

Partie 3 – Structures & Monitoring

BENCHMARK DE CAPTEURS DE DÉFORMATIONS BASÉS SUR DES FIBRES OPTIQUES À RÉSEAUX DE BRAGG POUR DES STRUCTURES EN BÉTON ARMÉ

**BENCHMARK STUDY OF DEFORMATION SENSORS BASED ON BRAGG FIBER
GRATINGS TO EVALUATE REINFORCED CONCRETE STRUCTURES**

**Mohamad EZZEDINE EL DANDACHY¹, Frédéric DUFOUR¹,
Antoine TIXIER¹, Mikhaël de MENGIN², Yves-Laurent BECK³**

¹ Grenoble-INP/Université Joseph Fourier/CNRS UMR 5521, Laboratoire 3S-R,

² Université Joseph Fourier/CNRS UMR 5274, IPAG,

^{1,2} Domaine Universitaire, BP53, 38041 Grenoble Cedex 9, France.

³ EDF-DTG, 21 avenue de l'Europe, 38000 Grenoble.

Auteur correspondant : mohamad.ezzedineeldandachy@3sr-grenoble.fr

RÉSUMÉ

L'objectif de cette étude est de qualifier différents capteurs à fibre optique à réseaux de Bragg (FBG) dans leur milieu d'usage sur une petite structure en béton armé amenée jusqu'à l'état limite ultime. Les mesures ont été comparées quantitativement avec une analyse d'image par corrélation en parement et un modèle numérique prédictif. Les résultats sont globalement très satisfaisants avec certaines limitations atteintes en termes de fixation des ancrages et de plage de mesure dans les zones fissurées.

measures are in good agreement with other measurements performed by means of either digital image correlation at the surface of the beam, or by means of a predictive numerical model. However some limitations are met regarding the cracking of the concrete in terms of damage of the sensor anchorage or reaching the measurement limit across a widely opened crack.

Mots-clés : Auscultation, Capteurs de Bragg, Corrélation d'image, Structure en béton armé, Endommagement.

ABSTRACT

This study aims at benchmarking several strain sensors based on optical fibers with fiber Bragg grating (FBG). For this purpose, two reinforced concrete beams have been tested in three point bending up to ultimate limit state. The

1. INTRODUCTION

Les ouvrages du génie civil, notamment en lien avec la production d'énergie, sont très souvent des ouvrages présentant des conséquences majeures en cas de rupture. Afin

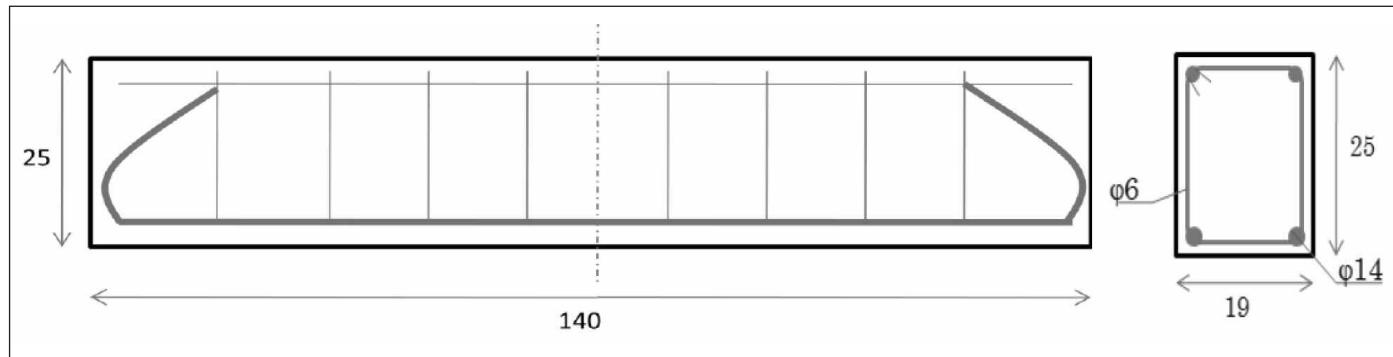


Figure 1 : Géométrie de la poutre en béton armé menée jusqu'à rupture en flexion 3 points.

de limiter le risque induit, il faut s'assurer du bon niveau de sûreté de l'ouvrage. Pour suivre l'évolution au cours du temps et sous divers chargements (séchage, mise en pression, variation de température, fluage, etc.) du comportement mécanique, les maîtres d'ouvrage sont amenés à instrumenter leurs ouvrages afin de mesurer diverses quantités physiques d'intérêt. Parmi celles-ci, les déformations jouent un rôle important pour analyser le comportement mécanique de l'ouvrage.

Les capteurs de déformations peuvent reposer sur divers phénomènes physiques (corde vibrante, résistivité électrique, fibre optique, etc.). En fonction de leur positionnement dans l'ouvrage, le packaging peut aussi varier du tube métallique à noyer dans le béton ou à ancrer en surface, au patch à coller en surface. Les longueurs d'interrogation varient aussi en fonction de l'usage recherché. Plus le capteur aura une base d'interrogation longue, plus la mesure sera moyennée. A contrario, une mesure sur une base plus réduite sera plus locale mais aussi plus variable d'un point à l'autre de la structure. Dans le contexte de la mesure de déformation sur une structure en béton armé, a priori fissurée, cette interrogation prend tout son sens lorsqu'on cherche à quantifier une grandeur dont le champ présente de fortes hétérogénéités (localisation des déformations au droit des fissures).

L'objectif de cette étude est de comparer divers capteurs sur les résultats obtenus sur une petite structure en béton armé menée jusqu'à l'état limite ultime. Sur deux poutres, un total de 12 capteurs différents du commerce, basés sur la technologie de fibre optique à réseaux de Bragg (FBG), ont été comparés entre eux, à des capteurs à corde vibrante (C110), à une fibre optique nue avec un réseau de Bragg, à la corrélation d'image en surface et à un modèle numérique de fissuration. Pour des raisons de clarté, toutes les mesures ne sont pas présentées dans cette contribution.

2. PRÉSENTATION DE L'ESSAI

La géométrie de la structure est présentée à la Figure 1. Les capteurs sont positionnés soit en partie centrale qui va principalement fissurer, soit au quart de la portée de chaque côté avec une fissuration plus tardive et moindre (voir positionnement à la Figure 5). Le pilotage est réalisé en déplacement avec des critères d'arrêt en force. Des cycles de déchargements sont effectués pour l'analyse des défor-

mations permanentes non présentée dans cette contribution. Les mesures sont la force et le déplacement du vérin, ainsi que les mesures à comparer.

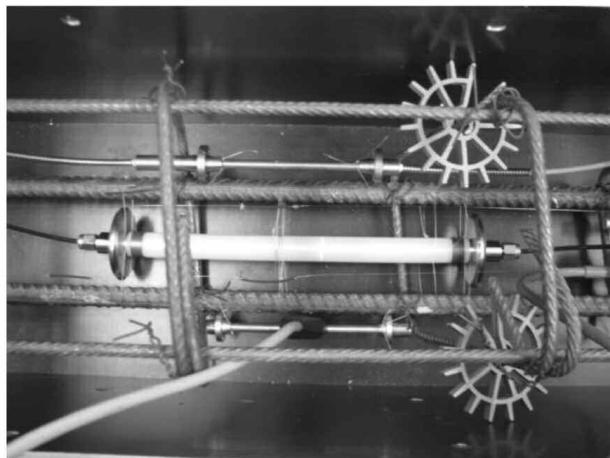
Deux appareils photos numériques ont été disposés sur le côté de la poutre, l'un de 36 MPixels dans la partie centrale et l'autre de 80 MPixels centré sur la moitié de la poutre afin d'avoir une zone de recouvrement avec le premier (voir positionnement à la Figure 5). Dans la phase d'analyse après essais, le logiciel *tracker* [1] a été utilisé afin de construire le champ de déplacement et calculer les déplacements relatifs entre les points d'ancrage des capteurs pour comparaison.

L'instrumentation est complétée par un ensemble de capteurs qui sont pour certains noyés dans le béton (capteurs Ex) et pour d'autres ancrés (capteurs Mx) ou collés en parement de la poutre. La Figure 2.(a) présente le positionnement avant coulage du capteur à corde vibrante dénommé « C-110 mid » (capteur avec une connectique centrale), le capteur E2 en position axiale et un capteur E3 qui a été endommagé au coulage et dont les mesures n'ont pas pu être analysées. La Figure 2.(b) présente l'ancrage des capteurs M1 (parement latéral) et M1up (surface en tension).

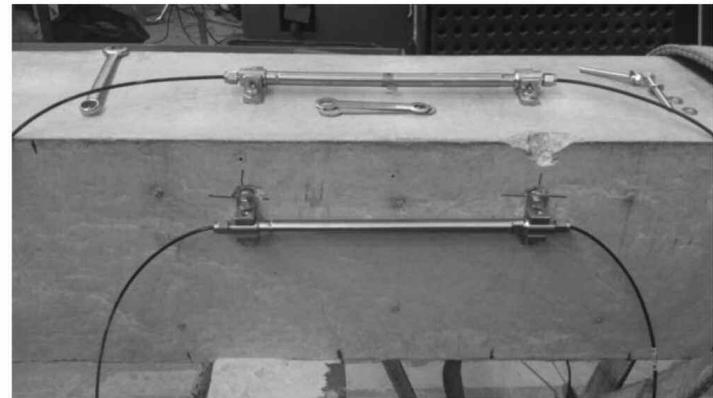
3. MODÉLISATION NUMÉRIQUE

Pour la conception de l'essai et la comparaison en aveugle des résultats, un modèle numérique a été réalisé de l'essai. Même si le profil de fissuration, comme le montrera l'essai, n'a aucune raison d'être symétrique, seule une moitié de la poutre a été maillée en utilisant la symétrie géométrique et de chargement. Les éléments finis utilisés sont d'interpolation linéaire, de géométrie volumique pour le béton et de type barre pour les aciers. La liaison acier-béton est supposée avec une adhérence parfaite.

Les modèles de comportement des matériaux sont classiques, à savoir un comportement élasto-plastique parfait pour l'acier et le modèle d'endommagement scalaire proposé par Mazars [4]. Seulement la version locale a été utilisée pour l'aide à la conception de l'essai et aucune calibration des paramètres n'a été réalisée à partir des résultats des essais. Pour ce faire, la taille de maille a été prise égale à 3 fois la taille des plus gros granulats qui est une taille acceptable pour la zone de fissuration. Le module d'Young et la résistance en traction ont été mesurées sur



(a)



(b)

Figure 2 : Fixation des capteurs de déformations noyés dans le béton (a) ou ancrés en parement (b).

une autre gâchée de même formulation. Ils ont été utilisés pour le choix des paramètres mécaniques du béton. Bien que des approches plus précises, pour déterminer les trajets et ouverture de fissures, ont été récemment développées ([2] et [3]), l'objet étant ici de comparer des déplacements relatifs pour tout état du béton, d'élastique à fissuré, les déplacements dans le modèle numérique des points d'ancrage des capteurs sont suivis au cours du chargement. Les valeurs relatives sont comparées aux mesures par fibre optique et analyse d'image en parement.

4. RÉSULTATS ET COMPARAISONS

4.1. Comportement global

Les réponses globales des deux poutres, ainsi que de la modélisation numérique, sont présentées à la Figure 3. Seule la rigidité initiale est mal reproduite à cause de la mise en place des appuis dans le modèle physique (rigidité moindre en charge mais identique en décharge). Par la suite, la rigidité de la poutre fissurée et le palier en effort correspondant à la formation d'une rotule plastique centrale sont parfaitement anticipés par le modèle numérique qui se situe dans la variation aléatoire physique des deux poutres.

Les deux profils de fissuration sont aussi comparables (Figure 4) avec une première fissure centrale de flexion, suivie par une fissure majeure en cisaillement. Le modèle numérique (Figure 4.(b)) montre aussi, en parement, la fissuration liée à l'endommagement le long de l'interface acier-béton. En effet, par le choix d'un maillage relativement grossier, les éléments de parement contiennent les aciers. A noter que dans le modèle physique (Figure 4.(a)), la majorité des fissures d'effort tranchant traversent les ancrages des capteurs. Une raison probable est que l'ancrage de 5 cm, pour de petites structures comme cette poutre, est suffisamment intrusif pour créer un point faible qui « attire » les fissures. La conséquence, comme nous le

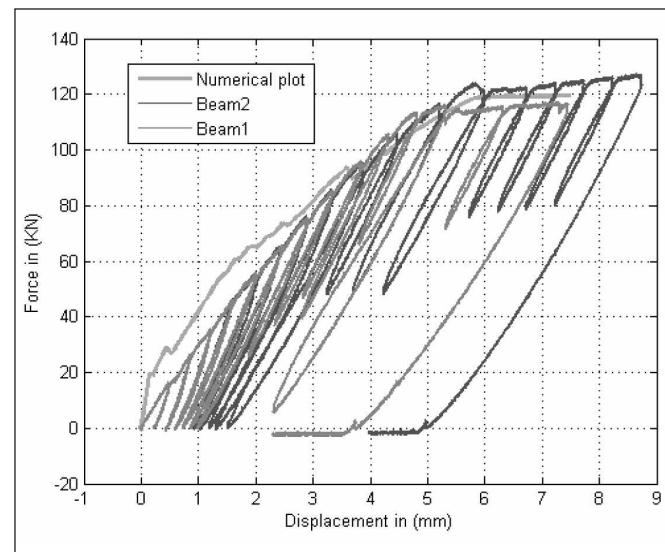


Figure 3 : Courbes force-flèche des deux poutres expérimentales et du modèle numérique.

verrons dans la partie de l'analyse des résultats, est que pour ces capteurs la mesure se détériore au passage de la fissure.

4.2. Analyse locale des déformations

Pour chaque capteur à fibre optique, une comparaison est proposée, d'une part, avec la mesure numérique entre les points d'ancrage, et d'autre part, avec la mesure par corrélation d'images aux mêmes points pour les capteurs de parement et aux points d'ancrage ramenés en surface pour les capteurs noyés. Dans ce dernier cas, seule une approximation est attendue puisque les déformations ne sont pas identiques en parement et à cœur d'une structure en béton armé. Le positionnement des capteurs est présenté à la Figure 5.

Les capteurs M1 sont centrés sur le quart de la poutre en parement supérieur et en parement latéral (Figures 2.(b) et 5). Les résultats (Figure 6.(a)) montrent une très bonne cohérence entre les trois mesures pour le capteur en pare-

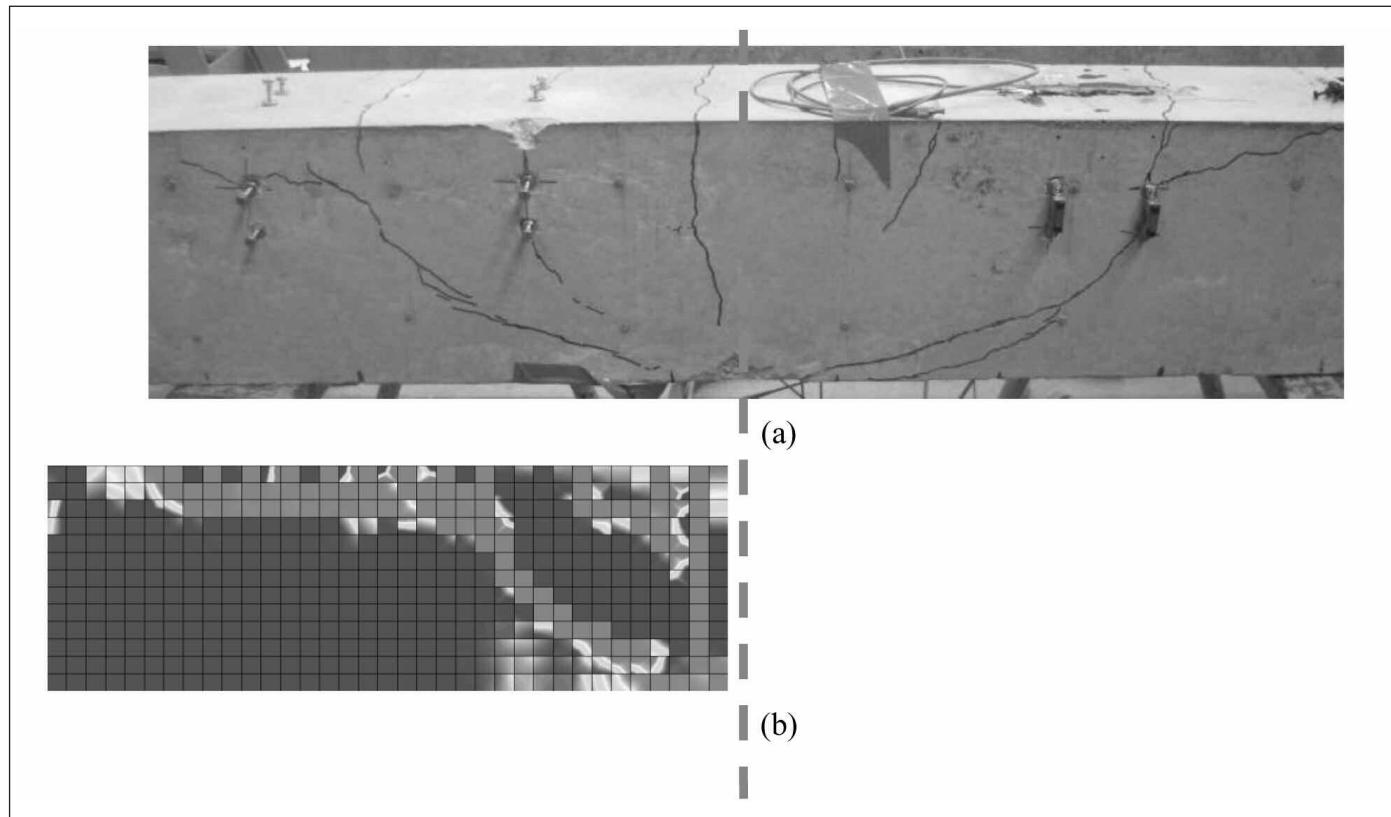


Figure 4 : Profil de fissuration réel (a) et simulé (b) en parement.

ment supérieur (M1up). Le même type de capteur positionné latéralement montre une forte sous estimation de son élongation (Figure 6.(b)). Une analyse détaillée du profil de fissuration montre qu'un de ses points d'ancrage a été traversé par une fissure créant un jeu et perturbant fortement la mesure, contrairement au capteur en face supérieure pour lequel la fissure s'est produite entre les deux points d'ancrage du capteur (voir partie gauche de la Figure 4.(a)).

Le capteur noyé E3 est comparé au capteur à corde vibrante positionné symétriquement par rapport à l'axe de la poutre et à la modélisation numérique (Figure 6.(c)). La mesure par corrélation d'image est aussi proposée mais montre une valeur nettement plus grande puisqu'elle est en surface alors que les capteurs sont proches des armatures longitudinales qui jouent pleinement leur rôle de limiteur d'ouverture de fissure. Les deux capteurs noyés donnent

des résultats de par et d'autre de la réponse numérique. Notre interprétation basée sur l'analyse post-mortem de la poutre est que la symétrie avant-arrière de la réponse locale est perdue lors de la fissuration (profil de fissure différent sur les deux faces de la poutre), alors que la symétrie droite-gauche semble conservée à partir des deux mesures par cordes vibrantes (C-110 left et C-110 sym). La modélisation numérique, respectant la première symétrie, propose un résultat intermédiaire aux résultats expérimentaux. Après cette interprétation détaillée, on peut conclure que les résultats sont de bonne qualité.

Le capteur noyé E2 (Figure 6.(d)), ainsi que le capteur à corde vibrante, ont donné une très bonne mesure avant la plastification des armatures longitudinales. Toutefois, ces capteurs sont positionnés dans la partie centrale de la poutre qui se fissure principalement. Par conséquent, ils atteignent leur limite de la plage de mesure lors de l'ou-

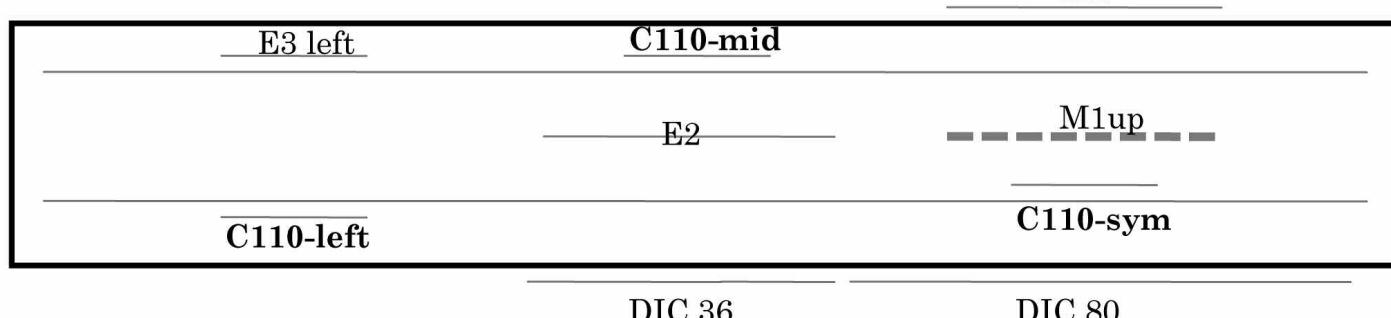


Figure 5 : Positionnement des capteurs présentés dans cette contribution vue de la face en tension (Ex = capteur fibre optique noyée ; Mx = capteur à fibre optique en parement ; C110 = capteur à corde vibrante noyé ; DIC = corrélation d'images)

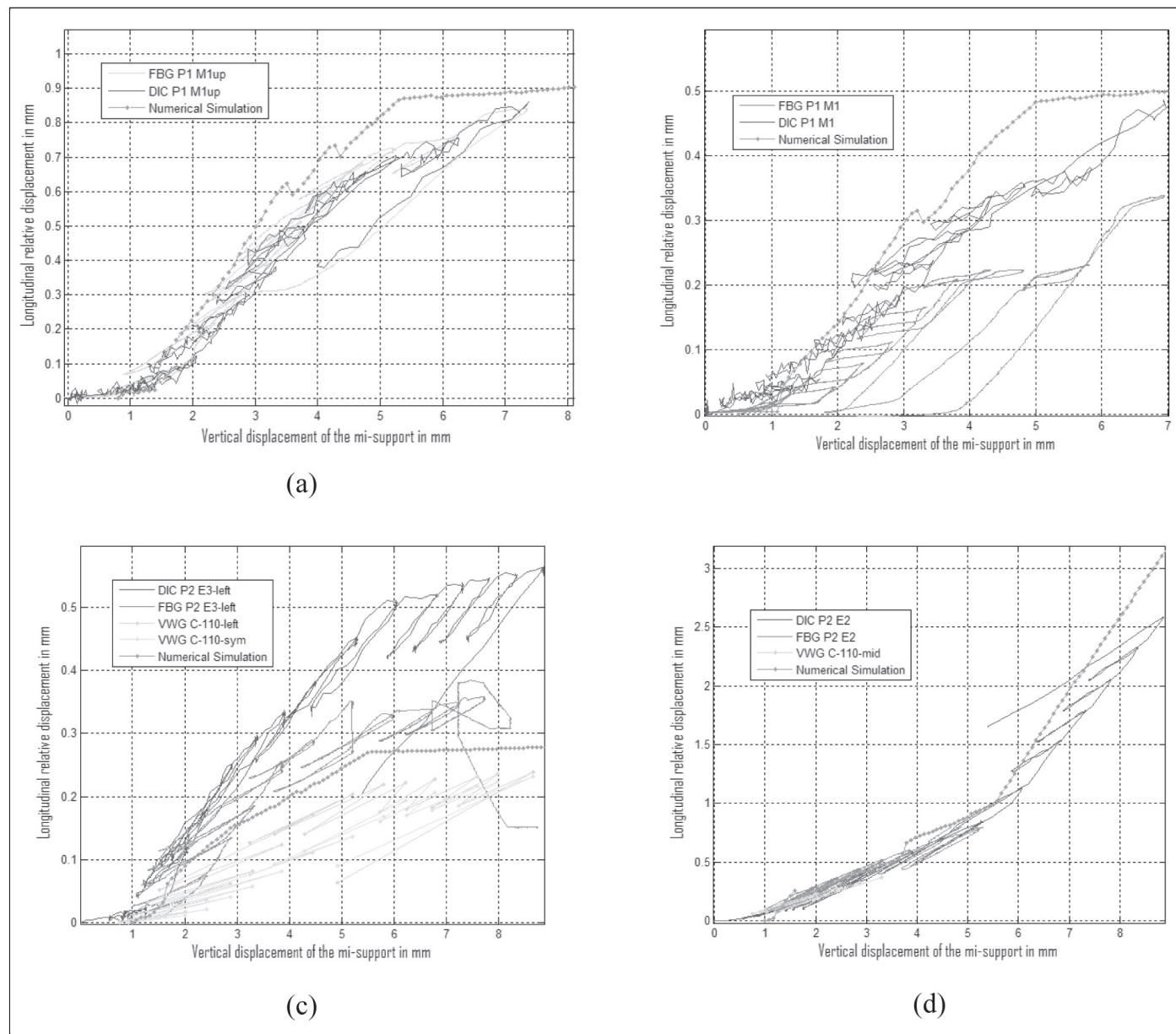


Figure 6 : Evolutions des mesures de déplacements relatifs en fonction de la flèche de la poutre.

verture de fissure et le signal est perdu peu avant la plastification des aciers. La mesure issue du modèle numérique est relativement bien corroborée par la mesure en surface par corrélation d'image. Contrairement aux autres mesures, dans cette position, une accélération de l'évolution de la mesure de déplacement relatif est observée en fonction de la flèche de la poutre. En effet, ici la fissure se développe continument, alors que les zones entre fissures se déchargent et les déplacements relatifs atteignent un palier lié au palier en moment de flexion.

Il est à noter que le modèle numérique surestime systématiquement les déplacements relatifs pour une flèche donnée. Cela peut s'expliquer partiellement par une plus forte localisation des dommages et donc des déplacements. En effet, le nombre de fissures (Figure 4) est moindre dans le modèle numérique. Par conséquent, à flèche égale, les déplacements relatifs de par et d'autre des fissures est plus grand dans le modèle numérique. Cet aspect pourrait être amélioré en introduisant dans le modèle numérique des

défauts avec les effets d'inclusion des cadres de ferraillage et des champs aléatoires des propriétés du béton. Par ailleurs, l'hypothèse d'adhérence parfaite entraîne un fort endommagement de la maille béton environnante ne permettant pas de modéliser la contrainte résiduelle de glissement d'interface qui pilote en grande partie l'espacement des fissures dans le modèle physique.

5. CONCLUSION

Cette analyse détaillée du comportement d'une poutre en béton armé a montré, d'une part, que la modélisation numérique d'un élément de structure relativement simple est raisonnablement prédictive à la fois sur le comportement global et sur les mesures de déplacements relatifs à l'échelle de quelques centimètres, et d'autre part, que les capteurs basés sur des fibres optiques à réseaux de Bragg donnent une mesure très précise des déplacements recher-

chés jusqu'à des états limites ultimes. Toutes ces mesures ont été comparées à une mesure en parement du champ de déplacement par analyse d'image.

Toutefois, ce type de capteur peut atteindre certaines limites en fonction de leur usage. Dans cette étude, nous avons mis en évidence des mesures qui peuvent sortir des limites du capteur dans les zones de forte fissuration. Cette limitation peut être levée avec l'utilisation de capteurs avec une base d'interrogation plus longue acceptant une plus grande plage de mesure. Par ailleurs, l'ancrage des capteurs de parement, sur des structures de tailles réduites, semblent attirer la fissuration qui déchausse l'ancrage et perturbe de manière irréversible la mesure. Des fixations en parement par collage sont à prescrire dans ce cas là mais avec l'inconvénient de rajouter des problèmes de vieillissement et de fluage de la colle.

RÉFÉRENCES

- [1] Combe G., Richefeu V. (2013). Tracker: a Particle Image Tracking (PIT) technique dedicated to nonsmooth motions involved in granular packings. *Powders and Grains*, July 8-12, UNSW, Sydney, Australia, aIP Conf. Proc. 1542, 461.
- [2] Dufour F., Legrain G., Pijaudier-Cabot G., Huerta A. (2012). Estimate of crack opening from a 2D continuum-based FE computation, *Int. J. for Num. and Anal. Meth. in Geomech.*, Vol. 36, p. 1813-1830,
- [3] Giry C., Oliver-Leblond C., Dufour F., Ragueneau F. (2014). Cracking analysis of reinforced concrete structures, *Eur. J. of Env. and Civil Eng.*, <http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2014.881756>.
- [4] Mazars J. (1986). A description of micro- and macroscale damage of concrete structures. *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 25, n°5-6, pp 729-737.