

Douai, France  
03-04 juillet 2014

## **ANALYSE DU COMPORTEMENT DE POUTRES EN BETON PRECONTRAIT : INSTRUMENTATION DES TORONS DE PRECONTRAINTE PAR FIBRES OPTIQUES**

A. Michou<sup>A</sup>, F. Benboudjema<sup>A</sup>, A. Khadour<sup>B</sup>, G. Nahas<sup>A,C</sup>, P. Wyniecki<sup>D</sup>, Y. Berthaud<sup>E</sup>

A LMT-Cachan, ENS Cachan, CNRS, Universud Paris PRES, France

B Université Paris-Est, IFSTTAR, Marne-la-Vallée, France

C Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, Fontenay-aux-Roses, France

D Nuvia Travaux Spéciaux, Aix-en Provence, France

E Sorbonne Universités, UPMC Univ Paris 06, CNRS, Institut Jean le Rond d'Alembert, Paris, France

**RÉSUMÉ** : Une analyse expérimentale et numérique de poutres en béton précontraint est proposée dans cette communication. Une instrumentation des torons de précontrainte par fibres optiques est validée et utilisée afin d'évaluer la contribution des câbles au cours d'un chargement mécanique de la structure. Les résultats expérimentaux obtenus sont comparés à des simulations numériques éléments finis, à des échelles locales et globales.

### **1. INTRODUCTION**

Les enceintes de confinement de centrale nucléaire se présentent comme des structures à double paroi, dont une en béton armé précontraint. Dans les enceintes de nouvelle génération type EPR, celle-ci doit assurer la résistance structurelle de l'ouvrage dans le temps, l'étanchéité de l'ouvrage étant assurée par un liner métallique interne. En France, l'utilisation d'une précontrainte adhérente, avec injection des gaines de précontrainte par coulis de ciment, permet la prise en compte des torons de précontrainte comme armatures passives et garantit la protection contre la corrosion. Cependant, les déformations différées du béton (retraits et fluage) ou des torons de précontrainte (relaxation) peuvent mener à des pertes de précontrainte plus ou moins importantes, diminuant par conséquent la capacité structurelle de l'ouvrage. L'impossibilité de retendre les torons dans la solution actuelle adhérente entraîne des difficultés à contrebalancer ces modifications d'état de contrainte.

Une alternative par toron gainé graissé, solution non-adhérente, est aujourd'hui considérée. Le toron enrobé de graisse et entouré d'une gaine plastique est protégé de manière accrue contre la corrosion. Son caractère non-adhérent permettrait d'envisager une re-tension des câbles dans le cas de pertes de précontrainte importantes. Néanmoins, le toron gainé graissé, ne jouant pas le rôle d'armatures passives dans la réglementation actuelle, peut faire apparaître des comportements structuraux différents par rapport à la solution de précontrainte adhérente, avant tout en termes de caractéristiques de fissuration engendrée.

Afin d'étudier le comportement global et local du toron de précontrainte non-adhérent, nous proposons dans cette communication une instrumentation des torons de précontrainte par fibres optiques. De nombreuses solutions innovantes à base de fibres optiques ont été développées durant les deux dernières décennies (Li et al., 1998) (Deng et Cai, 2007) (Ansari, 2007). Ces capteurs fonctionnent suivant le principe qu'une variation du phénomène mesuré (déformation par exemple) modifie la

propagation du signal lumineux le long de la fibre de silice. Suivant ce principe, ont été développés pour des applications en génie civil des capteurs permettant de réaliser des mesures réparties sur toute la longueur de la fibre optique.

L'utilisation d'une fibre optique protégée et noyée dans une structure béton constitue une solution d'instrumentation robuste. Cependant, le transfert d'effort du matériau hôte (le béton) vers l'élément sensible (la fibre de silice) se réalise par le biais des différentes couches constitutives du câble à fibres optiques. Celles-ci, plus souples que le béton, mobilisent une longueur importante pour diffuser la déformation. Récemment, l'instrumentation d'armatures par fibres optiques a permis la réalisation de mesures de déformation avec une bonne incertitude et haute résolution spatiale (Quiertant et al., 2013) (Khadour et al., 2013).

Nous validons dans cette communication l'utilisation des fibres optiques pour l'étude des déformations locales des câbles de précontrainte et mettons en évidence l'apport de cette instrumentation sur un exemple de poutre précontrainte par toron gainé graissé, testée en flexion 4 points.

## 2. INSTRUMENTATION PAR FIBRES OPTIQUES D'UN TORON DE PRECONTRAINT

### 2.1 Mesures de déformation par fibres optiques

Les systèmes de mesure de déformation (ou de température) dans les fibres optiques contiennent une unité optoélectronique active, qui est reliée à la fibre optique passive. L'unité optoélectronique transmet la lumière dans la fibre par un laser accordable en fréquence ou par une source à large bande. Les caractéristiques de propagation de la lumière à travers la fibre sont modifiées en fonction des déformations de celle-ci (ou de la température). Ainsi, la lumière rétrodiffusée, détectée par l'unité optoélectronique, rend compte de ces modifications. Le signal rétrodiffusé est analysé puis converti en données de déformation (ou de température).

L'élément essentiel du système de détection pour la réalisation des mesures distribuées est un réflectomètre qui permet d'avoir une haute résolution spatiale. Dans de nombreux cas, les systèmes utilisés fonctionnent avec un réflectomètre optique temporel (OTDR), dans lequel l'unité de contrôle transmet une impulsion lumineuse courte et utilise le temps de propagation de la lumière diffusée en retour pour déterminer la position de la réflexion. Pour la technologie de capteur de Rayleigh, une résolution plus élevée peut être réalisée ( $< 1 \text{ mm}$ ), en utilisant un réflectomètre dans le domaine de fréquence optique cohérent, C-OFDR (Figure 1). L'OFDR utilise un laser à fréquence variable, couplé dans un interféromètre de Mach-Zehnder. Les composantes de fréquence dans le signal détecté définissent la position respective de la réflexion.

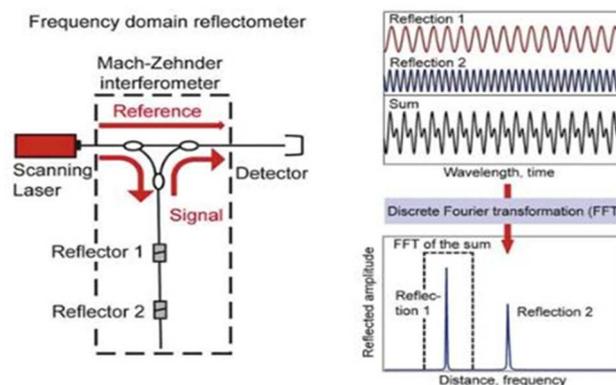


Figure 1. Principe de l'OFDR

Pour réaliser des mesures exactes de déformation (et/ou température), le signal de rétrodiffusion de la fibre optique est divisé en petites fenêtres d'analyse (largeur des gauges,  $1 \text{ mm}$  dans notre cas). Le signal de chaque fenêtre est transféré dans le domaine fréquentiel. Le résultat est une fluctuation du spectre de réflexion en fonction de la fréquence. Les variations des déformations appliquées à la fibre optique conduisent à un décalage de fréquence, proportionnel à l'évolution des conditions externes affectant la fibre. Ce processus ressemble à des mesures à base de réseaux de Bragg où, de la même façon, le déplacement de pics de fréquence réfléchi est détecté, lorsqu'il y a changement de conditions externes.

Finalement, afin d'obtenir des mesures distribuées, la fenêtre d'analyse doit balayer toute la longueur de la fibre optique, par un algorithme mathématique, afin d'obtenir le profil total des déformations (ou températures).

## 2.2 Comportement mécanique d'un toron de précontrainte

L'intérêt est porté sur une structure de toron acier 7 fils, un fil central et six fils périphériques torsadés. La particularité des torons réside dans leur haute limite d'élasticité, supérieure à 1500 MPa, et leur faible raideur en flexion et torsion. De nombreuses études, analytiques ou numériques, ont été menées sur leur comportement mécanique et résumées dans (Ghoreishi et al., 2007). Nous retiendrons que, dans le cas d'un toron à angle d'hélice inférieur à 20° et soumis à un chargement de traction, les phénomènes de flexion et torsion dans les fils périphériques peuvent être négligés, ainsi que l'influence de la friction entre les fils périphériques et le fil central. Ce dernier point a été validé numériquement par (Ghoreishi et al., 2007), une adhérence parfaite considérée n'apportant que peu d'erreur. Par ailleurs, (Huang, 1978) confirme aussi l'absence de contact entre fils périphériques, dans le cas où le diamètre du fil central est supérieur à celui des fils périphériques. Le comportement global Force – Déformation d'un toron soumis à un chargement axial est proposé par (Hruska, 1951) (Machida et Durelli, 1973) :

$$\begin{cases} F_z = E (A_c + 6A_p \cos^3 \alpha) \epsilon_z \\ \epsilon_p = \cos^2 \alpha \epsilon_z \end{cases} \quad (1)$$

avec  $F_z$  la force axiale,  $\epsilon_z$  la déformation axiale globale,  $\epsilon_p$  la déformation axiale dans les fils périphériques,  $E$  le module d'Young du matériau,  $A_c$  et  $A_p$  les surfaces du fil central et des fils périphériques respectivement,  $\alpha$  l'angle d'hélice. La flexion – torsion des fils périphériques est ici négligée. Le toron utilisé par la suite est un toron T15S, de type 7 fils. Ses propriétés sont détaillées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Propriétés géométriques et mécaniques toron T15S

<b>Section</b>	150 mm <sup>2</sup>	<b>Diamètre fil central</b>	5,4 mm
<b>Pas de l'hélice</b>	0,26 cm	<b>Diamètre fils périphériques</b>	5,2 mm
<b>Angle d'hélice</b>	7,3°	<b>Module d'Young</b>	195 GPa

## 2.2 Instrumentation par fibre optique : Validation numérique

Dans le but d'évaluer la faisabilité d'une instrumentation fibre optique sur un toron de précontrainte, une modélisation numérique éléments finis est menée sur un toron T15S à l'aide du code aux éléments finis Cast3m. La structure est soumise à un chargement axial de traction et bloquée en rotation aux abouts (Figure 2).

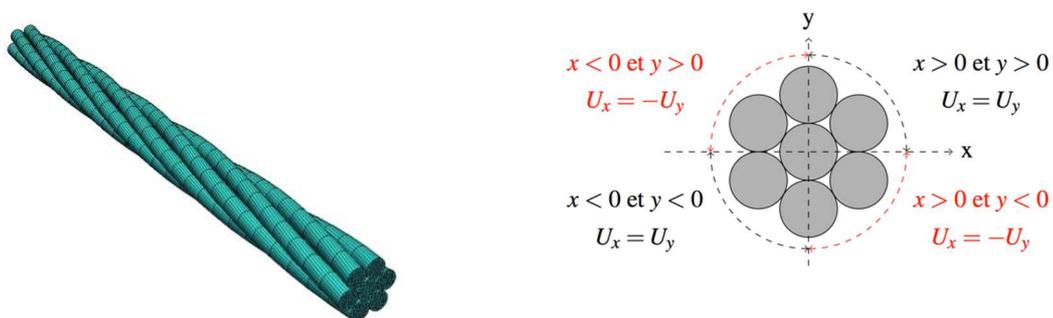


Figure 2. Modélisation éléments finis Toron T15S et conditions limites associées.

Une adhérence parfaite est considérée entre le fil central et les fils périphériques, ainsi qu'une absence de contact entre fils périphériques. La validité de la modélisation est assurée *a priori* par une comparaison avec les résultats expérimentaux de (Utting et Jones, 1987) mettant en œuvre des torons soumis à de la traction pour différents angles d'hélice.

La modélisation permet d'appréhender le champ de déformation susceptible d'être mesuré par la fibre optique. Celle-ci sera collée entre deux fils périphériques, c'est-à-dire en suivant la forme en hélice du toron. La comparaison des déformations axiales sur 6 lignes, suivant le profil des fils périphériques, montrent la prépondérance de la composante axiale devant la flexion (Figure 3– a). L'écart maximal entre les six génératrices est calculé à 2,5%. Ce résultat est confirmé par l'étude des différentes composantes du tenseur de déformation exprimé dans le repère  $(1,2,3)$ , avec  $(1)$  orienté selon la normale sortante à la surface et  $(3)$  dirigé selon l'axe du fil périphérique (Figure 3– b). Outre la composante axiale, seules les composantes transverses  $\varepsilon_{11}$  et  $\varepsilon_{22}$  présentent des valeurs non nulles, dues à l'effet Poisson. Les composantes de cisaillement quasi-nulles confirment le caractère négligeable de la flexion-torsion.

Ces résultats justifient la possibilité d'une instrumentation par fibre optique d'un toron de précontrainte. Inhérent au processus de collage de la fibre optique, la position de cette dernière ne peut être connue avec exactitude. Les calculs présentés montrent que ceci n'induit que peu d'erreur sur la déformation mesurée. Le passage de la déformation mesurée vers la déformation axiale globale du toron est aussi permis grâce à l'équation (1).

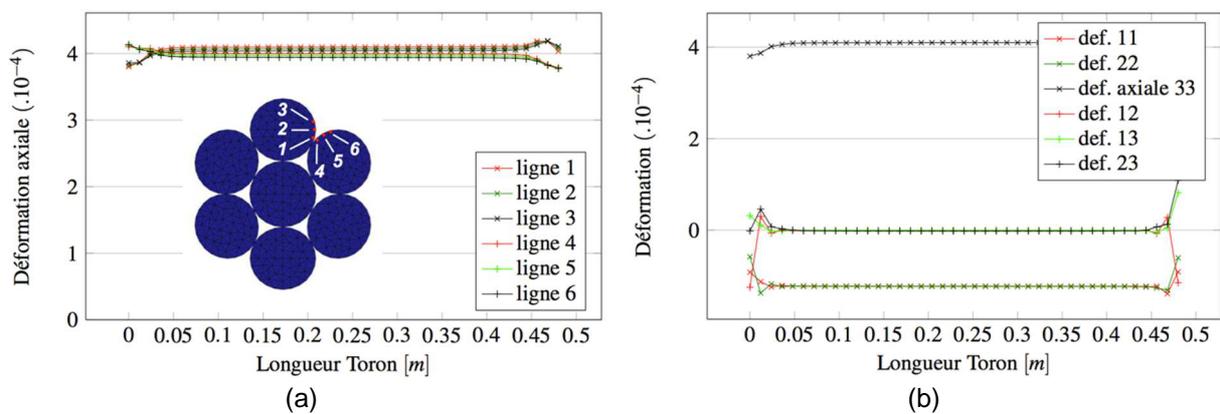


Figure 3. Calcul des déformations sur toron : (a) déformation axiale sur 6 lignes, (b) 6 composantes du tenseur des déformations sur la ligne 1

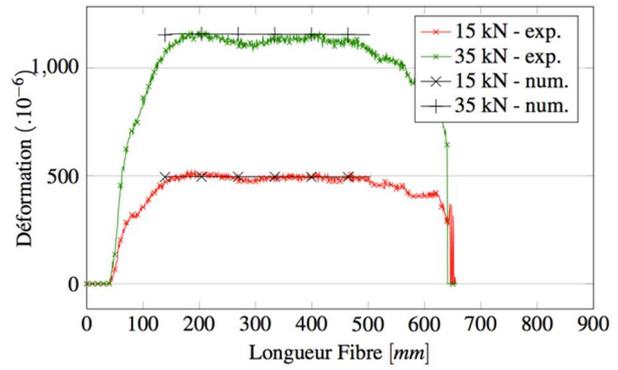
### 2.3 Instrumentation par fibre optique : Validation expérimentale

La modélisation numérique est confrontée à des mesures expérimentales sur un toron T15S. Un câble à fibre optique multifibres de 2 mm de diamètre est collé entre deux fils périphériques (Figure 4 – a), avec utilisation d'une colle cyanoacrylate Loctite. De part la nature et la géométrie du câble à fibres optiques, le processus d'installation s'avère relativement aisé et assure une bonne continuité du collage en hélice autour du toron. Le toron est soumis à un chargement de traction, les bouts étant bloqués en rotation. La Figure 4 – b rend compte des déformations mesurées par la fibre optique pour deux niveaux d'effort, et comparées aux déformations calculées par éléments finis. Les résultats montrent une bonne concordance entre les mesures expérimentales et la simulation dans la partie centrale. Néanmoins, on peut remarquer une zone de transition de déformations entre les bouts du toron et la zone centrale. Ceci peut être expliqué par un comportement perturbé de la structure dans cette zone de part la torsion induite par le chargement axial. De plus, le revêtement plastique du câble à fibres optiques induit une fonction de transfert relativement large entre le comportement interne de la fibre et celui du matériau étudié, impliquant cette zone de transition observée.

Les résultats présentés dans cette partie valident le processus d'instrumentation du toron de précontrainte par un système à fibres optiques. La facilité de mis en œuvre en termes de collage et de régularité d'installation peut être mis en évidence. De plus, cette instrumentation d'altère en rien le comportement initial du toron, aucun usinage ou aucunes transformations n'étant apportés au système. La mesure obtenue en traction, validée par simulation numérique, fait apparaître le comportement local du toron étudié. Cette instrumentation est utilisée par la suite pour une application structurelle, dans laquelle le toron travaille principalement en traction.



(a)



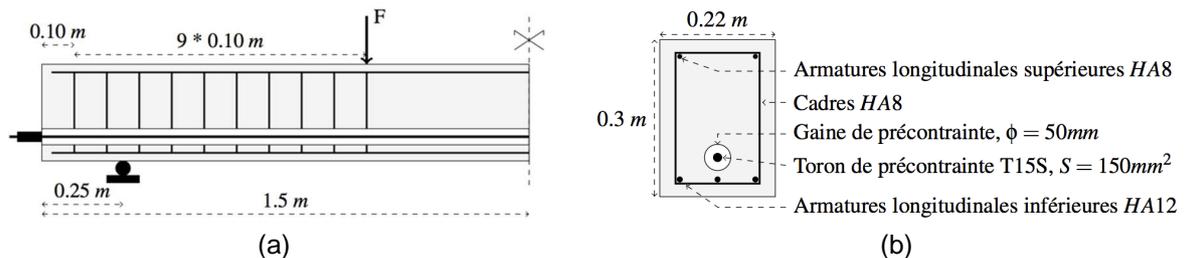
(b)

Figure 4. Chargement de traction sur toron T15S : (a) Instrumentation fibre optique, (b) Déformations mesurées par fibre optique vs. Déformations calculées par EF

### 3. APPLICATION STRUCTURELLE : POUTRES EN BETON PRECONTRAIT

#### 3.1 Introduction

Une poutre en béton armé précontraint, de longueur 3 m et de section 0,22 x 0,30 m<sup>2</sup>, est testée en flexion 4 points (Figure 5 – a). La structure est armée et précontrainte par un toron non adhérent gainé graissé, comme cela est illustré en Figure 5– b. Cherchant à étudier le comportement du toron au cours du chargement et non son apport à la résistance structurelle de la poutre, la précontrainte est imposée à 100 MPa dans le toron, afin de garantir son axialité.



(a)

(b)

Figure 5. Configuration poutre précontrainte : (a) coupe longitudinale, (b) coupe transversale

Le toron de précontrainte est instrumenté par deux câbles à fibres optiques diamétralement opposés. Les deux fibres sont collées au préalable sur un toron vierge, celui-ci étant par la suite graissé puis gainé (Figure 6). La poutre précontrainte est chargée en déplacement imposé par un vérin de capacité 250 kN. Des pauses courtes dans le chargement permettent l'interrogation des fibres optiques.



Figure 6. Instrumentation par fibre optique d'un toron gainé graissé

Trois capteurs de déplacement mesurent la flèche en cours de chargement, ainsi que le déplacement vertical au niveau des points d'application de la charge. Le comportement global de la structure est illustré en Figure 7. Il rend compte de manière claire des trois phases d'évolution de la structure : phase élastique, initiation et propagation de fissures, plastification des aciers passifs inférieurs avant rupture en compression du béton en partie supérieure (200 kN).

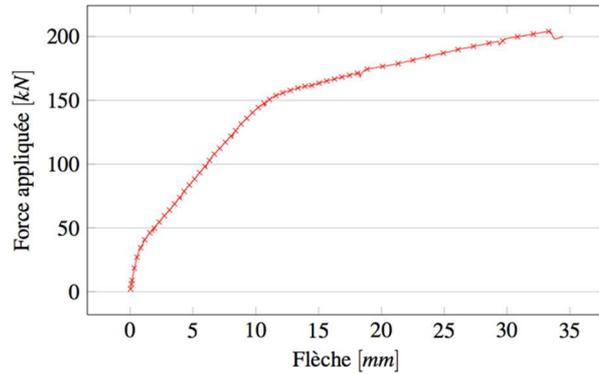


Figure 7. Comportement global à rupture Force – Flèche

### 3.2 Mesures de déformation par fibres optiques

L'interrogation des fibres optiques collées sur le toron s'effectue à différents paliers d'effort, de la phase élastique jusqu'à rupture de la poutre. Les mesures présentées sont des mesures relatives ; elles ne prennent pas en compte la déformation initiale de précontrainte. À titre d'exemple, la Figure 8 – a illustre les deux mesures de fibre optique effectuées à un palier d'effort de 48,8 kN. On remarque pour les deux fibres optiques une déformation oscillante périodique. Le pas d'oscillation correspond au pas d'hélice du toron. Ces résultats peuvent s'expliquer par une compression locale du câble optique par la structure environnante de manière périodique. L'opposition de phase entre les deux signaux est due à la position diamétralement opposée des deux fibres. La moyenne des deux mesures rend compte d'une déformation quasi-uniforme du toron de précontrainte sur toute sa longueur (Figure 8– b). Ce résultat valide le caractère glissant parfaitement du toron gainé graissé. À chargement croissant jusqu'à rupture, on retrouve ce résultat de déformation quasi-uniforme sur la longueur du toron (Figure 9 - a), signifiant l'absence de frottements locaux quelque soit la contrainte croissante dans le câble.

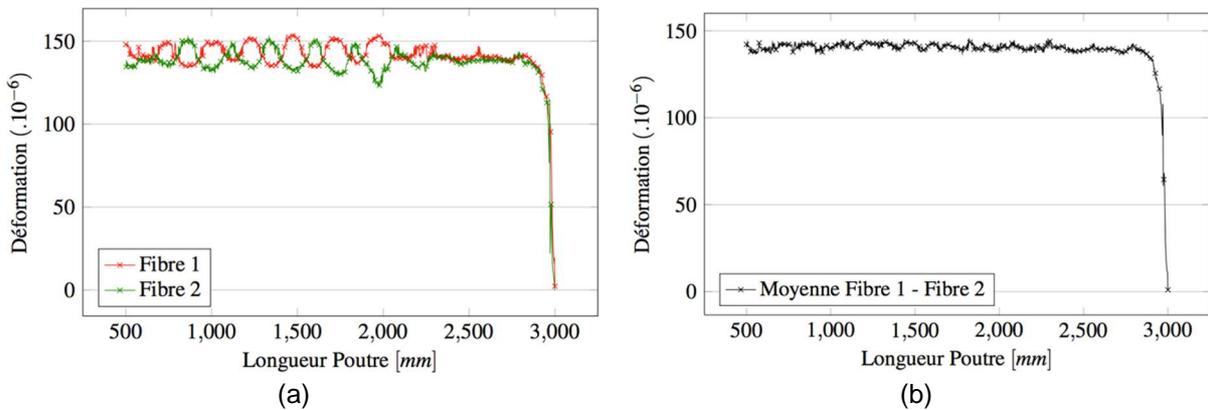


Figure 8. Mesures de déformation du toron par fibre optique,  $F = 48,8 \text{ kN}$  : (a) Mesures indépendantes Fibre 1 et Fibre 2, (b) Moyenne Fibre 1 et Fibre 2. Plage de mesure : 0,5 m – 3 m

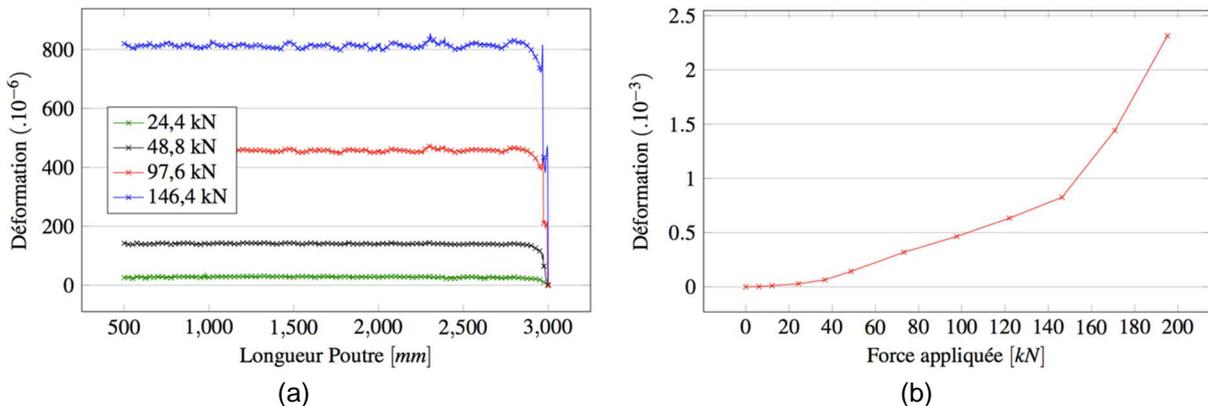


Figure 9. Évolution déformation toron en cours de chargement

La mesure par fibre optique permet de quantifier l'apport mécanique d'un toron non-adhérent gainé graissé sur le comportement structurel, en fonction du niveau de sollicitation imposé à la structure. La Figure 9 - b évalue le comportement du toron au cours du chargement, en quantifiant sa déformation additionnelle globale. On retrouve ainsi les trois phases du comportement de la structure globale : une phase d'élasticité linéaire de 0 kN à 20 kN, une phase d'ouverture de fissures entre 20 kN et 150 kN où le toron est sollicité avec les aciers passifs toujours élastiques, une phase de plastification des aciers inférieurs de 150 kN jusqu'à rupture.

Ces résultats mettent en évidence la possibilité et l'intérêt de l'utilisation de mesures à fibres optiques pour l'évaluation du comportement des torons de précontraintes dans des applications structurelles. Nous comparons par la suite ces données expérimentales à la simulation numérique éléments finis de la structure considérée.

### 3.3 Simulation numérique éléments finis

La structure considérée précédemment est modélisée à l'aide du code de calculs aux éléments finis Cast3m. Les armatures passives longitudinales sont modélisées par des éléments barres à 2 nœuds, alors que les cadres transversaux sont modélisés par des éléments poutres d'Euler-Bernouilli. Leur comportement est élastique plastique parfait, de module d'Young 210 GPa et de limite élastique 550 MPa. Une adhérence parfaite est prise en compte entre le ferrailage et le béton. Le toron de précontrainte non-adhérent est modélisé par des éléments barres à 2 nœuds. Un glissement sans frottement est considéré entre ce dernier et le béton environnant, à l'aide de relations cinématiques. Un ancrage parfait du toron sur des éléments rigides est pris en compte aux abouts. Le béton est considéré comme un matériau élastique-endommageable isotrope avec une loi d'évolution de l'endommagement en traction sous forme d'une exponentielle décroissante (Feenstra et al., 1996) :

$$D = 1 - \frac{\epsilon_{d0}}{\epsilon} \cdot \exp(B_t (\epsilon_{d0} - \epsilon)) \quad (2)$$

où  $\epsilon_{d0}$  est la déformation limite élastique et  $B_t$  est un paramètre contrôlant l'adoucissement. Une régularisation énergétique est utilisée par l'intermédiaire du paramètre  $B_t$ , dépendant de la taille des éléments finis et de l'énergie de fissuration  $G_f$  (Hillerborg, 1976). Un champ aléatoire sur la résistance en traction (Figure 10) est pris en compte par l'intermédiaire de la méthode des bandes tournantes.

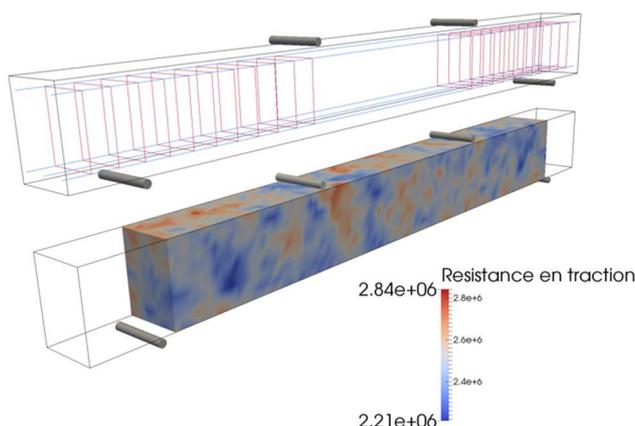


Figure 10. Modélisation poutre précontrainte : cage de ferrailage et champ de propriété béton

Les comportements globaux expérimentaux et numériques montrent une bonne cohérence l'un par rapport à l'autre, faisant apparaître les différentes phases de dégradation de la structure (Figure 11 - a). Par ailleurs, il est intéressant de comparer les résultats expérimentaux et numériques en termes de déformation globale du toron de précontrainte. Tout d'abord, la simulation numérique rend compte du caractère glissant du câble de précontrainte et garantit sa déformation uniforme sur la longueur de la poutre. De plus, le calcul numérique simule l'évolution progressive avec le chargement de la déformation dans le câble en trois phases, comparable aux résultats expérimentaux obtenus (Figure 11 - b). Numériquement, on remarque néanmoins que le câble est plus sollicité, en comparaison des

mesures expérimentales, dès l'apparition de la fissuration et dans la phase de plastification des aciers.

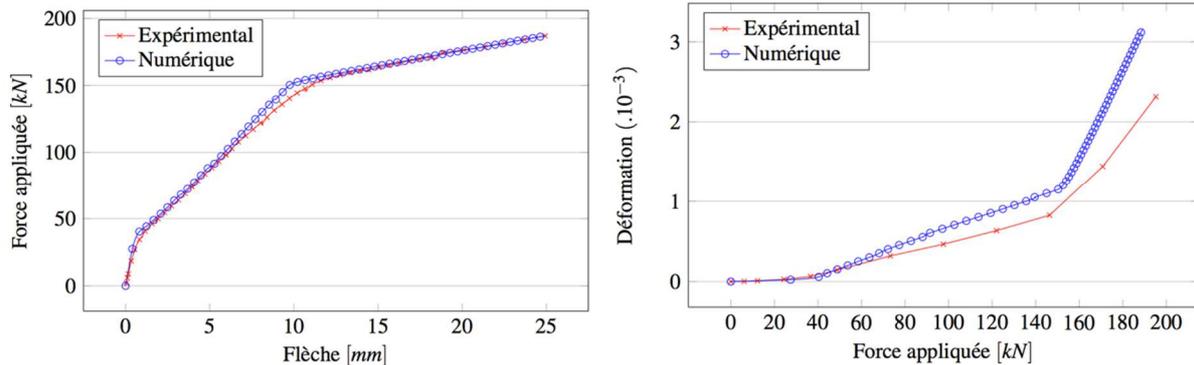


Figure 11. Comparaison numérique - expérimental : (a) Comportement global Force – Déplacement, (b) Déformation uniforme toron de précontrainte

Dans le but d'expliquer ces différences de comportement au niveau local, le champ de fissuration de la structure est étudié numériquement et expérimentalement. Des mesures par corrélation d'images numériques (Besnard *et al.*, 2006) ont été mises en œuvre expérimentalement sur la quasi-intégralité de la structure, rendant compte des champs de déplacements locaux (Figure 12). Un post-traitement permet d'extraire du champ de déplacement des informations locales telles que l'ouverture des fissures, à chaque pas de chargement. L'étude de la déformation globale du béton, induite par fissuration, peut être comparée à la déformation globale du câble de précontrainte. Numériquement, la déformation globale axiale est extraite du champ de déformation local de la structure (Figure 13 - a) et comparée de la même manière à la déformation globale uniforme du câble de précontrainte (Figure 13 - b).

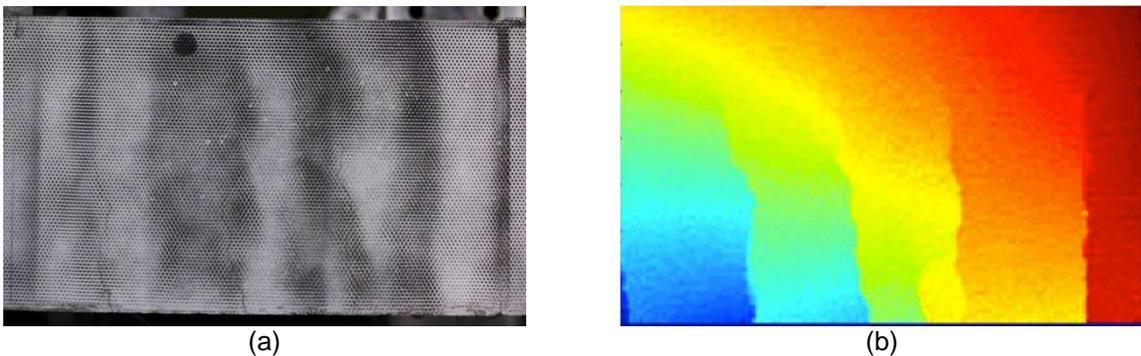


Figure 12. Corrélation d'images numériques : (a) mouchetis sur la structure étudiée, (b) allure du champ de déplacement calculé

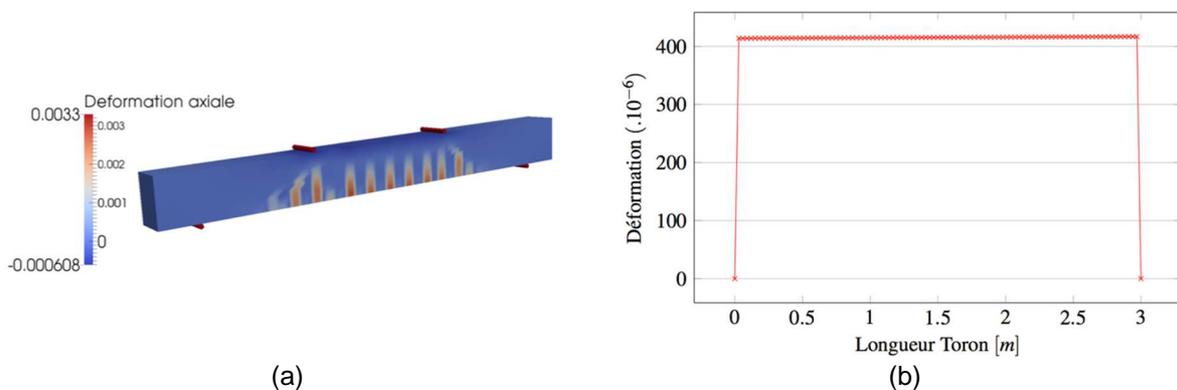


Figure 13. Champ de déformation axiale à 80 kN : (a) béton, (b) toron

Ces résultats numériques et expérimentaux sont détaillés en Figure 14. La simulation confirme l'égalité de la déformation globale du toron et à celle du béton (calculée sur la surface extérieure à une hauteur correspondante à l'emplacement du câble), en phase élastique ainsi qu'en phase de fissuration. Expérimentalement, on observe une différence relativement importante de la vitesse de déformation dans le toron (calculée par fibre optique) et dans le béton (calculée par corrélation d'images). Le toron ne suit pas la déformation globale de la structure. Ceci peut s'expliquer par les pertes de précontrainte au niveau des ancrages au cours d'essai. En effet, le toron est ancré par l'intermédiaire de clavettes de précontrainte. En fonction de la charge imposée au niveau de l'ancrage, une rentrée de clavette peut être observée ce qui induit une perte de précontrainte dans le câble. La quantification de la rentrée de clavette est ainsi possible grâce aux mesures par fibres optiques par comparaison de la déformation totale du toron et du béton. Pour un chargement de 100 kN, on l'estime ainsi à environ 400  $\mu\text{m}$ . Cette valeur se trouve être d'un bon ordre de grandeur, en comparaison d'observations faites sur ouvrages précontraints.

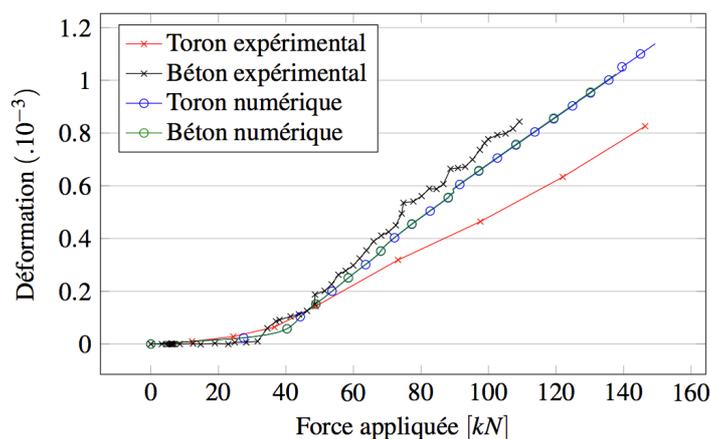


Figure 14. Comparaison numérique et expérimentale de la déformation globale toron et béton sur la longueur de la poutre.

#### 4. CONCLUSION

L'instrumentation des torons de précontrainte pour une mesure de déformation locale continue est validée et utilisée dans un cas de poutre en béton précontraint. Les mesures rendent compte du comportement local des câbles au cours du chargement mécanique imposé. La comparaison des résultats expérimentaux avec des mesures de champ de déplacement par corrélation d'images numériques et des simulations numériques éléments finis est aussi présentée et permet de quantifier des comportements locaux, au niveau des ancrages par exemple, pouvant être utilisés dans les simulations.

L'étude d'une poutre précontrainte par toron adhérent instrumenté par fibre optique est aujourd'hui en cours. Les mesures permettront d'évaluer le comportement du câble de précontrainte, ainsi que celui du coulis de ciment environnant.

#### 5. REFERENCES

- Ansari F. (2007). Practical implementation of optical fiber sensors in civil structural health monitoring. *Journal of intelligent material systems and structures*, 18 (8): 879-889.
- Besnard G., Hild F. et Roux S. (2006). "Finite-element" displacement fields analysis from digital images: application to Portevin–Le Châtelier bands, *Experimental Mechanics*, 46(6) : 789-803.
- Deng L., Cai C.S. (2007). Applications of fiber optic sensors in civil engineering. *Structural Engineering and Mechanics*, 25(5): 577-596
- Feenstra, P. H. (1993). *Computational aspects of biaxial stress in plain and reinforced concrete*. Thèse de doctorat, TU Delft.
- Ghoreishi, S. R., Messenger, T., Cartraud, P. et Davies, P. (2007). Validity and limitations of linear analytical models for steel wire strands under axial loading, using a 3dDFE model. *International Journal of Mechanical Sciences*, 49(11):1251–1261.
- Henault J.-M., Quiertant M., Delepine-Lesoille S., Salin J., Moreau G., Taillade F. et Benzarti K. (2012). Quantitative strain measurement and crack detection in RC structures using a truly

- distributed fiber optic sensing system, *Construction. and Building. Materials.*, 37: 916–923.
- Hillerborg, A., Modeer, M. et Petersson, P.-E. (1976). Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and concrete research*, 6(6):773–781.
- Hruska, F. (1951). Calculation of stresses in wire ropes. *Wire and wire products*, 26:766–767.
- Khadour, A., Baby, F., Herrera, A., Taillade, F., Marchand, P., Rivillon, P., Simon, A., Quiertant, M., et Toutlemonde, F., Distributed strain monitoring of reinforcement bars using optical fibers for SHM", 1620-1629, *CONSEC13 - Seventh International Conference on Concrete under Severe Conditions – Environment and Loading*, 23-25 September 2013, Nanjing, China
- Li H.N., Li D.S.; Song G.B. (1998). Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering. *Engineering Structures*, 26 (11): 1647-1657
- Machida, S. et Durelli, A. (1973). Response of a strand to axial and torsional displacements. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 15(4):241–251.
- Quiertant, M., Baby, F., Khadour, A., Marchand, P., Rivillon, P., Toutlemonde, F. (2013). Instrumentation par fibres optiques des ouvrages en BA pour la mesure répartie des déformations de traction des armatures *Revue Instrumentation Mesure Métrologie. Numéro spécial Capteurs à fibre optique - Développements et applications*. Janvier-juin 2013, vol. 13, n° 1-2/2013. p. 131-147.
- Utting, W. et Jones, N. (1987). The response of wire rope strands to axial tensile loads—part ii. comparison of experimental results and theoretical predictions. *International journal of mechanical sciences*, 29(9):621–636.