliorant ainsi les conditions de stabilité du versant.

Les tranchées drainantes, de même que les éperons et les parois drainantes sont utilisées dans les interventions de confortement des glissements rotationnels et/ou des glissements peu profonds.

2.1. Performances

De par leur méthode de réalisation, les drains subhorizontaux ont un impact esthétique et paysager limité. Cependant, leur mise en œuvre peut provoquer des effets négatifs sur le régime des écoulements souterrains et des aquifères concernés, si ils ont été réalisés sans une étude et une surveillance appropriées.

Les éperons drainants ont un impact visuel important, qui peut néanmoins être partiellement réduit par la végétation qui tend à masquer les ouvrages. En outre, ils sont caractérisés par des coûts de réalisation élevés.

Les galeries drainantes ont l'avantage:

- D'abaisser considérablement le niveau de la nappe à l'intérieur des éboulements en utilisant exclusivement l'écoulement gravitaire. Il est néanmoins parfois nécessaire de vidanger les drains par pompage.
- D'être réalisées entièrement dans le terrain stable situé au-dessous de la masse en mouvement. Elles ne la traversent donc pas et n'ont pas de risque d'être endommagées.
- De permettre la multiplication des éléments de drainage sans toucher la surface du sol.
- D'avoir un impact visuel limité.

Par contre, les galeries sont des ouvrages très coûteux. Elles sont généralement mises en œuvre seulement dans le cas où des infrastructures ou des agglomérations sont menacées par des éboulements de grandes dimensions. Dans des conditions particulières, les galeries peuvent en outre provoquer une modification des conditions hydrogéologiques (variations du débit des puits d'eau potable, appauvrissement ou tarissement des sources situées à proximité de la zone d'influence des puits) ou de stabilité (phénomènes de subsidence) dans la zone d'intervention.

Les puits drainants sont utilisés dans des zones où:

- Les lignes d'écoulement des eaux souterraines ne sont pas connues avec suffisamment de précision.

- Les terrains, hétérogènes, sont constitués par une alternance d'horizons de perméabilités différentes se traduisant par des conditions hydrogéologiques complexes.

Les puits drainants peuvent avoir un impact visuel important en fonction de leur méthode de construction. Dans des conditions hydrogéologiques particulières, ils peuvent en outre modifier les écoulements en surface ou souterrains.

Par rapport aux drainages de surface, les tranchées drainantes ont un impact important sur l'environnement (en particulier sur le régime des eaux souterraines). L'intégration de ce système de drainage dans le paysage est en générale bonne, compte tenu que la couche de remplissage superficiel peut être constituée par du terrain végétal ou des pierres.

Les parois drainantes ont un impact important sur l'environnement, de par leur mode de construction (vibrations et bruits désagréables) et du fait de l'introduction de mélanges de ciment dans le sous-sol (risques de pollution de la nappe).

2.2. Techniques associées

Les drainages profonds sont couramment associés aux drainages de surface et à toutes les techniques de stabilisation ou de confortement (Figure 5.14. 7).

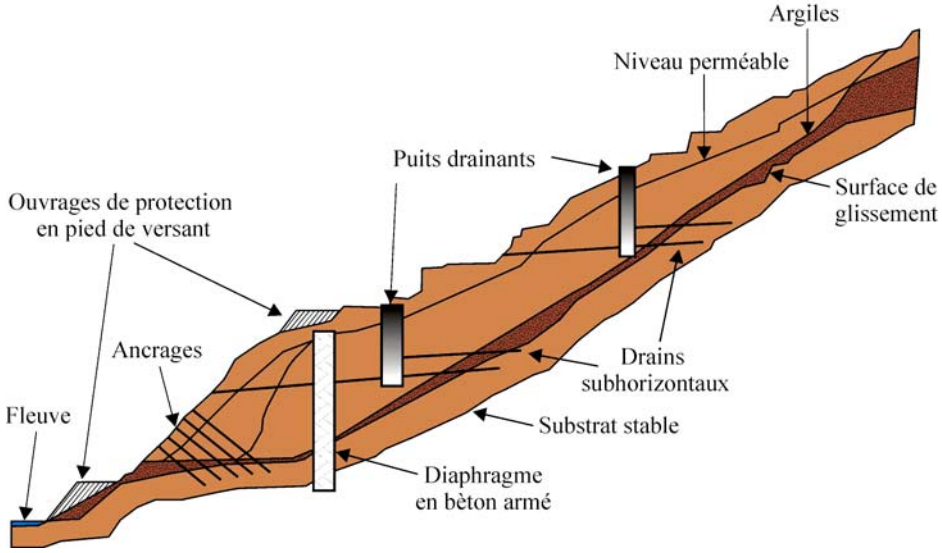


Figure 5.14. 7 – Aménagement d'une pente avec techniques de confortement et drainages profonds (APAT, 2001).

3. REALISATION

3.1. Conception

L'évaluation de l'efficacité d'un système de drainage est très souvent difficile durant la phase de projet. Il est par conséquent nécessaire de prévoir la réalisation d'un réseau de piézomètres en même temps que le système de drainage lui-même. Les relevés piézométriques périodiques permettront d'évaluer les réactions de la nappe, de vérifier le bon fonctionnement du système de drainage et éventuellement d'envisager son amélioration.

Le dimensionnement, le nombre, la disposition et la profondeur des drains subhorizontaux doivent en outre être réalisés sur la base d'une étude géologique et hydrogéologique visant à acquérir les paramètres hydrogéologiques de terrain.

Le projet d'une galerie drainante requiert une étude préliminaire visant à définir l'évolution de l'éboulement. Les zones de drainage préférentielles doivent être mises en évidence pour positionner et dimensionner la galerie drainante et le réseau de drains subhorizontaux .

3.2. Mise en œuvre

Les techniques de construction modernes permettent la réalisation d'interventions composites, constituées par des puits drainants verticaux reliés entre eux par des forages équipés de drains subhorizontaux disposés en éventail sur plusieurs niveaux. La zone d'influence du système drainant peut ainsi être élargie.

Les puits drainants peuvent être réalisés de manière isolée ou être rapprochés pour former une paroi drainante. Dans ce cas, il est nécessaire de remplir le forage avec du matériel drainant pour garantir l'écoulement gravitaire.

La réalisation des tranchées drainantes dépend de la profondeur et des conditions géologiques et hydrogéologiques locales. L'excavation doit être réalisée en avançant de l'amont vers l'aval, de sorte que les tranchées puissent exercer leur fonction drainante dès la phase de construction.

3.3. Eléments de coût

Pour la fourniture et la pose d'un drain subhorizontal constitué d'un tube en PVC crépiné transversalement, entouré d'une couche de protection filtrante et insérée dans un forage, selon le diamètre extérieur du tube (diamètre de 44, 90 ou 118 mm), les prix varient entre 25.43 et 38.16 €/m'.

4. ENTRETIEN

La pérennité de ces ouvrages dépend essentiellement de la nature du massif rocheux ou du terrain dans lequel ils sont réalisés. En particulier, dans les massifs calcaires, les drains peuvent se colmater rapidement à cause du dépôt de calcite.

L'entretien concerne principalement les drains subhorizontaux, qui doivent être décolmatés régulièrement avec des jets à haute pression d'eau ou d'air, et remplacés lorsqu'ils sont hors d'usage. De plus, l'exutoire et les collecteurs qui peuvent être endommagés doivent régulièrement être nettoyés et curés.

5. EXEMPLES

5.1. Eboulement du couloir Belvédère de Gimillian, commune de Cogne, vallée d'Aoste.

L'éboulement du couloir Belvédère (Figure 5.14. 8) est un phénomène ancien qui s'est réactivé suite aux intempéries d'octobre 2000. Cet éboulement est caractérisé par une zone d'arrachement, située entre 1700 et 1750 m, et une zone de glissement et d'accumulation à l'aval, ayant une forme triangulaire. Le corps principal de l'éboulement est affecté par différents mécanismes: la zone d'arrachement est caractérisée par la présence d'une surface de cisaillement ayant un pendage d'environ 50°, tandis que le mécanisme principal est du type rotationnel à partir

de 1580 m. Le phénomène affecte les dépôts formant la terrasse glaciaire sur laquelle est bâtie l'agglomération de Gimillian. Ces dépôts, qui ont une épaisseur variant entre 17 et 35 m, recouvrent des lithologies de l'unité Ligure-Piémontaise, constituées en particulier de calcschistes, de marbres, de cargneules et de gypse.

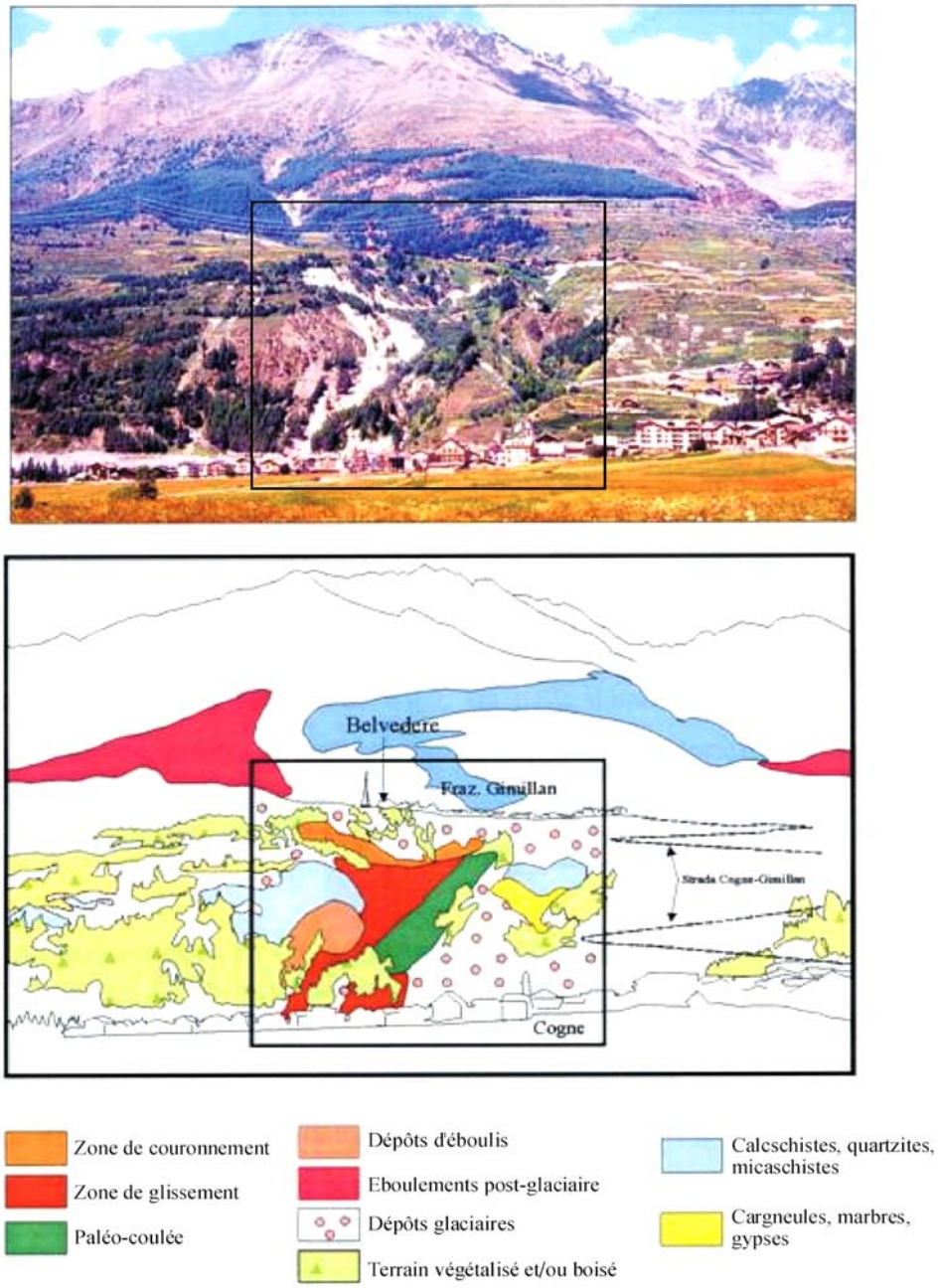


Figure 5.14. 8 – Photo et carte géologique de la zone d'éboulement.

La stabilisation du versant a été réalisée à l'aide d'un système de drainage profond comprenant des drains subhorizontaux disposés en éventail, associés à cinq masques drainants et à trois puits drainants. La mise en œuvre du système de drainage a été réalisée en divisant l'éboulement en deux secteurs:

- La zone de couronnement, située à proximité du Belvédère de Gimillian, où la réalisation de petites places masques drainants (Photo 5.14.1) a été prévue. Les travaux ont consisté à:
  - Creuser et reprofiler le versant, pour permettre l'installation du chantier.
  - Forer et poser des tubes drainants.
  - Poser et remplir des gabions métalliques.
  - Mettre en place des collecteurs.

Photo 5.14. 1 – Place drainante

Cliquer pour agrandir

- Le corps de l'éboulement, où des puits drainants ont été construits suivant les étapes suivantes:
  - Excavation et reprofilage du versant pour permettre l'installation du chantier.
  - Réalisation de la couronne de micro-pieux.
  - Excavation des puits.
  - Revêtement en béton armé.
  - Réalisation des tirants d'ancrages permanents.
  - Forage et pose des tubes drainants.
  - Forage et mise en œuvre du tube d'évacuation des eaux de drainage.
  - Réalisation de l'escalier de service pour l'inspection.

La couronne des puits (Figure 5.14. 9) est constituée par 28 micro-pieux, de 159 x 10 mm, d'une longueur de 11 m, disposés chaque 60 cm sur un cercle de 5,32 m de diamètre. Les puits drainants (Photo 2) ont une profondeur d'environ 12 m. Ils se composent de:

- 28 drains subhorizontaux en HDPE (High Density PE), d'un diamètre extérieur de 80 mm et d'une longueur de 50 m, disposés sur trois niveaux, avec des inclinaisons comprises entre 6-15°.
- Un exutoire constitué par un tube en HDPE ayant un diamètre de 180 mm, qui est introduit à l'intérieur d'une conduite en acier (norme ERW UNI 6363 DN 200).

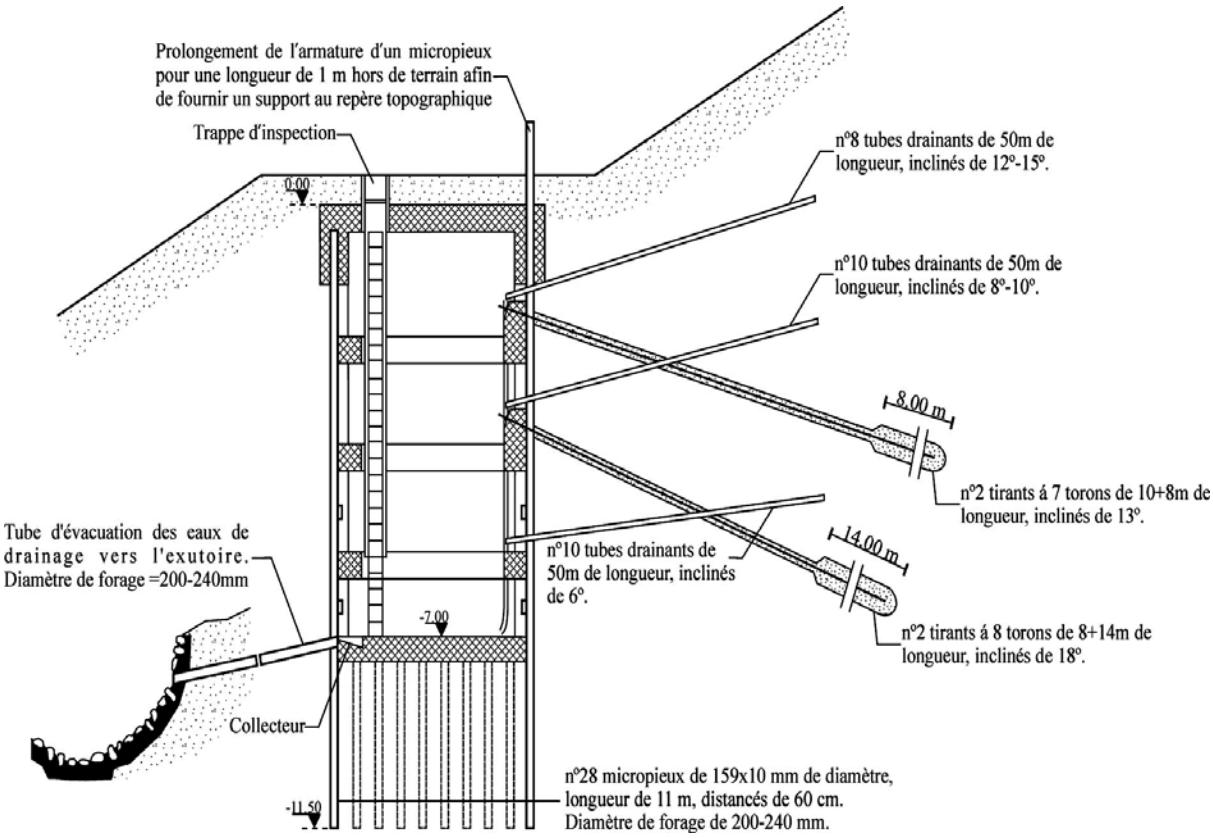


Figure 5.14. 9 – Schéma constructif du puit.

Photo 5.14.2 – Puits drainant en cours de réalisation

Cliquer pour agrandir

La réalisation, qui a débuté en 2004 n'est pas encore terminée. Le coût final de l'ouvrage, y compris l'aménagement extérieur (drainage de surface, végétalisation, etc.), devrait être supérieur à 2,5 millions d'euros.

5.2. Campo Vallemaggia, Canton du Tessin, Suisse

Le glissement de Campo Vallemaggia est localisé dans le canton du Tessin. Il affecte une série métamorphique composée d'amphibolites, de schistes et de gneiss, formant un assemblage complexe de blocs séparés par des accidents tectoniques qui drainent un aquifère fissural à forte anisotropie. Les études ont permis de mettre en évidence plusieurs plans de glissement sur une profondeur atteignant 300 m. Le volume délimité a été estimé à 800 millions de m^3. Les mouvements mesurés atteignent 5 cm/an en moyenne. Ils occasionnent de nombreux dégâts aux deux villages situés au pied de la masse en glissement. Afin de diminuer les déplacements, une galerie drainante de 1800 m a été creusée. Elle comporte 30 forages secondaires dont la longueur varie entre 25 et 70 m. La mise en service de cette galerie a permis de réduire substantiellement les mouvements.

6. BIBLIOGRAPHIE

Bonzanigo, L., Eberhardt, E. and Loew, S. (2001). "*Hydromechanical factors controlling the creeping Campo Vallemaggia landslide*". In: M. Kühne, H.H. Einstein, E. Krauter, H. Klapperich and R. Pöttler (Editors), International Conference on Landslides - Causes, Impacts, Countermeasures, Davos, Switzerland, pp. 13-22.

Pelizza S. & Peila D. (2000): "*L'utilizzo di opere in sotterraneo per interventi di sistemazione idrogeologica*". Geoingegneria Ambientale e Mineraria, 99, pp. 57-68, GEAM, Torino.

Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (APAT, 2003): "*Atlante delle opere di sistemazione dei versanti*". Manuali e linee guida 10/2002, pg. 92-107.

Pelizza S., Peila D., Oggeri C.: "*Tipologie di intervento per la bonifica di versanti rocciosi*". Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

Liste des prix de la Région Autonome Vallée d'Aoste, dernière mise à jour janvier 2006.

Bibliographie de l'Activité 5 Parades

Certaines des fiches-parades présentées dans ce projet sont basées sur le guide suivant :

Collectif (2001) Guide "Parades contre les Instabilités rocheuses" Collection Environnement *Les risques naturels.* LCPC 2001 n°59023103 144 pages

lequel Guide fait de fréquentes références aux ouvrages ci-dessous :

DRM (1987) – Plan d'exposition aux risques, Mesures de Prévention, Mouvements de terrain, document rédigé par le CEMAGREF Grenoble, l'IRIGM et Simecsol pour la Délégation aux Risques Majeurs- La documentation française - fiche 1.2.2.4

Rivet (1993) – Les travaux de prévention des risques naturels « Mouvements de terrain », Guide méthodologique des parades contre les éboulements, les chutes de blocs ou de pierres, Expérience acquise en Rhône-Alpes, Recherche LCPC, Contrat Etat – Région Rhône-Alpes, Contrat CEE EPOCH-RIVET – Laboratoire régional des ponts et chaussées Rhône-Alpes.

La liste suivante reprend de façon exhaustive toutes les références citées dans les 15 fiches-parades (voir en fin de chaque fiche pour avoir un regroupement par thème.

Abramson L, Lee T., Sharma S., Boyce G. (2002): "*Slope stability and stabilization methods"*. Wyley & Sons, New York.

A.I.C.A.P. (1993): *"Ancoraggi nei terreni e nelle rocce: raccomandazioni"*. Edigraf, Roma.

Airoldi S. (2004) : *"I bulloni d'ancoraggio nel consolidamento delle scarpate"*. Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (APAT, 2003): *"Atlante delle opere di sistemazione dei versanti"*. Manuali e linee guida 10/2002.

Agostini R., P. Mazzalai, A. Papetti (1988): *"Le reti metalliche a maglie esagonali nella difesa dei versanti"*. Officine Maccaferri S.p.A..

Bayer H., Gsell A., Sauermoser S., Scheiber M. (2000), Planning of mitigation measures regarding the aggravated risk imposed by rockfall, Fellsbau 18, n° 1, pp. 30-35.

Berger F. et Dorren L. (2005). *www. rockfor.net* : un outil de diagnostic rapide du rôle de protection des forêts de montagne contre les chutes de blocs.

Bidaut P., Durville J.-L., Guillemin P., Richard J.-C., Viktorovitch M.(2006). Essais de cisaillement sur discontinuités armées par ancrages passifs : utilisation d'une boîte de cisaillement de grandes dimensions. Bull. Labo. P. et Ch. n°spécial à paraître

Bonzanigo, L., Eberhardt, E. and Loew, S. (2001). "*Hydromechanical factors controlling the creeping Campo Vallemaggia landslide*". In: M. Kühne, H.H. Einstein, E. Krauter, H. Klapperich and R. Pöttler (Editors), International Conference on Landslides - Causes, Impacts, Countermeasures, Davos, Switzerland, pp. 13-22.

Brawner, C.O., 1994. Rockfall hazard mitigation methods, NHI course 13219, Participants workbook.

Cardu M., Oggeri C., Peila D., Casale M. :"*Bonifiche con esplosivo*". Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

Cemagref (1999) : Convention DPPR n°5/99 du 1/3/99 – Etude 5.1 Partie 1, 51 pages

Chiaves C.: *"Soluzione innovativa per le gallerie paramassi"*. Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

CREALP (2004) "Etude structurale et géomécanique, et établissement de la carte de danger chutes de pierres et éboulements : Rapport type"; Centre de recherche sur l'environnement alpin, 1951 Sion (CH)

Collepardi M. (2001): *"Il nuovo calcestruzzo"*. Edizioni Tintoretto, Treviso, pp. 281-291.

Cravero M., Iabichino G., Oreste P.P., Teodori S.P.: *"Metodi di analisi e dimensionamento di sostegni e rinforzi per pendii naturali o di scavo in roccia"*. Atti Convegno “Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio”, Trento, 2004.

Collectif. (1994). *Végétalisation : la végétation, un outil d'aménagement : guide technique*. SETRA, réf. B 9418, 112 p.

Collectif (1992). *Techniques de reboisement. Guide technique du forestier méditerranéen français*. Cemagref, 48 p.

Collectif (2005). *Gestion durable des forêts de protection*. Office fédéral de l’environnement, des forêts et du paysage, Berne. Classeur de 564 p.

Collectif (2006). *Guide des sylvicultures de montagne - Alpes du Nord françaises*. Projet Interreg IIIA, Editions Office National des Forêts.

Collectif (mai 2004), Guide technique : Protection contre les risques naturels – Ancrages passifs en montagne : conception, réalisation, contrôle. MEDD, CEBTP et Cemagref. 146 p.

Corte J-F., LepertT P., Rochet L. (1989), Etude d’un système de protection contre les chutes de blocs. Exemple de la RN 90, Revue générale des routes et aérodromes, 669.

Deflorian F., Rossi S., Bonora P., Sassudelli F.: *"Resistenza alla corrosione di funi per barriere paramassi e paravalanghe"*. Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

Delmas PH, Berche J.C., Gourc J.P. (1986) Le dimensionnement des ouvrages renforcés par géotextile - Programme CARTAGE. Bull. Liaison P&C, 142, mars-avril, pp.33-44.

Descoeudres, F., 1997. Aspects géomécaniques des instabilités de falaises rocheuses et des chutes de blocs. Publications de la Société Suisse de Mécanique des Sols et des Roches, 135: 3-11.

Dinger F. (1997). *Végétalisation des espaces dégradés en altitude*. Editions Cemagref, 144 p.

Ente Nazionale per le Strade - Gruppo Tecnico per la Sicurezza Stradale (2001) – “*La protezione del corpo stradale contro la caduta massi*“. ANAS.

Ferraiolo F. (2005): *"I rivestimenti corticali"*. Geoingegneria Ambientale e Mineraria, **1**, pp. 45-53, GEAM, Torino.

Ferraiolo F., Giacchetti G.: *"Rivestimenti corticali: alcune considerazioni sull’applicazione delle reti di protezione in parete rocciosa"*. Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

Flum D., Ruegger R., Guasti G.: “*Dimensionamento di sistemi di consolidamento flessibili superficiali costituiti da reti in acciaio ad alta resistenza in combinazioner a elementi di ancoraggio in barra”*. Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

Fokes P.G., Veltman A.J. (1989), *Rock slopes: stabilization and remedial measures against degradation in weathered and fresh rock*. Proceedings Instn Civil Engineers, Part 1, 86, pp. 359-380.

Franklin J. A., Dusseault M. B. (1989). *Rock engineering* (Chap. 18 *: Drainage, grouting and freezing)*. Mac Graw Hill, 600 p.

Gerber, W., 2001. Directive sur l'homologation des filets de protection contre les chutes de pierre. L'environnement pratique. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Institut fédéral de recherche WSL. Berne, 39 p.

Guillemin P., Pathologie et maintenance des ouvrages de protection contre les éboulements rocheux – Guide technique à paraître 2006.

Hénensal P. (1993). *Lutte contre l'érosion avant, pendant et après les travaux. Les protections végétales et structurelles des surfaces et des pentes*. Etudes et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, GT 54, 111 p.

Hoek E. & D. Wood (1988): *"Rock support"*. Article publié sur le magazine "Gallerie e grandi opera sotterranee", 4, pp. 39-44, 1990

Lapierre J.Y., Mathieu Y., Raffour J.P., Cabanis M. (1990), Déviation d'Aigue Blanche, Revue générale des routes et aérodromes, 671, pp. 20-28.

Lepert P., J.F. Corte Etude en centrifugeuse de l'impact de gros blocs rocheux sur un remblai de protection proceeding centrifuge 88 (corté ed.) 1988 Balkema Rotterdam.

Liste des prix de la Région Autonome Vallée d'Aoste, dernière mise à jour janvier 2006.

Manuale tecnico di Ingegneria Naturalistica della Provincia di Terni (2003) - *Applicabilità delle tecniche, limiti e soluzioni.*

Nguyen Thanh Long (1985), *Le Pneusol*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, rapport des Laboratoires, série GT7,36 pages.

Norme française NF P 95-301 (1994) Equipement de protection contre les avalanches – Ancrages passifs ponctuels en sol meuble – Méthode d'essais d'arrachement

Norme française NF P 95-308 (1996) Equipement de protection contre les avalanches – Ecrans de filets

Mancini R. & Cardu M. (1998): "*Ingegneria degli scavi*", Politeko, Torino.

Mauro R., Sassudelli F, Cristoforetti S.: *"In tema di proporzionamento delle barriere paramassi a rete"*. Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

Montani Stoffel S., Labiouse V. & Descoeudres F.: *"Impatto di blocchi rocciosi su un modello di galleria di protezione caduta massi"*. Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

Martorano L.(2005): *"Sistemazione e rettifica di un tratto della strada statale n. 612 della Val di Cembra con una galleria prefabbricata a sbalzo"*. Geoingegneria Ambientale e Mineraria, 114, pp. 69-74, GEAM, Torino.

Mullenbach P. (2000). *Reboisements d'altitude*. Editions Cemagref, 335 p.

OFROU (1998) "Projet, construction et entretien des galeries de protection contre les chutes de pierres et les avalanches : Documentation"; Office Fédéral des routes, Direction des travaux CFF, 3003 Berne (CH)

OFROU (1998) "Actions sur les galeries de protection contre les chutes de pierres : Directive"; Office Fédéral des routes, Direction des travaux CFF, 1998 (révis. 2006); 3003 Berne (CH)

OFROU (2005)"Surveillance et entretien des ouvrages d'art des routes nationales : Directive"; Office Fédéral des routes, 3003 Berne (CH)

OFROU (2004)"Vérification des galeries existantes, vérification générale : Documentation"; Office Fédéral des routes, 3003 Berne (CH)

Oggeri C., Peila D., Recalcati P.: *"Rilevati paramassi"*. Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

Parades contre les instabilités rocheuses – Collection Environnement / Les risques naturels - Editions du LCPC – ISSN 1151-1516

Paronuzzi P. & Coccolo A. (1995): *"Crollo di progetto e affidabilità delle barriere paramassi"*. GEAM, **86**, pp. 147-154.

Peila D., Pelizza S., Sassudelli F. (1995): *"Prove in scala reale su barriere paramassi deformabili a rete"*. GEAM, **86**, pp. 155-163.

Peila D. & Pelizza S. (1998): *"Linee guida per la classificazione e la certificazione di comportamento di barriere paramassi a rete"*. Geoingegneria Ambientale e Mineraria, 94, pp. 197-200, GEAM, Torino.

Pelizza S. & Peila D. (2000): "*L'utilizzo di opere in sotterraneo per interventi di sistemazione idrogeologica*". Geoingegneria Ambientale e Mineraria, 99, pp. 57-68, GEAM, Torino.

Pelizza S., Peila D., Oggeri C.: "*Tipologie di intervento per la bonifica di versanti rocciosi*". Atti Convegno "Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio", Trento, 2004.

Pénelon L., Dinger F., Rey F., Falcy JP. (2004). *Végétalisation des talus routiers en Isère*. CD-ROM. Cemagref - Conseil Général de l'Isère.

Rey F. (sous presse). *Génie biologique pour le contrôle de l'érosion dans les bassins versants torrentiels*. Editions Cemagref.

Richie A.M. (1963), *Evaluation of rockfall and its control*, Highway Research record, vol. 17, NRC, pp. 13-28.

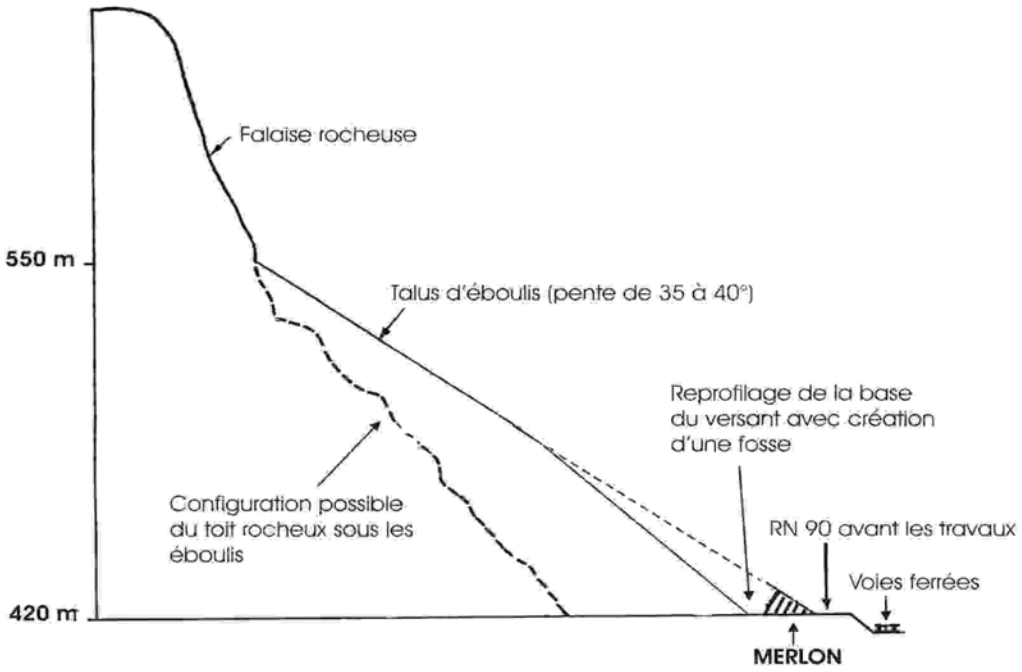
Whiteside P.G.D. (1986): *"Discussion on rockfall protection measures"*. Conference on rock and excavation engineering in an urban environment, Hong Kong, pp 490-492.

Willie, D.C. and Norrish, N.I., 1996. Stabilization of rock slopes. In: A.K. Turner and R.L. Schuster (Editors), Landslides, Investigation and Mitigation. National Academy Press, Washington, D.C., pp. 474-504.

Zeller E. (1996). *Résoudre les problèmes en forêt de montagne : reboiser, stabiliser, rajeunir, assainir*. Ecole intercantonale des gardes forestiers, Maienfeld, Suisse. 55 p.

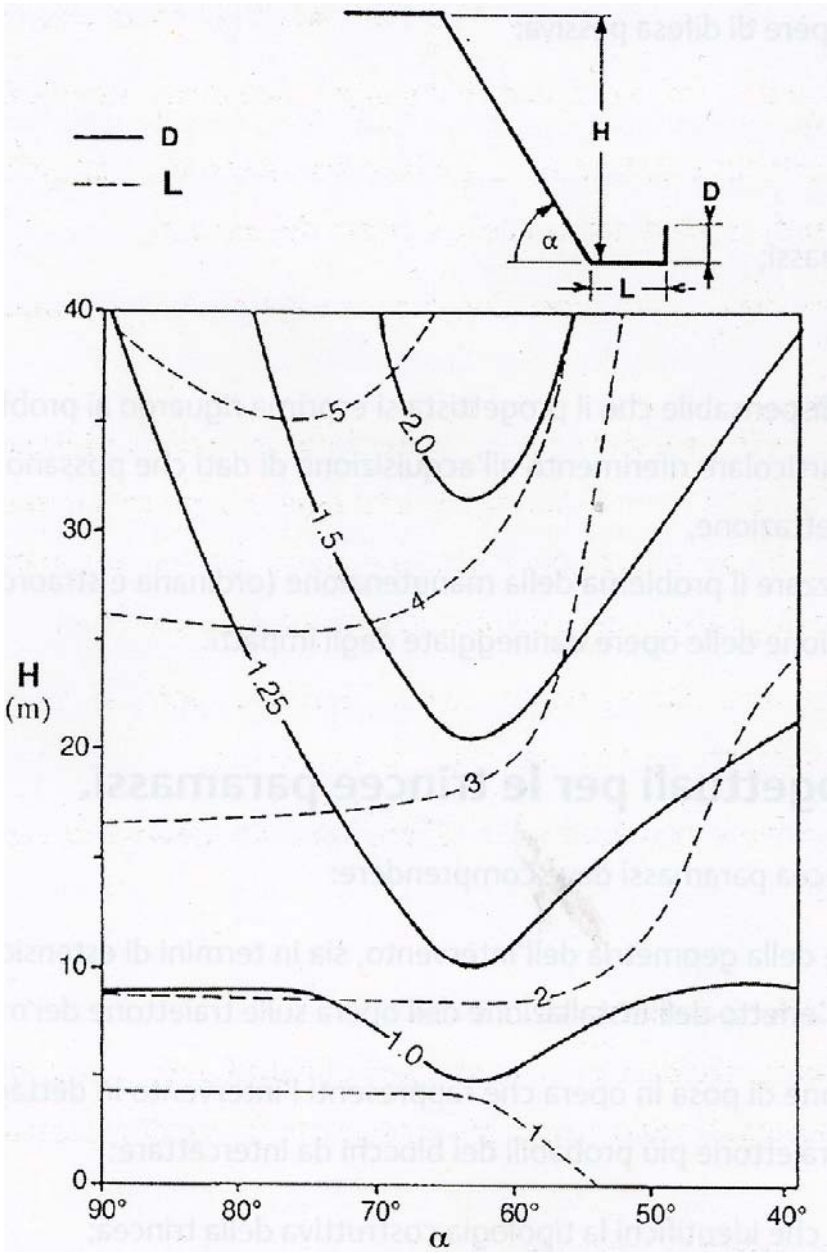
Annexe 5.1.1

Exemple d'implantation d'un merlon dans une pente avec reprofilage du versant amont.



Annexe 5.1.2

Dimensionnement d'une fosse de réception



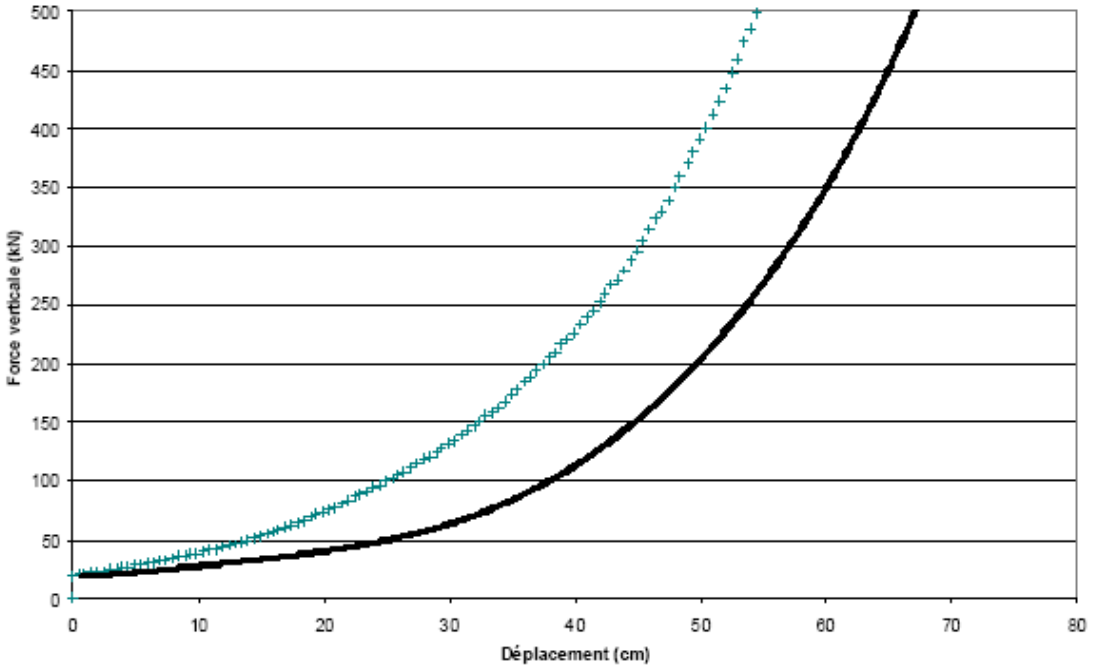
Abaque pour le dimensionnement de la fosse de réception (Whiteside, 1986).

Référence:
WHITESIDE P.G.D. (1986): *"Discussion on rockfall protection measures"*. Conference on rock and excavation engineering in an urban environment, Hong Kong, pp 490-492.

Annexe 5.3.1
Essais de traction dans le plan sur modules de filets métalliques de dimensions 4m x 4m

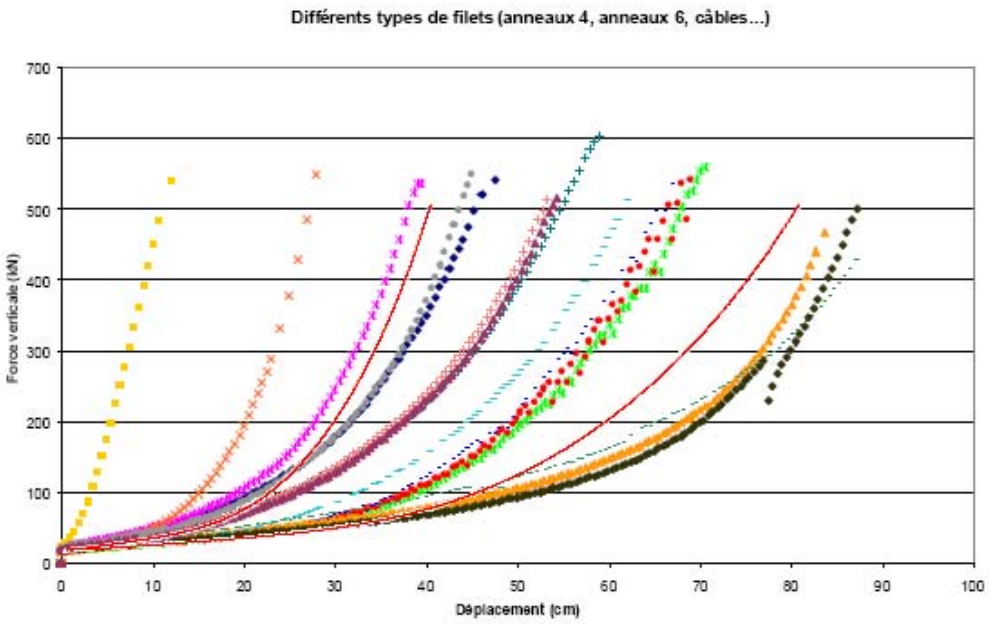
Certains anneaux qui composent les filets peuvent être structurellement différents, soit par leur diamètre, soit par la section du toron et peuvent avoir des résistances unitaires analogues mais conduire à un comportement global du filet fondamentalement différent. Un aspect de ce comportement a été mis à jour dans des essais de traction confinée dans le plan effectués dans le cadre d'un marché fournitures pour filets pendus destinés à un grand chantier de protection sur l'île de la Réunion. Les résultats des essais sur produits industriels sont à ce jour (2005) confidentiels et ne peuvent être divulgués, mais l'exemple ci-dessous qui concerne deux géométries de filets ASM "historiques" en est une illustration. Le diamètre du fil, le nombre de tours (donc le diamètre du toron = Ø16mm) et la résistance du fil sont identiques. Seul les diamètres des anneaux sont différents : la courbe en trait plein figure un module de 4mx4m composé d'anneaux de 420mm de diamètre ; le courbe pointillée représente un module de même dimensions composé d'anneaux de 390mm de diamètre.

Modules avec diamètres d'anneaux différents



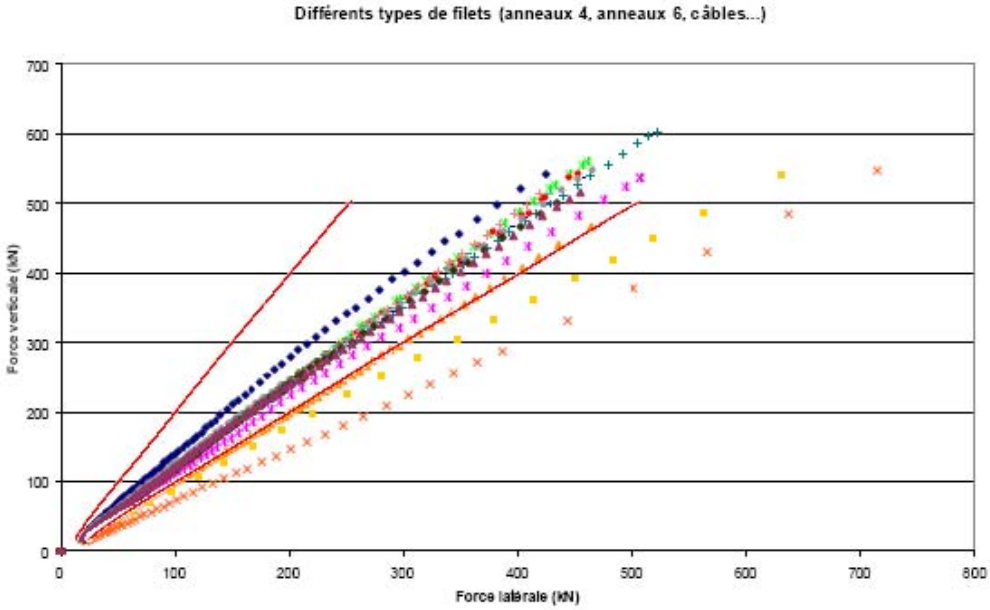
Le graphe montre que, sous sollicitation de 500 kN selon un axe, les bordures étant bridées, la déformation du module selon cet axe varie d'environ 21%. Cette différence de déformation conduit nécessairement à une répartition différente des efforts dans la nappe et à une dissipation différente des énergies correspondantes.

Les graphes ci-après résultent du même type d'essai de traction confinée d'un module de filet de 4mx4m. Les produits testés étaient des filets à anneaux 4 contacts, des filets à anneaux 6 contacts (fils ou câbles), un filet à mailles losanges ligaturées et un filet tricoté. Les mailles des filets variaient de 300x300mm pour les filets de câble à maille losange, à un diamètre de 430mm pour les anneaux les plus grands.



On voit ici que les déformations extrêmes ont un rapport de 1 à 7.5 environ, ce qui se traduira nécessairement par un comportement dynamique différent entre ces produits.

Le graphique ci-dessous représente, pour les mêmes produits que précédemment, le report latéral des efforts résultant de l'application de la force verticale.



On voit également ici l'influence de la structure des filets sur la distribution des forces dans le module. Pour certains produits, l'application d'une force de 500 kN selon un axe distribue des efforts latéraux

de 250 kN, alors que d'autres produits, sous même sollicitation, distribueront des efforts de près de 700 kN.

Les essais pseudo-statiques effectués sur des modules de filets à anneaux mis en traction confinée dans le plan montrent des comportements très variables qui résultent de plusieurs paramètres :

- le type d'assemblage des anneaux : grande différence de comportement général entre filets de type 4 contacts et filets de type 6 contacts ;
- le diamètre des anneaux, même pour une structure de toron identique ;
- le diamètre du toron ou de l'assemblage de fil, même à diamètre d'anneau identique ;
- le diamètre du fil composant le toron ou l'assemblage ;
- les caractéristiques mécaniques intrinsèques de l'acier composant le fil, le module de l'acier intervenant nécessairement plus que sa résistance à la rupture dans le cadre de ce test qui ne visait pas des sollicitations ultimes.

ANNEXE 5.3.2

Principe des essais réalisés en Suisse

En Suisse, les homologations sont réalisées conjointement par l'institut fédéral de recherche WSL et la commission fédérale d'experts en avalanches et chutes de pierres (CEAC). Les essais grandeur réelle sont réalisés sur le site de Walenstadt (SG). La certification est ensuite délivrée par l'office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP).

Le montage du filet est réalisé dans une paroi verticale de la manière suivante: 3 modules de filets de 10 m chacun, séparés par des piliers inclinés de 30° par rapport à l'horizontale sont assemblés à une hauteur de 15 m. Les câbles de retenue sont inclinés d'environ 40° par rapport à l'horizontale. La longueur des piliers dépend de la classe d'énergie des filets. Les filets sont répartis en 9 classes d'énergie variant entre 100 et 5 000 kJ (Tableau 4).

Les essais se déroulent en 4 phases. Les projectiles sont lancés verticalement à l'aide d'une grue. Les énergies testées sont des énergies cinétiques de translation ($E = ½ m v^2$):

Essai 1: Cet essai consiste à vérifier les déformations du filet soumis au jet de petits projectiles (faibles énergies): 5 projectiles de 3.8 kJ, 3 projectiles de 18 kJ et 1 projectile de 94 kJ. Les exigences sont les suivantes:
- Les projectiles doivent être arrêtés
- Le filet ne doit pas être perforé
- Aucun travail de réparation ne doit être effectué entre les jets

Essai 2: Cet essai teste la trajectoire de freinage pour une énergie correspondant à 50% de la capacité d'absorption du filet testé, ainsi que la facilité d'entretien et de réparation du filet. Les exigences sont:
- Le projectile doit être arrêté
- Le filet ne doit pas être perforé
- Les dépenses nécessaires pour la réparation de l'ouvrage doivent être aussi faibles que possible.

Essai 3: Cet essai teste la limite de charge et la capacité de déformation du filet (capacité d'absorption maximale du filet testé). Les exigences sont:
- Le projectile doit être arrêté
- Le filet ne doit pas être perforé
- La trajectoire de freinage et la hauteur de la section médiane du filet après impact doivent rester dans les normes fixées (Tableau 4).

Essai 4: Il s'agit d'évaluer le filet selon certains critères spécifiques: Les exigences portent entre autres sur la correspondance entre les plans de réalisations et l'ouvrage fini, le respect des normes, la clarté des instructions de montage, la simplicité de la construction et sa durée de vie.

		Essai 1 (capacité d'absorption = 50%)			Essai 2 (capacité d'absorption = 100%)				
Classe	Longueur du pilier (m)	Energie (kJ)	Masse du projectile (kg)	Longueur du côté du projectile (m)	Energie (kJ)	Masse du projectile (kg)	Longueur du côté du projectile (m)	Longueur max. de la trajectoire de freinage (m)	Hauteur min. du filet après impact (m)
1	1.5	50	160	0.41	100	320	0.52	4.0	0.90
2	2.0	125	400	0.56	250	800	0.70	5.0	1.20
3	3.0	250	800	0.70	500	1'600	0.88	6.0	1.80
4	3.0	375	1'200	0.80	750	2'400	1.01	7.0	1.80
5	4.0	500	1'600	0.88	1'000	3'200	1.11	8.0	2.40
6	4.0	750	2'400	1,01	1'500	4'800	1.27	9.0	2.40
7	5.0	1'000	3'200	1.11	2'000	6'400	1.40	10.0	3.00
8	6.0	1'500	4'800	1.27	3'000	9'600	1.60	12.0	3.60
9	7.0	2'500	8'000	1.51	5'000	16'000	1.90	15.0	4.20

Tableau 4: Tableau résumant le principe des essais pratiqués en Suisse

ANNEXE 5.3.3

Principe des essais définis dans l'ETAG

Les essais de type SEL et MEL consistent à impacter le centre d'un écran composé de 3 modules fonctionnel, à l'aide d'un bloc béton en mouvement et de forme standard. La mise en mouvement du bloc peut s'effectuer en station d'essai de type incliné (bloc lâché en cours de déplacement par un téléphérique balistique ou un blondin, dans un filet disposé sur une pente) ou de type vertical (bloc lâché en chute libre dans un écran disposé sur une paroi verticale).
Les mesures géométriques sur l'ouvrage sont effectuée par rapport à un terrain de référence qui est parallèle à la trajectoire du bloc (aux tolérances près). Lors de l'impact et quel que soit le type de site, le bloc ne doit pas être en contact avec le sol tant que la déformation maximale de l'ouvrage n'a pas été atteinte.

- ✓ Le premier test, de type SEL, qui permet de quantifier l'aptitude d'un ouvrage à recevoir plusieurs éboulements (notion de capacité de service), consiste à effectuer successivement 2 lâchers dans les mêmes conditions cinématiques, à mi-hauteur du module central.
  - o A l'issue du premier lâcher, l'essai est concluant si le bloc est arrêté, sans rupture de l'ouvrage et si sa hauteur résiduelle est ≥ 70% de sa hauteur nominale initiale.
  - o Le second lâcher SEL est effectué dans le centre du module central tel qu'il résulte du premier lâcher, le premier bloc étant enlevé. L'essai est concluant si le bloc est arrêté, sans contrainte de hauteur résiduelle ou d'état du dispositif.

  Le test SEL est validé si et seulement si les deux lâchers sont concluants. La valeur de l'énergie testée sert alors à la classification en niveau d'énergie (voir tableau ci-après).
- ✓ Le second test, de type MEL, qui permet de quantifier l'énergie maximale que peut absorber l'ouvrage considéré sur la base d'un seul événement, consiste à effectuer un lâcher à mi-hauteur du module central d'un écran remis en état ou neuf (au choix de l'entreprise). L'énergie testée doit être <u>au minimum 3 fois l'énergie de service</u> (voir classification ci-dessous). A l'issue du lâcher MEL, l'essai est validé si le bloc est arrêté, sans contrainte de hauteur résiduelle ni de dégâts à l'ouvrage. Par-contre, un classement secondaire en trois catégories est attribué (A, B et C) en fonction de la hauteur résiduelle mesurée après impact MEL :

  Catégorie A si H résiduelle ≥ 50% H nominale
  Catégorie B si 50% H nominale > H résiduelle > 30% H nominale
  Catégorie C si H résiduelle ≤ 30% de H nominale

Classification par niveau d'énergie (Energy level classification)	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
Niveau d'énergie de service (SEL) (en kJ)	-	85	170	330	500	660	1000	1500	>1500
Niveau d'énergie maximal (MEL) (en kJ)	100	250	500	1000	1500	2000	3000	4500	>4500

Tableau 1 : tests au niveau d'énergie de service (SEL) et au niveau d'énergie maximal (MEL) selon les classes d'énergie

A l'issue des tests, le rapport d'essai comportera les éléments principaux suivants :

- La description exhaustive de l'écran incluant les test d'identification et de caractérisation des matériaux et des composants
- La description de l'installation : paramètres géométriques, dispositifs de mesure, etc.
- L'ensemble des mesures effectuées :
    - masse du bloc utilisé
    - vitesse et trajectoire du bloc
    - forces exercées sur les ancrages représentatifs
    - élongation maximale de l'ouvrage
    - non-contact avec le sol
    - hauteurs
    - …
- La description des dommages consécutifs aux tests.

Annexe 5.6.1

Classement relatif de la résistance mécanique des essences par rapport au hêtre.
(Source document ONF GSM à paraître en 2006)

Le libre parcours moyen dégagé d'arbre ne doit pas excéder 30 m			
Essence	**Classement relatif de la résistance mécanique des essences par rapport au hêtre**	**Enérgie nécessaire (en KJ) pour casser un arbre d'un diamètre de**	
Robinier faux Acacia	**1,65**	**20 cm**	**40 cm**
Chêne	**1,31**	**115**	**490**
Hêtre	**1,00**	**85**	**375**
Merisier	**0,92**		
Charme	**0,92**		
Frêne	**0,89**		
Pin sylvestre	**0,68**		
Douglas	**0,68**		
Erable	**0,68**		
Pin noir	**0,67**	**60**	**250**
Sapin	**0,60**	**55**	**225**
Mélèze	**0,54**	**50**	**200**
Epicéa	**0,54**		
Pin maritime	**0,43**		
Cèdre	**0,40**		
Pin à crochets	**0,40**		

Conclusions et perspectives

En regard des résultats obtenus il ressort que les principaux objectifs ont été atteints par le projet.

L'inventaire et le fichage des méthodes de surveillance et des instrumentations de sites débouchent sur un outil exhaustif pour les praticiens appelés à intervenir dans l'équipement des sites instables (Activité 4, description technique de chaque méthode et instrument + base de donnée).

Si à l'heure actuelle l'évaluation de l'équipement d'observation des 6 sites pilotes équipés par RAVA le CETE ne permet pas de conclure à une adéquation validée de ces instruments à la problématique « instabilité » - surtout dû au fait de la faible période d'observation -, elle permet du moins de se faire une bonne idée sur les difficultés rencontrées dans la gestion de ces instruments (Activité 2).

L'établissement de la liste des parades les plus couramment utilisées sur le périmètre couvert par le projet (Activité 5) et la comparaison des trois systèmes opérationnels de télésurveillance à distance - Eydenet, GeSSRI et Guardaval - (Activité 3) ont été riches d'enseignements pour l'ensemble des partenaires. Les résultats augurent d'importantes potentialités d'échange et de tests croisés dans le but de travailler sur le développement en commun de systèmes de surveillance et de parades performantes contre les risques hydro-géologiques.

Il est cependant incontestable que l'apport le plus fructueux du projet est le mode d'échanges élaboré entre les partenaires, sous forme d'**ateliers :** 4 x 2,5 jours consacrés à un thème et répartis judicieusement entre les présentations en salle et le terrain. Voir, évaluer, discuter et critiquer ce que fait le voisin reste le meilleur moyen d'avancer vers des solutions communes, autant dans les méthodes, instrumentations et parades, que dans les procédures et réglementations administratives permettant à chaque région de prendre en compte les risques naturels vis-à-vis de la population, des biens et des infrastructures.

L'objectif final de Riskydrogeo était de proposer à l'autorité politique le plus petit dénominateur commun de ces pratiques : le volet « *ateliers* » a beaucoup avancé dans cette direction, même si cet objectif n'a pas été intégralement atteint pendant la durée du projet. **Ce mode de collaboration transfrontalière devra absolument être privilégié à l'avenir car il s'est révélé être le plus productif en la matière.**

L'équipe du projet est actuellement composée d'une quinzaine de personnes appartenant aussi bien à l'administration et aux sociétés paraétatiques qu'aux instituts de recherche et aux bureaux spécialisés. Oeuvrant ensemble sur plusieurs projets Interreg depuis 2000, ces personnes ont l'avantage de bien se connaître, ce qui est un gage de réussite non négligeable pour atteindre les objectifs fixés.

S'il devait y avoir une suite à ce projet, les perspectives de collaboration ont en grande partie été identifiées :

- Concernant la télésurveillance, l'objectif serait d'œuvrer dans la direction d'un système uniformisé permettant d'accéder online aux données des stations de mesure via le Web, le tout tétant couplé avec un système d'alerte/alarme ;

- Pour les parades pare-pierres, l'idée est

1) de porter à 10'000 kJ la capacité d'absorption énergétique des filets et d'améliorer leur géométrie,
2) de travailler sur les merlons cellulaires afin de diminuer les coûts de construction et d'entretien et
3) d'innover en matière de résistance des galeries en travaillant sur la capacité de déformation plastique (amortisseurs) des piliers.

- Pour les parades en matière de glissement de terrain il s'agirait de tester sur des sites déjà étudiés l'apport de la géophysique pour implanter de façon optimale les forages drainants.

Bibliographie générale

Cette bibliographie présente seulement quelques ouvrages généraux récents traitant des risques hydro-géologiques, auxquels il est fait référence dans les divers document du projet RiskYdrogeo.

Besson, L. (2005) Les risques naturels : De la connaissance pratique à la gestion administrative. Editions Techni-Cités, pp 592.

CFGI (Comité Français de Géologie de l'Ingénieur) (2000) *Caractérisation et cartographie de l'aléa dû aux mouvements de terrain*. Collection "Environnement - Les risques naturels", pp. 91, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2000.

Collectif Interreg IIC (2001) *Prévention des mouvements de versant et des instabilités de falaises – Confrontation des méthodes d'étude des éboulements rocheux dans l'arc alpin*. Projet Interreg IIC « Falaises » Méditerranée Occidentale et Alpes Latines, pp 239.

Collectif Interreg IIIA (2006) *RocksliDetect : Développement d'outils méthodologiques pour la détection et l'étude de la propagation des éboulements de masse*. Interreg IIIA-Alcotra-projet n°023.

Collectif LCPC (2001) *Parades contre les Instabilités rocheuses*. Guide méthodologique, Collection Environnement Les risques naturels. LCPC n°59023103, pp 144.

Gianni, G.P. (1992) *Rock slope stability analysis*. Balkema, Rotterdam.

Hoek, E. (1999) *Rock engineering*. Rocsciences, London, UK, pp313.

Hudson, J. A. (1992) *Rock engineering systems* : Theory and Practice. Ellis Horwood , pp185.

IDNDR, *Glossary: international agreed glossary of basics terms related to Disaster Management*, pp. 83, DHA-Geneva, 1992.

PPR, *Plans de Prévention des Risques naturels, risques de mouvements de terrain.* Guide méthodologique, pp. 71, Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, ministère de l'équipement, du logement et des transports. La documentation française, 1999.

Rouiller, J.D., M. Jaboyedoff, Ch.Marro et F. Philipossian (1998) *Pentes instables dans le Pennique valaisan : une méthode d'auscultation des falaises et de détection des éboulements majeurs*. Rapport final PNR31, Hochsclugverlag AG an der ETH Zürich, Zürich.

UNESCO, *A suggested method for reporting a landslide.* The International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory (WP/WLI), Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, 41, 5-12, 1990.