ÉVALUATION DE LA TENSION DANS UNE ARMATURE DE PRÉCONTRAINTE

CONTEXTE

On entreprend généralement la mesure de tension des armatures de précontrainte pour s'assurer de la pérennité d'ouvrages en béton précontraint ayant plus de 25 ans. De telles reconnaissances sont en effet souhaitables car la perte de précontrainte ne s'accompagne pas toujours d'effets visibles. Il n'en reste pas moins que le gestionnaire d'ouvrage doit, vu le coût des réparations, disposer d'informations précises pour définir suffisamment tôt un programme de réparation.

La méthode de mesure de la tension d'une armature de précontrainte dépend de la nature du procédé de précontrainte. L'objet de la présente procédure est de guider vers les méthodes existantes selon la situation à traiter. Cette procédure ne concerne pas les tirants utilisés dans les soutènements.

De façon générale, la situation à traiter est analysée suivant :

– la nature de la précontrainte : intérieure ou extérieure ;
– la nature de produit utilisé pour les injections : coulis de ciment ou produit souple (cire ou graisse) ;
– et l'accessibilité des têtes d'ancrage : accessibles ou non.

MÉTHODOLOGIE DU DIAGNOSTIC

ÉTAPE 1 ANALYSE DU DOSSIER DE L'OUVRAGE	Plusieurs informations capitales pour la suite de l'opération doivent être réunies lors de cette analyse : – l'âge de l'ouvrage : à défaut d'autres informations disponibles afin de formuler des hypothèses sur la nature des armatures et leur procédé de mise en œuvre ; – les conditions d'accès aux armatures de précontrainte : tracés des câbles, profondeur du câble au sein du béton, nature des conduits, méthode d'injection utilisée et résultats de l'épreuve de convenance à la construction ; – la nature des armatures à tester : simple fil, armatures de type sigma ovale du procédé KA, câble à fils parallèles, câble à torons, câble constitué de torons toronnés entre eux (procédé CO2), etc. ; – le diamètre des fils ou torons constituant l'armature ainsi que la nuance des aciers utilisés ; – le procédé d'ancrage : fils boutonnés, câbles « filés », système STUP, ancrage par clavettes, etc. ; – les valeurs relevées sur les fiches de mise en tension (lorsqu'on peut les retrouver) ; – le cas échéant : résultat de campagnes de mesures antérieures. D'autres informations sont susceptibles d'orienter la démarche : – les résultats des mesures de coefficients de transmission ; – d'éventuelles anomalies lors des opérations de mise en tension des câbles de précontrainte ; – la composition des coulis (nature et provenance du ciment, nature de l'adjuvant éventuellement employé) ; – la période d'injection (froide, chaude), ordre et dates d'injection des conduits, chauffage éventuel du coulis avant l'injection ; – les incidents d'injection éventuellement notés ; – voire les témoignages des personnes ayant contrôlé ou participé aux mises en tension et à l'injection.
ÉTAPE 2 INSPECTION DÉTAILLÉE	Celle-ci est rappelée pour mémoire. Elle précède l'auscultation et permet d'examiner l'état apparent de la précontrainte, de vérifier la cohérence des plans, de détecter d'éventuels problèmes de mise en œuvre de la précontrainte qui auraient pu avoir lieu lors de la construction, de prendre les côtes nécessaires, d'aider à positionner les fenêtres, etc.

ÉTAPE 3
AUSCULTATION

Définition d'un plan d'auscultation

En fonction de la nature de la précontrainte (intérieure ou extérieure), des résultats de l'analyse du dossier et des constatations effectuées lors de l'inspection détaillée (nature du produit de protection des armatures, coulis ou produit souple, existence de clavettes permettant de réamorcer une mise en tension depuis les ancrages), on pourra choisir la méthode d'évaluation la plus appropriée et définir le contenu de l'intervention.

Évaluation par pesée au vérin creux

Il arrive exceptionnellement que la tête d'ancrage d'un câble de précontrainte soit conçue pour permettre le suivi régulier de la tension par pesée au vérin creux (cas de l'injection de la tête et du câble par un produit souple). Il faut pour cela disposer d'une longueur de câble suffisante en deçà de l'ancrage pour pouvoir y fixer, soit directement le vérin, soit une rallonge d'armature avant de mettre le vérin : cela suppose d'avoir prévu *a priori* d'effectuer ce type de mesure au moment de la construction de l'ouvrage. Peu de ponts à ce jour ont été conçus avec cet objectif secondaire d'auscultation, mais on trouve de telles dispositions pour les tirants actifs des rideaux de palplanche[1]. La pesée d'une armature au niveau de la tête d'ancrage consiste à allonger l'armature. Une chaise d'appui est engagée sur la tête d'ancrage pour exercer une traction axiale en tête. Fort de ce dispositif, il est possible de tracer la courbe donnant la force exercée par le vérin en fonction du déplacement de la tête d'ancrage. La courbe obtenue (similaire à celle fournie par le matériel COMET 2 qui sert à mesurer les coefficients de transmission lors de la mise en tension des câbles) présente deux parties bien distinctes dont la seconde partie est quasi rectiligne. La tension d'ancrage s'obtient en extrapolant cette droite pour une valeur de déplacement nulle (ordonnée à l'origine). La figure 1 illustre les courbes de montée et de descente en tension d'une barre, la force dans la barre étant la moyenne des deux valeurs fournies par l'intersection des deux droites verte (montée) et rouge (descente) avec l'axe des ordonnées.

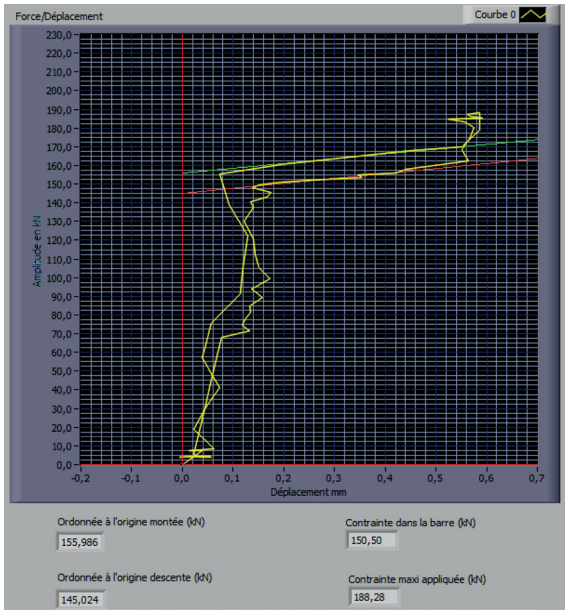


Figure 1 : exemple de courbe de pesée donnant la force moyenne dans une barre (150,50 kN)

Évaluation par analyse vibratoire

Dans le cas d'une précontrainte extérieure injectée au coulis de ciment, on peut mesurer la tension d'un câble par analyse vibratoire. En effet, l'analyse spectrale de la réponse d'un câble à un choc ou à des oscillations entretenues met en évidence la fréquence des premiers modes propres. En faisant l'hypothèse que les premiers modes propres du câble sont les modes de flexion, on peut s'appuyer sur l'expression théorique de la fréquence propre, qui fait intervenir la tension du câble.

La mesure de tension des câbles de précontrainte extérieure par analyse vibratoire, lorsqu'elle est possible, est peu coûteuse et donne des résultats immédiats ; elle suppose que les câbles soient injectés au coulis de ciment et aient une longueur libre d'au moins huit mètres. La présence de cire ou de graisse, ou l'absence totale de produit d'injection dans la gaine, empêche l'application de ce type de méthodes.

Ce type de méthode peut également être mis en œuvre pour des câbles plus courts. Il est alors nécessaire d'introduire l'influence de la raideur du câble (ensemble armatures + coulis + gaine), mais ceci est affaire de spécialiste.

En outre, il ne faut pas négliger la difficulté que représente la juste estimation de la longueur du câble en vibration, et la difficulté d'estimer la masse linéique du câble (sa raideur le cas échéant).

[1] C'est le cas par exemple des rideaux lourds en berge de la Deûle à Wambrechies (Nord).

ÉTAPE 3
AUSCULTATION

Évaluation par ouverture de fenêtre et mesure de tension avec l'arbalète

Dans le cas de la précontrainte intérieure, et dans le cas de la précontrainte extérieure injectée par un produit souple ou en l'absence de prise sur l'armature au niveau des ancrages, la mesure de la tension résiduelle ne peut être effectuée qu'en utilisant la méthode dite de l' « arbalète ». La méthode de l'arbalète consiste à exercer une déviation du câble puis à tracer la courbe caractéristique effort transversal-flèche mesurée. On montre par la théorie de l'élasticité que l'analyse de cette courbe permet d'apprécier la tension du câble.

Il convient naturellement, pour pratiquer cette méthode, de dégager préalablement les armatures non seulement de la gaine et du coulis, mais aussi éventuellement du béton (précontrainte interne, à fil adhérent ou non). Il faudra, dans ces derniers cas, pratiquer des ouvertures dans la structure depuis un parement pour dégager une fenêtre de dimension suffisante pour atteindre plusieurs câbles par une même ouverture, en s'appuyant sur les plans de câblage.

La dimension de la fenêtre :

– en longueur (c'est-à-dire dans le sens des câbles), varie entre 60 cm et 1 m, pour les gros torons et câbles ;
– et en largeur, est fonction du nombre de câbles.

On trouve généralement les armatures de précontrainte à moins de 30 cm du parement, ce qui donne la profondeur maximum des ouvertures à pratiquer ; on est souvent plus près de 15 cm de profondeur en post-tension, voire quelques centimètres en pré-tension.

Dans la plupart des cas, une reconnaissance par pachomètre ou radar est requise pour s'assurer de la position des câbles avant ouverture des fenêtres. Lorsqu'une campagne de gammagraphie a été préalablement réalisée, il est pertinent d'utiliser les résultats pour implanter les fenêtres.

Rappelons que les armatures peuvent être suffisamment dégradées (ou simplement détendues) pour rendre superflue toute mesure quantitative de la tension résiduelle.

Précautions particulières

En cas de rupture, un câble de précontrainte extérieure peut se détendre violemment et l'ancrage peut reculer de plusieurs mètres. Il convient donc d'éviter de se placer derrière les ancrages dans l'axe du câble. Le risque de fouettement est théoriquement nul pour les câbles courts (moins de 40 mètres) mais il augmente avec la longueur des câbles et dans la première travée après l'ancrage. Il convient donc de ne pas stationner inutilement dans l'ouvrage. À cette fin, un plan d'intervention définissant la mission et le trajet de chacun doit être établi.

Le positionnement des fenêtres doit être judicieux afin que la mesure soit représentative des sections à vérifier (une mesure en travée de rive est, par exemple, à éviter s'il s'agit de vérifier le milieu de travée centrale).

Les opérations d'ouvertures de fenêtres, réduisant la section de béton sous charges permanentes, sont à éviter sur les poutres de petites dimensions.

Évaluation de la mesure

Caractère plus ou moins local de la mesure

Outre les pertes évaluées classiquement à la construction des ouvrages, la tension des armatures est une grandeur susceptible de varier d'une extrémité à l'autre d'une armature, par suite des longueurs de ré-ancrage et plus généralement des interactions entre fils, torons, armature et coulis, armature et béton. Une mauvaise qualité d'injection peut en particulier introduire des différences de tension importantes entre deux points (pas forcément très éloignés l'un de l'autre) d'un même câble.

La pesée donne la tension à l'ancrage ; la méthode vibratoire donne, par nature, une mesure de la tension moyenne entre deux déviateurs, deux dispositifs anti-vibratoires ou deux massifs d'ancrage ; enfin la méthode de l'arbalète donne une mesure locale de la tension de l'armature.

Incertitude de mesure

La méthodologie employée permet d'afficher respectivement, pour les deux méthodes « vérin creux » et « vibratoire », une précision de l'ordre de 1 % et 5 %. Ces types de mesures peuvent être effectués plusieurs fois de suite pour s'assurer de la fidélité de la mesure, en l'assortissant notamment d'une analyse statistique. La bonne précision apparente de la mesure laisse cependant une large plage d'incertitudes sur la tension réelle dans le câble dans les sections à vérifier ; un calcul en fourchette est recommandé, tout particulièrement si la mesure est effectuée loin des sections à vérifier.

Interprétation au niveau de la structure

Il est recommandé de comparer les résultats des mesures aux tensions théoriques du dossier d'ouvrage ou à un recalcul prenant en compte les hypothèses de tension et de pertes existant à l'époque de la construction.

RÉFÉRENTIEL

Dantec P., Dargenton J-C. et al. Notice d'utilisation de COMET2 V 1.33, contrôleur de mise en tension, CECP d'Angers, 2006, 92p.

Mesure de la tension des câbles par vibration, Paris : LCPC, 1993, Méthode d'essai des laboratoires des ponts et chaussées, ME35, 15p.

Robert J.L. et al. Mesure de la tension des câbles par méthode vibratoire, Bulletin des Laboratoires des ponts et chaussées, n° 173, Mai-Juin 1991, pp 109-114.

Mesure de la tension des armatures de précontrainte à l'aide de l'Arbalète, Paris : LCPC, 2009, Techniques et méthodes des Laboratoires des ponts et chaussées, Guide technique, GTARBA, 23p.

Godart B. et Tonnoir B. Les essais de chargement des ouvrages in Colloque IREX des 25 et 26 novembre 2003 : Auscultation, diagnostic et évaluation des ouvrages - L' apport des essais, des contrôles et des différents modèles pour l'estimation de la durée de service, 15p.

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

B2-1 Mesure de la profondeur d'enrobage et du diamètre des aciers

B5-1 Gammagraphie, radiographie et radioscopie

C1-1 Technique Radar pour localisation d'armatures

C4-1 Pesée de tirant ou de suspente

C4-2 Estimation de la tension des câbles par méthode vibratoire

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 à l'évaluation de la tension est donné ci-après à titre de guide.

E2-5 : ÉVALUATION DE LA TENSION DANS UNE ARMATURE DE PRÉCONTRAINTE

