



HAL
open science

Instrumentations traditionnelles et innovantes d'un essai de flexion à rupture sur une poutre précontrainte de pont

Adrien Houel, Christophe Aubagnac, Didier Germain, Jean-Philippe Maherault, Jean-Jacques Brioist, Sylvain Chataigner, Aghiad Khadour, Marc Quiertant

► To cite this version:

Adrien Houel, Christophe Aubagnac, Didier Germain, Jean-Philippe Maherault, Jean-Jacques Brioist, et al.. Instrumentations traditionnelles et innovantes d'un essai de flexion à rupture sur une poutre précontrainte de pont. 7ème Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation, Jan 2016, Saint-Nazaire, France. hal-01280207

HAL Id: hal-01280207

<https://hal.science/hal-01280207>

Submitted on 29 Feb 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Instrumentations traditionnelles et innovantes d'un essai de flexion à rupture sur une poutre précontrainte de pont

Adrien HOUEL¹, Christophe AUBAGNAC², Didier GERMAIN¹, Jean-Philippe MAHERAULT³, Jean-Jacques BRIOIST⁴, Sylvain CHATAIGNER⁵, Aghiad KHADOUR⁶, Marc QUIERTANT⁶

¹Cerema, Département Laboratoire de Lyon, 25 avenue François Mitterrand, CS 92803, 69674 Bron cedex

²Cerema, Département Laboratoire d'Autun, Boulevard Giberstein, BP 141, 71405 Autun cedex

³Cerema, Laboratoire d'Aix-en-Provence, Pôle d'activités Les Milles, avenue Albert Einstein, CS 70499, 13593 Aix-en-Provence cedex 3

⁴Cerema, Laboratoire de Lille, 42bis rue Marais, Sequedin, BP99, 59482 Haubourdin cedex

⁵IFSTTAR, MAST, Route de Bouaye, CS4 44344 Bouguenais cedex

⁶IFSTTAR, Départements MAST et COSYS, 14-20 Boulevard Newton, 77420 Champs-sur-Marne

adrien.houel@cerema.fr

Abstract : *Traditional et innovative instrumentation to monitor the bending break of a concrete prestressed beam*

Cerema in France has set up an experimental project about a prestressed concrete bridge beam recovered during the demolition of a bridge. Before testing, an accurate diagnosis of the beam has been achieved. Three series of tests were carried out in 2014: bending tests before reinforcement, after a first phase of reinforcement bonded composite materials, and finally after a second and final phase of reinforcement bonded composite materials. This final test was gradually led to a complete break of the beam. Traditional instrumentations were installed on the beam: 187 measuring points were monitored at a frequency of 10 Hz by twenty five PEGASE WiFi connected sensors. Innovative instrumentations were also used and compared with the traditional ones. This experience on a precast, prestressed concrete bridge beam reinforced with FRP allows us to deliver some first lessons. The real break of the beam was held to a force of about 61 tonnes, corresponding to a bending at mid-span to about 20 cm. Thereafter, the effort has been decreasing. The complete shearing by delamination of the bonded composite reinforcements (which have thus accompanied the beam to maximum effort of loading), was held to a force of about 59 tonnes, corresponding to a bending to about 27 cm. The complete break in bending in a controlled section (cracking up in the upper table) was obtained for an imposed displacement of more than 40 cm.

1. Contexte et projet expérimental

Les Viaducs à travées Indépendantes en Poutres Précontraintes (VIPP) ont été construits en nombre important en France en particulier avant 1970. Ces ouvrages dits «de première génération» ont été conçus dans l'idée d'une précontrainte totale, durable en raison de la parfaite étanchéité du béton comprimé. Dans la réalité, un certain nombre de ces anciens VIPP souffrent de la corrosion des câbles de précontrainte, corrosion avec un caractère éminemment aléatoire [1]. Certains ouvrages sont ainsi très vulnérables à la corrosion de la précontrainte notamment en raison de leur déficit en aciers passifs et de la possibilité de ruptures fragiles notamment vis à vis de l'effort tranchant.

Les matériaux composites collés sont venus compléter la panoplie des techniques de renforcement des VIPP. Les recommandations provisoires de l'AFGC [2] prévoient le cas du recours aux matériaux composites pour remédier à une insuffisance d'aciers passifs des structures en béton précontraint, notamment les aciers passifs verticaux à proximité des appuis pour la reprise des cisaillements d'effort tranchant. De nombreuses interrogations demeurent sur l'intérêt des matériaux composites collés pour renforcer des structures en béton précontraint «critiques», sur le comportement des matériaux composites collés au droit des fissures pré-existantes.

Le VIPP de Clerval sur le Doubs a été construit entre 1952 et 1954 (Figure 1). Souffrant de défauts d'étanchéité et d'injection ayant généré la corrosion de câbles de précontrainte et l'affaiblissement de la capacité portante de l'ouvrage, celui-ci a été démolí et reconstruit en 2002.

Le laboratoire d'Autun a alors récupéré la poutre de rive amont de la travée Rive Droite (longueur de 30 m et hauteur d'1,30 m), poutre endommagée puisque présentant avant la démolition de l'ouvrage deux fissures de flexion d'ouverture maximale de 0,2 mm (sections dénommées par la suite S2 et S4).

Le projet prévoit de solliciter la poutre en flexion trois points en alternant des phases de renforcement par matériaux composites collés et des phases d'essais de chargement. Ces essais de chargement ont été menés en 2014, jusqu'à la rupture de la poutre en flexion.



Figure 1 : Vue de la poutre de rive amont et de la structure de l'élargissement en extrémité Rive Droite de l'ancien pont de Clerval sur le Doubs.

Instrumentations traditionnelles et innovantes d'un essai de flexion à rupture sur une poutre précontrainte de pont

Les principaux bénéfices attendus au terme de l'expérimentation sont ainsi :

- une aide aux Maîtres d'Ouvrage pour la gestion du risque « VIPP » : amélioration des méthodologies de surveillance et d'auscultation, d'évaluation structurale des VIPP,
- des résultats validés sur l'efficacité des renforcements composites collés notamment pour les ouvrages « critiques », qui nécessitent des renforcements « d'urgence » dans l'attente des conclusions d'une étude de diagnostic approfondie,
- des règles de justification adaptées notamment vis à vis du contrôle de la fissuration,
- une actualisation des recommandations provisoires de l'AFGC.

Les études préalables ont prévu un renforcement de la poutre à la flexion par lamelles pultrudées carbone collées en sous-face du talon appliquées en deux phases. Lors des essais « de fissuration » réalisés après la première phase de renforcement, les 6 lamelles ont été intentionnellement tronçonnées au droit de la section pré-fissurée S2.

2. Les instrumentations mises en oeuvre

2.1 Instrumentations dites "traditionnelles"

Lors des essais de chargement à rupture, il a été nécessaire de gérer 187 points de mesure. Pour y parvenir, ont été utilisées vingt-cinq centrales d'acquisition PEGASE (plateforme sans-fil développée par l'IFSTTAR et commercialisée par la société A3IP) connectées en WIFI. Les grandeurs physiques mesurées sont les suivantes :

- Suivi des rotations de la poutre : un inclinomètre de 10^{-5} radian de précision a été installé au droit de chacun des deux appuis de la poutre.
- Température : de façon à pouvoir calculer et tenir compte de la température moyenne de la poutre, des gradients thermiques vertical et transversal, une section de la poutre a été équipée de seize sondes de type PT 100.
- Déformations du béton : cinq sections de la poutre ont fait l'objet d'une instrumentation par 12 jauges de déformation (Figure 2), avec système de compensation en température. Lors des essais de chargement, ces cinq diagrammes de Navier ont été suivis en temps réel.
- Déformations des armatures de précontrainte : au droit de chacune des sept fenêtres réalisées dans le béton de la poutre et de la zone de dégradation sous talon, trois fils de précontrainte ont été instrumentés par jauge de déformation.
- Déformations des renforts composites : au droit de chacune des deux sections de poutre pré-fissurées S2 et S4, vingt-deux jauges de déformation ont été disposées au niveau de chaque interface de collage, ainsi qu'en sous-face du paquet de renforts composites (trois lamelles superposées). Onze jauges supplémentaires, réparties sur la longueur de la poutre, ont été collées en sous-face d'un paquet de renforts composites.
- Ouverture des fissures : les fissures des sections instrumentées ont été équipées de capteurs de déplacement de type LVDT. En association avec les jauges de déformation, ces capteurs permettent de suivre la décompression du béton puis l'ouverture de la fissure au cours des essais de chargement.

- Suivi des flèches de la poutre : Lors des phases de chargement, les déplacements de la poutre et de la longrine ont été suivis au moyen d'un théodolite automatique et de cibles.

Le logiciel superviseur SYSADYP, développé par le Laboratoire d'Aix-en-Provence sous Labview, a permis l'acquisition des mesures avec une fréquence d'acquisition de 10 Hz en direct pendant les essais puis en différé pour leur exploitation (Figure 3).

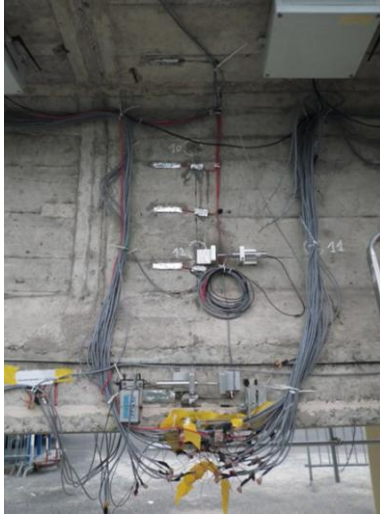


Figure 2 : Jauges de déformations permettant de suivre les diagrammes de Navier au droit de sections définies, ci-dessus en S4.

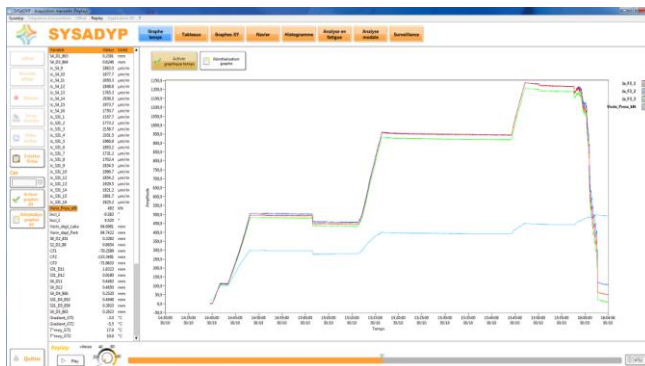


Figure 3 : Suivi en direct et en différé des mesures des 187 points de mesure via le superviseur SYSADYP.

Instrumentations traditionnelles et innovantes d'un essai de flexion à rupture sur une poutre précontrainte de pont

2.2 Instrumentations dites "innovantes"

En outre, le Cerema a installé sur le dessus de la poutre trois courburemètres, protégés de la température et du vent par une couverture faite d'une succession de demi-tubes en PVC. Ces instruments permettent de mesurer la courbure moyenne sur une portée de 5 m au moyen d'un comparateur LVDT d'une résolution de 1 μm .

De plus, le laboratoire SMC (Structures Métalliques et à Câbles) de l'IFSTTAR a installé deux systèmes acoustiques différents lors de la réalisation de ces essais :

- pour les premières phases de chargement, un système de mesure d'émission acoustique a été mis en œuvre au niveau des sections identifiées comme critiques. Différentes configurations ont été testées pour permettre une localisation linéaire, 2D ou 3D des événements. Pour ce faire, une chaîne de mesure Sensor Highway permettant d'utiliser 16 capteurs piézoélectriques de manière synchrone a été installée. Toutes les mesures sont également synchronisées avec la mesure de l'effort appliqué. Cette instrumentation a pour objectif principal de détecter et de suivre la fissuration de la poutre pendant les différentes phases de chargement,
- pour la phase ultime de chargement à rupture, un système de surveillance acoustique a également été mis en place. Il s'agit du système CASC 2 qui a été utilisé avec 7 capteurs disposés le long de la poutre et espacés d'une distance supérieure à 3 m les uns des autres. Cette seconde instrumentation a pour objectif de détecter et de localiser les principaux événements intervenant lors de la rupture de la poutre en flexion.

Enfin, l'utilisation des fibres optiques pour instrumenter ce type de structures est une solution moderne qui présente notamment deux avantages essentiels :

- la faible taille du capteur qui le rend extrêmement peu intrusif dans la structure,
- sa capacité à générer des mesures distribuées tout au long de la fibre optique, avec une résolution spatiale millimétrique et un haut niveau de déformation détectable avec une précision inférieure à 8 μm .

La configuration d'installation des fibres optiques qui a été choisie permet la mesure de la déformation tout au long de la poutre et donc la détection des fissures dès leur apparition. Deux fibres optiques ont ainsi été installées au niveau de la fibre supérieure de la poutre dans une rainure creusée dans le béton (profondeur et largeur respectivement de l'ordre de 10 et de 5 mm). Une autre fibre optique a été placée au niveau du flanc du talon de la poutre dans une rainure. Ces fibres de type Sensonet (diamètre > 3 mm) sont conçues spécifiquement pour être en contact avec le béton.

Pour évaluer le fonctionnement du renforcement par composites collés, plusieurs fibres monomodes revêtues d'une gaine polyimide (diamètre total $\sim 200 \mu\text{m}$) ont été installées au niveau des interfaces de collage. Les résultats ne sont pas présentés car non totalement exploités à la rédaction de l'article.

3. Principaux résultats

Les essais de flexion sur la poutre sans renforcement, puis avec renforcements jusqu'à rupture complète de celle-ci ont mis en évidence les observations suivantes.

3.1 Les étapes successives menant à la rupture

La première rupture s'est produite par cisaillement d'une partie des renforts par matériaux composites (initié en S2 en raison du sciage volontaire d'une partie des renforts dans cette section) et délaminé du béton enrobant les câbles de précontrainte entre les sections S2 et S4. L'effort maximal enregistré a été de 614 kN avec une flèche maximale de 20,4 cm. A partir de ce moment, l'effort de sollicitation n'a cessé de décroître.

La seconde rupture est observé par le décollement par cisaillement du restant des renforts sur quasiment toute la longueur de la poutre. L'effort au moment de la rupture a été de 588 kN avec une flèche de 26,3 cm.

Enfin, la ruine de la poutre a eu lieu été atteinte au droit de la section S2 sous une flèche maximale d'environ 40 cm (Figure 4).



Figure 4 : Ruine de la poutre précontrainte par rupture en flexion.

3.2 L'influence des renforts par lamelles pultrudées

Les lamelles pultrudées de carbone ont un effet local positif empêchant les fissures de s'ouvrir, en particulier en sous-face de la poutre sur laquelle sont collés ces renforts, allant jusqu'à avoir des ouvertures de fissures moins importantes en sous-face que sur le côté de la poutre (jusqu'à -68%). En effet, leur influence sur le côté du talon de la poutre est moins importante mais reste significative (Tableau 1).

Ouverture Section S4 (mm) à 240 kN	Sans renfort	Renforts 1 ^{ère} phase	Renforts 2 ^{ème} phase
Sous talon de poutre	0,182	0,127	0,092
Côté talon de poutre	0,173	0,163	0,134

Tableau 1 : Maîtrise de la fissuration grâce aux matériaux composites.

Les renforts composites améliorent la répartition des efforts. Dans la zone moins renforcée au droit de la section S2, l'ouverture de la fissure s'est accélérée au cours du

Instrumentations traditionnelles et innovantes d'un essai de flexion à rupture sur une poutre précontrainte de pont

chargement, alors que dans les zones normalement renforcées, les fissures existantes sont restées stables tandis que de nouvelles fissures sont apparues.

Enfin, l'effort maximal estimé sans les renforts est de l'ordre de 500 à 520 kN. Les renforts composites tels que dimensionnés dans le projet ont donc permis d'augmenter l'effort à rupture d'environ 20%.

3.3 Comparaison entre les instrumentations mises en oeuvre

3.3.1 Suivi des ruptures des câbles de précontrainte

Les mesures de déformation dans les câbles de précontrainte instrumentés indiquent une variation de contrainte de traction maximale de 629 MPa au droit de la section S4 (tensions initiales mesurées comprises entre 540 et 703 MPa) ; les courbes de variation de déformation en fonction de l'effort indiquent une accélération de la déformation à partir d'une charge de 450 kN et qu'il existe une assez bonne corrélation entre l'évolution de la déformation dans le câble et dans le composite au droit de la fissure en section S4.

Au droit de la section de chargement dénommée S3, les courbes de variation de déformation des câbles en fonction de l'effort indiquent qu'au maximum de 247 MPa, correspondant à une charge d'environ 450 kN (Figure 5). Le câble semble s'être rompu à proximité de la zone de mesure (entre S3 et S4).

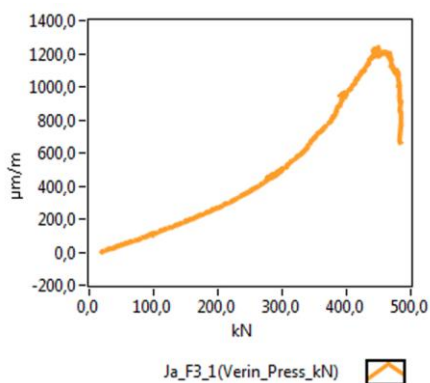


Figure 5 : Suivi des déformations d'un câble instrumentée à l'aide de jauges de déformations proche de S3 en fonction de la charge : rupture détectée vers 450 kN pour une surtension de 247 MPa (tension initiale diagnostiquée à 765 MPa).

Il est intéressant de noter également que la surveillance acoustique a permis de détecter chronologiquement de nombreux événements intervenant en différentes abscisses le long de la poutre :

- zone de la section S4 pour un niveau de force de 400 à 460 kN ;
- zone de la section S3 pour une force de 470 kN ;
- zone de forte dégradation du béton d'enrobage des câbles en talon de poutre pour un niveau d'effort de 470 à 480 kN ;
- zone de la section S3 à partir d'un niveau d'effort de 510 kN ;

- enfin, zone de la section S2 lorsque l'effort maximum de 610 kN a été atteint.

Lors de la rupture de la poutre, l'instrumentation des câbles via les jauges de déformations proches des ancrages a permis de montrer le bon ré-ancrage des fils, ce qui nous permettra d'utiliser les 2 demi-poutres pour d'autres expérimentations (essai à l'effort tranchant notamment).

3.3.2 Courburemétrie

Les mesures issues des courburemètres et des jauges de déformations sont cohérentes comme le montre la Figure 6 pour les 2 sections suivies par ces 2 méthodes.

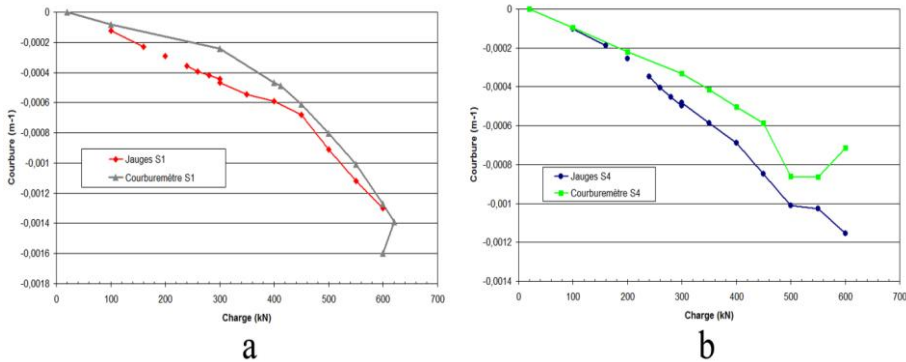


Figure 6 : Suivi des courbures en section S1 (a) et S4 (b).

4. Conclusion

L'expérimentation des essais de flexion sur une poutre précontrainte renforcée a permis de mettre en place et comparer des systèmes opérationnels ayant fait leur preuve à des instrumentations qui ne le sont pas encore.

L'ensemble des systèmes a mis en évidence la modification de comportement de la poutre lors de l'essai à rupture à partir d'environ 450 kN. Les systèmes se sont montrés tous complémentaires, parfois redondants.

Le prochain objectif est de définir des recommandations pour un gestionnaire sur la mise sous surveillance, simple, efficace et économique au travers d'une instrumentation minimale, d'ouvrages à poutres précontraintes de son patrimoine.

Bibliographie

- [1] Suivi du comportement mécanique d'une poutre de VIPP sous chargement, le cas du VIPP de Merlebach: LCPC Press, Paris, 2007.
- [2] AFGC (Association Française du Génie Civil), Réparation et renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites – Recommandations provisoires, Documents scientifiques et techniques, Février 2011.