

CORRECTION TORRENTIELLE : CONCEPTION & RETOUR D'EXPERIENCE SUR UN BARRAGE CABLE INNOVANT

A NEW WIRE ROPE BARRIER AGAINST DEBRIS FLOW: DESIGN & FEEDBACK

Nicolas VILLARD¹, Mathieu SCHMITT², Jean-Marc TACNET³

1 GTS groupe NGE, Lyon France, nvillard@gts.fr

2 ONF service RTM, Nice France, mathieu.schmitt@onf.fr

3 Irstea, UR ETGR, Saint-Martin-d'Herès France, jean-marc.tacnet@irstea.fr

RÉSUMÉ — Les laves torrentielles sont des phénomènes naturels gravitaires complexes particulièrement dévastateurs en montagne, occasionnant des dommages réguliers aux zones habitées ainsi qu'aux infrastructures de transport ou d'énergie. Il s'agit d'un écoulement d'eau et de matériaux solides affectant le lit de certains torrents suite à des précipitations intenses, pouvant transporter des amas de blocs rocheux avec des volumes et des niveaux d'énergie importants. Afin d'intégrer l'évolution des enjeux économiques et environnementaux, ainsi que les contraintes d'installation de protections conventionnelles (béton, gabions...), GTS a développé et mis en œuvre sur un chantier pilote des Alpes du sud, une nouvelle solution de barrage souple, en filet de câble métallique, perméable et orthotrope. L'ouvrage installé dans un couloir raide présente une hauteur de 6 m pour une largeur d'environ 15 m. Sa construction, simple, rapide et sûre est possible par hélicoptère en site escarpé. Il est fondé sur ancrages forés sans moyens lourds ni massifs béton. Les principaux composants utilisés sont légers, brevetés, et conçus pour optimiser la dissipation d'énergie ainsi que la descente de charge : le dispositif se comporte en effet comme un ouvrage dynamique de sédimentation en phase transitoire (parade passive), et comme un ouvrage de consolidation en phase durable contenant près de 500 m³ de matériaux (parade active). Le suivi de ce dispositif, première en France à cette échelle, sera mené conjointement avec le RTM et IRSTEA, en particulier sur la base d'une analyse inverse statique/dynamique, afin d'améliorer l'état de l'art sur le dimensionnement et le comportement de ces ouvrages avec modélisation et instrumentation d'une future expérience. L'expertise et la pertinence économique de cette alternative efficace permettent d'envisager dès aujourd'hui le traitement de sites jusqu'ici peu équipés, et de réduire l'exposition au risque d'érosion en montagne accentué par le changement climatique.

ABSTRACT — Debris flows are a complex and dangerous phenomenon in mountain, causing regular damages to urban areas and infrastructures. It is a mixture of water and solid materials met in some torrents after heavy rainfall sometimes with boulders, important volume of materials and high energy levels. In order to incorporate economic and environmental issues and to improve conventional solutions (concrete, gabions...), GTS has developed and implemented on a pilot site

of the Southern Alps, a new flexible barrier using wire rope , permeable and orthotropic. The 6 m height barrier is installed in a steep couloir about 15 m wide. Its construction is simple, fast and safe including with helicopter. It is based on geotechnical drilled anchors and wire ropes without heavy or massive concrete foundations. The main components are light, patented and designed to optimize the energy dissipation and the vertical load: the device is designed for dynamic load during transitional phase (passive) of sedimentation, and for quasi-static load as a consolidation dam for long term phase containing approximately 500 m³ of material (active phase). Monitoring of this first experience in France at this scale, will be conducted jointly by RTM and IRSTEA, especially on the basis of an inverse analysis dynamic / static. The expertise and the economic relevance of such an efficient option allows nowadays to protect sites under-equipped, and reduce exposure in mountain exacerbated by climate change.

1. Introduction

Les laves torrentielles sont des coulées boueuses et rocailleuses pouvant se déclencher dans certains torrents de montagne, notamment à la faveur d'évènements pluviométriques intenses (Recking, 2013). Ces phénomènes violents sont susceptibles de générer des dommages humains et économiques considérables (161 morts en Italie en mai 1998). En France, l'ampleur des phénomènes concerne de nombreux massifs montagneux (Figure 1).



Figure 1 : dépôt de lave torrentielle dans le Valgaudemar (05) en 2003 (Irstea).

Pour limiter les risques liés aux crues torrentielles, les ouvrages de correction torrentielle agissent sur les mécanismes de production de matériaux solides dans le cadre de mesures dites "actives" ou protègent directement les enjeux dans le cadre d'ouvrages dits "passifs" tels que les ouvrages de sédimentation (Tacnet, 2010). Les travaux de protection réalisés de l'aval à l'amont des bassins versants ont un rôle essentiel pour agir à la fois sur les causes et les effets des phénomènes (Deymier et al., 1995). Les barrages de consolidation ont ainsi pour fonction principale de stabiliser les profils en long et en travers des torrents (Figure 2).

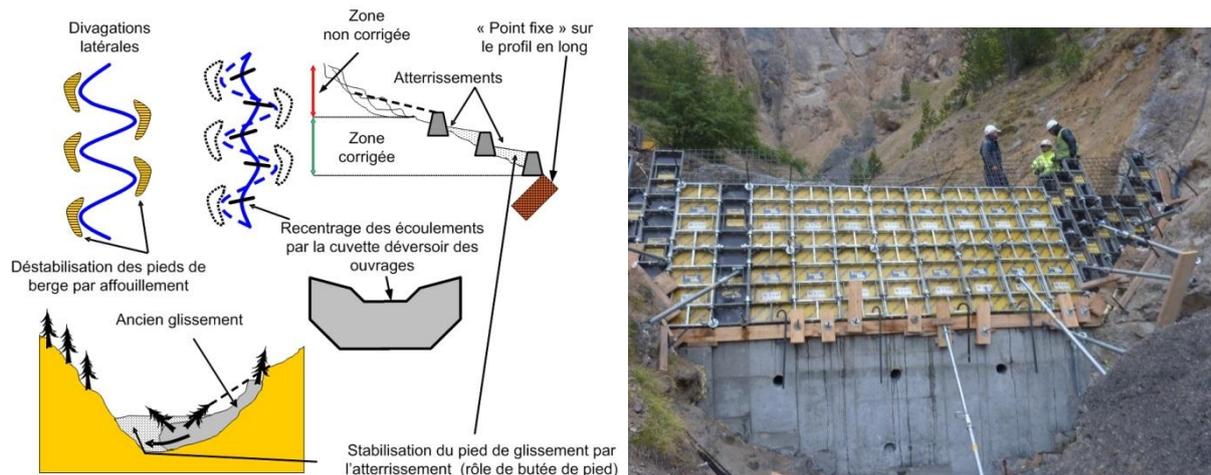


Figure 2 : fonctions des barrages de consolidation - chantier de seuil béton (GTS).

Historiquement, le service de restauration des terrains en montagne de l'ONF a mis en place les premiers ouvrages de génie civil dès le XIX^{ème} siècle (RTM, 2010). A ce jour, les chantiers de réalisation de seuils nécessitent encore souvent des moyens lourds (béton armé, engins) dans des sites parfois escarpés (Figure 2) et qui posent problème dès lors que l'accès et la constitution d'un atterrissement (i.e. remblai) sont difficiles.

Si des barrages en filets de câbles métalliques encore onéreux ont déjà été mis en œuvre à l'étranger dans un contexte torrentiel (Wendeler, 2012 ; Bichler, 2012), les procédés issus des protections contre les éboulements offrent aujourd'hui de nouvelles alternatives et complètent les expérimentations menées en France sur des ouvrages grillagés légers limités à des stabilisations statiques en haut de bassin versant à faible hydraulité (Requillart, 1997).

Cet article présente la conception / réalisation d'un premier ouvrage de ce type sur un chantier pilote dans les Alpes du sud, puis en identifie les principaux avantages.

2. Contexte du projet

Dans le massif du Mercantour, la route métropolitaine RM 2205 est un axe majeur qui relie Nice à la haute Tinée (cols et stations de ski) et peut accueillir un trafic de plus de 10000 véhicules par jour.

Au droit de Saint-Sauveur sur Tinée (06), un versant raide (pentes à 40°) domine cette route d'environ 500 m et combine des aléas forts de coulées de boue, laves torrentielles et d'éboulements. 32 ouvrages de correction et de protection équipent déjà une dizaine de couloirs situés en forêt domaniale (Ipoutcha, 2013). Ce site détenant certains records de pluviométrie (470 mm en 3 jours le 16/11/2002), on rappelle ici que le seuil de déclenchement d'une lave torrentielle est généralement rattaché à une intensité plutôt qu'à un volume pluviométrique. Des événements torrentiels de type décennal entraînent ainsi la ruine d'ouvrages et des perturbations importantes sur la route (Figure 3).



Figure 3 : vue du bassin versant - seuils surplombant la route RM 2205 (ONF).

Afin de compléter les ouvrages existants parfois débordés (seuils en béton armé), instables (gabions) ou mal adaptés (écran pare blocs), GTS a obtenu un contrat en 2013 (Villard, 2013) afin de concevoir et installer un barrage câble expérimental en aval d'un bassin versant (superficie 1 ha), avec comme contraintes contractuelles :

- Technique : comportement et mise en œuvre (altitude, site encaissé);
- Economique : recherche d'une alternative aux solutions existantes;
- Délais : rapidité et sécurité de mise en œuvre.

Le système recherché devait permettre de laisser transiter les crues liquides et le charriage tout en interceptant les chutes de blocs isolés (2000 kJ) et les laves de volumes plus importants (500 m³). Le dispositif proposé doit, de manière originale, ainsi se comporter comme un ouvrage de sédimentation en phase transitoire (parade passive, dynamique) et comme un ouvrage de consolidation en phase durable (parade active, quasi statique) une fois l'atterrissement (i.e. remblai) accumulé en amont.

3. Conception

3.1. Description des cas de charge

En statique : l'ouvrage de consolidation atterri (remblayé) en phase durable est soumis à un chargement de type "poussée des terres" apprécié suivant un calcul géotechnique conventionnel (Figure 4).

Certaines approches empiriques (Rickenman, 1999) permettent d'estimer la géométrie du chargement en fonction du contexte géotechnique. La surverse de l'ouvrage correspond au passage d'une lame d'eau chargée au-dessus de matériaux d'atterrissement non déjàugés. A noter qu'une membrane installée au sol immédiatement à l'aval de l'ouvrage, permet de limiter les risques d'abrasion et d'affouillement en pied (bavolet)

En quasi statique : l'approche française (Moniteur, 2012 ; Deymier et al., 1995) consiste à dimensionner les ouvrages pour les effets transitoires en appliquant un facteur d'amplification N (3, 5 ou 7) à la poussée hydrostatique équivalente de hauteur d'eau, suivant le même diagramme qu'en statique.

Enfin en dynamique pure : il s'agit de contrôler en phase transitoire l'impact dans le barrage d'une chute de bloc isolé (estimée à 2000 kJ), la conception s'apparentant alors à celle d'un écran pare blocs. A noter, que de manière classique, les barrages de correction torrentielle ne sont dimensionnés que sur la base d'équivalents statiques.

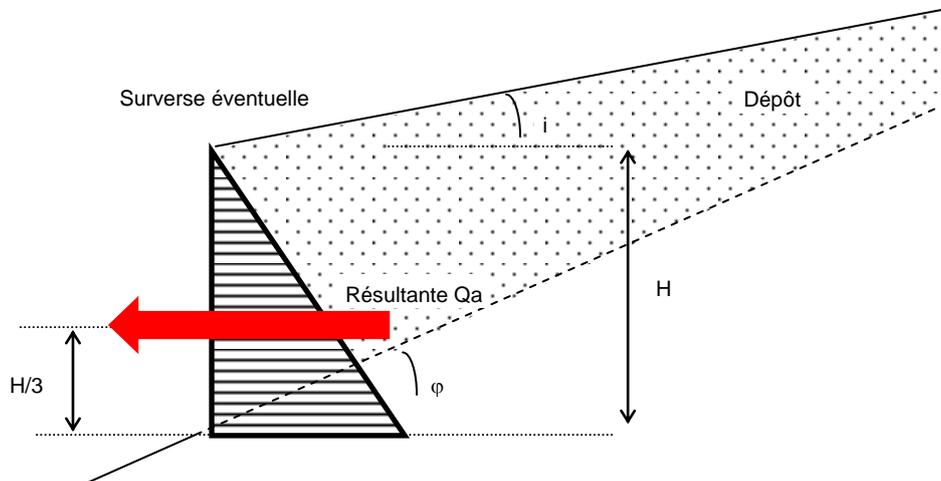


Figure 4 : diagramme chargement transversal poussée des terres

En pratique, il reste délicat et malgré tout essentiel de parvenir à définir des cas de charge type ELS / ELU issus de combinaisons entre scénario statique / dynamique et phases transitoire / durable (atterrissement par passes ou en un seul évènement) ainsi que la capacité résiduelle souhaitée. Les actions pouvant alors osciller dans un rapport de 1 à 10 pour une même structure flexible.

3.2. Fonctionnement

La structure comprend des composants GTS ELITE® brevetés pour la protection contre les risques naturels (Figure 5) :

- Filets : dissipateur intégré (agrafes), comportement orthotrope, mailles réparables, haute résistance, pas de contraction lors de la mise en œuvre ;

- Dissipateurs d'énergie : profilé aluminium comprimé en mode cloque par mouflage d'un câble intérieur dédoublant le travail mécanique du câble (longueur, effort)

Assemblé, l'ouvrage est une structure plane tendue entre les rives du couloir, de type membrane sur câbles porteurs, sans poteaux. Une fois remblayé, il est assimilable dans son comportement à un ouvrage de soutènement.

Les principes suivants régissent la mise en charge de la structure :

- Transfert horizontal des efforts et vertical des déformations (filet orthotrope) ;

- Les efforts sont maîtrisés par allongement des dissipateurs (2.4 m) ;

- La perméabilité du filet (mailles de 350 mm) permet de déjauger la charge.

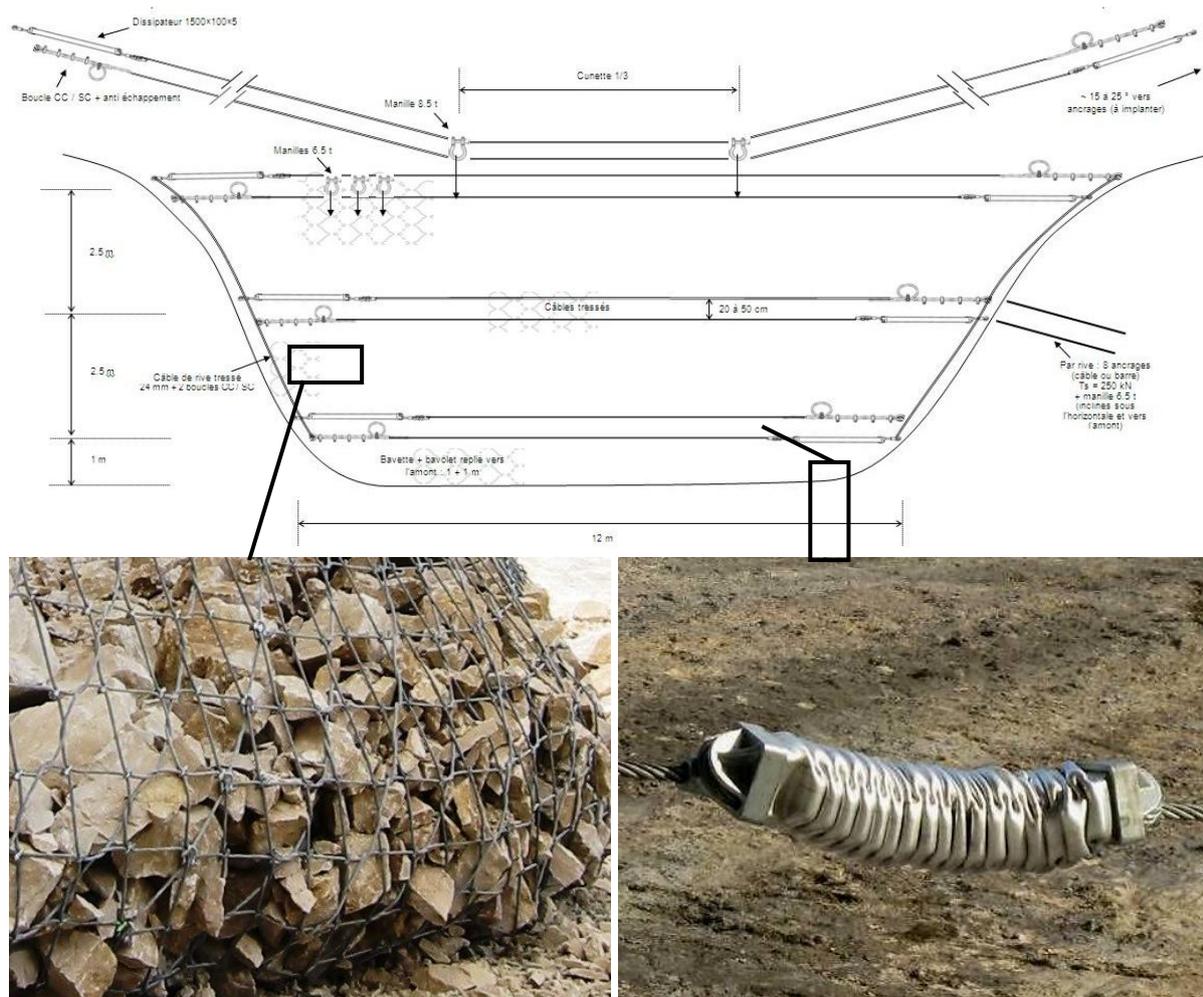


Figure 5 : plan d'exécution de la structure - déformations type (filet, dissipateur)

L'ouvrage rencontre des équilibres temporaires et successifs au gré des phases transitoires de remplissage. Les seuils de déclenchement des dissipateurs permettent alors de contrôler les efforts statiques et dynamique ainsi que la déformation des câbles porteurs (Figure 6), chacune des cloques de flambement correspondant à un palier d'équilibre. Le calcul de la structure est ainsi réalisé pour différentes combinaisons ELS / ELU avec une méthode analytique simplifiée en 2D (Segalini, 2013) permettant de rechercher des coefficients de sécurité par routine.

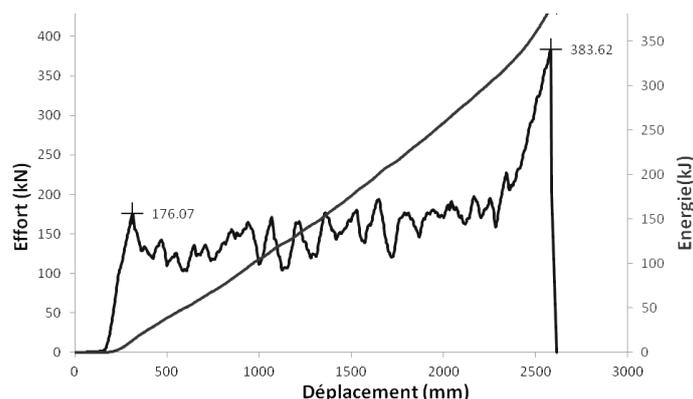


Figure 6 : équilibre des efforts contrôlé par les dissipateurs d'énergie

Principaux paramètres dimensionnant :

- tension des câbles porteurs : 24 t (ELU)
- nombre de dissipateurs la contrôlant : 6 u montés en parallèle
- course des dissipateurs : 2 m
- fondations : ancrage câbles (ci-après)

4. Installation et maintenance

L'ouvrage est implanté en altitude dans un couloir raide d'environ 20 m de largeur, recouvert d'un éboulis vif en limite d'équilibre (40°) et dont les rives présentent des affleurements de roche désagrégée (cargneule, pélites). La hauteur d'interception initiale est de 6 m et la hauteur de l'ouvrage atterri en phase durable de 4 m.

Des essais de traction sur ancrage ont permis de confirmer des propriétés mécaniques de sol assez médiocres (frottement latéral Q_s de 400 kPa) et le type de fondations (forages \varnothing 76 mm à 4 m). Afin d'en optimiser la réalisation (forage et équipement en accès difficile) ainsi que leur mode de travail (descente de charge des câbles porteurs, flexion composée), des ancrages câbles ont été retenus.

L'ensemble de l'ouvrage a ensuite été hélicoptéré et installé en un temps réduit (comparé au béton) avec un minimum de ressources en personnel et en matériel (Figure 7).



Figure 7 : dissipateur sur ancrages câbles et ouvrage en cours d'installation

Cet ouvrage expérimental, par nature flexible et déformable, nécessitera des opérations de maintenance différentes d'un ouvrage rigide. Un suivi régulier devra porter sur l'endommagement éventuel des composants (dissipateurs) et la capacité résiduelle du dispositif. Des opérations de curage et de remplacement pourront être envisagées avec contrôle de la propagation à l'aval des matériaux libérés. Les éléments indépendants peuvent être démontés à distance (pince hydraulique, micro charges explosives...).

5. Suivi

S'agissant d'un chantier pilote, un retour d'expérience est mené (suivi des déformations) afin d'une part de mieux appréhender le comportement de ces ouvrages et de leurs ancrages dans le temps (Volkwein, 2011), d'autre part d'apprécier les opérations de maintenance à intégrer lors de l'analyse cout-bénéfice. Le chargement statique observé dans le filet est alors confronté, par analyse inverse, au déclenchement des dissipateurs (taux de travail, pics dus aux effets dynamiques) afin de renseigner sur l'interaction aléa / parade et de dimensionner un nouvel ouvrage optimisé avec modélisation et instrumentation (Nicot, 2013).

6. Variante économique / technique / environnementale

Du point de vue opérationnel et comparativement à un ouvrage similaire en béton armé, la mise en œuvre d'un barrage câble permet des économies d'échelles de 20 à 40 % sur le coût, la durée du chantier ainsi que les effectifs requis en personnel. Par ailleurs, l'ouvrage et les moyens matériels requis sont plus légers, et d'un impact carbone moindre.

Tableau 1 : avantages comparatifs solutions barrages câbles

PRINCIPAUX ATOUTS :	PRINCIPALES LIMITES :
Coût de construction Délais de mise en œuvre Préfabrication en usine Héliportage en zone encaissée / escarpée Sécurité / exposition du chantier Bilan carbone Stratégie de protection étendue	Technique exigeantes Protection à l'abrasion Contrôle des déformations et de la cunette Maintenance et remplacements

L'analyse globale coût-bénéfice intégrant la maintenance d'un tel dispositif fait partie du retour d'expérience initié par cette opération. Techniquement, les barrages câbles sont évidemment particulièrement adaptés dans les contextes d'accès difficile et lorsque les laves torrentielles sont susceptibles d'exercer des actions dynamiques sur des structures non atterries, et qu'il n'est pas possible de remblayer lors des travaux, ou lorsque des ouvrages classiques (en béton armé de type autostable) ne sont pas réalisables. Economiquement, si cette technique reste encore assez peu utilisée, elle est particulièrement adaptée pour des maîtres d'ouvrages disposants de budgets restreints et de plannings réduits.

La question de l'analyse de l'efficacité des ouvrages et des stratégies de protection (Figure 8) se pose sur les plans structurels et fonctionnels mais aussi dans un cadre plus large lié à l'évaluation de leur impact réel sur la réduction du niveau de risque, aux décisions de gestion qui en découlent et aussi aux choix et priorités d'investissement et/ou de maintenance (Tacnet, 2010) .

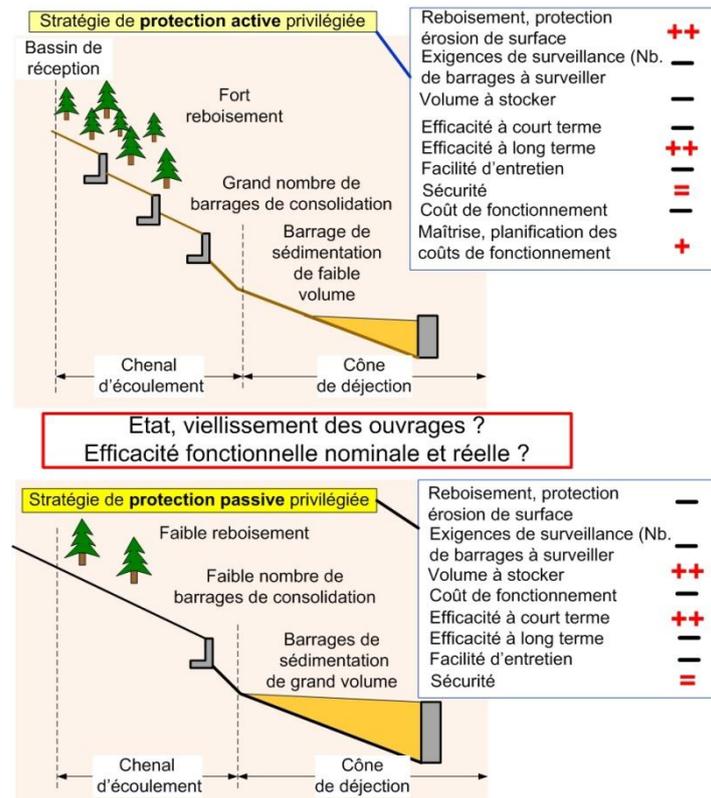


Figure 8 : comparaison des stratégies de protection contre les risques torrentiels

7. Conclusion

Si la technique des barrages câbles (dynamiques) n'est évidemment pas une solution universelle, elle reste par contre le seul recours dans des contextes de forte pente ou encaissés, soumis à des phénomènes de laves torrentielles

Le suivi de ces premiers ouvrages permettra d'une part d'étudier leur fiabilité dans le cadre de l'analyse d'efficacité globale et d'autre part d'améliorer les techniques de réalisation.

La qualité du dialogue entre le client, l'entreprise et ses partenaires a permis d'élaborer une solution spécifique adaptée au terrain et de valoriser une alternative innovante. Celle-ci peut être dès lors étendue en prévention contre les risques gravitaires en montagne afin d'en limiter les conséquences, comme rappelées en ce début d'année 2014, par le changement climatique.

Remerciements

Les auteurs remercient la DDTM / ONF RTM 06 ainsi que les équipes du chantier.

Références bibliographiques

Bichler et al. (2012). Flexible debris flow mitigation : Introducing the 5.5 mile debris fence. Landslides and Engineered Slopes, Eberhardt et al. (eds). Taylor & Francis Group, London.

Deymier C., Tacnet J-M., Mathys N. (1994). Conception et calcul de barrages de correction torrentielle, Equipements pour l'eau et l'environnement, Etudes du CEMAGREF N° 18, 287 p.

- EOTA (2008) ETAG 027 Guideline for European Technical Approval of Falling Rock Protection Kits.
- Ipoutcha S., Schmitt M. (2013). Vallée de la Tinée ravin I, étude hydraulique. ONF service RTM 06.
- Moniteur (2012). Construction et risque torrentiel, cahier détaché N° 5652.
- Nicot F., Lambert S. et al. (2013). Modelling the Mechanical Behaviour of Flexible Structures against Debris Flow. IRSTEA European research project MUMOLADE (in course).
- Recking A., Richard D., Degoutte G. (2013). Torrents et rivières de montagne, Dynamique et aménagement, Editions Quae, 334 p.
- Requillart J-P. (1997). Correction torrentielle : les barrages câbles, note de présentation ONF RTM 38.
- Rickenmann D. (1999). Empirical relationships for debris-flows, WSL SLF. Natural Hazards pp. 47-77. Kluwer Academic Publishers.
- RTM (2010) 150 ans de lutte contre les risques naturels, in Restauration des terrains de montagne ONF, Ministère de l'alimentation, de l'agriculture et de la pêche, France.
- Segalini A. et al. (2013). Comparison between the mechanical behaviour of barriers against rock fall vs debris flows. Rock Mechanics for resources. Kwasniewski & Lydzba. Taylor & Francis Group.
- Tacnet, J.-M., Richard, D. (2010) «De la conception à la sûreté des barrages de correction torrentielle », Revue SET, 2010, Numéro 02.
- Trad, A. et al (2011) Multi-scale analysis on an innovative flexible rockfall barrier, in Rockfall engineering, by S. Lambert & F. Nicot pp 303-342 ISTE - Wiley, London, UK.
- Villard N., (2013). Travaux de correction torrentielle du Frachet. Diagnostic et Etude technique GTS. Appel d'offres DDTM 06 du Ministère de l'agriculture à échéance du 14/08/2013.
- Volkwein et al. (2011). Design of flexible debris flow barriers. Italian Journal of Engineering Geology and Environment. Unisersita La Sapienza.
- Wendeler C. et al. (2012). Protection against debris flows using flexible ring nets in the Teufelskadrich. Ernst & Sohn Verlag fur Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin. Geomechanics and Tunnelling 5.