

# Lerm Infos n° 29 : Le contrôle de la précontrainte résiduelle

22 mai 2015



Mai 2015

## Editorial

La précontrainte des bétons : tout le monde en a entendu parler, sans pour autant prétendre la connaître... et sans savoir que cette révolution majeure dans l'art de bâtir peut se trouver mise en défaut sur des ouvrages vieillissants, ou mal entretenus...

Aussi nous vous proposons dans ce nouveau numéro d'en résumer le principe, afin d'aborder un point essentiel : l'enjeu de sa maintenance dans notre patrimoine d'ouvrages concernés. Plus précisément : comment détecter et prévoir les manifestations de son vieillissement et donc les moyens d'en contrôler l'efficacité dans le temps. A cette fin, les différentes méthodes adaptées à son évaluation seront évoquées, complétées, comme c'est l'usage dans notre lettre d'information, par les points de vue éclairés de spécialistes du sujet, jusqu'à celui d'un Maître d'ouvrage particulièrement concerné : la société des Autoroutes du Sud de la France.

Mais cet éditorial se doit d'abord de rendre un hommage à Eugène Freyssinet, ingénieur bâtisseur qui, en 1928, déposa le premier brevet de béton précontraint. Cette invention allait révolutionner l'usage du béton, les conceptions et les façons même de bâtir.

Freyssinet connaissait parfaitement le béton, matériau dont il allait révolutionner l'ouvrage. Le raccourcissement différé du béton était un obstacle à l'obtention d'une compression permanente du béton. Il étudia donc minutieusement ces phénomènes, ses articles scientifiques en témoignent, et il se tourna 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.

L'architecte romain, qui construisit, entre 104 et 106 le pont d'Alcantara sur le Tage, fit en son temps graver dans le temple qui en est proche : « *ce pont est édifié pour l'éternité grâce à la voûte, artifice par*

*lequel la matière triomphe d'elle-même*... Deux mille ans plus tard, Eugène Freyssinet voyait l'association de la gravité et de l'arche comme antécédent à la précontrainte qu'il inventa, car il écrivait dans un article de 1949 « *L'usage de la gravité en tant que seul moyen d'union d'éléments a conduit à une définition très stricte et très limitée des formes architecturales possibles.* [1] » Et en effet, selon la définition qu'il donna de la précontrainte dans son brevet de 1928 [2] la voûte est bien un moyen de mettre en compression par gravité ses éléments constitutifs. Albert Caquot fit même remarquer son caractère immédiatement décisif : « *c'est une chose que d'appliquer de vieilles routines, fruits de l'expérience concrète et simples applications d'un principe informulé, et c'en est une autre que d'établir ce principe sous une forme générale et susceptible de déboucher sur une application universelle.* »

Bonne lecture !

Bernard Quénée, Directeur général délégué

Philippe Souchu, Rédacteur en chef

[1] E. Freyssinet, « *Exposé d'ensemble de l'idée de précontrainte* », Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics, juin 1949.

[2] « *Précontraindre une construction, c'est la soumettre, avant l'application des charges, à des forces additionnelles déterminant des contraintes telles que leur composition avec celles qui proviennent des charges donne en tout point des résultantes inférieures aux contraintes limites que la matière peut supporter indéfiniment sans altération* ».

## Dossiers techniques



### **Le principe de la précontrainte**

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...



### **L'évaluation de la précontrainte résiduelle**

**Entretien avec Bernard Tonnoir, expert à la direction scientifique du Lerm...**



### **L'auscultation par gammagraphie du béton précontraint**

**Entretien avec Pierre Roënnelle, Chef d'unité au CEREMA, unité « Pathologie des Structures et Diagnostic », à Bron (69)**



### **La précontrainte additionnelle**

**Entretien avec François Tépily, Directeur technique national de Freyssinet France...**



### **La problématique VIPP des autoroutes ASF**

**Entretien avec Hervé Guérard, Direction technique de l'infrastructure d'ASF...**

# Portrait



## Portrait de Christophe Carde

Directeur du département Ouvrages et Patrimoine du Lerm

# Actualités



Vient de paraître : La pérennité du béton précontraint, sous la direction de Bruno Godart

# Agenda

**C'était hier...**

**Journées Ouvrages d'Art, du 20 au 22 mai 2015, à Nantes.**

Organisées conjointement par le Cerema et l'Ifsttar, les Journées Ouvrages d'Art du réseau scientifique et technique (RST) du ministère en charge du développement durable (MEDDE), sont le rendez-vous annuel et traditionnel de tous les experts « ouvrages d'art » du RST.





**Valoriser les matériaux alternatifs en technique routière en régions PACA et Languedoc-Roussillon - 19 mai 2015 à Aix en Provence (13)**

Journée d'échanges à l'attention des acteurs des travaux publics : maîtrise d'ouvrage, maîtrise d'oeuvre et entreprises



**Les matériaux alternatifs en technique routière, le 4 juin 2015 à Clermont-Ferrand (63)**

L'objectif de cette journée est tout d'abord de présenter les outils méthodologiques élaborés par le Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Environnement (MEDDE) en partenariat avec les professionnels. Plusieurs exemples abordés selon les points de vue des différents acteurs présentent les prescriptions et exigences opérationnelles relatives à l'acceptabilité mécanique et environnementale des matériaux alternatifs...



**Façades en ciment naturel – Quels enjeux pour Marseille ? Le 21 mai 2015 à Marseille**

En partenariat avec le groupe Vicat, le Cercle des Partenaires du Patrimoine organise une journée d'information sur les enduits en ciment naturel à Marseille le 21 mai 2015 au musée d'Histoire...

# REMERCIEMENTS

## LERM-Infos



Directeur de la publication : *Bernard Quénée*

Rédacteur en chef : *Philippe Souchu*

Nos remerciements à Hervé Guérard, Pierre Roënelle, François Téply, Bernard Tonnoir, Christophe Carde... et Eugène Freyssinet !

# Le principe de la précontrainte

10 mai 2015

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.

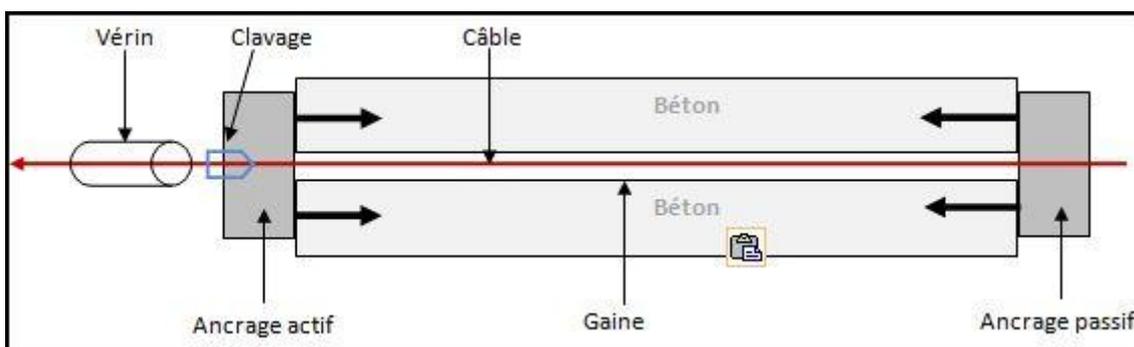
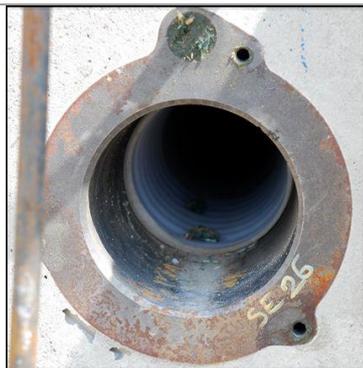


Schéma d'un dispositif de précontrainte

## 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 injectés 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.



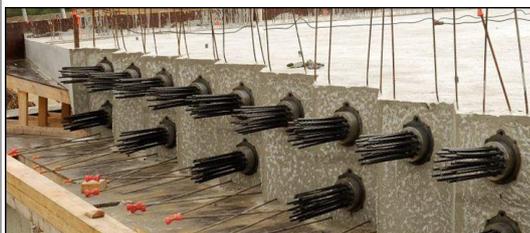
Gaine et pièce d'appui du vérin



Mise en place du vérin de tension



Events de tubes d'injection des gaines



Vue générale d'une zone d'ancrage

Source : © CUGC d'Egletons

### 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 off-shore

Les structures industrielles, agricole ou commerciales

Les réservoirs (d'eau, d'hydrocarbures)

les silos

Les enceintes de réacteurs nucléaires

Éléments 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.

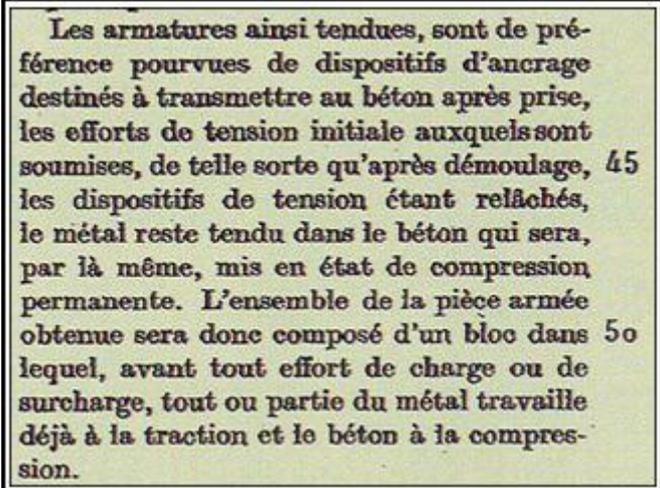
# Eugène Freyssinet et la précontrainte

9 mai 2015

C'est en 1928 qu' Eugène Freyssinet et Jean Charles Séailles déposent leur premier brevet concernant « un procédé de fabrication de pièce en béton armé » :

une poutre est coulée dans un coffrage, dans lequel, au préalable, des câbles ont été mis sous tension.

Lorsque le béton a durci, on libère l'extrémité des câbles qui transmettent leur contrainte au béton qui se met alors en compression.



Les armatures ainsi tendues, sont de préférence pourvues de dispositifs d'ancrage destinés à transmettre au béton après prise, les efforts de tension initiale auxquels sont soumises, de telle sorte qu'après démoulage, les dispositifs de tension étant relâchés, le métal reste tendu dans le béton qui sera, par là même, mis en état de compression permanente. L'ensemble de la pièce armée obtenue sera donc composé d'un bloc dans lequel, avant tout effort de charge ou de surcharge, tout ou partie du métal travaille déjà à la traction et le béton à la compression.

Extrait du brevet de 1928

Le terme de précontrainte ne sera employé par Freyssinet qu'en 1933.

En 1939, Freyssinet brevète le système de précontrainte par vérin hydraulique de tension et cône d'ancrage en béton fretté

L'ancrage est un élément de béton percé d'un trou conique (le cône femelle) par lequel passent les fils d'acier. Ils passent également dans un cône mâle en béton. Ils sont mis en tension et bloqués par la compression du cône mâle dans le cône femelle. Les fils, relâchés à leurs extrémités, transmettent leur contrainte à l'ouvrage via le dispositif d'ancrage.

Ce brevet ne sera accordé qu'en 1947 du fait de la guerre. Le procédé évoluera au fil du temps dans le sens d'une plus grande efficacité : apparition des torons, clavettes d'acier à la place des cônes... L'histoire des grands ouvrages en béton précontraint de l'après guerre se confond avec l'amélioration de ce procédé de précontrainte.



E. Freyssinet, pont d'Esbly, sur la Marne, 1947



E. Freyssinet, pont d'Esbly, sur la Marne, 1947

# L'évaluation de la précontrainte résiduelle

8 mai 2015

Entretien avec Bernard Tonnoir, expert à la direction scientifique du lerm

## **Avant d'aborder la mesure de la précontrainte résiduelle, peux-tu, Bernard, 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.



Essai à l'arbalète

### **Peux-tu 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'empatement est d'environ 300 mm la flèche communiquée n'excèdera 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 tu décris, 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.

**Peux-tu, 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. 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 :*

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

# L'auscultation du béton précontraint par gammagraphie : Entretien avec Pierre Roënnelle, Chef d'unité au CEREMA, unité « Pathologie des Structures et Diagnostic », à Bron (69)

7 mai 2015



**Nous nous intéressons, dans cette lettre d'information, à l'analyse de l'état de la précontrainte. Pouvez-vous, Monsieur Roënnelle, 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 en coulis des gaines de précontrainte et à apprécier la qualité de ce coulis, en fonction de son opacité.

Les radiogrammes obtenus permettent également d'apprécier l'aspect et la position des fils et des torons dans leur gaine qui sont autant d'indices d'une possible perte de tension. 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 son trajet n'est pas parallèle aux autres.

Le troisième type d'information fournie par la gammagraphie concerne la gaine elle-même : ses déformations ou ses éventuels accidents.

L'auscultation permet aussi la visualisation du positionnement du ferrailage passif. Elle permet enfin une appréciation de l'aspect du béton environnant en révélant les hétérogénéités et les fissures. Le positionnement des armatures actives ou passives peut être acquis plus largement et plus facilement par la technique du radar géophysique.

## **Quel est le principe technique de la gammagraphie ?**

On émet un rayonnement gamma qui traverse une masse dense pour venir impressionner un récepteur.

L'image obtenue traduit les obstacles rencontrés au sein de la masse traversée par le rayonnement. Ce système d'émetteur-récepteur implique d'avoir accès aux deux faces de l'ouvrage.

Nous intervenons avec deux types d'émetteurs : un émetteur d'iridium 192, qui est portable et qui permet de traverser des épaisseurs de 25 à 30 cm de béton et un émetteur de cobalt 60, qui permet de traverser des épaisseurs de 55 à 60 cm ; il pèse 350 kg et est donc alors installé dans une remorque.

Auparavant l'image reçue devait être développée sur un film argentique. Aujourd'hui, elle est reçue sur un écran photostimulable à grains de phosphore qui sont excités par l'exposition aux rayons ionisants. 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 traitement de l'image.



Image obtenue par gammagraphie

Les tirs s'effectuent sur des fenêtres d'environ 30 cm sur 40 cm. Les zones d'exposition sont donc choisies avant l'intervention sur plans et en fonction de nos objectifs. Le caractère sélectif des tirs implique une approche statistique des recherches d'information.

Cette technique est utilisée dans le génie civil depuis 1967-1968 ; la principale évolution 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* » et est dominée par les conditions de radioprotection du personnel et des personnes environnantes. Pendant les expositions toute personne doit se tenir à distance ou être protégé par un obstacle physique.

#### **Sur quels types d'ouvrages intervenez-vous ?**

Nous intervenons sur tous types d'ouvrages de génie civil, sur des ponts bien sûr, sur des dalles aussi, malgré des problèmes d'épaisseur, des bâtiments, des châteaux d'eau et même, récemment, un bateau-porte du port de Marseille sur lequel le lerm a d'ailleurs lui aussi travaillé.

# La précontrainte additionnelle : entretien avec François Téply, Directeur technique national de Freyssinet France

6 mai 2015



## **Quel rapport l'entreprise Freyssinet entretient-elle avec l'inventeur de la précontrainte ?**

On peut parler d'un rapport de filiation directe : lors de l'entreprise de sauvetage de la Gare maritime du Havre en 1934, Eugène Freyssinet rencontre l'entrepreneur Edme Campenon, avec lequel se met en place une longue collaboration. En 1943 est créée, par Campenon, la STUP (Société technique pour l'utilisation de la précontrainte) qui devient « Freyssinet International » en 1976. Depuis, l'entreprise ne s'est pas limitée à la précontrainte : elle a développé les techniques de réparation et de renforcement. Elle est

également bien connue pour son usage des haubans.

## **La précontrainte additionnelle que vous pratiquez s'applique d'une part à la réparation des structures, d'autre part à leur renforcement... qu'est-ce qui distingue la réparation du renforcement ?**

Le renforcement par précontrainte additionnelle s'effectue sur une structure saine dont on souhaite augmenter la capacité portante. La réparation, elle, concerne une structure dont les désordres manifestent une pathologie de ses matériaux constitutifs ou un dysfonctionnement structural.

## **Si l'on se place donc dans la perspective d'une réparation, quand choisit-on d'appliquer une précontrainte additionnelle ?**

Je répondrai d'une façon générale en vous disant : dans tous les cas où cela fait du bien à la structure, c'est-à-dire quand elle a besoin d'être soulagée... qu'il s'agisse d'ailleurs d'une structure déjà précontrainte ou non.

Le principe est d'introduire des forces supplémentaires qui soulagent la structure des contraintes qu'elle subit.

C'est évidemment un diagnostic sérieux de l'ouvrage qui amène à la décision d'y ajouter de la précontrainte pour maintenir sa capacité de service.



Gaine de précontrainte additionnelle avec déviateur

**Cette solution de la précontrainte additionnelle est-elle toujours possible à mettre en œuvre ?**

Cette solution demande que la structure accepte d'être raccourcie, c'est-à-dire qu'elle puisse être mise en compression. C'est presque toujours possible pour des ponts, qui sont, au fond, des structures indépendantes. La problématique est plus complexe dans les bâtiments : quand par exemple, on veut ajouter de la précontrainte à un plancher, il faut alors tirer sur les murs dont il est solidaire.

**Dans le cas d'un ouvrage déjà précontraint, arrive-t-il que l'on soit dans l'obligation de changer toute la précontrainte originelle sans condamner l'ouvrage ?**

Oui... Cela est rare, mais c'est un choix qui peut être fait. Cela nous est arrivé sur un pont autoroutier : nous avons installé une précontrainte additionnelle provisoire. Nous avons découpé et remplacé entièrement les câbles d'origine. Nous avons ensuite ôté la précontrainte provisoire.

**Sur un ouvrage en place, la précontrainte additionnelle vient s'ajouter à la précontrainte initiale...**

**Elle est forcément extérieure au béton ?**

C'est presque toujours le cas, en effet... Pour l'anecdote, je peux cependant citer le cas d'une piscine pour laquelle le choix a été fait de carotter pour permettre le passage des câbles dans le béton.

**Dans les ouvrages sur lesquels vous intervenez, les problèmes ne sont pas forcément liés à des problèmes de résistance mécanique...**

Disons que nous résolvons les problèmes de résistance mécanique, même s'ils proviennent de pathologies de matériaux : attaque chimique du béton, corrosion des armatures passives ou de précontraintes, ou autres... Nous nous situons donc dans cette double problématique de résistance et de durabilité que doit cerner le diagnostic dont je vous parlais en commençant cet entretien.

Outre la réparation par ajout de précontrainte, nous traitons aussi les problèmes de durabilité, par exemple en installant des protections cathodiques, des inhibiteurs de corrosion, en purgeant les bétons pollués, etc...

**Si l'on aborde maintenant la question du renforcement des structures, qu'est-ce qui motive un tel renforcement ?**

La motivation peut venir d'une augmentation prévisible de sa charge : intensification du trafic, alourdissement de l'ouvrage lui-même par ajout d'éléments... Cela peut-être aussi lié à une évolution

réglementaire qui va toujours dans le sens d'une élévation de la capacité portante : élévation de la charge climatique ou sismique, par exemple.

Enfin le renforcement est effectué aussi sur les structures les plus anciennes pour lesquelles le calcul originel était optimiste et où la perte de précontrainte avait été sous évaluée, le plus souvent par manque de recul sur les phénomènes de comportement différé du béton ou de relaxation des câbles.

### **Quel est le problème majeur qui se pose dans la mise en œuvre d'une précontrainte additionnelle ?**

La précontrainte additionnelle peut se résumer à trois éléments : les câbles, les déviateurs, les ancrages. Ce sont les ancrages qui sont les plus problématiques : ils doivent parfois supporter des tensions de 100 tonnes et plus. Il s'agit de massifs de béton qui sont solidarités à l'ouvrage par des barres de précontraintes qu'on appelle des clous. La technique est toujours la même, mais il convient à chaque fois de trouver des mises en œuvre originales.



Massif d'ancrage avec barres de précontrainte et plaques d'ancrages

Je précise que la réparation des structures n'implique pas forcément l'ajout de précontrainte additionnelle. Ainsi pour résoudre des problèmes locaux de manque d'armature, le collage tissu de fibres de carbone sur le béton est une solution que nous pratiquons couramment avec efficacité. Les solutions apportées dépendent, comme nous l'avons souligné, du diagnostic initial et des préconisations qui en découlent.

# La problématique VIPP des autoroutes ASF

5 mai 2015

Entretien avec Hervé Guérard, Direction technique de l'infrastructure d'ASF



**Monsieur Guérard, nous nous intéressons, dans cette lettre d'information, au béton précontraint et, plus particulièrement, à l'évaluation de la précontrainte résiduelle. Pouvez-vous nous situer la problématique rencontrée au regard de cette question en ce qui concerne le patrimoine d'ouvrages d'art dont vous avez la charge ?**

Si nous voulons d'abord situer la question dans le temps, nous devons remonter à 2005, année où la Tutelle des Sociétés Concessionnaires d'Autoroute les a alertées sur la fragilité des ouvrages d'art de type VIPP (*viaducs* à travées indépendantes à poutres précontraintes).

## **Qu'est ce qui motivait cette alerte ?**

Dans les années qui ont précédé cette alerte, certains VIPP avaient dû être détruits à la suite de désordres mettant gravement en cause leur aptitude à supporter les charges normales d'exploitation. Ces démolitions étaient impliquées par de forts déficits de précontrainte dus à la corrosion ou à la rupture d'armatures, et ces désordres n'avaient pu être décelés par aucun signe extérieur lors des inspections détaillées antérieures.

## **Ces ouvrages présentaient donc un risque ?**

Un risque potentiel, oui : les VIPP sont des structures isostatiques qui, à l'inverse des structures hyperstatiques, ne présentent pas de redondances. Par ailleurs, dans les années 60 ces structures étaient souvent optimisées, et présentaient donc peu de réserves de résistance.

ASF était d'autant plus concerné par ce problème que sur les 116 VIPP de l'ensemble du réseau autoroutier français, 57 sont dans le patrimoine de la société et 35 d'entre eux ont été construits entre 1962 et 1970. A cette époque, nous entreprenons d'ailleurs de démolir un pont qui enjambe la Drôme, pont dont les poutres présentent une corrosion avancée et des câbles endommagés et même rompus.

## **Ce que vous constatez lors de cette démolition vient confirmer la nécessité d'une prise en compte générale de la question... Comment organisez-vous donc cette vaste campagne de contrôle ?**

A la suite de cette alerte de notre Tutelle, nous avons fait réaliser des études de criticité, sur base documentaire, qui ont permis de hiérarchiser nos VIPP afin de démarrer les diagnostics par ceux le nécessitant le plus.

La campagne de diagnostics et de recalculs est alors planifiée dès 2008 et se terminera en 2016.

**C'est sur cette campagne que le lerm intervient pour diagnostic et contrôle...**

Exactement. Le lerm est intervenu dès 2008 sur 25 ouvrages répartis sur l'A7 et l'A9, et sur 2 ouvrages complémentaires de l'A7 en 2014.

### **... Et la précontrainte est en cause dans tous les cas de désordres rencontrés ?**

Oui, dans une certaine mesure, puisque le principe technique simple et économique de ces ouvrages est basé sur la précontrainte de poutres... mais les facteurs de désordres sont multiples et souvent associés. Le problème majeur est celui de la corrosion des armatures actives et des ancrages. Ce problème provient d'un défaut de conception, car à l'époque l'étanchéité des tabliers n'était pas jugée nécessaire, la compression du béton semblant suffisante à son étanchéité. Ce défaut est souvent aggravé par un défaut d'exécution, dans la mesure où la protection et la passivation des aciers dans les gaines, ainsi que le cachetage des ancrages, présentent de graves anomalies liées à de très nombreux défauts d'injection de coulis et, parfois, à l'absence même de coulis ! Or la corrosion des armatures sous contrainte entraîne rapidement une dégradation des câbles et parfois leur rupture, ce qui amoindrit considérablement la capacité portante des ouvrages.

Enfin, l'enthousiasme des concepteurs d'alors pour la précontrainte, qui en était à ses débuts, les a conduit à mettre peu d'armatures passives dans le béton. Ceci a été par la suite rectifié dans le règlement BPEL.

### **Comment en êtes-vous venu à ces conclusions ?**

Comme on l'a vu précédemment, la précontrainte en était à ses débuts, et certains phénomènes comme les pertes de tension différées dans les câbles, la relaxation, etc. étaient mal connus. Les calculs d'époque avaient donc tendance à surestimer la tension dans les câbles.

Afin de réaliser des recalculs les plus proches possible de la réalité, il est nécessaire [d'évaluer la précontrainte résiduelle des ouvrages à l'aide de l'arbalète](#). Ceci implique la réalisation de fenêtres jusqu'aux câbles précontraints dont on ouvre d'ailleurs également les gaines. Outre la mesure de la précontrainte résiduelle, ces fenêtres permettent donc de prélever dans les gaines du coulis (quand il y en a) et du liquide (très rarement), ainsi que de réaliser des explorations endoscopiques (en l'absence de coulis) qui permettent, liés à des contrôles des abouts de poutres et des ancrages, d'obtenir une vue complète de l'état du système de précontrainte.

Je précise que la visualisation des armatures actives, ainsi que le remplissage des gaines ont au préalable été contrôlés au moyen d'une campagne systématique [d'inspection gammagraphique](#), qui a permis d'orienter en partie le choix de l'emplacement des fenêtres.

Bien sûr, nous nous sommes également intéressés au contrôle du béton armé et nous avons donc procédé à des séries de prélèvements pour soumettre les échantillons à la classique batterie de tests : résistance à la compression et module d'élasticité, caractérisation de la formulation (béton et ciment), mesure de l'épaisseur d'enrobage, mesure de l'activité de corrosion, de la profondeur de carbonatation, de la migration des ions chlorures et sulfates.

**Après ce diagnostic approfondi quelles réparations avez-vous dû entreprendre ?**

Nous avons fait procéder au recalcul des ouvrages en y intégrant différentes hypothèses de vieillissement. Au final deux ouvrages ont dû être renforcés au moyen de précontrainte additionnelle et une quinzaine ont été renforcés localement au moyen de tissus de fibres carbone pour pallier aux relatifs défauts d'armatures passives.

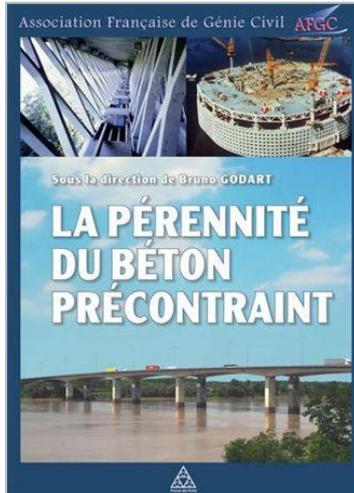
**Et pour ce qui concerne les gaines dont le défaut de remplissage était un souci majeur ?**

Il faut noter que gaine vide n'est pas synonyme de corrosion de câbles : beaucoup de câbles non protégés par du coulis se trouvent être en parfait état. Heureusement ! Les gaines sont alors refermées et laissées en l'état, en veillant à maintenir la protection des zones de cachetage.

Pour deux ouvrages pour lesquels certains câbles sont atteints de corrosion à proximité des ancrages, nous avons opté pour un procédé d'injection par pompe alternative à ultrasons de puissance. Ce procédé, breveté par PMD/ATEAV, permet l'injection, à saturation et sous basse pression, d'un inhibiteur de corrosion (nitrite de calcium), y compris dans les parties de gaines injectées. Le procédé permet également la détection précise des défauts d'enrobage dans les gaines. Ces défauts sont ensuite corrigés par l'injection, par le même moyen, d'un nouveau coulis permettant de restituer l'enrobage initial nécessaire.

# Vient de paraître : La pérennité du béton précontraint

4 mai 2015



Fin 2014, est paru aux Presses des Ponts, sous la direction de Bruno Godart, un ouvrage dont le projet date de plus de 20 ans : une défense et illustration du béton précontraint. Le livre, autant que la technique et les réalisations qu'elle a permises, relèvent d'une belle épopée.

Tout y est : la naissance, l'histoire et l'évolution de cette technique, les règles de l'art et l'évolution des règlements, l'histoire de la construction précontrainte et l'état des lieux français du patrimoine d'ouvrages réalisés par post-tension, la pré-tension dans le bâtiment, les pathologies et la réparation des ponts précontraints, enfin une approche très actuelle de la démarche durabilité.

**La pérennité du béton précontraint**, sous la direction de Bruno Godart, AFGC – Presses des Ponts, 2014

# Portrait de Christophe Carde, Directeur du Département Ouvrages et patrimoine du Lerm

3 mai 2015

Entretien avec Christophe Carde,  
Directeur de Département Ouvrages et Patrimoine du lerm



**Christophe, tu diriges le département ouvrages et patrimoine du lerm... es-tu plutôt ouvrages ou plutôt patrimoine ?**

Comme il m'est impossible de choisir, je te répondrais que les ouvrages sont un patrimoine...

**Je reconnais là immédiatement le directeur du département du lerm mais... mon portrait est un peu court !**

Disons alors que je suis plutôt ouvrages parce que je suis passionné par les techniques du génie civil dans toutes leurs dimensions : utilitaires certes, mais aussi esthétiques. Je trouve très intéressante l'alliance contemporaine de l'ingénierie et de l'architecture.

**Tu me racontes un peu ton parcours et ta formation ?**

Mon bac en poche... Disons que je suis alors bien jeune et que ma vocation est encore assez incertaine. C'est donc en partie par amitié que je m'inscris à l'université de géologie de Pau. Pour continuer en licence et faire ensuite une maîtrise de géologie appliquée je dois gagner Bordeaux. Comme l'appétit vient en mangeant, mon intérêt pour la géologie grandit avec la poursuite de mes études. J'enchaîne donc par un DEA de génie civil à l'INSA de Toulouse...

**... Le *donc* que tu viens de prononcer signifie qu'il y a, pour toi, un rapport logique entre l'étude de la géologie et le génie civil...**

Oui, certainement : l'aspect matériau du génie civil me semblait très proche de l'intérêt que je portais à la géologie. Le béton, dont j'étudierai la dégradation par lixiviation lors de mon doctorat, est au fond un matériau minéral artificiel, certes, mais que la géologie, ses méthodes et sa chimie peuvent parfaitement étudier. Mais nous n'en sommes pas là, car l'obtention de mon DEA m'ouvre alors au bénéfice du service militaire...

Libéré de ces obligations, comme on dit, je travaille ensuite un temps à la division Transfert de technologie du LMDC. C'est là, que, pour la première fois, j'entends parler du lerm.

A cette époque démarre mon travail de thèse, au LMDC, travail qui s'inscrivait dans un contrat de recherche soutenu par l'ANDRA et le CEA. Dans le cadre de la durabilité des bétons de conteneurs de

déchets radioactifs, il s'agissait de prévoir les propriétés résiduelles des matériaux cimentaires soumis à l'action des eaux de pluie et de ruissellement.

### **C'est après ta thèse que tu arrives au lerm ? Comment cela se produit-il ?**

Très simplement, tu vas voir... Le laboratoire est en pleine phase de développement et cherche donc des collaborateurs. Je rencontre Hugues Hornain pour un entretien... C'est ainsi que j'arrive à Paris en 1996 pour devenir ingénieur d'études.

### **C'est juste avant le départ du laboratoire vers Arles...**

En effet, je ne resterai que quelques mois à Bagnolet... Pas fâché de rejoindre une région du Sud de la France, je dois le dire !

### **Tu connaissais déjà Arles et sa région ?**

Oui... J'y avais fait un voyage scolaire de deux jours quand j'étais à l'école primaire !

### **Comment se passe ton arrivée au lerm ?**

Le milieu est tout neuf pour moi : j'écoute, j'observe, j'apprends. Ce qui a été très encourageant, c'est la confiance que l'on m'a faite d'emblée : tu peux prendre tes responsabilités, mais celles-ci ne sont pas écrasantes, dans la mesure où le lerm est une équipe où les échanges et les questionnements sont toujours ouverts, ce qui, bien sûr, est favorable aux apprentissages toujours nécessaires.

Petit à petit, avec l'expérience, je deviendrai responsable du bureau d'études puis directeur technique. Cette direction technique est plutôt une fonction de transversalité. En l'exerçant, je me suis toujours souvenu de l'intérêt qu'ont eu, dès mon arrivée dans l'entreprise, le travail d'équipe et les échanges de compétences qu'il autorise.

### **Que change, pour toi, la direction du département ouvrages et patrimoine ?**

Disons que je renoue avec l'action des études... Chaque étude un peu complexe est une aventure qui te met aux prises avec une problématique et des interlocuteurs nouveaux. C'est stimulant : c'est là un moteur du développement permanent des connaissances.

### **A propos d'étude complexe, c'est toi, qui a piloté au lerm le dossier des VIPP d'ASF, tu peux nous en parler un peu ?**

Cette étude était pour nous un dossier atypique. Atypique d'abord par sa taille puisqu'il s'agissait du diagnostic général de 26 ouvrages ! Atypique aussi par sa forme : nous avons en effet répondu à l'appel d'offre en groupement d'entreprises. Il a donc fallu piloter une importante coopération de personnes et de moyens.

Cette étude a également été l'occasion de rencontres professionnelles, techniques et humaines très fortes. Je pense notamment à la rencontre avec Bernard Tonnoir du CETE de Lille qui est intervenu avec nous sur [l'évaluation de la précontrainte résiduelle](#) des VIPP. Notre travail en commun a permis de nouer une forte estime réciproque, si bien qu'après la prise de sa retraite, Bernard Tonnoir nous a rejoints et a apporté au

lerm la maîtrise complète de [l'essai à l'arbalète](#). Grâce à lui et à sa grande expérience, nous avons acquis une connaissance approfondie de la caractérisation des aciers de précontrainte, un bon savoir-faire concernant les procédures de calibration et une approche précise des correctifs à appliquer aux essais in situ... autant d'éléments absolument nécessaires à une évaluation aussi fine que possible de la précontrainte résiduelle.

**Trouves-tu le temps pour une vie après le lerm ?**

Pour plusieurs vies... On ne laisse pas sa curiosité aux portes du labo ! Une vie de famille, de musique, de sport, de loisir, de voyages...