E2-6

ÉVALUATION DU DÉFICIT EN FLEXION D'UN PONT À CAISSONS EN BÉTON PRÉCONTRAINT PAR LA MÉTHODE DES MOMENTS DE DÉCOMPRESSION

CONTEXTE

Un nombre relativement important de ponts à caissons en béton précontraint construits par encorbellements successifs ou par poussage ont présenté des ouvertures de joints entre voussoirs caractéristiques d'un défaut de résistance en flexion, que les voussoirs aient été préfabriqués ou coulés en place. Ces ouvertures de joints étaient préférentiellement situées dans les zones dites de « moment nul » de la travée centrale dans le cas des ponts hyperstatiques à trois travées, et étaient souvent accompagnés de fissures de diffusion ou de fissures d'entraînement localisées au voisinage des bossages d'ancrage de précontrainte du hourdis inférieur, ainsi que de fissures de poussée au vide dans les ponts de hauteur variable.

Plusieurs causes expliquent ce déficit de résistance en flexion qui résulte d'une insuffisance de précontrainte longitudinale :

– une sous-estimation ou une non prise en compte des moments fléchissant dus à la redistribution des efforts sous l'effet des déformations différées gênées (principalement le fluage du béton) ;
– la négligence des moments hyperstatiques dus au gradient thermique dans les caissons (différence de température entre le hourdis supérieur et le hourdis inférieur sous l'action de l'ensoleillement) ;
– une mauvaise maîtrise du frottement des câbles dans leur conduit, non seulement en partie courante en raison d'un tracé des conduits mal maîtrisé sur chantier, mais aussi au passage des joints ;
– un effort de précontrainte parfois insuffisant au niveau de son introduction dans la structure.

Le 2 avril 1975, la Direction des Routes a publié une circulaire qui prescrit de prendre en compte la redistribution des efforts dus aux déformations différées du béton dans les ouvrages hyperstatiques ainsi que les sollicitations induites par le gradient thermique. De ce fait, à partir de 1975, les ponts à caissons ont bénéficié d'une précontrainte plus importante et de câbles de continuité prolongés vers les piles au delà des zones de moment nul, et cette pathologie spécifique a disparu.

Pour pouvoir estimer le déficit de résistance en flexion, une méthode dénommée « Méthode des moments de décompression » a été mise au point dans les années 1980 par le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées [1], puis améliorée progressivement [2] et [3].

Cette méthode peut également être utilisée pour des structures fissurées en béton précontraint autres que les ponts à caissons.

MÉTHODOLOGIE DU DIAGNOSTIC

ÉTAPE 1
ANALYSE DU DOSSIER DE L'OUVRAGE
	Objectif : analyse préliminaire de l'aléa
	
	On identifiera dans le dossier de l'ouvrage tous les éléments utiles au diagnostic :
	
	– renseignements généraux :
	  – date de construction (un ouvrage construit avant 1975 est *a priori* suspect),
	  – hypothèses de calcul de dimensionnement (règles de calcul en béton précontraint, résistance du béton, procédé de précontrainte, type d'acier de précontrainte, tension initiale des câbles, coefficients de frottement, relaxation à 1 000 heures, etc.),
	  – isostaticité ou hyperstaticité de la structure,
	  – trafic supporté par l'ouvrage ;
	– renseignements sur l'exécution de la structure (plans, carnets de chantier, comptes rendus de réunions, etc.) :
	  – plan de câblage et de ferraillage, disposition des câbles en section transversale,
	  – relevés des mises en tension,
	  – éventuelles anomalies lors des opérations de mise en tension des câbles de précontrainte (résultats des mesures de coefficient de transmission, etc.),
	  – nature des conduits et type de raccordement des conduits.

ÉTAPE 2
INSPECTION DÉTAILLÉE

Objectif : détection des joints de voussoir qui s'ouvrent

Cette détection par des moyens oculaires n'est pas très facile car les joints peuvent être fermés à vide (ouvrage non chargé) et s'ouvrir sous les effets du gradient thermique ou de la circulation des PL ; dans ce cas leur ouverture est faible, de l'ordre du dixième de millimètre. Dans le cas où les joints sont ouverts à vide, la détection visuelle de leur ouverture est plus aisée car leur ouverture peut atteindre plusieurs dixièmes de millimètre. En outre, la conjugaison des joints est parfois mal faite et il convient donc de détecter la présence de fissurations dans les joints en faisant la part de ce qui est dû à des défauts de conjugaison et de ce qui est provoqué par des fissures de flexion, etc.

A ce stade cette détection peut être facilitée par la pose de quelques capteurs de déplacements sur des joints repérés comme douteux.

Enfin, ce n'est pas parce qu'aucune ouverture de joint n'est apparente que l'ouvrage ne souffre pas d'un déficit de résistance en flexion.

Si des fissures sont observées ou si l'analyse du dossier d'ouvrage fait ressortir des doutes sur l'ouverture de joint (existence de tractions indiquées dans certains joints par la note de calcul), il convient de passer à l'étape 3. Les désordres constatés lors de l'inspection détaillée, ou les insuffisances théoriques de résistance mises en évidence par les notes de calcul, permettent de guider sur le choix des joints à instrumenter.

ÉTAPE 3
AUSCULTATION

Objectif : estimation de la réserve ou du déficit de moment fléchissant des joints repérés comme étant les plus faibles, à l'aide d'une instrumentation conséquente

3.1 Reconnaissance des joints ouverts par instrumentation

Cette phase de reconnaissance correspond à une phase d'exploration préliminaire de l'ouvrage et permet de reconnaître l'existence de joints ouverts ou susceptibles de s'ouvrir sous trafic et/ou gradient thermique afin de choisir les 2 ou 3 joints, voire plus, qui feront l'objet d'une expertise approfondie. Elle est donc destinée à repérer les sections *a priori* les plus faibles.

La reconnaissance est menée à l'aide d'une instrumentation « légère » essentiellement constituée de capteurs de déplacement de grande précision (résolution de l'ordre du micron) placés à cheval sur les joints, et répartis sur la largeur du hourdis inférieur. Les joints instrumentés sont le plus souvent situés dans les zones de moment nul, mais peuvent être également situés en milieu de travée centrale.

Cette phase de reconnaissance a pour but de suivre en continu les mouvements de ces joints sous l'effet du trafic et des phénomènes thermiques. Quelques jours de surveillance suffisent pour détecter les joints dont l'ouverture varie sous ces actions variables. Une analyse des mouvements des joints permet de retenir les joints les plus sensibles car les insuffisances constatées au droit de ces joints seront prises en compte pour le dimensionnement de la précontrainte additionnelle.

3.2 Application de la méthode des moments de décompression

La méthode consiste à soumettre les sections reconnues comme fissurées à des moments fléchissant croissant obtenus par des chargements connus, et à mettre en évidence le moment de flexion qui provoque l'ouverture du joint (ou de la fissure préexistante) au niveau de la fibre inférieure du caisson, puis au niveau des fibres de plus en plus proches de l'axe neutre.

Les chargements sont obtenus par le déplacement progressif et prédéfini d'un convoi de camions sur l'ouvrage. Les charges sont déplacées :

– soit de façon à créer dans les joints choisis un accroissement du moment par pas constant ;
– soit en avançant les camions par pas constant.

Les positions des camions doivent être préalablement marquées sur la chaussée.

Dans le cas d'un ouvrage hyperstatique, en présence d'un joint ouvert à vide, un chargement des travées adjacentes peut être envisagé pour essayer de recomprimer le joint sous l'effet du moment négatif ainsi produit.

À l'issue des chargements, il convient de s'assurer que les camions ne restent pas groupés pour quitter l'ouvrage.

Dans la mise en œuvre de cette méthode, pour chaque point de mesure le dispositif utilisé pour la détection fine de l'ouverture d'un joint en un point associe un capteur de déplacement placé à cheval sur la fissure et une jauge d'extensométrie collée sur le béton dans le prolongement du capteur, près du bord de la fissure (couple jauge/capteur). La jauge et le capteur fonctionnent linéairement pendant la phase de décompression du joint jusqu'à son ouverture ; puis, après ouverture, les deux instruments divergent, le capteur indiquant une ouverture progressive et la jauge n'enregistrant plus de décompression supplémentaire (figure 1). Cette information étant localisée au droit du couple jauge/capteur, et le joint ayant souvent un fonctionnement complexe, il est nécessaire d'installer de 10 à 20 couples par joint pour pouvoir diagnostiquer l'ouverture et suivre la remontée de la fissure dans le joint.

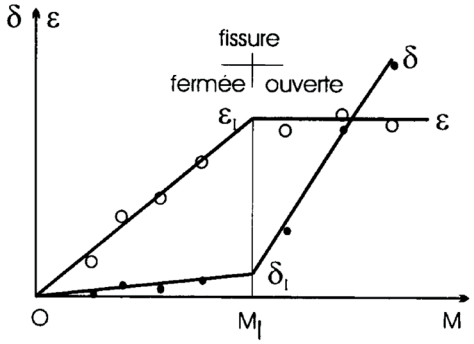


Figure 1 : Évolution d'un capteur de déplacement δ associé à une jauge ε pendant l'ouverture d'une fissure

Bien que l'instrumentation par une bonne dizaine de couples jauge/capteur présente l'intérêt de connaître la manière généralement non uniforme dont s'ouvre un joint entre voussoirs, avec à titre d'exemple une décompression du milieu du hourdis inférieur qui se produit avant celle des goussets inférieurs, ce type d'instrumentation reste relativement lourd. Une alternative, peu employée, consiste à utiliser des inclinomètres qui mesurent les rotations de section et fournissent ainsi une information plus globale ; l'implantation d'un inclinomètre de part et d'autre du joint permet de détecter au cours de l'essai de chargement l'apparition d'une discontinuité correspondant à l'ouverture du joint et d'obtenir par différence une valeur de la rotation d'un joint qui, lorsqu'il est bien ouvert, fonctionne comme une rotule élastique [4].

Par ailleurs, il est indispensable d'équiper une section du caisson à l'aide de sondes de température disposées de manière à pouvoir évaluer le gradient thermique dans la structure, gradient qui peut évoluer pendant les essais de chargement. Il est conseillé de réaliser un suivi de l'ouverture des joints en fonction du gradient thermique avant de procéder aux essais de décompression. A noter que le pilotage du chargement du pont par des camions doit être conduit en fonction du gradient thermique mesuré pour éviter d'endommager l'ouvrage. De même, la période de réalisation de l'essai peut être choisie en fonction de l'intensité supposée du gradient thermique.

ÉTAPE 3
AUSCULTATION

Trois cas peuvent se produire :

Cas 1

Si le joint est fermé à vide (exemple du point A sur la figure 2), l'identification du cas de chargement (intégrant les effets du gradient thermique) correspondant à l'ouverture du joint ou de la fissure donne une estimation de la réserve de moment fléchissant existant « à vide » dans la section considérée. L'analyse des différentes réserves ainsi estimées pour les joints instrumentés permet ensuite de recaler le modèle informatique et ainsi, s'il est décidé de mettre en œuvre une précontrainte additionnelle, de dimensionner celle-ci.

Cas 2

Si le joint est ouvert à vide et peut être refermé (exemple du point B sur la figure 2), de façon analogue, l'identification du cas de chargement correspondant à la refermeture du joint ou de la fissure par des cas de chargement en « moment négatif » fournit une estimation du déficit de moment fléchissant existant « à vide » dans le joint considéré. Ce déficit de moment ajouté aux moments provoqués par les charges de trafic et le gradient thermique permet de recaler le modèle informatique et ainsi, s'il est décidé de mettre en œuvre une précontrainte additionnelle, de dimensionner celle-ci.

Il est également possible dans ce cas d'effectuer des mesures de surtensions des câbles pour évaluer les risques de fatigue de ceux-ci (cf. ci-après).

Cas 3

Si le joint est ouvert à vide (par exemple, ouverture > 3/10 de mm) et ne peut être refermé par des chargements introduisant des moments négatifs (exemple du point C sur la figure 2), il n'est pas possible de déterminer l'état à vide de la structure. Il est alors conseillé de fixer des jauges de déformation sur quelques câbles de précontrainte au droit de la fissure et de mesurer leur surtension sous l'effet du chargement (Figure 2). La crainte est en effet d'obtenir des ruptures par fatigue des armatures de précontrainte au droit des joints, et les surtensions enregistrées sous trafic réel pendant deux ou trois semaines représentatives permettent d'évaluer la durée de vie en fatigue de l'ouvrage [5] et [6]. Le document [5] montre l'intérêt qu'il y a à effectuer ces mesures en période de gradient thermique important.

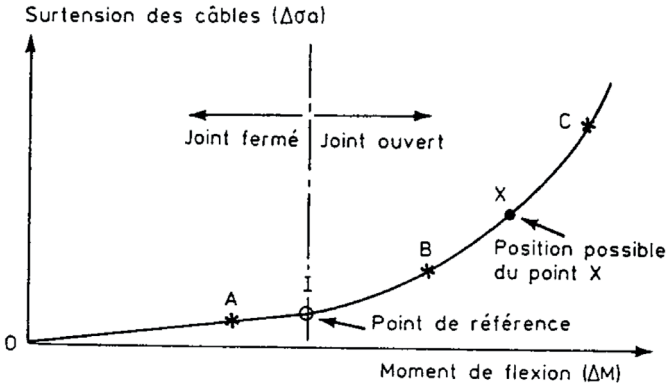


Figure 2 : Évolution de la surtension des câbles en fonction du moment appliqué

Cependant, si l'on cherche à estimer le déficit de flexion, il est possible de l'obtenir en traçant l'évolution théorique de la surtension dans les câbles sous l'effet des chargements à l'aide de calculs de section de béton précontraint en section fissurée (et en faisant une hypothèse sur la force de précontrainte existant dans la section de l'ouvrage et sur la longueur d'ancrage des câbles), puis en essayant de faire coïncider cette courbe théorique avec la courbe d'évolution de la surtension mesurée sous chargement. L'obtention d'une bonne superposition des deux courbes permet d'estimer le déficit de flexion.

Pesée de réaction d'appui

En complément à la méthode des moments de décompression, la pesée de réaction d'appui effectuée sur les culées pendant l'application de cette méthode présente deux intérêts majeurs :

Les valeurs des réactions d'appui constituent d'excellents témoins de l'existence de redistribution d'efforts au sein d'une structure, soit entre lignes d'appuis, soit entre appareils d'appui d'une même ligne. Ces redistributions d'efforts peuvent provenir de phénomènes internes à la structure comme des effets résultant du comportement différé de matériaux ou comme l'apparition de fissures qui modifient la répartition des rigidités entre travées. Les pesées de réaction d'appui effectuées pendant les opérations de chargement permettent d'étudier la rigidité globale de l'ouvrage et les modifications de rigidité créées par les ouvertures ou fermetures de joints à condition que ces dernières soient significatives. Ces pesées de réaction d'appui doivent être réalisées pendant une période plus longue que celle correspondant aux essais de chargement afin de pouvoir prendre correctement en compte les effets du gradient thermique.

ÉTAPE 3
AUSCULTATION

L'intérêt le plus évident de la pesée est que, faite dès l'origine, elle peut être reproduite plus tard afin de quantifier une évolution. Malheureusement, dans la pratique, cette valeur initiale de référence n'existe pas, et l'on ne peut donc opérer qu'une comparaison entre valeurs mesurées et calculées. Cette mesure des réactions d'appui par pesée apporte une information très utile pour le dimensionnement de la précontrainte additionnelle, information complémentaire à l'estimation du déficit de résistance en flexion par les instrumentations de joints.

Suites de l'auscultation

Il est à noter que le renforcement d'une structure précontrainte fissurée n'est pas automatique, certains règlements autorisant même une fissuration.

La décision de réparer, en général par ajout de matériaux composites et/ou précontrainte additionnelle extérieure est prise notamment en fonction des considérations suivantes :

– la fissuration est-elle maîtrisée ?
– les sections fissurées sont-elles traversées par des câbles de précontrainte ?
– si oui y-a-t-il un risque vis-à-vis de la fatigue ?

S'il est décidé de mettre en œuvre une précontrainte additionnelle, en général on injecte les joints d'ouverture supérieure ou égale à 3/10^{e} de mm à l'aide d'une résine époxy de classe F au sens de la norme NF EN 1504-2, en considérant que les joints injectés transmettent bien les efforts de compression et en dimensionnant la précontrainte additionnelle pour qu'elle reprenne les charges de trafic et le gradient thermique sous combinaisons caractéristiques. Cependant, l'expérience montre que pour des considérations de reprise des efforts d'ancrages ou de résistance à la compression du béton, il n'est pas toujours possible de mettre en œuvre la précontrainte additionnelle qui serait nécessaire pour atteindre cet objectif. Il convient alors de respecter des exigences moins élevées mais assurant une maîtrise de la fissuration et une résistance à la fatigue acceptable (cf. [7] page 89). L'injection des joints se fait sous un chargement important de l'ouvrage par des poids lourds de façon à bien ouvrir les joints et à faciliter l'injection, ce chargement étant maintenu en place jusqu'à polymérisation de la résine (cf. [7] page 95) ; en général, il n'est pas tenu compte dans les calculs de renforcement des contraintes de compression générées dans le joint lors du déchargement des poids lourds.

RÉFÉRENTIEL

[1] Chatelain J., Bruneau J. et Duchene J.-L. Estimation par des essais de chargement du défaut de résistance à la flexion de certains tabliers en béton précontraint. Colloque international sur la gestion des ouvrages d'art, Paris-Bruxelles, 13-17 avril 1981, Ed. ENPC.

[2] Chatelain J. et Godart B. Évaluation de l'état mécanique réel de ponts en béton précontraint. 13th IABSE Congress, Helsinki, June 1988, pp 325-330.

[3] Chatelain J., Godart B. et Duchene J.-L. Detection, Diagnosis and monitoring of cracked prestressed concrete bridges. Proc of the second NATO Advanced Research Workshop on Bridge Evaluation, Repair and Rehabilitation, Baltimore, May 1990, Kluwer Academic Publishers, pp 145-153.

[4] Godart B. Approche par l'auscultation et le calcul du fonctionnement de ponts en béton précontraint fissurés. Proc. of the first NATO Advanced Research US-European Workshop on Rehabilitation of bridges, CEBTP Saint-Remy-lès-Chevreuse, 22-25 Juin 1987.

[5] Jacob B., Caracilli J., Godart B. et Trouillet P. Étude en fatigue d'un pont en béton précontraint sous actions combinées du trafic et des gradients thermiques. Bull. liaison LPC 152, Nov. Déc. 1987, pp 37-48.

[6] Houel et *al.* Viaduc pasteur : auscultations, estimation de la durée de vie résiduelle et projet de réparation d'un ouvrage en béton précontraint pour une durée de vie de 20 ans. Diagnobéton 2016, Marrakech, mars 2016.

[7] Conception des réparations structurales et des renforcements des ouvrages d'art. Guide Cerema, 2015, pp 83 à 102.

Chatelain J. et Godart B. L'auscultation des ponts en maintenance et réparation des ponts, sous la direction de Calgaro J.-A. et Lacroix R., Presses de l'ENPC, 1997, pp.77-149.

Abdunur C et Godart B. Méthodes d'auscultation pour l'évaluation des ponts. Annales du bâtiment et des travaux publics, décembre 1998, n°6, pp.35-49.

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

C3-2 Mesure de déplacement – capteur électrique

C3-3 Mesures des rotations par nivelles et inclinomètres (ou clinomètres)

C3-5 Mesure de déformation par jauge

C3-17 Mesures de température par thermocouple, thermistance ou sonde

C4-5 Pesée des réactions d'appui

C5-2 Méthodes des moments de décompression

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.

E2-6 : ÉVALUATION DU DÉFICIT EN FLEXION D'UN PONT À CAISSONS EN BÉTON PRÉCONTRAINT PAR LA MÉTHODE DES MOMENTS DE DÉCOMPRESSION

