E2-8

DIAGNOSTIC DE LA PRÉCONTRAINTE INTÉRIEURE

CONTEXTE

La précontrainte intérieure est, en France, la technique de précontrainte la plus ancienne. Elle permet de réaliser des ouvrages robustes et a été appliquée à la réalisation d'un grand nombre d'ouvrages de types très différents : ponts dalles, ponts à poutres, grands ponts construits par encorbellement, etc. Si les ouvrages précontraints ont pu souffrir de pathologies structurales diverses, la précontrainte intérieure, en soi, en est rarement la cause directe et pose généralement peu de problème de pérennité.

Cependant, bien que les câbles soient protégés par le béton, les gaines et le coulis d'injection, la corrosion peut s'y développer progressivement dès lors qu'il y a renouvellement d'agents agressifs chargés en oxygène (air, eau) ou en chlorures car le coulis ne recouvre par l'ensemble des fils constitutifs et l'eau peut ainsi y circuler très facilement. Le maintien de l'effort de précontrainte dans le temps étant un gage essentiel de maintien des capacités structurales de l'ouvrage, les défauts d'étanchéités qui peuvent y porter atteinte sont à surveiller avec la plus grande attention. Il s'agit ici de rechercher tous les accès potentiels de l'eau d'infiltration tels que : défaut ou absence de chape d'étanchéité, ancrages défectueux, fissures ouvertes, nids de cailloux, joints de construction, gonflement d'origine chimique du béton, écoulements directs du système d'assainissement sur les parements, traces d'humidité suspectes (permanentes ou curieusement localisées, notamment sur les poutres de rives), épaufrures (chocs ou autre, etc.).

Dans d'autres situations, il est nécessaire de s'assurer de la nature des systèmes de précontrainte utilisés ou de la persistance de la tension de précontrainte prévue, par exemple, en présence de défauts structuraux, d'évolution de l'usage de l'ouvrage, d'un accident (choc, incendie) ou lors d'un bilan patrimonial exhaustif.

La présente fiche porte sur le diagnostic de la précontrainte intérieure proprement dite, en cas de suspicion de dégradation structurale ou en accompagnement de diagnostics structuraux plus étendus. La fiche ne porte pas sur les diagnostics structuraux des ouvrages précontraints proprement dits.

MÉTHODOLOGIE DU DIAGNOSTIC

ÉTAPE 1
ANALYSE DU DOSSIER DE L'OUVRAGE

Objectifs : analyse préliminaire de l'aléa

On identifiera dans le dossier de l'ouvrage tous les éléments utiles au diagnostic :

- âge du pont, publications relatives à la construction de l'ouvrage ;
- recensement de la présence de câbles ou de barres de précontraintes dans toutes les parties de l'ouvrage ;
- nature du procédé de précontrainte et des armatures (les câbles Sigma-oval du procédé de précontrainte KA sont particulièrement vulnérables à la corrosion fissurante sous tension) ;
- procédures de mise en œuvre de la précontrainte et contrôles réalisés ;
- éventuelles anomalies lors de la mise en tension ;
- composition des coulis, ordre et date d'injection ;
- incidents éventuels d'injection, voire témoignage de personnes ayant contrôlé ou participé à la mise en tension/l'injection ;
- carnets de chantier ;
- dossier photographique réalisé à la construction, carnet de mise en tension ;
- détails de conception et de réalisation de l'étanchéité et système utilisé, renouvellements éventuels de l'étanchéité ;
- nature du béton et pathologies déjà repérées ;
- recalcul si disponible ou analyse des hypothèses de calculs (pour mémoire).

L'ouvrage peut avoir donné lieu, depuis sa construction, à des campagnes d'auscultation (épreuves de chargement avec courburemétrie ; mesures de tension à l'arbalète, etc.) ou des relevés topographiques : il convient aussi de réunir les rapports disponibles.

Les résultats d'une analyse de risques effectuée dans le cas de familles d'ouvrages à risques (par exemple les VIPP [1]) sont utiles pour orienter l'auscultation.

Enfin, la connaissance de l'évolution des fissures, voire d'ouvertures de joints, est un objectif essentiel pour les ponts précontraints : chaque rapport d'inspection doit actualiser les relevés de ces singularités ; aussi, les rapports successifs d'inspection détaillée doivent être collectés et analysés.

Conclusion de l'étape 1

Cette étape s'achève par une synthèse du recueil de données mettant en évidence les points à examiner plus particulièrement lors de l'inspection détaillée et les recherches d'informations supplémentaires.

ÉTAPE 2 INSPECTION DÉTAILLÉE	**Objectifs : localisation des zones de dégradations potentielles ou effectives** Une inspection détaillée spécifique est systématiquement déclenchée en cas de détection de fissures considérées comme symptôme d'un dysfonctionnement mécanique, ainsi que pour des familles de pont particulières : VIPP construits avant 1967, grands ouvrages précontraints autres que dalles ou multi-poutres. Un telle inspection est également motivée par des dégradations significatives du béton que ce soit du fait de chocs, d'incendies ou de dégradations chimiques internes (réactions de gonflement internes) ou externes. L'inspection détaillée revêt un caractère essentiellement visuel. Les plans de câblage sont des documents de première importance pour l'inspection détaillée. On examine en premier lieu la qualité et le fonctionnement de l'assainissement général de l'ouvrage dont le bon état est essentiel à la conservation des câbles de précontrainte intérieurs. Les défauts repérés sur certains équipements de l'ouvrage doivent alors alerter : gargouilles défectueuses, joints de chaussée dégradés, fuites par les trottoirs et corniches, étanchéité mal conçue, mal réalisée ou suspecte, etc. En ce qui concerne la structure proprement dite, on s'intéresse à tous les parements visibles des éléments porteurs (qui sont, *a priori*, les éléments précontraints). On recherche d'éventuels indices de circulation d'eau/de corrosion : présence de ruissellements, de traces d'humidité ou de calcite résultant de défauts d'étanchéité ; coulures de rouille sur le parement ; éclatements par corrosion gonflante des aciers passifs ou de précontrainte, etc. La présence de nids de cailloux (visibles ou détectés par sondage au marteau), résultant d'un serrage défectueux du béton, et découvrant un conduit, constitue un point d'accès pour l'oxygène de l'air, véritable « carburant » de l'oxydation. On pourra tenter d'examiner l'extérieur des capots de protection des ancrages des câbles de précontrainte, mais ils sont souvent inaccessibles, et l'on ne pourra au mieux que rechercher des coulures au niveau du cachetage (et les arrivées d'eau correspondantes). En présence de fissures d'éclatements ou de nids de cailloux, il importe d'établir s'il y a ruissellement par ces orifices après un épisode pluvieux. La présence de calcifications ou de traces de matière entraînée peut répondre à cette question. On profitera des nids de cailloux pour examiner l'orifice par endoscopie à l'aide d'une caméra (fiche C1-5). D'autres indices sont à examiner mais sont de nature davantage mécanique : – fissures ; – des déformations (flèches) anormales : soit par leur amplitude, soit par leur caractère local ; – « fantômes » des conduits de câble, visibles en parement, soit par absorption différentielle après un épisode pluvieux, soit par l'allure caractéristique de fissures, avec ou sans efflorescences, épousant le tracé d'un câble. Ces indices mécaniques seraient particulièrement graves s'ils étaient à relier à un mauvais état de la précontrainte intérieure. **Conclusion de l'étape 2** En l'absence de mise en évidence de défaut visuel, l'ouvrage pourra faire l'objet d'une surveillance périodique normale, sauf dans les cas où l'analyse de risques ou les conclusions de l'étape 1 entraînent la réalisation d'auscultations. Dans les cas de défauts d'étanchéité *a priori* significatifs (coulures de rouilles, efflorescences parallèles au tracé des câbles, etc.), de fissures d'origine apparemment mécanique ou chimique, de déformations anormales. Il y a lieu de déclencher des auscultations.
ÉTAPE 3 AUSCULTATION	**Objectifs : analyse approfondie de l'aléa et auscultations** On s'intéresse, dans le cadre de cette procédure, à l'évaluation quantitative d'une dégradation de la précontrainte intérieure : – susceptible de provoquer les désordres observés ; – ou d'être la conséquence de désordres structuraux. Dès lors, il s'agit de localiser et de reconnaître les zones défectueuses et d'estimer l'ampleur et la cause des phénomènes de corrosion, ou de se prononcer sur l'origine des fissures ou des déformations relevées à l'étape précédente. Même si on dispose de plans de câblage, on procédera au repérage des armatures passives et actives, par radar (fiche C1-1) ou par pachomètre (fiche B2-1). Ce travail est indispensable pour positionner les ouvertures éventuelles (orifices, fenêtres) à pratiquer dans les éléments en béton ou pour implanter les clichés gammagraphiques (fiche B5-1) qui permettront de détecter des zones de défauts d'injection avant d'ouvrir des fenêtres.

ÉTAPE 3
AUSCULTATION

Assez souvent, il sera nécessaire de procéder à l'ouverture d'orifices, voire de fenêtres dans le parement, afin d'accéder jusqu'aux conduits. En effet, en présence de défauts d'étanchéité *a priori* significatifs et de présence de coulures de rouille, l'ouverture de fenêtres d'observation doit permettre de reconnaître l'avancement de la corrosion et de procéder à des analyses des matériaux.

On pourra se reporter à la fiche A1-9 : Ouverture / Fermeture d'une fenêtre qui décrit en détail les procédures utiles à l'ouverture et à la fermeture de fenêtres. Ces fenêtres seront pratiquées avec l'appui d'un bureau d'études qui s'assurera de l'innocuité des ouvertures pratiquées vis-à-vis de la résistance structurale de l'ouvrage.

Ces ouvertures, de l'ordre de 10×25 cm pour des observations visuelles avec ou sans prélèvements, se pratiquent :

– dans les zones réputées douteuses à l'étape précédente ;
– autant que possible, là où le béton, déjà passablement ruiné, n'est de toute façon plus porteur et ne constitue qu'une charge inerte ;
– en des points où les armatures de précontrainte sont suffisamment proches du parement (entre 15 et 20 cm de profondeur maximum). Cette distance correspond bien à la profondeur de détection accessible à un radar.

Les points à examiner sont les suivants :

– état et nature du conduit (notamment pour les conduits de type Manurhin revêtus à l'intérieur de plomb) ;
– qualité du remplissage : aspect du coulis, présence de produits ou pâte blanche, d'eau circulante ou stagnante, de coulis humide ;
– confirmation du système de précontrainte utilisé ;
– état de conservation des armatures de précontrainte : importance et nature de la corrosion, présence de fils coupés ou détendus, etc. ;
– examen du conduit à l'endoscope.

Rappel : il est fortement déconseillé de procéder au prélèvement de fils sur des torons intègres. Les prélèvements concernent uniquement les fils coupés ou détendus (voir fiche A2.3).

Des examens *in situ* peuvent être réalisés immédiatement après l'ouverture du conduit afin que les échantillons ne soient pas remaniés : détermination du pH du liquide éventuellement présent ; mesures d'oxygène dissout dans l'eau et/ou si possible dans la pâte blanche humide éventuellement présente.

Si possible, on procédera à des prélèvements de matériaux (eau, pâte blanche, coulis) pour analyses en laboratoire.

Si des mesures de tension sont requises au titre d'une évaluation structurale, des fenêtres de taille plus importantes doivent être ouvertes,afin de réaliser des mesures de tension des câbles par Arbalète (cf. fiche C4-3).

Selon le résultat des premières fenêtres d'observation, il sera alors possible d'étendre l'examen de l'état des câbles par des clichés gammagraphiques (cf. fiche B5-1) afin d'éviter de multiplier les ouvertures (Dans le cas des VIPP, il est recommandé d'effectuer les clichés gammagraphiques préalablement à l'ouverture des fenêtres afin de les positionner de façon optimale (Voir Procédure E2-7).

Dans quelques rares cas où ils sont accessibles et où le cachetage est soit absent, soit très dégradé, on peut tenter de démonter un capot, si, toutefois, l'opération peut être faite rapidement et sans exercer d'effort important sur les câbles.

L'attention est attirée sur la nécessité de parfaitement refermer les fenêtres dès la fin des prélèvements en rétablissant la protection anti-corrosion conformément à la fiche A1-9.

Autres investigations à caractère « structural »

Pour mémoire car cela dépasse le cadre de cette fiche, en présence de fissures des parements, il importe de déterminer si ces fissures sont :

– inertes, ou si elles « respirent » au moyen d'une instrumentation ;
– évolutives, ou stabilisées : l'examen des dossiers d'inspections périodiques devrait répondre à cette question.

Il est à noter que dans le cas d'un pont hyperstatique, la fissuration peut être liée, ou combinée, ou amplifiée par les gradients thermiques extrêmes d'une part, par la présence de coupleurs disposés dans une section de reprise de bétonnage (souvent positionnés dans les zones d'inversion de moment) d'autre part.

Des mesures de contraintes par libération (cf. fiche C3-16) peuvent être très utiles pour caractériser l'état réel de fonctionnement des sections malades en particulier au droit de zones où la précontrainte serait dégradée. Toutefois, cette étape ne peut être abordée qu'après une analyse structurale préliminaire par un bureau d'études.

ÉTAPE 3 AUSCULTATION	On pourra se reporter aux fiches C3 qui présentent les différentes méthodes de « mesures locales de fonctionnement » qui vont complémenter l'auscultation des câbles intérieurs et à la procédure E2-6 relative à l'évaluation des moments de décompression. **Conclusion de l'auscultation** L'auscultation permet de qualifier les dégradations de la précontrainte intérieure et d'évaluer leur impact structural ou le potentiel d'évolution, mais l'auscultation ne permet généralement pas d'avoir une vision quantitative de l'état des armatures de précontrainte. Dans le cas d'un pont précontraint intérieurement, on cherchera si ces anomalies s'expliquent par : – la disparition de matériau par corrosion ; – des chocs, un incendie ; – une zone de couplage mal exécutée ; – des fissures structurales passives ou actives ; – une surtension à la mise en tension ayant entraîné une rupture de fils ; – des dégradations localisées ou généralisées du béton. Bien entendu d'autres causes structurales peuvent également être recherchées en parallèle. In fine, l'auscultation doit alors permettre de conduire une évaluation structurale en fournissant au bureau d'étude chargé de recalculer l'ouvrage, les hypothèses indispensables à ce calcul prenant en compte l'ouvrage construit, dans ses conditions réelles et actuelles de fonctionnement compte tenu des dégradations constatées. Il s'agit de mettre sur pied un modèle numérique de la structure, conforme aux observations et mesures effectuées sur site, et de là, d'en déduire l'origine des écarts par rapport au projet de conception. Finalement, en fonction des résultats de l'auscultation et de l'évaluation structurale, les recommandations suivantes seront faites au gestionnaire : – maintien ou limitation de l'exploitation ; – fermeture de l'ouvrage ; – maintien d'une surveillance normale ou mise sous surveillance renforcée ou haute surveillance ; – nécessité de réaliser un projet de réparation : renfort structural, réparation des équipements ou des parements ; – autres suites à donner, etc. **Il est à noter que des désordres structuraux seraient particulièrement graves s'ils étaient à relier en tout ou partie à un mauvais état de la précontrainte intérieure. Une telle éventualité pourrait suggérer l'opportunité de la mise en place d'une haute surveillance.**

RÉFÉRENTIEL

[1] Guide technique « Viaducs à travées indépendantes à poutres précontraintes : guide méthodologique de surveillance et d'auscultation», LCPC, octobre 2001, ISBN :2-7208-3104-2

Recueil de méthodes d'auscultation des matériaux et structures d'ouvrages d'art :

- A1-2 : Analyse minéralogique du béton
- A1-9 : Ouverture / fermeture d'une fenêtre
- A2-1 : Examen métallographie et fractographique
- A2-3 : Prélèvement d'armatures en acier
- B2-3 : Prélèvements de poudre en béton pour mesure de la teneur en agents agressifs
- B5-1 : Gammagraphie - Radiographie - Radioscopie
- C1-5 : Endoscopie - Application à la recherche de vide et / ou de zones corrodées dans les conduits de précontrainte
- C3-16 : Mesure de contrainte par libération
- C4-3 : Mesure de la tension des câbles et armatures de précontrainte au moyen de l'arbalète

LOGIGRAMME

Un logigramme ou un schéma décisionnel, visualisant de façon séquentielle et logique les actions à mener et les décisions à prendre pour aboutir au diagnostic est donné ci-après à titre de guide.

E2-8 : DIAGNOSTIC DE LA PRÉCONTRAINTE INTÉRIEURE

