

Les ouvrages de protection contre les avalanches et chutes de pierres

Grenoble, 4-6 décembre 2001

Session

de formation

La synthèse qui suit est issue d'une session de formation continue qui a eu lieu du 4 au 6 décembre 2001 à Grenoble. Cette session était organisée par Ponts Formation Édition sous la responsabilité de Madame Hélène Skoutarides, et coordonnée par Messieurs Jean Tonello (Tonello Ingénieurs Conseils) et François Toutlemonde (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées). La préparation, amorcée début 2001, a également bénéficié du soutien de Messieurs Michel Prat et Philippe Vion du Service d'études techniques des routes et autoroutes. Il a semblé utile de faire ici, en quelques lignes, le point sur un sujet de grande actualité dans la communauté technique française. Sans prétendre résumer les exposés sur ce sujet complexe, cette synthèse souhaite mettre en évidence ce que les différentes contributions présentées dans ce stage font ressortir d'acquis et d'errements, dans la pratique de l'ingénieur, comme dans la connaissance fondamentale que l'on peut avoir des avalanches, des chutes de pierres, et des ouvrages de protection contre ces aléas.

Nous remercions ici les spécialistes qui ont bien voulu intervenir dans cette session :

- Jacques Bourriot et Pascal Roux, EI Montagne (fonctionnement et pose des écrans),
- Jean-Armand Calgaro, Service d'études techniques des routes et autoroutes (dimensionnement des ouvrages de protection),
- M. Dieny, conseil général de Savoie (enjeux pour le maître d'ouvrage),
- Jean-Louis Durville, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées – actuellement au Centre d'études techniques de l'équipement de Lyon (chutes de blocs et aléas géotechniques),
- Thierry Hubert, ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement/DPPR/Sous-direction de la prévention des risques majeurs (gestion des espaces à risques),
- Vincent Labiouse, École polytechnique fédérale de Lausanne (trajectographie de blocs rocheux et actions sur les galeries de protection),
- B. Lefebvre, SOGREAH (laves torrentielles et modélisation physique des écoulements),
- Lionel Lorier, Société alpine de géotechnique (sécurisation d'un itinéraire),
- M. Meffre, ASI (analyse du risque d'avalanche),
- François Nicot, CEMAGREF (calcul des ouvrages souples de protection),
- Virgile Ojeda, Centre d'études techniques de l'équipement Méditerranée (conception des galeries paravalanches),
- Hervé Palin, Direction départementale de l'équipement de Savoie (études et chantiers),
- M. Plaut, Ingénieur conseil (retour d'expérience),
- Jean Tonello, Tonello Ingénieurs Conseils (méthodologie et spécifications),
- Michel Viktorovitch, Centre d'études techniques de l'équipement de Lyon (extension des chutes de blocs et normalisation des filets de protection).

Enjeux

Les ouvrages de sécurisation d'un itinéraire de montagne, quelle que soit leur nature, correspondent à une attente générale de maîtrise des risques naturels, d'autant plus importante que la société devient de plus en plus dépendante des moyens de communication. L'enjeu se trouve accru lorsque l'utilisation connaît des pointes, y compris en période de fort aléa (cas du tourisme hivernal). L'enjeu économique pour le développement de la Savoie a ainsi été présenté, motivant un très important programme de travaux. Les cas de l'île de la Réunion ou des Alpes-Maritimes ont également été cités. En dehors des enjeux humains, le choix de la prévention, plutôt que de l'intervention d'urgence, a également une incidence budgétaire très significative, puisque, en moyenne sur quelques années, environ la moitié des réserves de crédits de la Direction des Routes est débloquée pour sécuriser en urgence des itinéraires sous falaises instables.

Par ailleurs, dans la logique de promotion d'un développement durable, la doctrine de gestion des espaces s'affirme au sein de la puissance publique, à partir de principes qu'il peut être utile de rappeler :

- l'ouvrage passif de protection ne supprime pas l'aléa ;

- l'ouvrage a une fonction de protection de l'existant et ne doit pas être un prétexte pour augmenter ultérieurement le risque en considérant qu'il est comme invulnérable ;
- les plans de prévention des risques constituent un outil d'analyse et de dialogue à exploiter au mieux, pour maintenir les zones d'expansion des phénomènes naturels, et limiter si possible, par une analyse élargie, l'accroissement de la vulnérabilité, notamment pour le problème de la constructibilité ;
- on doit s'assurer de l'entretien des ouvrages pour maintenir leur fonction de protection.

En résumé, décider de réaliser des ouvrages de sécurisation et de protection, et gérer l'héritage des infrastructures anciennes, c'est faire un choix d'aménagement de l'espace qu'il importe de rendre durable, tant par la connaissance des aléas auxquels l'ouvrage et ce qu'il protège seront soumis, que par une bonne appréciation de la fonctionnalité de ce que l'on protège et par une bonne maîtrise de la réponse de l'ouvrage. La demande sociale de valorisation des espaces de montagne, où l'espace utilisable est restreint et où les aléas sont importants, rend particulièrement aiguë cette problématique.

Connaissance des phénomènes et modélisation des actions

Les fortes pentes de l'environnement de montagne contribuent à conférer un caractère dynamique et accidentel aux actions s'exerçant sur les ouvrages, qu'il s'agisse des chutes de blocs, des avalanches ou de l'écoulement des laves torrentielles. Ce caractère rend difficile l'appréhension d'un « chargement » au sens classique, les quantités de mouvement, vitesses ou énergies étant souvent plus caractéristiques du phénomène qu'une force statique équivalente. L'état de l'art présenté permet de distinguer des acquis, et des points qui nécessiteraient encore d'importants efforts de recherche.

■ Concernant les **chutes de blocs**, on distingue la phase de détachement de la phase de chute. La prévision du premier aspect relève encore pour l'heure d'une expertise liée à la connaissance géologique, échappant à la prévision déterministe des occurrences et des tailles de blocs. Le recueil d'observations historiques et locales reste un élément décisif de la qualité des prévisions. L'interaction avec la météorologie, dans la prévision des risques à court terme, rend également les prévisions assez empiriques. La modélisation des trajectoires des blocs et de l'extension des éboulements a, quant à elle, fait l'objet de recherches nombreuses, avec des approches plus ou moins simplifiées et plus ou moins globales. La convergence des méthodes pour prévoir l'extension des zones soumises aux impacts apparaît assez bonne, sous réserve que les observations historiques et le recueil des informations sur place soient suffisants, comme le montrent les comparaisons réalisées dans le cadre du projet européen Interreg II. En revanche, la prévision des vitesses et des énergies atteintes par les blocs reste assez variable en fonction des modèles utilisés. Actuellement, les experts s'accordent sur la nécessité impérative d'un jugement critique préalable à un « chaînage direct » de la trajectographie des blocs à la cartographie des risques, compte tenu de la sensibilité des résultats aux lois de probabilité utilisées.



Fig. 1 - Chute de bloc à Moûtiers (Savoie).
(Photo communiquée par Jean-Armand Calgario, SETRA).

L'effet « absorbant » permettant de calculer la force s'appliquant sur une galerie pare-blocs, connaissant l'épaisseur de terre interposée sous l'impact, a fait l'objet d'une étude fournie, conduisant notamment aux formules proposées par la Directive fédérale suisse n° 308317.f. L'effet de « matelas » d'épaisseur supérieure à 50 cm s'y trouve bien établi. En revanche, l'effet « absorbant » dû à la présence de la végétation et notamment des arbres, permettant de ralentir ou d'arrêter partiellement les blocs, doit encore faire l'objet d'importants développements. En effet, même si on parvient à modéliser raisonnablement l'interaction d'un bloc rocheux avec un tronc, il reste à intégrer l'effet d'une population d'arbres vis-à-vis d'un ensemble de blocs, à prendre en compte des incidences variables, et à quantifier l'énergie effectivement dissipée dans les différents processus. Malgré tout, un boisement adapté reste une technique dont le bénéfice, même difficilement quantifiable, est recherché dans le souci d'économiser ou de pérenniser la protection assurée par les ouvrages de génie civil. Comme pour ces mêmes ouvrages, sa fonctionnalité reste subordonnée à la qualité de son entretien.

■ La connaissance des **avalanches**, de leurs conditions d'occurrence et de propagation, reste, elle aussi, relativement empirique, compte tenu notamment de la variabilité des conditions typiques de déclenchement. Ceci se traduit par d'importantes « fourchettes » pour le choix des valeurs de paramètres caractéristiques (densité de la neige, coefficient de frottement, etc.). L'observation et la collecte de l'historique local, avec les biais qu'elle peut comporter, restent des instruments précieux d'estimation des risques. La possibilité d'une instrumentation rustique au niveau d'ouvrages de protection constituerait un élément intéressant et peu onéreux de retour d'expérience et de

vérification des hypothèses de dimensionnement (mesures de pression et de hauteur de neige, notamment), pour des phénomènes difficiles à reproduire en laboratoire ou de façon contrôlée.

■ Pour les **laves torrentielles** comme pour les avalanches, les zones de couloir concernées peuvent être assez bien cernées ; en revanche, le problème de l'extension de l'écoulement dans une zone de piémont est souvent crucial pour les infrastructures, et relève jusqu'ici plutôt de la modélisation physique, compte tenu de la complexité des écoulements de fluides à représenter. Pour les laves torrentielles et les charriages qui sollicitent les ouvrages hydrauliques, la caractérisation précise des chargements qui gouvernent l'usure effective des structures reste à expliciter et valider.

Techniques de modélisation des ouvrages

■ La modélisation du comportement des **filets** a connu récemment d'importants progrès, notamment par le biais de la **méthode des éléments discrets**. Cette méthode rend en effet relativement aisée la description de la grande déformabilité des ouvrages souples. La possibilité de simuler la déformation de ces filets, considérés comme des structures à barres, qu'ils agissent de façon statique par rapport à un manteau neigeux constitué de plusieurs couches, ou en interaction dynamique avec un bloc rocheux, ouvre la voie à un dimensionnement mieux maîtrisé des filets et de leurs ancrages, et à la prise en compte de situations de plus en plus réalistes. On note cependant que la simulation des effets de bord (poteau de rive) se heurte à des problèmes délicats de conditions aux limites de maillage.

■ Le dimensionnement dynamique des **ouvrages rigides en béton armé** (galeries paravalanches ou pare-blocs) reste peu classique. Il a cependant été montré que le caractère transitoire de l'arrivée d'une avalanche sur l'ouvrage conduit à des situations plus critiques, en termes de moments, que la prise en compte du « simple » régime permanent. L'effet de la modification de l'écoulement induit par l'inclinaison de l'ouvrage peut également être particulièrement sensible pour le dimensionnement, et demande un soin particulier lors de la définition des valeurs de calcul.

Si la prise en compte explicite de caractéristiques dynamiques du béton armé, aujourd'hui mieux connues, n'est pas de nature à bouleverser la conception des ouvrages de protection, en revanche une meilleure appréhension du



Fig. 2 - Écran déformable de type filet anti-sous-marin au Cap Sicié (Var).

(Photo extraite du Guide technique « Parades contre les instabilités rocheuses : chutes de pierres, chutes de blocs, éboulements », LCPC, mai 2001).



Fig. 4 - Pare-pierres aux Essariaux (Savoie). Conception innovante Tonello Ingénieurs Conseils (label IVOR). (Photo Tonello Ingénieurs Conseils).



Fig. 3 - Pelle à neige à Avoriaz (Haute-Savoie). (Conception et photo Tonello Ingénieurs Conseils).

fonctionnement dynamique (nécessité d'éviter les ruptures d'effort tranchant, d'assurer la possibilité de déplacements importants sans perte de capacité portante et de ménager des dispositifs contrôlés d'absorption d'énergie) doit permettre de réaliser des ouvrages relativement économiques et faisant effectivement travailler la dalle de couverture, éventuellement dans un domaine post-élastique réparable, plutôt que d'utiliser principalement l'importante charge de terre surmontant les ouvrages plus anciens. Une solution innovante fondée sur ces principes a fait l'objet d'applications validées (comité IVOR). La recherche de conceptions renouvelées se trouve d'ailleurs stimulée par des exigences de résistance au séisme souvent concomitantes pour les ouvrages en question.

Pratique de l'ingénieur

■ Le **traitement d'un itinéraire** avec choix de solutions et priorités a été illustré au cours de la session, d'une part, avec la RN 212 dans les gorges de l'Arly et, d'autre part, avec la RN 90 et les chantiers en cours aux environs de Moûtiers. L'intérêt d'un relevé historique détaillé des événements apparaît clairement pour attribuer un ordre rationnel de priorités dépassant l'effet lié aux incidents les plus récents ou les plus malheureux. Dans le cas d'itinéraires avec fréquence importante des événements, le classement des zones suivant le cumul des accidents sur plusieurs dizaines d'années recoupe d'ailleurs assez bien le classement issu de l'observation du terrain et de l'analyse géotechnique. Une loi puissance reliant la fréquence des éboulements et leur volume est également assez bien vérifiée. On note l'importance du critère d'accessibilité pour proposer des protections actives par rapport à des ouvrages passifs. L'exploitation même de l'itinéraire, et les phases de chantier de mise en œuvre des protections, ont fait l'objet d'une étude de sécurité conduisant à des mesures adaptées. Cette étude de sécurité constitue une sujétion assez lourde ; il convient donc de l'avoir réalisée assez en amont.

■ Avec la définition des zones à protéger, **l'estimation cohérente de l'aléa** doit permettre de définir les valeurs de calcul des actions, suivant le format de vérification qui va s'imposer avec les Eurocodes. Ce format tend à expliciter des caractéristiques du projet jusqu'ici relativement floues : durée de vie, niveau de vérification (projet, accident ou danger potentiel), caractère permanent, variable ou accidentel de l'action, etc. Pour la catégorie particulière que constituent les ouvrages de protection, les discussions amorcées au cours de la session tendraient à faire valoir la position qui suit.

➤ La fonction même de l'ouvrage étant la protection, l'action principale vis-à-vis de laquelle l'ouvrage est conçu (chute de blocs, avalanche, etc.) doit d'abord être traitée comme une action « de service » Q, avec les règles d'actions concomitantes de ce niveau de vérification, et un coefficient sur cette action égal à 1. La valeur même de l'action (considérée alors comme une action variable) correspond à une période de retour de 50 ans, ce qui devrait permettre un recalage raisonnablement fondé à partir de données historiques. La logique d'une vérification ELS serait de vérifier l'absence totale d'endommagement irréversible sous cette action. La question se pose de tolérer des endommagements localisés et aisément réparables sous cette action cinquantennale (zones « fusibles »). En effet, se limiter au domaine élastique de toutes les parties d'ouvrages conduit à limiter beaucoup l'énergie stockée.

➤ C'est le coefficient de sécurité (usuellement 1,5) appliqué à la même valeur de l'action Q, dans le cadre d'une vérification à l'ELU fondamental qui, en particulier en l'absence d'éléments permettant de définir une action accidentelle nominale de période de retour de l'ordre de 10 000 ans (qui serait alors vérifiée dans le cadre d'un ELU accidentel), pourrait permettre de passer artificiellement à une période de retour probable de 1 000 à 10 000 ans. La vérification ELU tolère une incursion dans le domaine plastique, en garantissant le maintien de stabilité, ce qui compte tenu du caractère dynamique pourrait préférentiellement conduire à une justification en termes de rotations ou déplacements possibles, analogue à la justification dans le domaine sismique. La concomitance des actions « d'accompagnement », avec des valeurs elles aussi accidentelles ou non, est posée, dans la mesure où les actions peuvent être considérées comme indépendantes, ou faire partie d'un même scénario accidentel.

➤ Il est possible (voire nécessaire) d'intégrer un coefficient de sécurité supplémentaire lié à l'incertitude sur le modèle de calcul utilisé.

➤ Le maintien de l'aptitude au service nécessite *a priori* un entretien au cours de toute la durée de vie escomptée. La requalification de l'ouvrage en fin de durée de vie escomptée serait à prévoir. Tout ceci pourrait influencer sur une meilleure prise en compte de l'exigence consistant à pouvoir inspecter, maintenir ou réparer les ouvrages ou au minimum leurs parties critiques.

■ Pour les ouvrages souples de protection, on est conduit à transposer cette logique de dimensionnement. Leur justification tend à s'appuyer sur une normalisation européenne, en cours de mise en place, fondée sur des **essais de performance** des produits que constituent les filets. Une installation est en cours de montage au Centre d'études techniques de l'équipement (CETE) de Lyon et devrait être opérationnelle d'ici deux à trois ans. Il est envisagé de qualifier les produits vis-à-vis de chocs « ELS » (blocs n'endommageant pas le filet) et « ELU » (stabilité garantie, mais dommages irréversibles). La question de simuler (et d'autoriser dans une certaine mesure) l'endommagement des poteaux de maintien des filets (et de tester la possibilité de les réparer) est posée, dans une même logique de dissipation judicieuse de l'énergie dans les ouvrages.

La tendance des maîtres d'œuvre à exiger des références d'essais conduit d'ici là à réaliser des tests à l'étranger, avec des protocoles qu'il pourra être nécessaire de compléter ultérieurement. On note que le bon fonctionnement d'un ouvrage actif dépend des filets eux-mêmes, mais aussi de la qualité des fixations et ancrages, dont il existe une gamme large de matières, produits et qualités. Il dépend également de la qualité d'exécution des scellements, et de sa maintenance. La normalisation des produits ne supprime donc pas la nécessité de spécifications précises, d'un plan d'assurance de la qualité concernant la pose, et d'un contrôle approprié de la part de la maîtrise d'œuvre (une visite de réception doit être prévue par un autre intervenant que l'installateur).

■ Cette nécessité apparaît évidemment aussi à la lumière du **retour d'expérience**.

Pour les ouvrages souples, l'accent semble devoir être mis sur le suivi des ancrages, et sur la vidange régulière des filets, ce qui suppose une planification financière exigeante de l'entretien.

La réalisation de couvertures de terre ou de merlons avec des pentes importantes, notamment supérieures à 30 %, constitue généralement une difficulté importante qui peut nuire à la qualité finale de réalisation.

Pour les ouvrages rigides, les principales pathologies rencontrées sont liées à une mauvaise prise en compte de l'environnement (nécessité de spécifier – puis de réaliser effectivement – des bétons résistant au gel-dégel et aux sels de déverglaçage), à une spécification ou à une exécution insuffisante des enrobages, et à un mauvais traitement des étanchéités et écoulement des eaux. Pour l'étanchéité, une double couche avec décalage des joints semble indispensable.

Le vieillissement des ouvrages voûtés massifs en maçonnerie ou béton non armé supportant une importante couverture de terre est généralement assez bon, ceci étant d'autant plus important que les réparations n'en sont pas aisées.

Le vieillissement lié à l'usure des ouvrages hydrauliques soumis au charriage de blocs n'a pas été abordé au cours de la session, faute de temps et d'intervenant ayant fait une synthèse des matériaux et techniques disponibles, et des leçons de l'expérience.

Les enjeux de cette question sont cependant importants, au moins en termes de nombre d'ouvrages.



Fig. 5 - Paravalanche du Chevril (Savoie) en fin de construction.

Nécessité de prendre en compte l'environnement dans la spécification et l'exécution des bétons. (Conception et photo Tonello Ingénieurs Conseils).

Remarques pour conclure

De premiers pas ont été faits au cours de cette session, pour identifier les progrès des connaissances utilisables par l'ingénieur, ou s'accorder sur les moins mauvais errements compte tenu des connaissances disponibles. L'importante pluridisciplinarité des équipes à intervenir sur les projets de protection des itinéraires de montagne a été rappelée constamment, ce qui exige un rôle fédérateur de la maîtrise d'œuvre (ou du « designer » selon la terminologie « euro-anglo-saxonne ») pour assurer la cohérence du projet... et il n'a pas été inventé de recette miracle lors de cette formation pour faciliter ce rôle !

L'importance des études et données de terrain spécifiques pour assurer la validité du projet a également fait l'objet de rappels constants, ce qui fait des ouvrages de protection, même s'ils utilisent des éléments modulaires normalisés, tout sauf des ouvrages types.

Plusieurs champs d'investigation ont été rappelés, n'exigeant pas forcément de gros moyens, mais surtout un intérêt continu pour l'observation et à l'analyse de phénomènes qui, même s'ils sont inégalement répartis sur le territoire national, correspondent à un enjeu humain et économique dont l'importance est rappelée.

C'était le souhait des participants de pouvoir, dans quelques années, au-delà de cette première ébauche d'état de l'art, faire le point sur les méthodes plus économiques, mieux établies ou plus sûres, pour concevoir, réaliser et maintenir les ouvrages de protection dont les routes de montagne peuvent avoir besoin pour être sûres.

Quelques documents récents

Parades contre les instabilités rocheuses : chutes de pierres, chutes de blocs, éboulements, Guide technique LCPC-MATE, Ouvrage collectif, Édition LCPC, Collection Environnement – les risques naturels, mai **2001**.

Projet européen INTERREG II C, Prévention des mouvements de versants et des instabilités de falaises – FALAISES – Confrontation des méthodes d'étude des éboulements rocheux dans l'arc alpin, Publication du rapport final prévue fin **2001**.

Couverture PSD « pare-blocs structurellement dissipant, dossier IVOR.

Office fédéral des routes, *Directive n° 308317.f*, Berne (Suisse), octobre **1997**.

François Toutlemonde