

Lettre d'information du lerm n° 38

Le contrôle des ouvrages d'art... Quid de la précontrainte ?

Posted on4 décembre 2018



N° 38, décembre 2018

Editorial



Les défaillances d'ouvrages d'art récemment apparues dans des pays voisins, avec des conséquences parfois dramatiques en termes de vies humaines, nous rappellent combien le suivi de l'état de nos infrastructures routières représente un enjeu majeur pour nos sociétés.



Nous avions abordé il y a quelques temps dans notre lettre d'information le sujet de la précontrainte dans les ouvrages en bétons, et en particulier l'enjeu de sa maintenance dans notre patrimoine d'infrastructures de transport. En effet, ce dispositif constructif, talon d'Achille des ouvrages de grande portée, nécessite pour assurer sa fonctionnalité dans le temps, un suivi, une prévention des manifestations de son vieillissement et des moyens spécifiques pour en contrôler l'efficacité.

Eugène Freyssinet connaissait parfaitement le béton, matériau qui allait révolutionner le monde de la construction. Son raccourcissement différé étant un obstacle à l'obtention d'une compression permanente, il en étudia minutieusement les phénomènes, ses articles en témoignent, jusqu'à se tourner vers les aciers à haute performance pour la mise en compression. Personne, parmi ceux qui travaillent sur le béton, ne peut donc rester indifférent à ce qu'a permis cette révolution du matériau. Mais comme après toute révolution, une ré-écriture des règles s'impose.

Nous vous proposons ainsi dans cette lettre d'information de refaire le tour de procédés de contrôle permettant d'établir un diagnostic précis de l'état des ouvrages précontraints qui nous entourent.

A bon entendeur... bonne lecture!

Bernard Quénée, directeur général délégué Patricia Geretto, rédactrice en chef





Principes généraux de la précontrainte

Le béton est un matériau résistant à la compression mais fragile à la flexion. Pour améliorer sa résistance à la flexion, il a été imaginé d'y incorporer des armatures en acier (« béton armé »). Le béton précontraint va encore plus loin : il permet au béton de ne travailler qu'en compression...

Lire la suite





Essai à l'arbalète et courburemétrie pour mesurer tension et flexion

Les ponts qui ont aujourd'hui 50 ans, peuvent présenter, en moyenne, une perte d'environ 30% de leur précontrainte initiale.

Chiffre généralement un peu supérieur au calcul initial et réglementaire des pertes que pouvaient en faire les ingénieurs de l'époque : quelque peu optimistes, ils n'avaient pas alors le recul que nous avons maintenant sur les phénomènes différés qui affectent le béton précontraint...

Lire la suite



Gammagraphie pour ausculter les gaines du béton précontraint

L'aspect et la position des fils ou des torons de précontrainte dans leur gaine sont autant d'indices d'une possible absence de tension d'origine ou de rupture en service, lorsque la gaine est peu ou pas remplie par le coulis...

Lire la suite

REMERCIEMENTS | |

LERM-Infos

Directeur de la publication : Bernard Quénée



Rédactrice en chef : Patricia Geretto

Avec nos remerciements à Bernard Tonnoir, Pierre Roënelle et Christophe Carde pour leur contribution active sur le sujet ainsi qu'à Michel Martini, pour ses photos.





Principes généraux de la précontrainte

Posted on 4 décembre 2018



Le béton est un matériau résistant à la compression mais fragile à la flexion. C'est pour améliorer la résistance à la flexion qu'il a été imaginé d'y incorporer des armatures en acier (« béton armé »). Le béton précontraint va encore plus loin dans ce domaine : il permet au béton de ne travailler qu'en compression. C'est Eugène Freyssinet qui, en 1928, eut l'idée de ce procédé qui allait révolutionner l'art de construire.

L'objectif de la précontrainte est de soumettre le béton à des contraintes permanentes de compression destinées à compenser les forces de traction qui seront appliquées à l'ouvrage. Les forces de flexion ne viendront alors qu'en déduction de la force de la précontrainte initiale. Le béton

est alors employé au mieux de ses possibilités.

Le béton est précontraint au moyen de câbles qui sont tendus par des vérins : la tension des câbles va appliquer une contrainte de compression au béton, dont l'intensité dépend des charges de flexions qu'aura à subir l'ouvrage. Cette précontrainte peut être appliquée par pré-tension, c'est-à-dire que les câbles sont tendus avant le coulage du béton. Elle peut l'être également par post-tension : dans ce cas, les câbles sont tendus après le durcissement du béton.

Cette technique permet ainsi de réaliser des ouvrages soumis à des contraintes importantes (ponts, réservoirs...) ou des éléments structuraux de faible épaisseur mais de portée importante (poutres, dalles...), autorise des projets architecturaux plus sophistiqués et audacieux qu'avec le seul béton armé. Cette technique s'applique aussi bien aux ouvrages coulés en place qu'aux éléments préfabriqués.



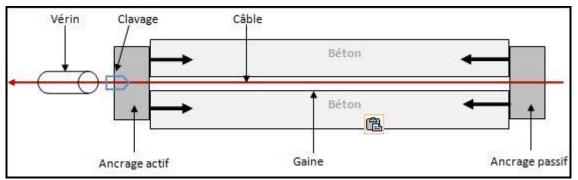


Schéma d'un dispositif de précontrainte

Précontrainte par post-tension

Après le coulage et le durcissement du béton, les câbles de précontrainte sont passés dans les gaines préalablement mises en place et les ancrages, jusqu'à des vérins qui permettent leur mise en tension. Lorsque les câbles sont libérés le béton est alors mis en compression. La tension des câbles est contrôlée par la mesure de leur allongement. Une fois les vérins démontés et les câbles coupés à leurs extrémités, les gaines sont injectées d'un coulis cimentaire pour protéger les câbles de la corrosion. Notons que la post-tension peut être intérieure ou extérieure au béton. Cette dernière permet le changement des câbles endommagés voire le renforcement de structures soumises à des charges supérieures à celles initialement prévues.

Précontrainte par pré-tension et fils adhérents

Cette technique est utilisée en préfabrication et permet la production de poutres, poteaux, dalles précontraintes...

Les câbles de précontraintes sont disposés et tendus dans des bancs de précontrainte. Le béton est coulé au contact de ces armatures. Dès que sa résistance le permet, les câbles, libérés, mettent le béton en compression par adhérence.



Domaines d'usage de la précontrainte

- Les structures offshore
- Les structures industrielles, agricole ou commerciales
- Les réservoirs (d'eau, d'hydrocarbures)
- Les silos
- Les enceintes de réacteurs nucléaires
- Eléments préfabriqués : poutres, dalles, poteaux...



Les ponts de diverses sortes

- Ponts poussés
- Ponts en encorbellement à voussoirs pré-fabriqués
- Ponts en encorbellement coulés en place
- Ponts à poutres
- Ponts à haubans
- PSI-DP Passages supérieurs ou inférieurs à dalle précontrainte
- VIPP Viaducs à travées indépendantes à poutres précontraintes
- PR-AD Poutres précontraintes par adhérence.

Si pour les ouvrages de génie civil, les réservoirs, les silos, les enceintes de réacteur nucléaires, le béton précontraint est utilisé pour ses résistances mécaniques, dans le domaine du bâtiment et du bâtiment industriel, il permet une économie de matériaux (aciers, bétons) qui réduit les coûts économiques et environnementaux. Les gains de résistances permettent également une réduction du nombre d'éléments porteurs, ce qui permet une plus grande liberté architecturale.

En savoir plus

<u>La pérennité du béton précontraint</u> / sous la direction de Bruno Godart. – AFGC – Presse des Ponts, 2014.







Essai à l'arbalète et courburemétrie pour mesurer tension et flexion

Posted on4 décembre 2018

Entretien avec Bernard Tonnoir, Expert à la Direction scientifique du lerm

Avant d'aborder la mesure de la précontrainte résiduelle, pouvez-vous nous dire quels sont les facteurs qui entraînent une perte de précontrainte dans les ouvrages ?

Il convient de distinguer trois types de pertes de précontrainte : les pertes instantanées (à la mise en oeuvre), les pertes différées mais aussi les pertes aléatoires (non prévues, donc).

Les pertes instantanées ont plusieurs origines, parmi lesquelles la perte de tension par frottement : cette perte est due aux frottements des câbles dans les gaines lors de leur mise en tension. Les pertes instantanées peuvent aussi provenir des pertes de tensions liées au recul de l'ancrage : glissement des armatures par rapport à leurs ancrages, ou déformation du massif d'ancrage lui-même. Enfin les déformations du béton lors des mises en tension contribuent également, pour une faible part, aux pertes instantanées.



Les pertes différées concernent la perte de tension liée au comportement différé du béton (retrait et fluage) et à la relaxation progressive de l'acier des câbles.

Enfin les pertes aléatoires de contrainte peuvent être dues à divers phénomènes comme une corrosion insidieuse produisant un affaiblissement ou même la rupture d'armatures, un défaut de fiabilité d'une technologie de précontrainte ou le non-respect d'une méthodologie de mise en oeuvre spécifiée.

Pour fixer les idées, les ponts qui ont aujourd'hui 50 ans, peuvent présenter, en moyenne, une perte d'environ 30% de leur précontrainte initiale. Ce chiffre, établi à partir de mesures faites sur les vieux ouvrages, est généralement un peu supérieur au calcul initial et réglementaire des pertes que pouvaient en faire les ingénieurs de l'époque : quelque peu optimistes, ils n'avaient pas alors le recul que nous avons maintenant sur les phénomènes différés qui affectent le béton précontraint.

Il n'y a donc pas de cause unique de la perte de précontrainte initiale... Maintenant, quelles sont les conséquences, pour un ouvrage, de la perte de précontrainte ?

La conséquence directe de cette perte de précontrainte est d'affecter la capacité portante résiduelle des ouvrages. Rappelons qu'un ouvrage doit être capable de supporter deux charges simultanément : l'une est sa charge permanente, c'est-à-dire son poids propre, et l'autre est la charge civile, charge de trafic réglementaire. Ainsi, si l'on s'intéresse aux VIPP, ouvrages d'une seule travée, l'addition de ces deux charges ne doit pas provoquer de traction à mi- portée, zone critique de tous les ouvrages de cette famille.

Mais l'incidence des pertes est différente selon que la travée est de petite ou de grande portée. Ainsi, pour les petits VIPP de 25 m, la charge totale à supporter se répartit en 50 % de charge permanente et 50 % de charge civile. Pour les grands VIPP de 45 m, c'est 75 % de charge permanente et 25 % de charge civile. Cela signifie que plus la portée de l'ouvrage est longue, plus la perte de précontrainte amputera significativement la capacité de service de l'ouvrage. C'est ce qui oblige à une évaluation la plus fine possible de la précontrainte résiduelle, de l'ordre de 1 %.

Alors, justement, comment évalue-t-on la tension des armatures de précontrainte ?

Cette évaluation a fait l'objet de recherches dès les années 70, compte tenu de la nécessité de contrôler des ouvrages précontraints isostatiques construits après-guerre (les méthodes divinatoires sans contact, comme l'imposition des mains n'ayant pas donné de résultat satisfaisant). La seule méthode trouvée a consisté à accéder aux armatures et à exercer sur elles un effort de traction. Il s'agit là de l'essai dit à l'arbalète. Pour l'anecdote, la première arbalète date de 1976 : elle a été employée la première fois pour le contrôle d'un ouvrage précontraint construit en 1949 à Douai.



Pouvez-vous nous décrire le principe de cette arbalète ?

L'arbalète repose sur le principe que plus une armature est tendue, plus l'effort nécessaire à la dévier latéralement de son tracé est important. Pour une arbalète dont l'empattement est d'environ 300 mm la flèche communiquée n'excédera pas 3 mm.

L'enregistrement en parallèle de l'effort exercé sur l'armature et de l'évolution de la flèche qui lui est communiquée donne une droite caractéristique dont la pente est exploitée pour évaluer la tension de l'armature soumise à l'essai. La lecture des résultats n'est cependant pas immédiate. En effet, certains effets perturbateurs comme l'allongement et la flexion parasites qui sont communiqués à l'armature lors de l'essai doivent être éliminés par le biais d'une calibration en laboratoire.







La justesse des résultats de l'essai dépend donc d'une simulation en laboratoire au plus proche des conditions réelles qui seront rencontrées sur le site, simulation qui permet de recueillir un faisceau de courbes de références. Par ailleurs, il convient d'évaluer certains coefficients correcteurs destinés à être appliqués à la mesure in situ.

L'ensemble de ces procédures d'essai doivent être minutieusement mises en œuvre si l'on veut rester dans la précision de $1\,\%$, telle que mentionnée plus haut. Un essai mal mené, réalisé sans respecter toutes les précautions utiles ni appliquer les correctifs nécessaires, peut amener à une évaluation beaucoup moins fiable, d'une précision de l'ordre de $5\,\%$.

L'essai à l'arbalète, que vous décrivez, peut-il s'appliquer à tous les types d'ouvrages ?

Oui, il peut s'appliquer à tous types d'ouvrages et à tous types d'unités de précontrainte constituées de fils ou de torons, grosses barres exceptées. Notons qu'il existe deux types d'arbalètes : l'une pour tester les fils et les torons individuellement, dont la tension peut aller de 2 à 20 tonnes. L'autre est utilisée lorsque les torons sont torsadés et qu'il faut alors tester l'ensemble du câble ; on utilise alors un châssis d'arbalète similaire, mais équipé d'accessoires différents. La tension de ces câbles peut aller de 50 à 100 tonnes.



Pouvez-vous, pour finir, nous dire deux mots de la courburemétrie?

La courburemétrie est une technique simple mais très précise qui permet de tester le comportement en flexion d'un ouvrage.







Photos Courburemétrie - Source : M. Michel Martini

Le dispositif est utilisé pour détecter un seuil de fissuration, ou l'ouverture d'un joint identifié (joint de voussoir, par exemple) lors d'une épreuve de chargement. Associé à une centrale d'acquisition, il peut constituer une sorte de « boîte noire » assurant la surveillance à long terme d'un ouvrage en béton précontraint.

En savoir plus:

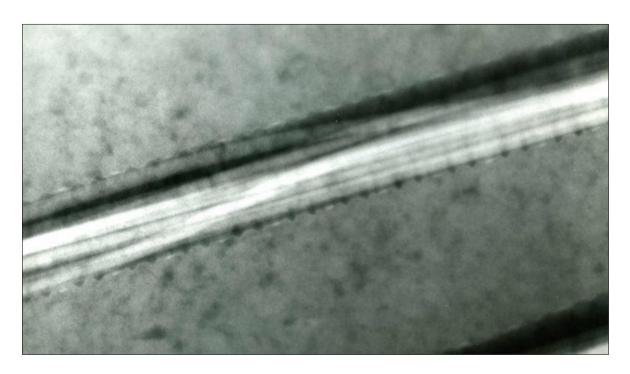
Deux méthodes d'évaluation mécanique des ouvrages d'art : Mesures à l'arbalète et courburemétrie / Bernard Tonnoir.- Colloque le Pont 2018.

Méthodes d'auscultation de la structure, mesures locales de fonctionnement : Courburemétrie, Fiche C3-12. Les Collections de l'IFSTTAR, 2015.

Évaluation mécanique des ouvrages d'art par la courburemétrie – Méthode d'essai des LPC n°82 / Bernard Tonnoir, Jean-Jacques Brioist et Bruno Godart.- IFSTTAR, 2014. (Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées).

Mesure de la tension des armatures de précontrainte à l'aide de l'Arbalète : Guide technique / Bernard Tonnoir.- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), 2009. (Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées).





La gammagraphie pour ausculter les gaines du béton précontraint

Posted on4 décembre 2018

Entretien avec Pierre Roënelle, Expert consultant en gammagraphie pour le LERM



Nous nous intéressons, dans cette lettre d'information, à l'analyse de l'état de la précontrainte.

Pouvez-vous nous dire ce qu'apporte la gammagraphie dans ce domaine ?

La gammagraphie est une technique d'auscultation qui sert principalement à visualiser le niveau de remplissage des gaines de précontrainte par le coulis et à apprécier la qualité de ce coulis, en fonction de sa compacité.

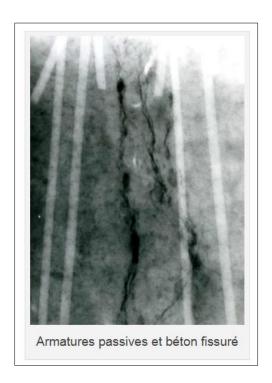
Les images obtenues appelées radiogrammes, permettent également d'apprécier l'aspect et la position des fils ou des torons de précontrainte dans leur gaine qui sont autant d'indices d'une possible



absence de tension d'origine ou de rupture en service, lorsque la gaine est peu ou pas remplie par le coulis.

La visualisation directe d'une rupture est extrêmement rare et elle se manifeste plutôt par le fait que le câble festonne, c'est-à-dire que des fils ou torons ne sont pas parallèles entre eux (sauf dans le cas des torons toronnés) ou qu'ils sont séparés des autres. Le troisième type d'information fournie par la gammagraphie concerne la gaine elle-même : ses déformations ou ses éventuels accidents tels qu'écrasement local, discontinuité ou forte oxydation.

L'auscultation permet aussi la visualisation des armatures passives. Elle permet enfin une appréciation de l'aspect du béton en révélant les hétérogénéités, l'aspect des joints de reprise ou entre éléments de structure et certaines fissures.



Le positionnement des armatures actives ou passives peut être acquis plus largement et plus facilement par la technique du radar géophysique, cependant la gammagraphie reste une bonne technique lorsqu'on recherche un positionnement très précis, par exemple avant perçage à proximité immédiate d'un ou plusieurs câbles.

Quel est le principe technique de la gammagraphie ?

On émet un rayonnement gamma qui traverse le matériau à ausculter pour venir impressionner un récepteur. L'image obtenue visualise les éléments de densités différentes, rencontrés au sein du matériau. Ce système d'émetteur-récepteur implique d'avoir accès aux deux faces de l'ouvrage.

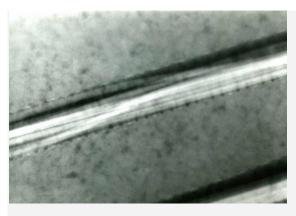


Il existe deux types d'émetteurs gamma permettant de radiographier du béton : le radioélément iridium 192 (Ir192), qui permet de traverser des épaisseurs de 25 voire 30 cm de béton dans certains cas ; le cobalt 60 (Co60), qui permet de traverser des épaisseurs jusqu'à 55 voire 60 cm. On peut également utiliser des rayons X de haute énergie produits par un accélérateur circulaire ou linéaire qui permettent de traverser jusqu'à 80 voire 100 cm de béton. Seul les projecteurs contenant l'Ir192 sont portables (environ 25 kg), ceux de Co60 sont transportables (220 à 350 kg suivant les appareils ; les générateurs de RX haute énergie transportables sont très rares (1 ou 2 en France, lourds et encombrants).

Avant 2008, dans le domaine de l'auscultation du béton, l'image était obtenue sur un support argentique qui devait être développé et fixée dans des bains chimiques. Depuis 2008, l'image virtuelle se forme sur un écran photostimulable à grains de phosphore qui sont excités par l'exposition aux rayons ionisants de l'émetteur. Le niveau d'excitation des grains du support exposé est lu par un scanner laser qui restitue une image numérique pouvant ensuite être améliorée si nécessaire par un logiciel de post-traitement de l'image. Cette technique permet un gain de temps important pour l'obtention du radiogramme, tant lors de l'exposition que lors de la phase de traitement et améliore l'environnement du fait de la suppression de la chimie de développement, sans dégradation importante de la qualité de l'image.



Torons dans une gaine vide de coulis



Plusieurs fils non tendus dans une gaine vide

Les supports sensibles sont généralement de 30 cm sur 40 cm. Les zones d'exposition, en nombre limité, sont choisies sur plans avant l'intervention en fonction des objectifs recherchés et de la nature de la structure. Ce caractère sélectif implique une approche statistique des recherches d'information.

Cette technique est utilisée dans le génie civil depuis 1968 ; la principale évolution technique concerne le passage au numérique que je viens de vous décrire.

Comment mettez-vous en œuvre cette auscultation?

En général, c'est une équipe de trois personnes qui met en œuvre l'auscultation. La pratique s'effectue dans le respect de la norme NF A09-202 : « *Principes généraux de l'examen radiographique*, à l'aide de rayons X et gamma, des matériaux béton, béton armé et



béton précontraint » ; elle est dominée par les conditions de radioprotection du personnel et de l'environnement. Pendant les expositions toute personne doit se tenir à distance ou être protégé par un obstacle physique.

Depuis 1968, les conditions réglementaires de la radioprotection en France se sont beaucoup renforcées, c'est pourquoi il n'est pas toujours possible d'intervenir sur toutes les parties d'un ouvrage ; le respect des conditions de radioprotection peut même interdire toute mise en œuvre de la gammagraphie sur certains ouvrages ou parties d'ouvrage, principalement en zone urbaine.

Sur quels types d'ouvrages intervenez-vous?

Nous intervenons sur tous types d'ouvrages de génie civil, principalement sur des ponts (poutres, caissons bien sûr, sur quelques dalles aussi malgré des problèmes d'épaisseur) mais aussi sur des bâtiments, des châteaux d'eau, des bateau-porte...

Il est également possible de radiographier des structures en pierre par exemple pour en rechercher les éléments de liaison métalliques (monuments historiques, statues ...).