

## Note de sensibilisation sur les ouvrages existants à précontrainte extérieure

Des ruptures de câbles de précontrainte extérieure protégés par une gaine PEHD ont été observées en France récemment sur quelques grands ouvrages précontraints. Le principal facteur identifié à l'origine de ces ruptures (intégrité des gaines PEHD) est susceptible d'être présent sur différents ouvrages précontraints par des câbles extérieurs au béton injectés au coulis de ciment ou à l'aide de produits souples ; cependant les conséquences sont plus graves dans le cas de câbles injectés au coulis de ciment.



Il avait déjà été constaté dans les années 2000 des ruptures de câbles de précontrainte extérieure protégés par un coulis de ciment. Ces ruptures étaient alors imputables à la qualité de l'injection ce qui avait motivé, en décembre 2007, la publication de la note d'information n° 29 du Sétra-LCPC relative aux « ouvrages existants à précontrainte extérieure protégée par du coulis de ciment au contact des armatures ».

La note n° 29 avait une portée générale et recommandait aux gestionnaires de porter une attention particulière à la protection des câbles de précontrainte extérieure (gaine et injection) ; malgré cette note, l'intégrité des gaines n'a cependant pas toujours été suffisamment perçue comme un facteur important de dégradation des câbles.

A la lumière d'incidents survenus récemment, des retours d'expérience disponibles et compte tenu des risques importants présents sur certains ouvrages à précontrainte extérieure, il était nécessaire de mettre à jour la note n° 29 et de porter à connaissance des gestionnaires les informations techniques utiles à la surveillance et à la gestion de ces ouvrages. La présente note se substitue donc à la note n° 29.

Les ouvrages potentiellement concernés par cette note sont tous les ouvrages à précontrainte extérieure et, avec une plus grande attention encore, tous les ouvrages dont la précontrainte extérieure est protégée par une gaine en PEHD et un coulis de ciment au contact des armatures. 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 abandonnée pour les câbles de précontrainte extérieure.

Les ouvrages dont les câbles sont directement exposés à une ambiance agressive (structures à treillis ou à âmes ajourées, câbles extérieurs à la structure, salage hivernal intense, milieu marin, etc.) sont particulièrement concernés.

## 1. 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 employée systématiquement pour les ouvrages en béton précontraint de grandes portées. De plus cette technique a été utilisée avec succès pour la réparation d'ouvrages précontraints existants de première ou de seconde génération.

Cependant, des ruptures de câbles de précontrainte extérieure ont été observées en France dans les années 2000 (torons protégés par du coulis de ciment directement au contact des armatures) puis récemment dans les années 2017-2018, soit une dizaine de cas recensés en tout. Bien que les facteurs ayant conduit à ces ruptures soient différents entre ces deux périodes, les conséquences sont identiques.



*Pont des années 50*



*Pont des années 50*

En premier lieu, il convient d'insister sur le fait que **la rupture brutale d'un câble de précontrainte injecté au coulis de ciment est susceptible de libérer brutalement une énergie mécanique considérable**. Ce phénomène doit être pris en compte dans le cadre de la surveillance des ouvrages possédant une précontrainte de ce type afin, en particulier, d'assurer la sécurité des personnels amenés à travailler à proximité de ces câbles.

Ensuite, la rupture de ce câble est susceptible d'endommager des pièces accessoires ou importantes de la structure (désordres en chaîne). Enfin, cette rupture diminue la force de précontrainte globale. La résistance structurale de la structure est donc affectée.



*Rupture d'un câble par corrosion*

**La rupture d'un câble injecté à l'aide d'un produit souple** est, *a contrario* et *a priori*, plus progressive et donc potentiellement moins dangereuse pour les personnels et la structure ; c'est d'ailleurs ce qui a conduit à généraliser (et à imposer) ce type de protection. Il n'en reste pas moins que ce type de précontrainte doit faire l'objet d'une surveillance régulière afin d'identifier les risques potentiels et de les prévenir à temps.

La présente note vise donc à informer les différents maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre sur les phénomènes en cause 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.

## 2. L'état des connaissances

### 2.1. 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 technologies sont à distinguer :

## Câbles injectés à l'aide d'un produit souple

Ce cas concerne les ouvrages les plus récents et quasiment tous les ouvrages construits depuis les années 2000, à savoir les ouvrages dont :

- les câbles sont protégés par de la graisse ou de la cire pétrolière, etc. ;
- les câbles sont galvanisés avec ou sans gaine générale ;
- les câbles comportent des torons protégés individuellement 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*

## Câbles dont les armatures sont au contact d'un coulis de ciment

Il peut s'agir d'ouvrages conçus initialement avec de la précontrainte extérieure ou d'ouvrages réparés par précontrainte extérieure. Il convient de se reporter au dossier d'ouvrage pour confirmer l'application de ce procédé.

Dans ce cas, lors de la rupture d'un toron et du fait de l'adhérence du coulis, le toron cassé se ré-ancre généralement 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.

Cependant, du fait de la disposition des fils rompus dans le câble et de leurs excentrement par rapport au centre de gravité (les fils rompus sont principalement extérieurs), le report de tension sur les autres torons ne peut pas se calculer par stricte proportionnalité en déduisant les pertes de sections constatées. Ainsi, la rupture du toron peut se produire bien avant que la limite de rupture soit théoriquement atteinte par application d'une règle de proportionnalité sur les sections perdues. En pratique, si l'on considère que les câbles sont tendus à environ 70 % de leur limite de rupture, ils pourraient admettre la rupture de 30 % des torons constitutifs. En pratique, il a pu être observé des ruptures de câbles avec moins de torons affectés.

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.



*Déformation de câbles 19T15 lors d'un démontage*

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 faible 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.

Si la rupture d'un, voire deux, câble(s) extérieur(s) n'est en général pas de nature à mettre en péril la résistance de la structure, il existe des cas pour lesquels la dégradation de pièces accessoires (par suite du fouettement) peut compromettre une stabilité locale.



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

## 2.2. Les causes des ruptures observées

Les cas de rupture affectant des câbles injectés à l'aide de produits souples sont très rares. Les cas de ruptures brutales de câbles injectés au coulis de ciment à la suite d'une attaque par corrosion des armatures sont les plus fréquents.

Il est à noter que depuis la publication de la circulaire n° 2001-16 du 28 février 2001 [3], la protection par coulis de ciment au contact direct des armatures est de fait abandonnée pour les câbles de précontrainte extérieure.

Cette corrosion a pour origine des armatures insuffisamment protégées ou attaquées pour deux raisons assez différentes :

1. **Une instabilité du coulis** lors de sa mise en œuvre, couplée éventuellement à une procédure d'injection inadaptée. En général, ces défauts d'injection 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. Ce phénomène a motivé la note n° 29 de décembre 2007 et concerne essentiellement les coulis très adjuvantés utilisés dans les années 1980-2000. On pourra se reporter à la note d'information Sétra-LCPC n° 21 de juillet 1996 [1] pour une explication détaillée du phénomène chimique en cause.
2. **La pénétration et la circulation d'eau** à l'intérieur même des gaines PEHD et aux interfaces entre le coulis et les câbles (ou entre les fils) soit du fait de défauts d'étanchéité des gaines PEHD et/ou des ancrages des câbles. Les défauts d'étanchéité des gaines peuvent provenir de fissuration de gaine, de défauts de raccords entre gaines, d'une fragilité du PEHD en raison d'une composition chimique inadaptée. L'eau peut avoir des origines diverses (défauts d'étanchéité de l'ouvrage lui-même, condensation, etc.) et les phénomènes sont considérablement aggravés en présence de chlorures (sels de déverglaçage, embruns, etc.) ; ces chlorures peuvent migrer plus ou moins facilement à travers le coulis en fonction de sa porosité. **Ce phénomène peut concerner tous les ouvrages** quelle que soit leur date de construction soit un nombre potentiel d'ouvrages très important.

La sensibilité des armatures à la corrosion fissurante sous tension constitue un facteur aggravant et d'ailleurs les deux phénomènes (corrosion de dissolution et corrosion fissurante) sont souvent identifiés conjointement.

### 2.3. Les conclusions des enquêtes et investigations réalisées

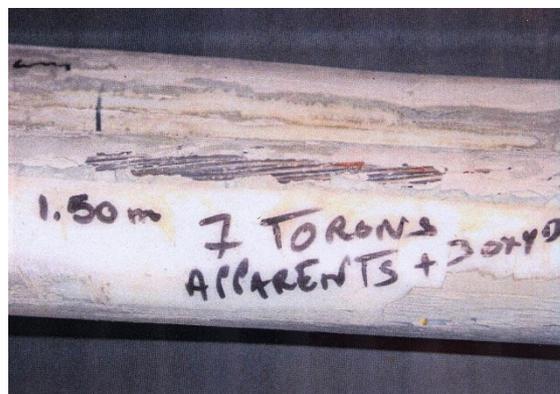
Afin d'avoir une meilleure appréciation des phénomènes et de leur étendue, un groupe de réflexion associant le Cerema, l'Ifsttar, des gestionnaires, des laboratoires et bureaux d'études privés a été créé afin de recenser les incidents et investigations déjà effectuées.

Les principales conclusions sont les suivantes :

- depuis les années 2000 et l'application de la circulaire n° 2001-16 du 28 février 2001, aucune nouvelle rupture de câble par défaut du coulis d'injection proprement dit (instabilité du coulis) n'a été constatée ; ce sujet reste néanmoins une préoccupation, même si de nombreux ouvrages concernés ont été traités ;
- les ruptures constatées ces deux dernières années (2017, 2018) sont liées à des défauts d'étanchéité des gaines PEHD aggravés par des conditions environnementales défavorables. Une fois la gaine PEHD protectrice devenue non étanche, les aciers de précontrainte sont exposés à la pénétration des agents agressifs, qui peut être extrêmement rapide, même en présence d'un coulis parfaitement bien injecté. Il y a alors un risque de corrosion, plus ou moins étendue (parfois largement au-delà de la zone de défectueuse de la gaine), puis de rupture à court ou moyen terme, de fils, de torons et même du câble, même en présence d'un défaut extérieur de la gaine très minime ;
- les ouvrages dont la précontrainte extérieure d'origine ou de renforcement est directement exposée à l'air libre, et à fortiori aux embruns, aux sels de déverglaçage sont les plus sensibles. Néanmoins, des cas de ruptures sont possibles à l'intérieur même des caissons où la condensation peut être importante, notamment s'il existe un défaut d'injection (généralement situé en point haut) ou si un produit de colmatage (mousse de polyuréthane...) a été injectée à tort dans le conduit pour l'obturer ou pour combler une fuite lors de l'injection du coulis ;
- l'intégrité des gaines de précontrainte et de leurs manchons de raccordement est compromise par la très grande différence de dilatation thermique entre les conduits et l'ouvrage : le coefficient de dilatation thermique est 18 fois plus élevé pour le PEHD que pour le câble. Cet effet est d'autant plus sensible que la longueur dilatable du câble est importante ;
- la fragilité de certaines gaines en PEHD peut exister en raison de la composition chimique du matériau, si par exemple celui-ci a une quantité de noir de carbone inférieure à celle qui est recommandée par la fib (International Federation of Structural Concrete), s'il comporte une quantité insuffisante d'anti-oxydants ou si son taux de cristallinité est trop important.



*Défaut de manchonnage de gaines  
(produit d'injection souple)*



*Défaut d'intégrité des gaines  
(coulis de ciment)*



*Corrosion avancée du câble avec rupture de fils*



*Endommagement de gaine au droit d'un déviateur*

### 3. Les investigations à réaliser

Deux niveaux d'investigations peuvent être réalisés pour évaluer l'état de la précontrainte d'un ouvrage :

#### 3.1. Premier niveau

Pour tous les ouvrages évoqués ci-avant, il est recommandé de réaliser le bilan complet de l'état de la protection des câbles extérieurs au béton. Il s'agit d'une opération relativement lourde qui, pour les grands ouvrages, peut sortir du cadre classique de l'inspection détaillée, par son ampleur et par les moyens d'accès particuliers qu'elle peut mobiliser. Il s'agit alors d'une "inspection détaillée spécifique" au sens de l'ITSEOA (Fascicule 0 §2.4, page 18).

Ce bilan complet consiste en :

- **un recueil préalable des informations disponibles** sur les procédures d'injection qui ont été appliquées lors de la construction, les procédés de précontrainte et le type de câbles, la nature des conduits (caractéristiques du matériau, dimensions des tubes, type de rabotages...) et les produits de protection,
  - coulis de ciment : nature et provenance du ciment, nature du (ou des) adjuvant(s) éventuellement employé(s), méthode de contrôle de l'étanchéité des conduits utilisée, méthode d'injection utilisée, période d'injection (froide, chaude), ordre et dates d'injection des conduits, incidents d'injection éventuellement notés, témoignages des personnes ayant contrôlé ou participé à l'injection, etc.,
  - produits souples : nature des produits utilisés,
  - environnement des câbles de précontrainte extérieure (plus ou moins agressive selon la géographie, les conditions d'exploitation et les dispositions constructives) : exposition particulière, condensation, ultra-violet, etc. ;
- **une inspection détaillée visuelle des conduits de précontrainte extérieure** (le plus souvent en PEHD) en section courante qui comprend l'examen des points suivants :
  - report des tracés de câbles sur les fonds de plan de l'ouvrage et des positions de manchons de raccordement le cas échéant,
  - signes de défauts d'étanchéité de la gaine au droit des raccordements entre tronçons de gaines, qu'elles soient manchonnées (état des témoins de soudage, traces de fuite de produit d'injection) ou soudées, en zone courante ou en des points singuliers (extrémité de déviateur, purge ou évent d'injection, chocs, incidents de chantier...),
  - présence de fissures longitudinales ou transversales, de déformation (ovalisation, festonnage en forme d'hélice pouvant faire craindre une rupture de toron), etc., en section courante et au droit des contacts avec les déviateurs,
  - présence de coulure de rouille,
  - recherche, tout au long du conduit, de 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 ou d'entrée d'eau),
  - une 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 événements d'injection qui doivent être situés en partie haute du capot,
- qualité du remplissage des événements d'injection,
- traces de fuite de coulis, de cire ou de graisse à l'extérieur du capot,
- etc. ;
- **intégrité des accessoires** tels que « dispositifs anti-vibratoires » dont le mauvais état est susceptible de porter atteinte à l'intégrité des câbles et de leur protection.

Bien évidemment, un ouvrage peut comporter des milliers de raccords, manchons ou points singuliers sensibles. Il serait très difficile de prétendre à une vue exhaustive d'autant que certains points singuliers peuvent être d'accès très difficiles. Cependant, il a été observé que les défauts se répètent facilement sur un ouvrage donné. Aussi, une évaluation « statistique » peut suffire dans un premier temps ; en tout état de cause, ce type d'inspection demande un travail de préparation et des moyens d'accès spécifiques (échafaudage, nacelles) peuvent s'avérer nécessaires. La découverte de désordres justifie alors d'étendre l'inspection de la manière la plus exhaustive possible. 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.

Ce bilan permet alors d'avoir une vision globale de la qualité de protection des câbles et de l'état de la précontrainte.

#### **Remarque à propos du sondage au marteau des gaines de précontrainte protégée par un coulis :**

- cette investigation, préconisée par la note n° 29, a dû être effectuée lors de la première inspection des ouvrages (au plus à 10 ans), du moins pour les ouvrages du Réseau Routier National. Cette investigation consistait alors à sonder les conduits sur toute leur longueur (hors traversée des éléments en béton) de façon à détecter s'ils « sonnent le creux ». 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. Par ailleurs, l'attention est attirée sur le fait que certains PEHD de fabrication ancienne peuvent durcir et paraître « sonner le creux » ; c'est pourquoi, outre le fait que ce relevé ne donne pas d'indication fiable sur la corrosion des câbles, il n'est probablement plus suffisant au-delà des dix premières années de vie de l'ouvrage. Cette technique, malgré ses limites évidentes, est très simple, et peut continuer à être envisagée en première auscultation.

### **3.2. Second niveau**

S'il y a le moindre doute sur l'état de la précontrainte à l'issue de ce bilan (présence de gaines dégradées ou de manchons défectueux, de traces d'humidité ou de corrosion, etc.) des investigations plus poussées doivent être menées. Ces investigations sont à conduire en s'appuyant sur plusieurs des techniques rappelées ci-après :

- démontage de capots, si l'opération peut être faite rapidement et sans exercer d'effort important sur les câbles et vérification de l'état des ancrages et de l'absence de pénétration d'eau ;
- observation endoscopique dans les gaines, notamment aux points hauts, près des entretoises sur pile, si cela est possible ;
- détection des vides dans les gaines sans avoir à les ouvrir à l'aide, par exemple, du capteur capacitif mis au point par le Cerema et l'Ifsttar ; cette manipulation est alors associée à un examen visuel, préalable et exhaustif, des gaines ;
- gammagraphies pour détecter les vides et éventuellement des ruptures de fils ou de torons ;
- détection de la corrosion des câbles à l'aide d'une bobine électromagnétique comportant des aimants permanents (technique en cours de validation)
- prélèvements de matériau PEHD (sans perte d'étanchéité) pour une caractérisation physico-chimique en laboratoire ;
- 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 ;

- tout autre moyen permettant de donner des informations sur le contenu des gaines (thermographie infrarouge, etc.) ;
- en cas de découverte de fils déjà rompus (et uniquement sur ces fils), un prélèvement pour être effectué afin de déterminer le processus de rupture ;

D'autres techniques sont en cours de développement :

- au niveau des ancrages (après démontage des capots) : il est possible d'utiliser une technique d'auscultation par ondes ultrasonores guidées après un polissage soigné des abouts de torons ; cette technique qui permet de détecter des ruptures franches de fils ou de torons de précontrainte sur une longueur d'environ 2 m à partir de l'ancrage fonctionne sur des haubans injectés à la cire dont les torons sont bien séparés ; son application à des câbles injectés au coulis de ciment dont les torons sont en contact reste cependant à confirmer.
- auscultation magnétique des câbles. La meilleure technique semble être celle qui utilise des aimants de forte puissance (MRT) telle que mise en œuvre pour les câbles de téléphériques. Son application aux câbles extérieurs est prometteuse mais nécessite le développement de matériels spécifiques.

On pourra se reporter au « cahier interactif relatif à l'auscultation des ouvrages d'art » (Ifsttar, Cerema) pour le détail des procédures à appliquer pour ces investigations de second niveau.

## 4. 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 ont été données dans les bulletins Ouvrages d'Art n°57 et 58 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. C'est ainsi qu'une « mise en sécurisation des câbles » pour limiter leur fouettement en cas de rupture peut être appliquée (mise en œuvre de structures de protection, de sangles, etc.).

## 5. 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 (Cerema, Ifsttar).

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 ;
- 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 ;
- injection d'inhibiteurs de corrosion sous ultrasons de forte puissance (technique validée sur VIPP, mais encore expérimentale pour les câbles de précontrainte extérieure) ;
- en présence de corrosion sans rupture de fils, des réparations de la protection sont envisageables. Le fascicule 32 de l'ITSEOA (2018) [5] donne des indications sur les procédures à appliquer ;
- en cas de rupture de fils, suivant le nombre de torons atteints, le remplacement du câble peut être envisagé. Une telle opération ne peut être engagée qu'après un bilan exhaustif et une étude du phasage du remplacement. 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 assez limités (éclatements superficiels de béton). Cependant, le remplacement de la totalité de la précontrainte est également à envisager si les causes identifiées sont généralisées. C'est d'ailleurs ce qui a été appliqué sur les premières séries d'ouvrages touchés (années 2000).

## 6. Conclusions

L'état de la protection des câbles des ouvrages à précontrainte extérieure 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 de la protection des câbles et si le risque de rupture brutale reste assez limité (en particulier depuis la mise en œuvre systématique d'injection de produits souples pour la protection des câbles de précontrainte extérieure), le parc d'ouvrages comportant des câbles de précontrainte extérieure injectée au coulis de ciment reste relativement important. Il est recommandé de veiller avec attention à la qualité de la protection de la précontrainte extérieure au cours de la vie de l'ouvrage.

L'inspection détaillée spécifique telle que décrite au paragraphe « investigation de niveau 1 », si elle n'a pas déjà été faite, est à conduire à l'occasion de la prochaine inspection détaillée périodique des ouvrages possédant des câbles de précontrainte extérieure, puis doit être envisagée avec une périodicité d'environ 20 ans. Les ouvrages dont les câbles extérieurs sont exposés aux embruns ou à des ambiances agressives sont à examiner en priorité, sans attendre la prochaine inspection détaillée réalisée de manière périodique.

Les inspections détaillées périodiques doivent être conduites avec le souci d'examiner un échantillonnage significatif de raccords de gaine (environ 10 %). Dans tous les cas, même en l'absence de désordres constatés sur les armatures de précontrainte, il est impératif de réparer tout défaut de la gaine pouvant amoindrir la durabilité d'un câble.

Enfin, lors de la réalisation d'ouvrages neufs ou le renforcement d'ouvrages existants par ajout de précontrainte additionnelle, il est recommandé de prévoir des essais de réception contradictoire des gaines PEHD (et des éventuels manchons de raccordement) et d'être particulièrement vigilant sur la qualité de la mise en œuvre des gaines et accessoires d'injection contribuant à l'étanchéité du système (rebouchage des purges, événements et pipes d'injection, capot d'ancrage, etc.).

## 7. 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
  - [5] Fascicule 32 de l'ITSEOA - Guide d'application de l'instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art Fascicule 32 – Ponts en béton précontraint
  - [6] « Note de sensibilisation sur les ouvrages existants à précontrainte extérieure protégée par du coulis de ciment au contact des armatures » - Note d'information, Série ouvrages d'art, n° 29 - Sétra/LCPC décembre 2007
- Nota* : le site internet les « cahiers interactifs de l'IFSTTAR » présente de nombreuses méthodes d'auscultation :  
<http://www.ifsttar.fr/collections/CahiersInteractifs/CI11/methodes-auscultation-re-marques.html>

## Résumé

La présente note vise à informer les différents maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre 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.

Collection  
**Connaissances**  
ISSN 2417-9701

*Ce document ne peut engager la responsabilité ni de son rédacteur ni du Cerema.*

*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.*

© 2018 - Cerema  
*La reproduction totale ou partielle du document doit être soumise à l'accord préalable du Cerema.*

### Redacteurs

Laurent LABOURIE (Cerema) - laurent.labourie@cerema.fr  
Didier GERMAIN (Cerema) - didier.germain@cerema.fr  
Jean-Michel LACOMBE (Cerema) - jean-michel.lacombe@cerema.fr  
Pierre CORFDIR (Cerema) - pierre.corfdir@cerema.fr  
Bruno GODART (IFSTTAR) - bruno.godart@ifsttar.fr

**Renseignements techniques** : Cerema

### **La collection « Connaissances » du Cerema**

Cette collection présente l'état des connaissances à un moment donné et délivre de l'information sur un sujet, sans pour autant prétendre à l'exhaustivité. Elle offre une mise à jour des savoirs et pratiques professionnelles incluant de nouvelles approches techniques ou méthodologiques. Elle s'adresse à des professionnels souhaitant maintenir et approfondir leurs connaissances sur des domaines techniques en évolution constante. Les éléments présentés peuvent être considérés comme des préconisations, sans avoir le statut de références validées.

Aménagement et cohésion des territoires - Ville et stratégies urbaines - Transition énergétique et climat - Environnement et ressources naturelles - Prévention des risques - Bien-être et réduction des nuisances - Mobilité et transport - Infrastructures de transport - Habitat et bâtiment