

IMGC

Pathologies de la précontrainte extérieure
Modalités de surveillance et d'auscultation

Laurent Labourie (Cerema)

Journée Technique IMGC
Vendredi 27 septembre 2018
FNTP – 3 Rue de Berri, 75 008 PARIS

AFGC
Association Française de Génie Civil

Sommaire

- Pathologies des ouvrages précontraints (rappels)
- Pathologies spécifiques de la précontrainte extérieure
- Modalités de gestion : surveillance, auscultations

Pathologies des ouvrages précontraints

Rappels pour les ouvrages concernés

- De quels ouvrages parle t'on ?
  - Grands ouvrages construits ou réparés en précontrainte extérieure







➔ un très large panel de grands ouvrages construits ou réparés entre les années 1970 à 2000+ par précontrainte extérieure avec gaine PEHD

Pathologies des ouvrages précontraints

Rappels pour les ouvrages concernés

- Quelles pathologies pour les ouvrages BP (cf. fascicule 32 ITSEOA)
  - Les pathologies « structurales » sont plutôt derrière nous, pour mémoire :
    - Insuffisances des réglementations avant BPEL 1983
    - Méconnaissance de la rhéologie des bétons (fluage)
    - Absence ou insuffisance de prise en compte du gradient thermique
    - Calculs erronés des pertes de précontrainte
    - Autres pathologies spécifiques de types d'ouvrages : VIPP, ponts à nervures, ponts à voussoirs préfabriqués, utilisations de coupleurs, phasages complexes…

Ces pathologies structurales ne devraient plus se produire pour les ouvrages modernes et ont été traités – **souvent par précontrainte extérieure** - pour les ouvrages anciens.

Les pathologies actuelles sont essentiellement des pathologies des matériaux : vieillissement et défauts initiaux (vieillissement prématuré).

Pathologies des ouvrages précontraints

Pathologies des matériaux (rappels)

- Quels matériaux
  - Pour mémoire : les **bétons** et les **armatures passives** mais non spécifiques du béton précontraint (cf. Fascicule 31 ITSEOA),
  - Dégradation des armatures actives **intérieures** ou **extérieu**



- Dégradation des armatures actives intérieures
  - Deux modes de corrosion : dissolution + sous tension.
  - Peu visible (ou non recherchée ?) mais… à suivre car évaluation probablement insuffisante à ce jour
  - Conséquences souvent « locales » du fait du ré-ancrage des câbles injectés au coulis de ciment sans risque de rupture « explosive »

⚠ Attention cependant :

  - aux ancrages sensibles aux pénétrations
  - aux accidents : chocs et incendies qui sont les causes les plus fréquentes de dégradation (objective) de la précontrainte intérieure
  - Aux ouvrages des années 50/60 limites aux ELU et sensible à la perte d'un câble.



La qualité de l'étanchéité de l'ouvrage est essentielle à la pérennité de la précontrainte intérieure.

Pathologies de la précontrainte extérieure avec protection par coulis de ciment

Problématique

- Corrosion des armatures actives extérieures
  - De plus en plus souvent mis en évidence
  - Mais ne concerne, à ce jour, que les câbles avec gaines injectées au coulis de ciment.
  - Les câbles injectés avec des produits souples paraissent mieux préservés
  - Les causes ne sont pas toutes spécifiques mais les conséquences sont plus graves en précontrainte extérieure qu'en précontrainte intérieure







- Comment doit être assurée la protection du câble ?
  - Par un produit d'injection au contact du câble (passivant pour le ciment)
  - Par une gaine pérenne et parfaitement étanche aux agressions extérieures



La qualité de l'étanchéité de la gaine est essentielle à la pérennité de la précontrainte extérieure.

Pathologies de la précontrainte extérieure avec protection par coulis de ciment

Problématique

- (1) Le coulis n'est pas toujours passivant…
  - Certains coulis (avec super-plastifiant) ont pu favoriser la formation de produits blanchâtres et un ressuage important
  - Ces phénomènes sont amplifiés par une mauvaise circulation du ciment (si ségrégation et ressuage)
  - Pile électrochimique aux interfaces acier/pâte/eau. L'eau qui surnage présente un PH très élevé (> 13,8),
  - Ce milieu hyper basique se révèle « corrosif » pour les aciers et non passivant

- (2) L'injection peut être imparfaite
  - Fuites de coulis aux **raccords** des gaines et **près des ancrages**
  - Mauvaise pénétration du coulis, en particulier dans les zones de concentration des torons
  - Il en résulte des zones non protégées : poches d'air et aération différentielle, condensation… puis corrosion
  - Les zones mal injectées sont éventuellement favorables à des phénomènes de ségrégation et ressuage (=>1)

Pathologies de la précontrainte extérieure avec protection par coulis de ciment

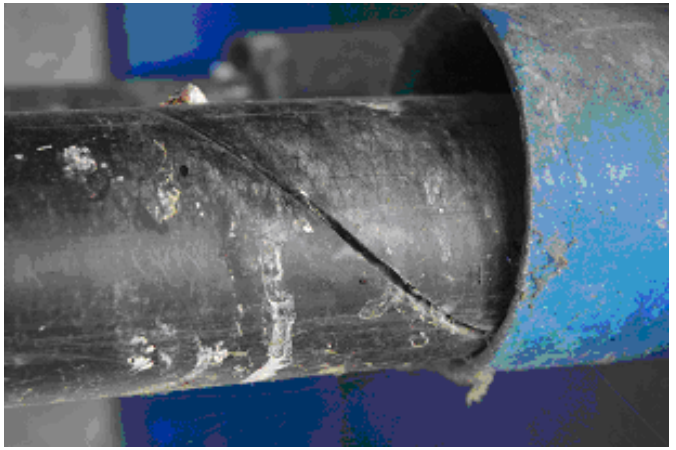
Problématique

- (3) L'eau circule facilement entre les torons
  - (car le coulis n'y a pas circulé facilement)
  - L'injection est alors inopérante

- (4) Les conduits peuvent présenter des défauts
  - Au droit des raccords entre éléments :
    - du fait de mises en œuvre défectueuses des soudures au miroir ou des raccords thermo-soudables
    - et de la dilatation différentielle du PEHD (18X supérieure à celle des câbles)
  - Près des ancrages (difficultés d'accès)
  - Du fait de « cracks » à des points singuliers (déviateurs)
  - Du fait de blessures à la mise en œuvre (lors de l'enfilage
  - Du fait de montages inadaptés
  - De dégradation si composition chimique inadaptée (cf. exposés)

Le coulis de ciment n'assure finalement qu'une protection très limitée du câble

Gaines non étanches + coulis non passivant ou non recouvrant => corrosion





Pathologies de la précontrainte extérieure avec protection par coulis de ciment

Conséquences de la corrosion des armatures (actives)

- La corrosion est difficile à localiser et à quantifier
  - Les points de corrosion maximale peuvent être décalés par rapport aux singularités (du fait de la circulation de l'eau), par exemple en points bas
  - La corrosion n'est pas toujours « proportionnelle » aux déficits de coulis de ciment
  - Les méthodes de détection indirectes (non destructives) sont encore rares (cf. exposés) et complexes à mettre en œuvre



Défaut d'injection flagrant mais peu de corrosion



Défaut gaine minime (injection OK) mais corrosion flagrante

Les conditions environnementales jouent un rôle important : brouillard salin, condensation, pénétration d'eau suivant le tracé des conduits…

Pathologies de la précontrainte extérieure avec protection par coulis de ciment

Conséquences de la corrosion des armatures (actives)

- Les conséquences mécaniques sont graves
  - (1) La présence de corrosion réduit la résistance à rupture Fprg (-25% ?)
  - (2) La rupture d'un fil crée une dissymétrie du toron et des sur-contraintes
  - (1) + (2) augmentent considérablement le risque de rupture d'un toron sans lien avec la perte de section en %
  - (3) Du fait de l'adhérence du coulis le toron rompu se ré-ancre au sein du faisceau de torons, **l'effort du toron rompu se reporte <u>localement</u> sur les autres torons**
  - (4) Mais les autres torons sont potentiellement affectés de corrosion (1)

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.

Du fait du ré-ancrage, la rupture est violente et libère brutalement la totalité de l'énergie élastique emmagasinée au cours de la mise en tension du câble.

Pathologies de la précontrainte extérieure avec protection par coulis de ciment

Conséquences de la corrosion des armatures (actives)





La rupture brutale par fouettage est susceptible d'entraîner des désordres structuraux ou collatéraux et aussi des accidents corporels très graves

En cas de risque de rupture imminent, les conditions d'accès à l'ouvrage doivent être

En cas de rupture avérée (ou à risque), les conditions de fonctionnement de l'ouvrage doivent être évaluées.

Pathologies de la précontrainte extérieure avec protection par coulis de ciment

Comment aborder le problème et évaluer les risques ?

- Analyse des archives et du « dossier d'ouvrage »
  - Identifier les ouvrages à précontrainte extérieure injectée au coulis de ciment avec gaine PEHD
  - Rechercher les informations sur les matériaux et procédés
    - Types des conduits PEHD et raccords
    - Particularités de mise en oeuvre
    - Types et systèmes de précontrainte, coulis et adjuvants utilisés
  - Environnement des câbles, agressions
  - Dates de construction
  - Inspections antérieures et défauts déjà repérés

Il n'existe pas de statistique suffisante à ce jour mais on peut estimer que les risques sont significatifs surtout 20/25 ans après la construction.

Le Cerema a lancé en 2018/2019 une enquête auprès des maîtres d'ouvrages (tous réseaux) afin de répertorier et mieux connaître les ouvrages les plus « à risques ».

Pathologies de la précontrainte extérieure avec protection par coulis de ciment

Recommandations de premier niveau (suivant note n°3 Cerema Ifsttar)

- Inspection détaillée visuelle des conduits de précontrainte extérieure (avec reports sur plans)
  - Signes de défauts d'étanchéité de la gaine
  - Etats des raccords
    - Etat des manchons de raccordement, anomalies
    - Etat des témoins de soudage
    - Présence de fuites ou débords de coulis lors de la mise en tension
  - Présence de fissures longitudinales ou transversales des gaines, déformations, ovalisations, incrustation des câbles dans les gaines
  - Etat des gaines aux zones de déviation, aux points de contacts avec les dispositifs anti-vibratoires, etc…
  - Traces et coulures de rouilles en section courante et aux ancrages
  - Repérage et état des évents d'injection

Limitations inhérentes à l'inspection visuelle

- Chaque ouvrage est unique (tablier et système). La typologie des défauts constatés est inconstante
- L'inspection peut concerner de **dizaines de kilomètres de câbles et des milliers de raccords**
- De nombreux points singuliers restent invisibles (dans les déviateurs en particulier)

L'analyse préalable du dossier d'ouvrage (particularités de conception, procédures) et un premier tri suivant la typologie de l'ouvrage, son environnement, est indispensable pour réaliser un échantillonnage représentatif.

Pathologies de la précontrainte extérieure avec protection par coulis de ciment

Recommandations de premier niveau (suivant note n°3 Cerema Ifsttar de 2018)

- Sondages au marteau
  - Solution préconisée en 2007 (note Setra LCPC n°29) à la suite des premières ruptures de câbles (par défauts de coulis adjuvantés)
  - Reste d'actualité mais savoir que l'efficacité est réduite sur des gaines anciennes qui durcissent
  - Un vide ne signifie pas nécessairement présence de corrosion
  - De nombreuses zones ne peuvent être atteintes (parties hautes…)



Raccords « de fortune » suspects



Déformation anormale



Formation d'un bourrelet





Indices (pas des défauts en soi) : Traces de polyuréthane (pourquoi ?) Traces de coulis (pourquoi ?)







Défauts : Contact et fissure Défaut d'injection derrière un ancrage Trou évent non rebouché

Pathologies de la précontrainte extérieure avec protection par coulis de ciment

Recommandations de second niveau

- Démontage de capots
  - Si l'opération est aisée, vérifier l'absence d'eau
- Ouvertures des gaines
  - Solution « destructive » mais inévitable même à titre de sondage (taille ~ 10X 15cm)
  - **Prévoir et concevoir la réparation étanche qui va avec (avant)!**
  - Peut s'appliquer en section courante mais le plus souvent au droit des raccords et manchons
  - Sondage endoscopique si possible
  - + Prélèvement de PEHD pour analyse en laboratoire



Ouverture et réparation >



Pathologies de la précontrainte extérieure avec protection par coulis de ciment

Recommandations de second niveau

- Analyse à prévoir sur les câbles après ouverture
  - Nombre de fils rompus par toron
  - Nombre de fils corrodés par torons
  - Nombre de torons touchés
  - **Pas de prélèvement de fils sur des torons intègres**
  - Mode de rupture (prélèvement uniquement sur fils déjà rompus)

- Analyse à prévoir sur les gaines (laboratoire qualifié)
  - Température de fusion, taux de cristallinité
  - Mesure du taux de noir de carbone
  - Essais de traction mécanique dans le sens longitudinal
  - Caractérisation physico-chimique

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.

Pathologies de la précontrainte extérieure avec protection par coulis de ciment

Recommandations de second niveau

- Gammagraphie
  - Pour mémoire : convient bien à des sections singulières à expertiser, permet de repérer des fils rompus
- Investigations à plus grand rendement
  - Détection des vides par capteur capacitif (localisation des points de faiblesse)
  - Thermographie IR (assez peu utilisé).
  - Attention : Investigations visuelles préalables obligatoires car impose le sectionnement des témoins de soudure. Difficultés d'accès à considérer. Pas de « garantie » sur l'état de corrosion.



Capteur capacitif



Thermographie IR

Pathologies de la précontrainte extérieure avec protection par coulis de ciment

Recommandations de second niveau

- Investigations en développement (faisant l'objet d'exposé ce jour)
  - Auscultation des **zones d'ancrages** par réflectométrie d'ondes ultrasonores
  - Auscultation des **câbles en section courante par méthode magnétique**
  - Solutions très prometteuses mais considérer :
    - La disponibilité des équipes et matériels
    - Les conditions d'accès (avant ou après réparation partielle)
    - L'interprétation experte requise





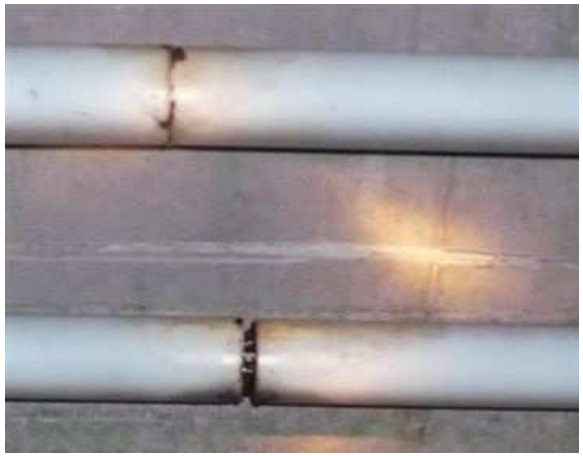
Pathologies de la précontrainte extérieure avec protection par produit souple

Occurrence et traitement

- Pathologies plus rares et (potentiellement) moins dangereuses
  - Technologie plus récente, ~imposée depuis 2001/2003 (*)
  - Agrément des produits CIP puis ASQPE systématique en principe pour les ouvrages les plus récents
  - En pratique, aucun cas de rupture de câble répertorié
  - Rupture parfois visible avant rupture complète par festonnage de gaine (point zéro ?)
  - Même si rupture, du fait de l'absence de ré-ancrage, les câbles perdent leur force progressivement
  - Les risques collatéraux sont moindres a priori (mais attention tout de même)

(*) Circulaire n° 2001-16 du 28 février 2001 relative à la conception de la précontrainte extérieure au béton







Malgré des désordres sur les gaines, les câbles restent protégés par le produit souple (cire)

Pathologies de la précontrainte extérieure avec protection par produit souple

Occurrence et traitement

- Cependant des gaines défectueuses peuvent exister
  - Les gaines sont de même nature et donc sujettes aux mêmes désordres éventuels : raccords rompus par dilatation différentielle avec les câbles (dilatation 18X supérieure au béton/armatures)
  - Les cas observés de désordres des gaines ne conduisent pas à constater de la corrosion des câbles qui restent enrobés (« collés ») par le produit souple (cire ou graisse)
  - Ces désordres sont assez facilement réparables (**et doivent être réparés**)
  - **Les ouvrages doivent donc toujours être surveillés vis-à-vis des défectuosités des conduits même si protection par produit souple**





Pathologies de la précontrainte extérieure

Gestion des ouvrages



- Programmation des inspections et contrôles
  - Visites d'évaluation, inspections détaillées
    - Suivant rythme normal recommandé
  - Investigations exhaustives de niveau 1
    - A vingt ans au maximum (10 ans si possible)
    - Sans délai pour les ouvrages exposés

- Quelle mesures de gestion cas de découverte de pathologie ?
  - La surveillance renforcée (orientée câbles) est un minimum. **Des consignes de sécurité pour le personnel doivent être envisagées avant d'aller plus loin**
  - Risque de rupture avéré si 30% des torons touchés par des ruptures de fils mais incertain en dessous suivant le nombre de torons touchés par la corrosion (la perte en % de section n'est PAS un indicateur fiable). Le seuil de sécurité est à discuter suivant le système (par exemple seuil maxi de 2 torons touchés par des ruptures de fils sur 19… ?).
  - Une **évaluation structurale** doit être lancée en cas de perte de câble ou de risque de perte y compris avec **justification des déviateurs** au réancrage des câbles lors de la rupture
  - Protéger l'accès : la « surveillance instrumentée » par écoute acoustique peut être un accompagnement de ces mesures
  - La haute-surveillance vis-à-vis de l'exploitation est à envisager mais est rarement requise (du fait de la « redondance ») ; des restrictions d'exploitation peuvent être envisagées

Pathologies de la précontrainte extérieure

Gestion des ouvrages

- Mesures opérationnelles provisoires (Protection contre le fouettage des câbles)
  - Absorbeurs d'énergie à titre conservatoire
  - « Sanglage » des câbles
  - Guidage des câbles par portiques métalliques
  - Tunnels d'accès

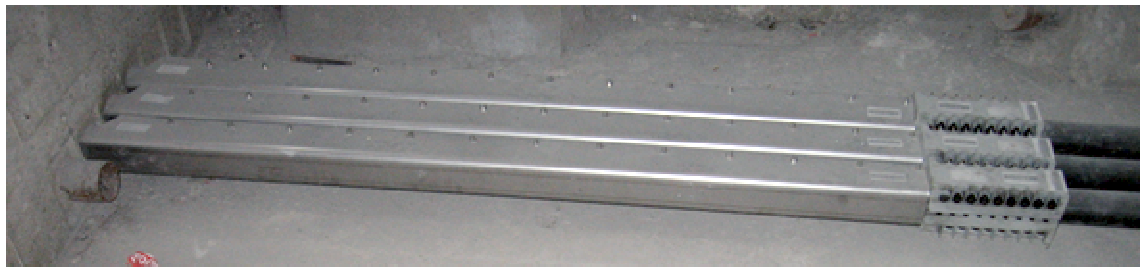
ns tous les cas



Guidage par sangles



Guidage par portiques



Absorbeurs d'énergie (préventif ou pour le démontage)

Pathologies de la précontrainte extérieure

Réparation des ouvrages

- Sans remplacements de câbles
  - Seuils de corrosion acceptables (avec ou sans ruptures de fils et de torons) **à évaluer au cas par cas**
  - Réparation locales à concevoir **au cas par cas** (cf. exposés) :
    - Il n'existe pas de procédé standard (peuvent être différents sur le même ouvrage !)
    - **Capots étanches** avec ou sans cerclages métalliques au droit des défauts, prévoir convenance
    - Considérer les conditions d'accès pour les soudures sur PEHD
    - Injection de cire pétrolière préférable (meilleure pénétration)
  - Traiter aussi les pénétrations d'eau, l'ambiance…



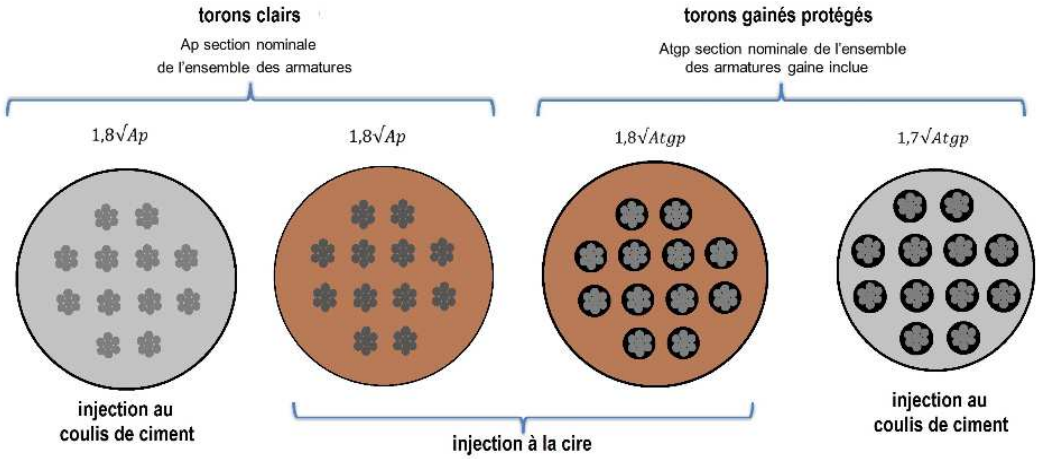


Dans tous les cas, il s'agit de projets spécifiques qui nécessitent convenances et recalculs

Pathologies de la précontrainte extérieure

Réparation des ouvrages

- Avec remplacements de câbles
  - Dé-tension « brutale » possible, mais
    - Les déviateurs subissent un choc de dissipation d'énergie = 1X l'effort de précontrainte, autres conséquences difficiles à évaluer sur les structures
    - Avec pose d'absorbeurs d'énergie (St Cloud)
  - Dé-tension « contrôlée » avec contrôle « actif » de la tension au droit de la coupure (Ré, Echinghen…), cf. exposé.
  - Avantages des Torons Gaines Graissés (TGG) protégés dans une gaine collective
    - La gaine collective est injectée au coulis de ciment avant mise en tension : le coulis réduit les points durs et joue le rôle d'écarteur entre TGG
    - Les TGG sont remplaçables et bien protégés mais encombrement supérieur







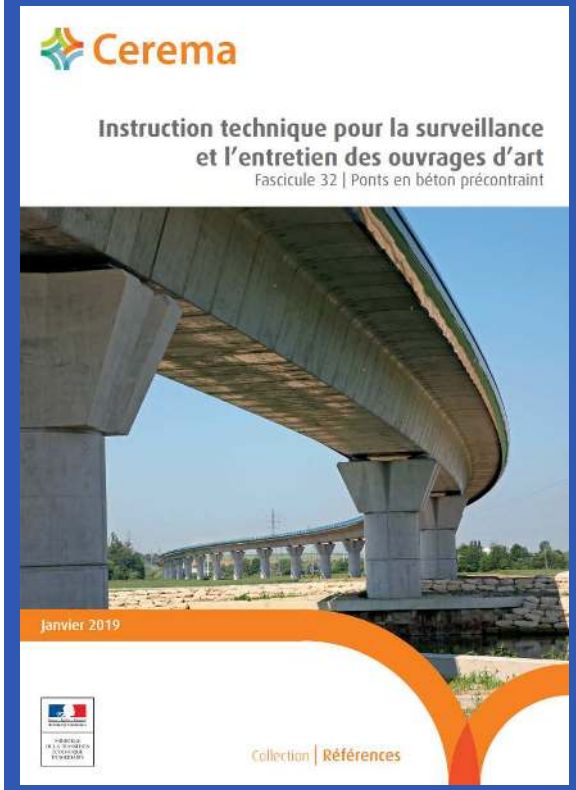
Projet spécifiques qui nécessitent des convenances, recalculs et inventivité !

Pathologies de la précontrainte extérieure

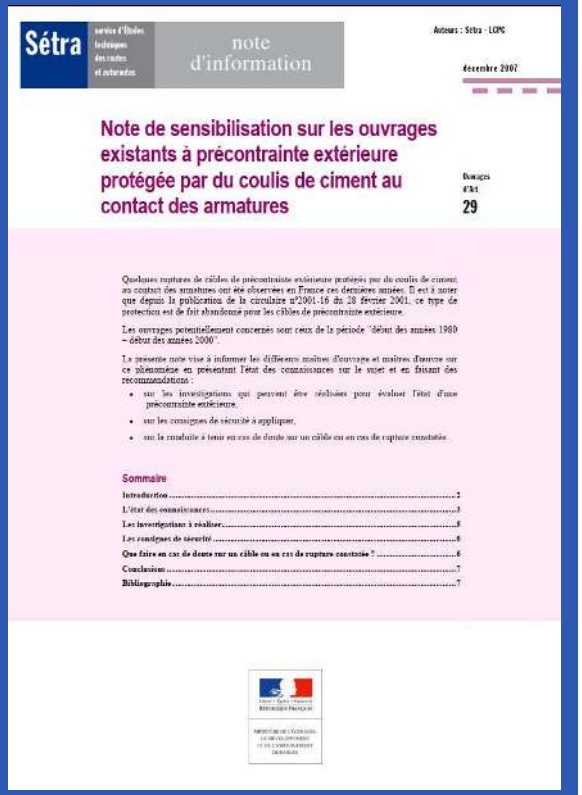
Conclusions

- Les ouvrages à précontrainte extérieure sont robustes
  - Doivent être surveillés comme toutes les autres infrastructures
  - Les pathologies structurales des ouvrages BP ont été traitées
  - Les **pathologies de vieillissement et de mises en œuvre dominantes**
  - Relèvent partiellement des problématiques (surveillance) des ouvrages « à câbles »
- La précontrainte extérieure protégée au **coulis de ciment**
  - N'est plus utilisée depuis 2001/2003 mais très développée depuis ~1985
  - Est susceptible de désordres à +/-20 ans inhérents à une protection insuffisante des conduits PEHD (gaines et raccords) et du coulis de ciment
  - En cas de désordres, expose l'ouvrage, le personnel à des ruptures brutales dangereuses
  - L'inspection exhaustive est un « sujet » non totalement résolu : des développements sont nécessaires
- La précontrainte extérieure protégée avec des **produits souples**
  - Est imposée depuis le début des années 2000 et donne satisfaction
  - Mais nécessite toujours une surveillance attentive du fait de l'importance de la précontrainte pour la structure
  - Les réparations ponctuelles sont assez aisées à réaliser

Le futur nous réserve certainement des solutions tant pour l'inspection que pour les réparations… Bien suivre les exposés qui suivent !…







Bibliographie : Fascicule 32 (ITSEOA- 2018), note 03 Cerema-Ifsttar (2018), note 29 Setra-LCPC (2007)

Merci de votre attention

Laurent Labourie
Cerema