



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

Risk Ydrogé

«Risques hydrogéologiques en montagne : parades et surveillance »

Activité 5. Systèmes de parades

Parade 5 – Galeries de protection

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



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 :



Pôle Grenoblois
Risques Naturels



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 linéaires, 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)

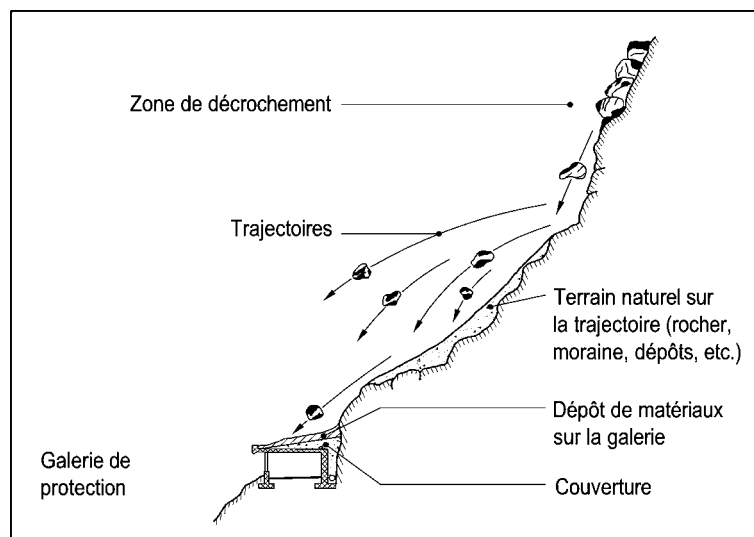


Figure 5.5. 1: Exposition d'une galerie de protection et terminologie générale

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.

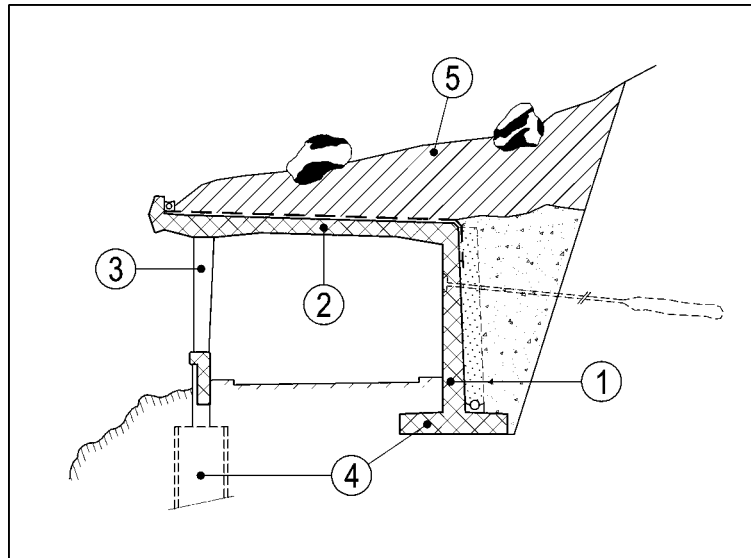


Figure 5.5. 2 Schéma de principe des galeries usuelles **LEGENDE** : ① Mur amont ép. 0.40 m à 0.70 m, év. ancré, avec drainage arrière - ② Dalle de toiture en béton armé, avec étanchéité, ép. 0.40 m à 1.0 m, avec év. sommier noyé sur les piliers - ③ Piliers aval, 50 x 50 à 80 x 80, distants de 5 m à 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.

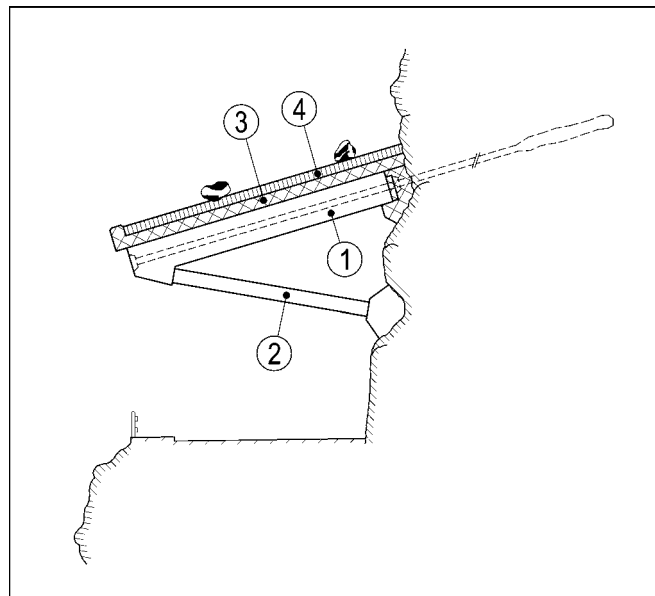


Figure 5.5. 3 Galeries en console ou casquette LEGENDE : ① Sommers ancrés en rocher, espacement 2.0 m à 4.0 m - ② Butons de compression - ③ Dalletes de couverture - ④ Couche de protection amortissante.

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.

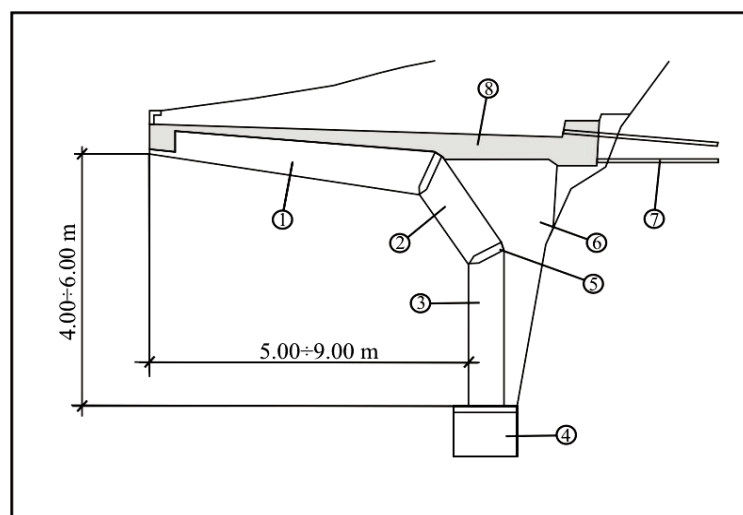


Figure 5.5. 4 / Variante de galerie en console de la société Tensiter LEGENDE : Eléments composant la structure préfabriquée : ① Console - ② «oblique»- ③ Piédroit. ④ Fondation en béton armé - ⑤ Scellement - ⑥ Matériel compacté - ⑦ Tirants du type Diwydag - ⑧ Dallette en béton armé.

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 dalle en béton armé, qui assure la liaison des tirants et des éléments préfabriqués.
- La réalisation de la couverture de protection de la dalle.

C) Galerie en voûte

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

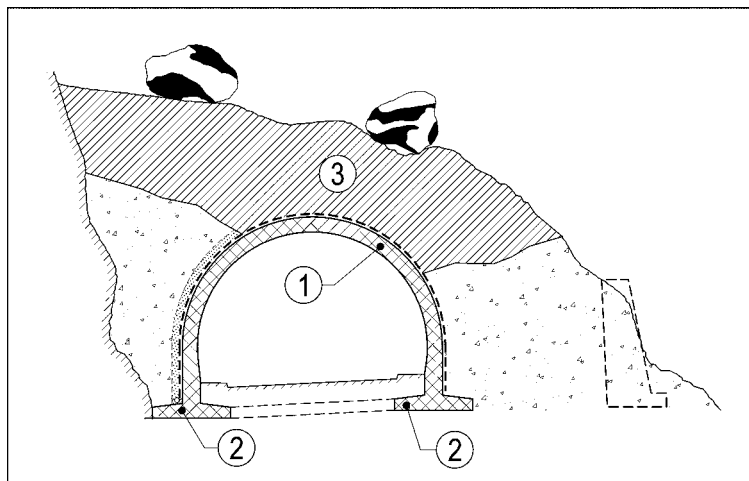


Figure 5.5. 5 Galerie en voûte **LEGENDE** : ① Voûte pleine en béton armé avec étanchéité ép. 0.40 à 0.90 m. - ② Fondations, en général sur semelles filantes, év. liées par des sous-tirants - ③ Couche de couverture, ép. 1.50 à 3.0 m en matériaux calibrés

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 éboulements ou effondrements 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.

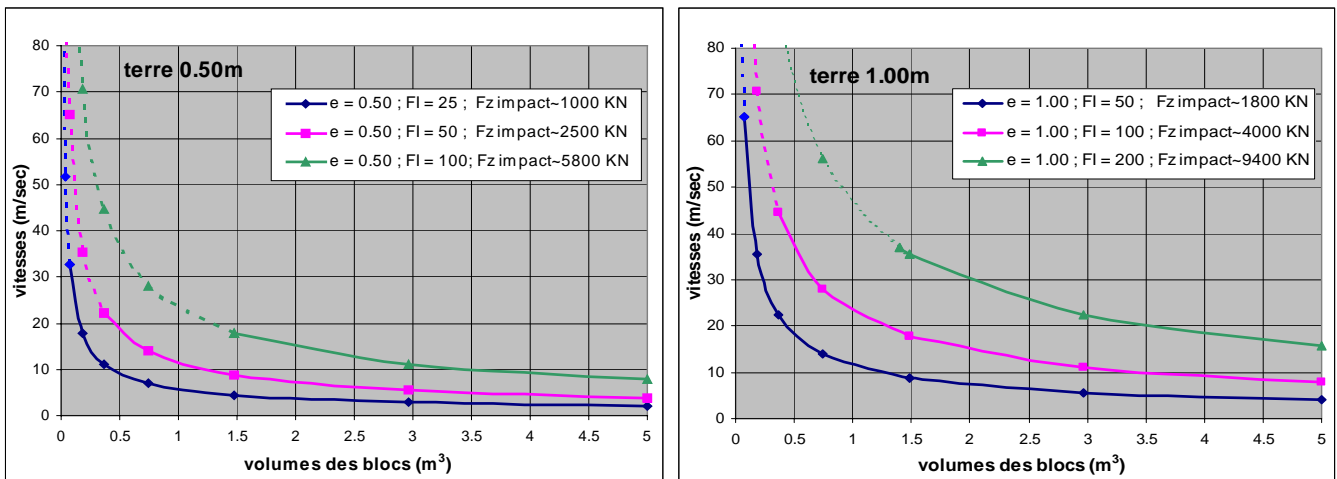


Figure 5.5. 6: Diagrammes définissant les capacités d'absorption des galeries usuelles

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 σ_{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 optimiser 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:

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

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

$$Q = C_K \cdot F$$

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 soutènements 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. Éléments 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/m², 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 $FI \cong 100$ selon la figue 5 (ch. 2.1), pour un cas normal et un $FI \cong 170$ 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 $FI \cong 37$ selon la fig.5 (ch. 2.1) pour un cas normal et un $FI \cong 50$ 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 Percelette 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 permettait 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 de section 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. & Descoeurdes 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*". Geingegneria Ambientale e Mineraria, 114, pp. 69-74, GEAM, Torino.

* téléchargeable sous : www.astra.admin.ch