

TRACÉS

08

OUVRAGES ANCRÉS

132^e année 3 mai 2006
Bulletin technique de la Suisse romande



Etude de **risques**

La stabilité des ouvrages de soutènement, construits entre la fin des années 60 et les années 80, a souvent été assurée par l'intermédiaire d'ancrages permanents, véritables fleurons technologiques de cette époque. Près de 40 ans après, les ingénieurs s'interrogent sur la durée d'utilisation restante de ces ouvrages. A l'initiative du Service des routes du canton de Vaud, une méthode d'appréciation de l'état des ouvrages ancrés permanents, basée sur une « approche risque », a été développée et appliquée dans le cadre de la planification de travaux d'entretiens.

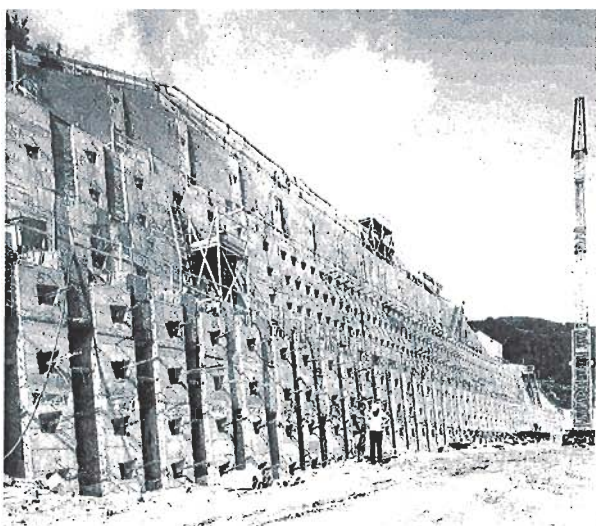
Les ancrages permanents jouent souvent un rôle capital pour assurer la sécurité structurelle d'un ouvrage ou d'un secteur complet d'autoroute. Noyés dans une masse de béton ou dissimulés par de la végétation (fig. 1), ces éléments posent aujourd'hui nombre de questions inédites aux ingénieurs. Combien d'ancrages sont-ils hors service? Quelle est la sécurité actuelle d'un ouvrage ne présentant a priori aucun défaut majeur? Sa ruine éventuelle sera-t-elle précédée de signes annonciateurs? Quels travaux de remise

en état ou de renforcement faut-il prévoir pour assurer la sécurité de l'ouvrage, donc des usagers?

Une méthodologie délicate à appliquer

L'entretien des ouvrages ancrés des routes nationales est régi par des recommandations de l'OFROU, parmi lesquelles la directive « Tirants d'ancrages », dont la méthodologie impose d'évaluer chaque ancrage comme un élément isolé, son état étant apprécié par pas successifs. L'appréciation d'ensemble d'un ouvrage requiert donc aussi l'évaluation en parallèle des autres éléments, comme le béton et les drainages. Ce n'est qu'une fois l'état de chaque élément apprécié qu'il est possible d'établir un projet de renforcement.

Une mise en application pilote de la directive a été effectuée par le canton de Vaud sur le segment UPlANS 007 (autoroute A12 entre l'échangeur de la Veyre et Châtel-St-Denis). Réalisé au début des années 80, ce tronçon comprend treize ouvrages ancrés (des murs, une culée de viaduc et trois piles de pont) pour un total de plus de 300 ancrages à longueur libre gainée-graissée (fig. 2). Il se situe dans le versant substaibilisé ouest de la Veveysse, constitué essentiellement par des flyschs sous couverture morainique.



1a



1b

Fig. 1 : Stabilité du versant assurée au moyen d'un ouvrage lourdement ancré. Ouvrage lors de sa réalisation (a) et tel qu'on le trouve aujourd'hui (b)

Pour ce tronçon, la vulnérabilité du type d'ancrage utilisé, due à une protection contre la corrosion déficiente, a été confirmée par des investigations. Ce constat, couplé avec le contexte géologique et hydrogéologique et le besoin avéré d'ancrages a conduit au choix de « remplacer » systématiquement tous ces éléments (renforcement à 100 %).

A la suite de l'analyse de ce tronçon pilote, des investigations ont été menées sur le segment UPLaNS 005 (autoroute A9 entre Vennes et Chexbres). Réalisé au début des années 70, il comprend plus de 4000 ancrages - essentiellement à longueur libre injectée de coulis - répartis sur soixante ouvrages sis dans le versant molassique instable ou stabilisé du Lavaux. Le nombre d'ancrages par ouvrage varie de un à plus de 600. Pour ce segment, la technique d'exécution des ancrages (sans longueur libre) rendait inopportun et déraisonnable des travaux d'investigations systématiques. Des investigations menées en 2003 (épreuves de décollement, essais au coupe-fil, etc.) ont en outre abouti à des résultats parfois contradictoires, douteux ou difficiles à interpréter, liés à l'absence d'élasticité des tirants sans réelle longueur libre. De plus, les moyens à mettre en œuvre pour l'investigation des ancrages sur des ouvrages existants sous trafic sont particulièrement lourds. Or la directive OFROU s'appuie principalement sur les résultats des investigations pour fonder l'appréciation des ancrages. Ainsi, cette situation aurait dû conduire au remplacement systématique des tirants, une solution parfaitement déraisonnable.

Etude de risques

L'expérience des tronçons UPLaNS 005 et 007 a souligné l'inopportunité de l'investigation des ancrages à longueur libre injectée de coulis ainsi que l'absence d'un outil pour une appréciation globale de l'ouvrage (indicateurs d'état, de vulnérabilité ou facteurs d'agression possibles). Il a ainsi été proposé à l'OFROU d'utiliser une méthode s'appuyant sur une étude de risques, qui permet l'évaluation de l'état des ouvrages ancrés, mais surtout la définition des renforcements et des dispositifs de surveillance nécessaires.

L'étude de risques prend en compte les dangers auxquels est soumis l'ouvrage ancré, qu'ils soient naturels comme :

- la géologie (glissement),
- l'hydrogéologie (mise en charge),
- la chimie des eaux souterraines (agressivité et corrosivité),
- les courants vagabonds (résistivité des terrains),
- les séismes,

ou anthropiques comme :

- la conception de l'ouvrage (type d'ancrages, tension initiale, protection et enrobage de la tête, reprise de bétonnage),

- l'état du béton armé (réaction alcali-granulats, corrosion de l'armature, pénétration des chlorures, carbonatation),
- l'état des drainages (conception, fonctionnement),
- la proximité d'ouvrages sensibles (habitations, lignes de communication, lignes de transports électriques),
- le mécanisme de ruine par rapport à l'axe autoroutier,
- les facteurs de modèles obtenus par calculs (états limites types 2 et 3 selon SIA 267), traduisant la réserve de sécurité de l'ouvrage.

Comme tous ces éléments possèdent une dimension géographique ou représentent un attribut d'une entité (l'ouvrage), l'utilisation d'un SIG (système d'information géographique) facilite grandement leur exploitation : on peut ainsi obtenir des cartes visualisant tout ou partie des risques considérés (fig. 4).

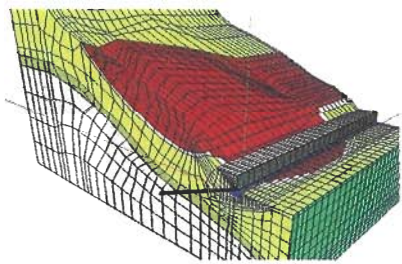
L'approche risque définie comprend deux étapes (fig. 3). Dans un premier temps, elle vise d'une part à optimiser les moyens nécessaires pour affiner l'évaluation, et d'autre part à identifier au plus vite les ouvrages nécessitant des travaux d'urgence. L'évaluation est faite *via* une matrice de cotation des ouvrages qui tient compte des risques inventoriés. Son résultat - sous forme de note - permet de définir, selon un barème préalablement établi :

- une première évaluation du renforcement,
- l'importance du dispositif de surveillance,
- le type et la quantité d'investigations à effectuer,
- la pertinence de l'exécution de calculs et la définition des situations de projet associées.

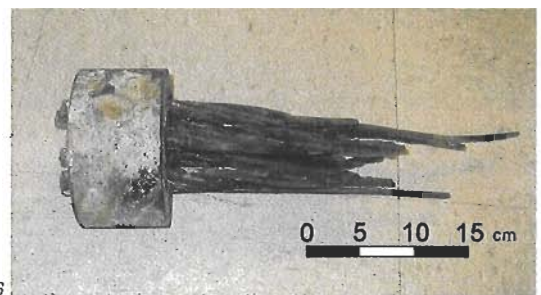
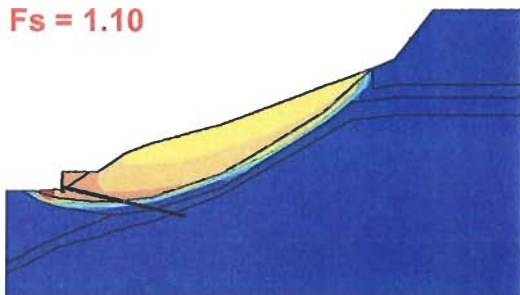
Cette procédure permet d'identifier rapidement les carences ou points faibles d'un ouvrage puis de définir les investigations ou les calculs de vérification qui doivent s'y rapporter. On effectue donc une évaluation ciblée de l'état de l'ouvrage, basée sur une appréciation globale systématique du risque et en profitant de l'expérience acquise dans le cadre d'études antérieures.

Une fois l'instrumentation, les investigations¹ et les calculs effectués, on procède à une seconde évaluation du risque *via* une nouvelle matrice de notation. Elle tient compte des résultats des investigations et des calculs ainsi que, si possible, des mesures déjà disponibles. Elle permet de préciser le concept de renforcement et d'assainissement. Le renforcement est apprécié en terme de pourcentage du tonnage d'ancrage initial (0 à 150% ou plus au besoin), ou de travaux d'assainissement du béton armé ou du système de drainage (par exemple en cas de risque de mise en charge inacceptable lié à un concept de drainage défaillant ou colmaté).

¹ Des travaux d'instrumentation et d'investigation pour la première évaluation ont été menés sur le segment UPLaNS 005 (voir article pp. 15-18).



$F_s = 1.10$



Sécurité résiduelle

Une des difficultés de l'étude des ouvrages ancrés permanents existant réside assurément dans l'évaluation de leur sécurité effective actuelle, et surtout dans le pronostic de son évolution temporelle. Tout d'abord, la sécurité actuelle dépend naturellement de l'état des tirants, un domaine dans lequel - les travaux faits pour le canton de Vaud le prouvent - il est difficile d'obtenir des résultats probants, surtout pour les ancrages sans réelle longueur libre. Ensuite, l'état futur exige de connaître une relation entre la dégradation du tirant et le temps, ceci en fonction des agressions dont il est l'objet. Cette relation, certainement non-linéaire (fragile), est à notre connaissance très mal - voire pas du tout - connue.

S'il est clair que l'absence de dégradation visible d'un ouvrage peut être perçue comme garante du bien-fondé du concept structural et des moyens mis en œuvre, cette conviction s'effrite rapidement si des investigations révèlent que des ancrages sont rompus, des armatures corrodées ou des drainages bouchés, alors qu'aucun déplacement critique n'est constaté.

Les documents retrouvés concernant la description des ouvrages ont montré que la mise en place des ancrages pouvait être soit « préventive », pour garantir une sécurité adéquate des ouvrages, soit « réactive », en fonction du comportement du versant au cours des travaux. Cette seconde façon de faire, émotionnelle et ne répondant à aucune logique mathématique, rend délicate l'évaluation de la nécessité des ancrages.

Dans le cadre de la vérification, une recalculon de l'ouvrage intégrant les informations disponibles (mesures, essais, observations lors de la réalisation, etc.) permet d'une part d'apprécier la sécurité résiduelle des différentes parties d'ouvrage tout en identifiant celles qui sont les plus vulnérables et, d'autre part, de s'assurer de la pertinence des ancrages pour garantir la stabilité générale (fig. 5). Des calculs, basés sur les exigences des normes en vigueur (facteurs partiels), ont ainsi été effectués selon trois scénarios :

- une situation de projet « initiale » correspondant à l'ouvrage neuf,
- une situation de projet « de base », satisfaisant à l'état actuel le plus probable (pourcentage d'ancrages absents, colmatage partiel du drainage, armature partiellement corrodée, surcharge, etc.),
- des situations de projet « futures probables », en fonction des risques encourus (rupture d'ancrages, colmatage total du drainage, etc.).

Bien que débouchant sur une appréciation quantitative de l'état, les résultats des calculs traduits sous forme de facteurs de modèles (appréciation de la sécurité selon les nouvelles normes) ne constituent qu'un indicateur à prendre en compte dans l'évaluation de l'état, et non un paramètre déterminant, étant donné que les hypothèses admises sont souvent conservatrices, notamment pour les paramètres géotechniques.

Fig. 5: Calcul de stabilité du versant au droit d'un ouvrage ancré; maillage basé sur la géométrie d'un glissement avéré et résultat de calcul

Fig. 6: Tête d'ancrage rompue par corrosion sous contraintes

(Tous les documents illustrant cet article ont été fournis par les auteurs)

Une méthode à consolider

Les expériences enregistrées à ce jour ont montré que la pertinence des études à entreprendre pour évaluer l'état d'un ouvrage ancré doit toujours être comparée avec l'importance des travaux de renforcement nécessaires a priori (par exemple le remplacement de 100% des tirants sur un ouvrage possédant peu de tirants). En tous les cas, une inspection principale, l'établissement du dossier d'ouvrage et une première évaluation du risque sont indispensables, ne serait-ce que pour permettre de juger de la nécessité de maintenir les ancrages.

L'application de l'étude de risques permet de définir un renforcement spécifique optimisé pour chacun des ouvrages d'un tronçon, en relation avec la philosophie d'entretien des routes nationales. Sur le segment UPlaNS 005 par exemple, cette méthode a permis d'abaisser de 100% à environ 35% en moyenne le tonnage d'ancrage nécessaire pour assurer une sécurité suffisante jusqu'à la prochaine intervention UPlaNS (environ 25 ans selon le désir du MO). A noter que les renforcements définis à partir de l'étude de risques ne garantissent une sécurité suffisante sans intervention jusqu'au prochain UPlaNS qu'à condition qu'un système d'auscultation complet et redondant de l'ouvrage soit mis en place.

En exploitant une statistique concernant plus de 100 ouvrages ancrés de différents types, l'évaluation de l'état à partir d'une étude de risques s'appuie ainsi à chaque fois sur des bases plus solides, ce qui permet évidemment d'accélérer le processus, et donc d'en limiter les coûts. Cette optimisation de la tâche correspond ainsi bien au retour sur investissement attendu par l'OFROU, via le Service de routes du canton de Vaud, lors du démarrage des études sur les tronçons pilotes.

Jérémie Crisinel, ing. dipl. EPFL
Frédéric Mayoraz, dr ing. dipl. EPFL

Groupement GUMA, De Cérenville Géotechnique SA
Champs-Courbes 17, CH - 1024 Ecublens

Investigations des ancrages permanents - retour d'expériences

A ce jour, plus de 100 ouvrages ancrés de nature très différente - murs à contreforts ancrés, murs de soutènements traditionnels ancrés au niveau de la semelle, longrines ou plaques ancrées, pieux ancrés, piles ou culées de pont ancrés, estacades, etc. - sont ou ont été étudiés dans les cantons de Vaud, de Berne et de Neuchâtel par les divers représentants du GUMA. Environ la moitié d'entre eux ont subi des investigations portant sur les grandes familles d'éléments que sont les ancrages, le béton armé et les systèmes de drainages. On dispose ainsi d'une bonne idée des pathologies de dégradation de ces macroéléments. Les principaux résultats de ces investigations peuvent être synthétisés de la manière suivante :

- La ruine des ancrages ou la dégradation du béton armé, et donc la perte de sécurité, n'est pas forcément associée à des signes extérieurs visibles.
- Statistiquement et indépendamment de leur type, 10 à 15% des ancrages mis en place depuis plus de 20 ans sont hors service; ce taux varie d'un ouvrage à l'autre en fonction du contexte et de la conception de l'ouvrage.
- Le principal mécanisme de dégradation d'un tirant d'ancrage est la corrosion sous contraintes (fig. 6). Fortement non linéaire et lié à l'utilisation d'éléments précontraints, ce phénomène apparaît si la protection contre la corrosion est déficiente, généralement dans les zones proches de la tête ou à la transition avec la zone de scellement.
- Les ancrages à longueur libre injectée de coulis, utilisés principalement dans les années 65-70, sont moins vulnérables que ceux à longueur libre gainée-graissée des années 80. De plus, du fait du frottement (entre les câbles, le coulis d'injection, les gaines et le terrain), les premiers nommés continuent à exercer une tension dans le sol même en cas de rupture en tête.
- La présence derrière les ouvrages de soutènements d'eaux corrosives pour les aciers et agressives pour les bétons (utilisation de sels de déverglaçage sur les chaussées) est un indicateur quasi systématique de dégradation attendue des ancrages ou du béton. Les éléments de béton armé peuvent présenter des pertes de section d'armature allant jusqu'à 50%.
- La plupart des ancrages mis en place entre les années 65 et 80 ont été bloqués à une tension supérieure à celle exigée aujourd'hui, les rendant ainsi non conformes aux recommandations actuelles.
- Les épreuves d'essais sur des ancrages à longueur libre injectée de coulis sont difficiles à interpréter, puisque la forte tension initiale dans l'ancrage associée à l'absence de longueur libre réduit considérablement le domaine élastique dans lequel doit se dérouler l'essai de décollement.
- Selon des essais d'infiltration menés sur plus de 50 ouvrages, le fonctionnement des systèmes de drainage est généralement correct.