

Note de sensibilisation sur les ouvrages existants à précontrainte extérieure protégée par du coulis de ciment au contact des armatures

Ouvrages
d'Art
29

Quelques ruptures de câbles de précontrainte extérieure protégés par du coulis de ciment au contact des armatures ont été observées en France ces dernières années. Il est à noter que depuis la publication de la circulaire n°2001-16 du 28 février 2001, ce type de protection est de fait abandonné pour les câbles de précontrainte extérieure.

Les ouvrages potentiellement concernés sont ceux de la période "début des années 1980 – début des années 2000".

La présente note vise à informer les différents maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre sur ce phénomène en présentant l'état des connaissances sur le sujet et en faisant des recommandations :

- sur les investigations qui peuvent être réalisées pour évaluer l'état d'une précontrainte extérieure,
- sur les consignes de sécurité à appliquer,
- sur la conduite à tenir en cas de doute sur un câble ou en cas de rupture constatée.

Sommaire

Introduction	2
L'état des connaissances	3
Les investigations à réaliser	5
Les consignes de sécurité	6
Que faire en cas de doute sur un câble ou en cas de rupture constatée ?	6
Conclusions	7
Bibliographie	7

Introduction

La précontrainte extérieure est une technique durable comme en témoignent les deux ouvrages ci-contre construits en France dans les années 1950 et en excellent état aujourd'hui avec leurs câbles d'origine.

Elle a connu depuis la fin des années 1970 un remarquable essor en France et dans le monde, et elle est aujourd'hui employ e systématiquement pour les ouvrages en béton précontraint de grandes port es.

Cependant, quelques ruptures de câbles de précontrainte extérieure constitués de torons et protégés par du coulis de ciment directement au contact des armatures ont été observ es en France ces dernières années (5 cas recensés).



Deux ponts des années 50

Ce phénomène doit être pris en compte dans le cadre de la surveillance des ouvrages possédant une précontrainte de ce type et pour assurer la sécurité des personnels amenés à travailler à proximité de ces câbles.

La présente note vise donc à informer les différents maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre sur ce phénomène en présentant l'état des connaissances sur le sujet et en faisant des recommandations :

- sur les investigations qui peuvent être r alis es pour évaluer l'état d'une précontrainte extérieure,
- sur les consignes de sécurité à appliquer,
- sur la conduite à tenir en cas de doute sur un câble ou en cas de rupture constat e.



Rupture d'un câble par corrosion

L'état des connaissances

Les différents modes de rupture des câbles extérieurs

Il convient en préambule de rappeler les différents modes de rupture des câbles de précontrainte extérieure. Deux cas de figure sont à distinguer :

Cas où les armatures ne sont pas au contact du coulis

Ce cas concerne :

- les câbles protégés par produit souple (graisse, cire, etc.) ;
- les câbles galvanisés avec ou sans gaine générale ;
- les câbles dont les torons sont individuellement protégés par des gaines PEHD, ces gaines individuelles pouvant elles-mêmes être placées dans une gaine générale injectée par du coulis de ciment.

Dans ce cas, lors de la rupture d'un toron, sauf éventuellement frottements élevés au niveau des pièces déviateurs, l'énergie élastique emmagasinée au cours de la mise en tension du toron est libérée individuellement et la rupture se fait sans trop de dommage.

S'il y a une gaine générale, le toron peut en général glisser à l'intérieur de la gaine, sans fouetter et sans modifier l'état de contrainte dans les autres torons.

En l'absence de gaine générale, un fouettement reste possible et il convient donc de prévoir des colliers pour éviter ce phénomène.

D'un point de vue structurel, la perte d'efficacité est donc progressive.



Rupture de torons non protégés par du coulis

Cas où les armatures sont au contact du coulis

Ce sont les câbles visés par la présente note.

Dans ce cas, au contraire, lors de la rupture d'un toron et du fait de l'adhérence du coulis, généralement le toron cassé se ré-ancre au sein du faisceau de torons, l'énergie ne se libère pas et l'effort du toron rompu se reporte sur les autres torons augmentant ainsi d'autant leurs sollicitations. Si l'on considère que les câbles sont tendus à environ 70% de leur limite de rupture, il suffit par exemple, pour un câble 19T15, que 6 torons rompent pour que la limite de rupture soit atteinte dans les torons restants.

La rupture est alors violente et c'est une énergie considérable correspondant à la totalité de l'énergie élastique emmagasinée au cours de la mise en tension du câble qui est libérée brutalement.

Le câble se déforme et peut fouetter latéralement, des projections (coulis, éclats de béton, clavettes) peuvent se produire, les extrémités peuvent être expulsées. Ces phénomènes peuvent mettre en danger les personnes qui se trouveraient à proximité.

Le risque de fouettement est théoriquement nul pour les câbles courts (longueur inférieure à 40 mètres); il augmente avec la longueur des câbles et dans la première travée après l'ancrage.

D'un point de vue structurel, lorsqu'un câble extérieur rompt, il perd son efficacité sur toute sa longueur. Au contraire, pour les câbles intérieurs au béton, du fait de l'adhérence du coulis lorsque l'injection est correcte, l'effort peut se ré-ancrer sur une courte longueur et une rupture de torons, voire de câble, n'a qu'un effet local sur la résistance de la structure.



Déformation de câbles 19T15 lors d'un démontage



Expulsion de l'extrémité d'un câble 19T15 lors d'un démontage

En général, la rupture d'un, voire deux, câble(s) extérieur(s) n'est pas de nature à mettre en péril la résistance de la structure. De plus, l'expérience montre que la probabilité d'avoir dans un ouvrage plus de deux câbles rompus entre deux inspections est extrêmement faible.

Les causes des ruptures observées

Les ruptures observées sont dues à la corrosion des armatures insuffisamment protégées du fait de défauts d'injections des gaines. Ces défauts résultent essentiellement d'une instabilité du coulis lors de sa mise en oeuvre, couplée éventuellement à une procédure d'injection inadaptée.

En général, ces défauts d'injections se traduisent par des défauts de remplissage (vides partiels ou totaux, notamment à proximité des points hauts éventuellement remplis d'eau) et/ou par la présence en partie supérieure de la gaine d'un produit blanchâtre ayant la consistance d'une pâte humide et molle surmontée d'une couche d'eau et d'une poche d'air. Cette eau provient du ressuage du coulis et est restée piégée au sein du conduit étanche en PEHD.

La sensibilité des armatures à la corrosion fissurante sous tension constitue un facteur aggravant.

L'explication détaillée de ce phénomène, qui concerne essentiellement les coulis très adjuvantés postérieurs à 1980, est décrite dans la note d'information Sétra-LCPC n o21 de juillet 1996 [1]. Pour remédier à cette pathologie, la circulaire 99-54 du 20 août 1999 [2] a institu e un avis technique coulis d elivr e par la CIP, bas e sur l'essai très discriminant dit "essai au tube inclin e". Cet essai a été repris par la norme EN 445 et une nouvelle méthode d'essai plus simple sur tube de 1 m vient d'être publiée par le LCPC (méthode d'essai des lpc n o65 "Essai de stabilité des coulis de ciment au tube inclin e d'un mètre").

Il est à noter que depuis la publication de la circulaire n o2001-16 du 28 février 2001 [3], ce type de protection est de fait abandonn e pour les câbles de précontrainte extérieure.

Les ouvrages potentiellement concern es sont donc ceux de la p eriod e "début des années 1980 – début des années 2000".

Les conclusions des enquêtes et investigations réalisées

Afin d'avoir une meilleure appréciation du phénomène et de son étendue, un groupe de réflexion du RST a été cr e e et plusieurs phases d'enquêtes ou d'investigations ont été effectuées sur une cinquantaine d'ouvrages du réseau routier national.

En particulier un sondage systématique des gaines a été effectu e au marteau afin de détecter d'éventuels défauts de remplissage. Il convient à ce sujet de distinguer le cas des gaines qui "sonnent le creux" uniquement en partie supérieure, ce qui traduit en général un simple décollement du coulis, des câbles qui "sonnent le creux" sur toute leur périphérie, ce qui traduit un manque important de coulis.

Les principales conclusions sont les suivantes :

- aucune nouvelle rupture de câble ou de toron n'a été observée à cette occasion ;
- de façon très grossière on peut considérer que la proportion des câbles de précontrainte extérieure ayant pr esent e une rupture est de l'ordre de 1/1000 ;
- même si une forte proportion d'ouvrages présente au moins une zone de gaine qui "sonne le creux" en partie supérieure lorsqu'on la frappe avec un marteau, seulement un petit nombre d'ouvrages, de l'ordre de 10 %, présentent une zone "sonnant le creux" sur toute la périphérie de la gaine ;
- la présence de zones mal ou pas injectées ne se traduit pas systématiquement par une corrosion des armatures ;
- aucun adjuvant n'est particulièrement suspect e.

Les investigations à réaliser

Deux niveaux d'investigations peuvent être r ealis es pour évaluer l'état de la précontrainte d'un ouvrage :

Premier niveau

Pour les ouvrages ne présentant pas de rupture de torons, il est recommand e de faire réaliser au plus tard lors de la prochaine Inspection Détaillée un premier bilan de la précontrainte extérieure.

Un chapitre spécial du rapport de l'Inspection Détaillée doit être consacr e à la précontrainte extérieure.

Ce bilan consiste en :

- un recueil préalable des informations disponibles sur les procédures d'injection qui ont été appliquées lors de la construction : procède de précontrainte et type de câbles, nature des conduits, composition des coulis (nature et provenance du ciment, nature du (ou des) adjuvant(s)  ventuellement employ e(s)), méthode d'injection utilisée, périodes d'injection (froide, chaude), ordre et dates d'injection des conduits, incidents d'injection éventuellement not es, témoignages des personnes ayant contr ol e ou participé à l'injection, etc. ;
- une inspection détaillée visuelle de la précontrainte extérieure qui comprend les points suivants :

a) **inspection des conduits** en prenant soin de relever la présence de fissures longitudinales, de raccords défectueux, de déformation (ovalisation, excroissance en forme d'hélice pouvant faire craindre une rupture de toron), etc. ;

Il convient notamment de rechercher, tout au long du conduit, la présence de traces de coulis, de bouchons ou de trous dans la gaine de PEHD (ce sont des signes de ré-injection pendant le chantier et les endroits où ces signes sont observables représentent des zones potentielles d'injection défectueuse).

b) **observation de l'aspect extérieur des capots de protection des ancrages :**

- présence de coulures de rouille sur la surface des capots et sur la tromplaque ;
 - repérage de la position des  v enements d'injection qui doivent être situ es en partie haute du capot ;
 - qualité du remplissage des  v enements d'injection ;
 - traces de fuite de coulis à l'extérieur du capot ;
 - etc.
- une auscultation des gaines au marteau. Il est recommand e de sonder à l'aide d'un marteau les conduits sur toute leur longueur (hors traversée des éléments en béton) de façon à détecter s'ils « sonnent le creux » ; l'attention est attirée sur le fait que certains PEHD de fabrication ancienne peuvent durcir et paraître « sonner le creux ».

Ce premier bilan permet d'avoir une vision globale de la qualité de protection des câbles et de l'état de la précontrainte. Cependant, des zones à pâte blanchâtre peuvent ne pas être détectées et les zones des gaines en partie haute dans la traversée des entretoises sur piles ou au niveau des massifs d'ancrage ne peuvent pas être sondées au marteau.

Il est à noter qu'il convient d'effectuer en particulier ces investigations sur les ouvrages déjà inspect es mais dont certaines parties étaient inaccessibles lors de la première inspection (câbles près des voussoirs sur pile de grande hauteur par exemple). Des moyens d'accès spécifiques ( chafaudage, nacelles) peuvent s'avérer nécessaires.

Second niveau

S'il y a le moindre doute sur l'état de la précontrainte à l'issue de ce premier bilan (présence d'une zone "sonnant le creux" sur toute la périphérie d'un câble, traces d'humidité ou de corrosion, etc.) ou si le gestionnaire souhaite améliorer la connaissance de l'état de son ouvrage, des investigations plus poussées doivent être menées :

- utilisation du capteur capacitif mis au point par le LRPC d'Autun et le LCPC qui permet de détecter des vides dans les gaines sans avoir à les ouvrir ;
- ouvertures de fenêtres dans la gaine sans endommager les armatures et prélèvements éventuels de matériaux pour analyse (eau, pâte blanchâtre, produits de corrosion, etc.). Ces ouvertures de l'ordre de 10 x 25 cm sont à réaliser dans les zones réputées douteuses à l'issue du premier bilan. L'attention est attirée sur la nécessité de parfaitement refermer les gaines dès la fin des prélèvements ;

- démontage de capots, si l'opération peut être faite rapidement et sans exercer d'effort important sur les câbles ;
- observations endoscopiques dans les gaines, notamment aux points hauts, près des entretoises sur pile, si cela est possible ;
- gammagraphies ;
- tout autre moyen permettant de donner des informations sur le contenu des gaines (thermographie infrarouge, etc.).

Les consignes de sécurité

Sur un ouvrage qui a présenté une rupture de câble (Viaduc de Saint-Cloud, reliant le boulevard périphérique parisien à l'autoroute A13), une étude de risque a été réalisée par un bureau d'étude spécialisé indépendant. Cette étude a conclu dans ce cas que si le risque encouru par les personnels réalisant les opérations de réparation du câble rompu était globalement acceptable par comparaison avec le niveau de risque des professions considérées, ce risque était significatif et devait être minimisé. Des informations complémentaires sur cette réparation seront données dans un prochain bulletin Ouvrages d'Art du Sétra. Le risque est nettement plus faible pour les inspections et investigations décrites ci-dessus qui ne demandent pas un séjour prolongé dans l'ouvrage. Il n'en demeure pas moins vrai que des précautions doivent être prises pour minimiser les risques lors des interventions. Il s'agit pour la plupart de simples mesures de bon sens, applicables d'ailleurs pour tout type de visite à l'intérieur du caisson.

Ci-après sont données quelques consignes générales pour aider à la mise au point avant inspection d'une procédure sommaire d'intervention spécifique et qui peuvent donner lieu à des adaptations et compléments en fonction de chaque ouvrage.

Consignes générales :

- en cas de rupture le câble peut fouetter violemment : il convient donc de ne pas stationner inutilement dans l'ouvrage ;
- en cas de rupture l'ancrage peut reculer de plusieurs mètres ou si l'ancrage ne recule pas, le câble peut considérablement se déformer latéralement à proximité de son ancrage. Il faut donc éviter de se placer derrière les ancrages dans l'axe du câble et en amont de l'ancrage à proximité du câble dans ses environs ;
- des mesures d'émission acoustique réalisées sur un ouvrage ayant subi une rupture de câble ont montré que les ruptures de fils constitutifs des torons semblent se produire plutôt lorsque la température est basse. Il convient donc d'éviter de visiter l'ouvrage si la température extérieure est descendue en dessous de 0° C la semaine précédant cette visite ;
- si des signes extérieurs laissent planer un doute sur l'état de la précontrainte (traces de corrosion aux ancrages, renflements sur des conduits, etc.) ou si une rupture de câble a été observée, les sondages au marteau et les inspections de second niveau ne doivent pas être effectués sans une réflexion préalable spécifique sur la gestion du risque.

Que faire en cas de doute sur un câble ou en cas de rupture constatée ?

Au-delà des consignes de sécurité exposées au paragraphe précédent, il n'est pas possible de donner des règles générales sur la conduite à tenir pour un ouvrage présentant un câble douteux ou rompu.

Chaque ouvrage doit être étudié au cas par cas. Il convient de se rapprocher d'experts, par exemple ceux des services du Réseau scientifique et technique (RST) de l'Équipement (Sétra, LCPC, Centres d'études techniques de l'Équipement).

Selon la gravité du cas considéré, divers scénarii sont envisageables :

- surveillance renforcée des câbles ;
- haute surveillance avec suivi acoustique : ce suivi permet de détecter les ruptures des fils constitutifs des torons et de mettre en évidence d'éventuelles accélérations du phénomène ;
- pose d'absorbants d'énergie : ceux-ci ont déjà été testés sur le viaduc de Saint-Cloud déjà cité et permettent d'éviter le phénomène de fouettement (mais il reste un risque de recul d'ancrage et d'un flambement limité dans la première travée après l'ancrage) et d'effectuer les opérations de démontage moins brutalement ;

- réinjections locales. Les investigations approfondies récentes réalisées sur quelques ouvrages du réseau routier national ont montré que l'absence de coulis dans une gaine n'était pas systématiquement synonyme de désordre pour les armatures. Des ré-injections locales sont alors envisageables, en prenant bien soin de vérifier la compatibilité des différents produits de protection pour éviter tout phénomène galvanique ;
- assèchement des gaines pour bloquer le phénomène de corrosion par soufflage d'air déshumidifié : cette technique, utilisée sur les grands câbles de ponts suspendus, n'a pas encore fait l'objet d'application opérationnelle sur des câbles de précontrainte extérieure ;
- remplacement de tout ou partie de la précontrainte. Le guide Sétra de février 1990 "Précontrainte extérieure" [4], donne des indications quant aux techniques de démontage. L'expérience des ruptures observées et des démontages réalisés montre que les dégâts sur la structure restent en général très limités (éclatements superficiels de béton).

Il est cependant à noter que pour les quelques ouvrages qui, à la date de rédaction de ce document, ont connu une rupture de câble de ce type, c'est dans tous les cas le remplacement de la totalité de la précontrainte qui a finalement été retenu.

Conclusions

L'état des ouvrages à précontrainte extérieure protégée par du coulis de ciment au contact des armatures peut être évalué et suivi de façon satisfaisante en respectant les recommandations faites ci-avant.

Même si les progrès techniques réalisés ces dernières années ont conduit à une amélioration considérable et si le risque de rupture reste très limité dans l'état actuel de nos connaissances, nous recommandons de procéder au diagnostic et aux réparations éventuellement nécessaires,

De plus, l'attention des gestionnaires est attirée sur le soin à apporter à la surveillance et à l'entretien de la totalité des câbles extérieurs, **y compris ceux présentant d'autres types de protection.**

Il est également nécessaire de traiter rapidement les autres défauts présents résultant d'une insuffisance d'entretien (interruption de gaines, torons apparents, endommagement de dispositifs antivibratoires, etc.) susceptibles de porter atteinte à la durabilité des câbles.



Exemples de défaut à traiter rapidement

Bibliographie

- [1] Coulis pour injection de conduits de précontrainte - Note d'information, Série Ouvrages d'art, n° 21 - Sétra/LCPC juillet 1996
- [2] Circulaire n° 99-54 du 20 août 1999 instituant un avis technique des coulis d'injection pour conduits de précontrainte, délivré par la commission interministérielle de la précontrainte
- [3] Circulaire n° 2001-16 du 28 février 2001 relative à la conception de la précontrainte extérieure au béton
- [4] Précontrainte extérieure – Guide technique – Sétra, février 1990 – référence : F9024

46 avenue
Aristide Briand
BP 100
92225 Bagneux Cedex
France
téléphone :
33 (0)1 46 11 31 31
télécopie :
33 (0)1 46 11 31 69
internet : [www.setra.
equipement.gouv.fr](http://www.setra.equipement.gouv.fr)

Rédacteurs

Thierry Kretz – Sétra / CTOA
téléphone : 33 (0)1 46 11 32 58 – télécopie : 33 (0)1 45 36 83 58
mél : thierry.kretz@equipement.gouv.fr

Jean-Michel Lacombe – Sétra / CTOA
téléphone : 33 (0)1 46 11 32 67 – télécopie : 33 (0)1 45 36 83 67
mél : jean-michel.lacombe@equipement.gouv.fr

Bruno Godart - LCPC
téléphone : 33 (0)40 43 53 32 – télécopie : 33 (0)1 40 43 65 20
mél : bruno.godart@lcpc.fr

Renseignements techniques

Centres d'études techniques de l'Équipement (CETE)

Document imprimé par téléchargement à partir des sites web du Sétra :
- Internet : <http://www.setra.equipement.gouv.fr>
- I² (réseau intranet du ministère de l'Équipement) : <http://intra.setra.i2>

Directeur de la publication : Jean-Claude Pauc – Directeur du Sétra
L'autorisation du Sétra est indispensable pour la reproduction même partielle de ce document.
Référence : 0760w – ISSN : 1250-8675

AVERTISSEMENT

La collection des notes d'information du Sétra est destinée à fournir une information rapide. La contre-partie de cette rapidité est le risque d'erreur et la non exhaustivité. Ce document ne peut engager la responsabilité ni de son rédacteur ni de l'administration.

Les sociétés citées le cas échéant dans cette série le sont à titre d'exemple d'application jugé nécessaire à la bonne compréhension du texte et à sa mise en pratique.

Le Sétra appartient
au Réseau Scientifique
et Technique
de l'Équipement

