

DÉVELOPPEMENT DE NOUVEAUX CAPTEURS POUR CARACTÉRISER L'ENDOMMAGEMENT D'ÉLÉMENTS DE STRUCTURE EN BÉTON : APPLICATION À LA SHM

DEVELOPMENT OF NEW SENSORS TO CHARACTERIZE THE DAMAGE OF STRUCTURAL ELEMENTS IN CONCRETE: APPLICATION TO SHM

**Andrés BELISARIO^(a), Catalin CODREANU^(a), Saheba ZEDEK^(a), Thierry CAMPS^(a),
Raoul FRANÇOIS^(b*), Mahamadou MOUNKAILA^(a), Christophe ESCRIBA^(a), Jean-Yves FOURNIOLS^(a)**
a. LAAS-CNRS, UPR 8001, Toulouse
b. Université de Toulouse, LMDC, UPS, INSA, Toulouse
* auteur correspondant : raoul.francois@insa-toulouse.fr

RÉSUMÉ

Cet article présente une stratégie de détection des endommagements mécaniques d'une poutre en béton armé renforcée par collage de composites carbone (TFC®) basée sur l'utilisation conjointes de capteurs piézoélectriques et d'accéléromètres classiques. Une sollicitation par impacts répétés pouvant représenter l'action des véhicules sur un joint de chaussée au niveau d'un ouvrage d'art est réalisée à différents niveaux d'endommagement en flexion de la poutre en béton armé. Les résultats montrent que les capteurs piézoélectriques donnent une réponse beaucoup plus riche que les accéléromètres en autorisant une étude dans le domaine des hautes fréquences (supérieures à 2 kHz). La réponse spectrale apparaît largement affectée par l'endommagement mécanique de la poutre et laisse penser à une utilisation possible en SHM pour les ouvrages d'art.

ABSTRACT

This paper presents a strategy for the detection of mechanical damage of a reinforced concrete beam strengthened by Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) sheets (TFC®) based on the joint use of piezoelectric sensors and conventional accelerometers. The beam is subjected to repeated impacts which may represent the action of vehicles on a roadway joint of a bridge, at different levels of damage induce by bending of the reinforced concrete beam. The results show that piezoelectric sensors provide a much wide response than accelerometers allowing a study in the high frequency range (above 2 kHz). The spectral response appears largely affected by mechanical damage on the beam and suggests a possible use for SHM in Civil Engineering structures.

Mots-clés : endommagement, SHM, piézoélectrique, béton armé

1. INTRODUCTION

Les infrastructures de transports sont directement liées à l'économie d'une nation et leur contrôle et maintenance pour à la fois prolonger leur durée de vie et prévenir les défaillances est indispensable. Cependant le Structural Health Monitoring (SHM) pour le Génie Civil est un défi. En effet, comme indiqué par Sohn et al [1] dans leur premier principe de la SHM : « All structures have inherent flaws ». En Génie Civil, à la fois par les dimensions de la structure, les caractères fortement hétérogènes et non linéaires des matériaux, les difficultés liées à l'interaction sols-structures rendent la modélisation numérique du comportement très difficile et donc la caractérisation de l'évolution du comportement en fonction du vieillissement et de la dégradation des matériaux constitutifs. La surveillance des vibrations de la structure sous l'effet des sollicitations courantes comme le trafic routier est une solution possible pour détecter une modification du comportement sans nécessairement quantifier cette modification en termes de réponse mécanique globale mais plutôt en terme « d'endommagement » de l'ouvrage. Par ailleurs, l'analyse vibratoire peut être multidirectionnelle et s'intéresser aux évolutions à hautes fréquences potentiellement plus sensibles à des endommagements locaux comme des ruptures partielles de câbles de précontraintes.

Dans cet article, nous nous intéressons à la réponse d'une poutre en béton armé renforcée par des feuilles de composites carbone (TFC ©) collés sur la surface tendue, sollicitée par des impacts répétés pouvant être représentatifs d'un trafic routier pour différents niveaux d'endommagement. Les endommagements mécaniques sont volontairement significatifs et correspondent à la différence entre la poutre non sollicitée puis ensuite chargée et fissurée au-delà du palier de plasticité des armatures tendues.

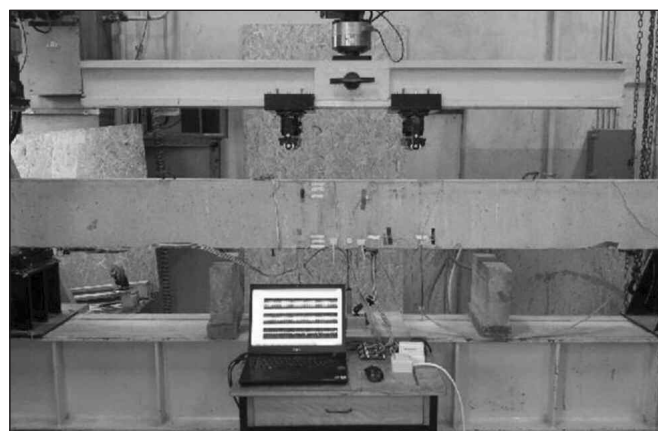


Figure 1 : Banc de flexion et d'instrumentation

2. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

La poutre testée est un élément en béton armé de dimensions 150 x 280 x 3000 mm, ferrillée par deux HA 12 mm en partie tendue (enrobage 20 mm) et renforcée par un tissu carbone (TFC) sur la face tendue. La poutre est sollicitée en flexion 4 points (figure 1) et instrumentée aux deux extrémités et à mi portée.

Le chargement consiste en un palier à 20kN avant plastification des armatures tendues, un palier à 30 kN après plastification des armatures tendues suivi d'un déchargement total de la poutre (figure 2). Les impacts réalisés sur l'extrémité de la poutre sont obtenues par un marteau piqueur équipé d'un outil cylindrique légèrement bombé en acier pour ne pas endommager le béton et impactant la poutre à une cadence d'environ 24 coups par secondes.

Le système d'acquisition comprend par nœud de mesure une jauge de déformations, un accéléromètre (XYZ) et

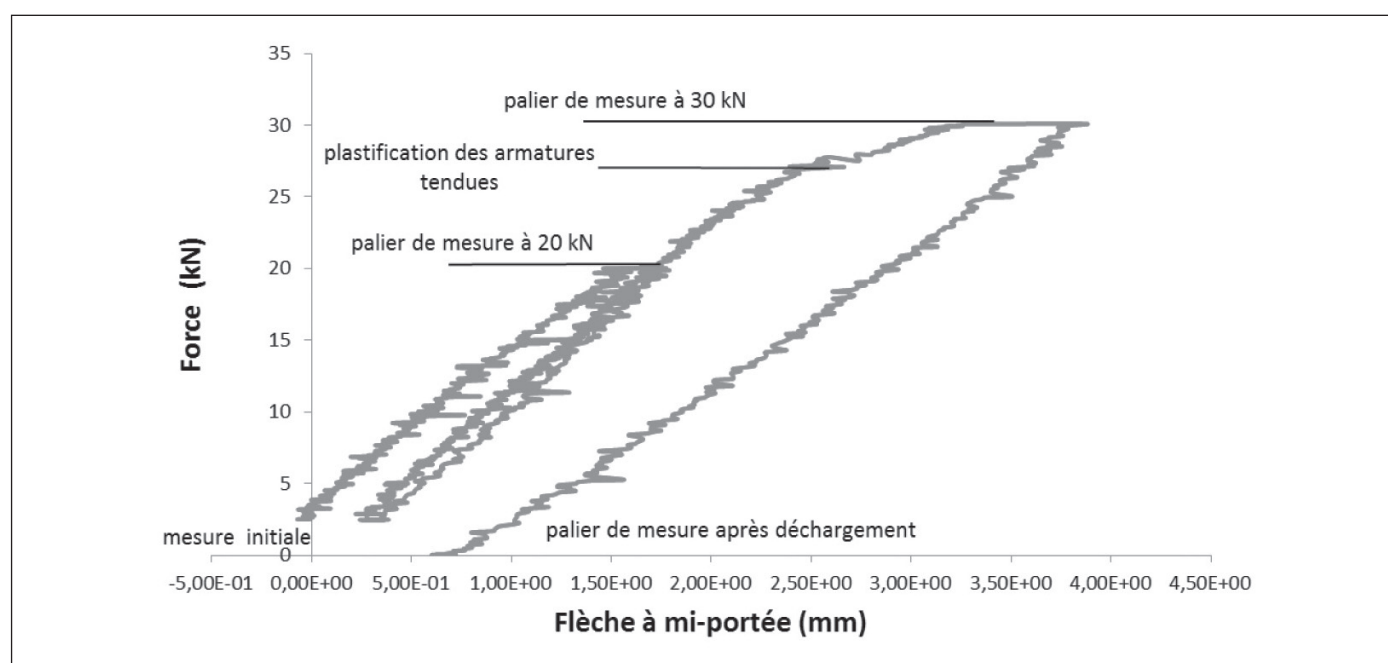


Figure 2 : Courbe force-flèche et paliers de mesure

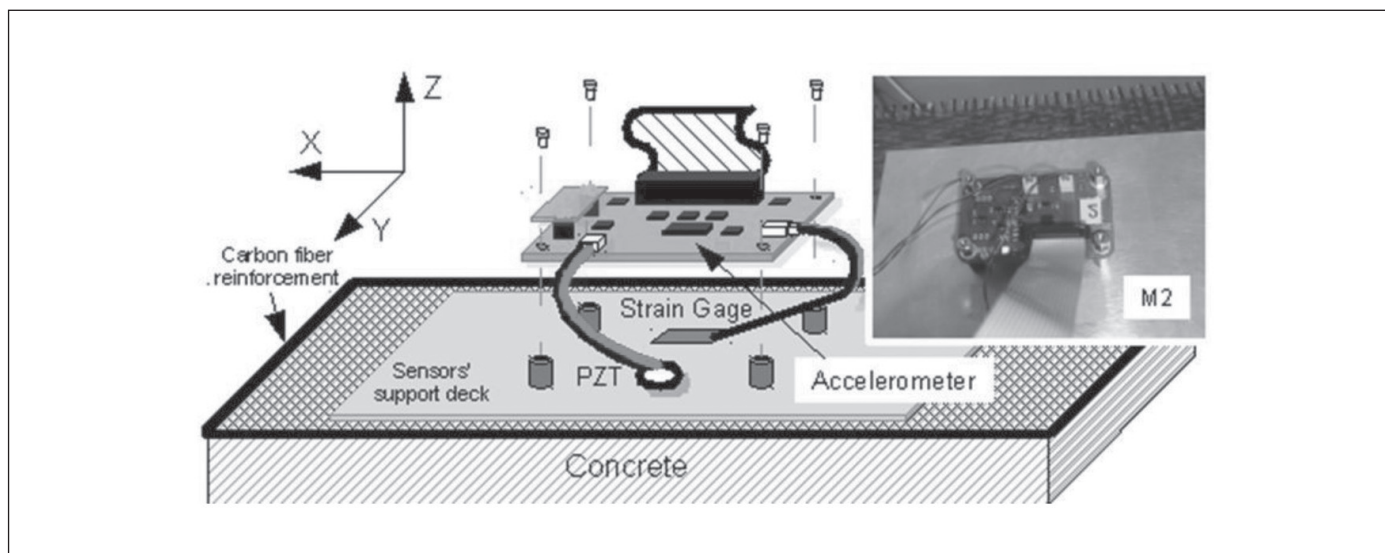


Figure 3 : Schéma du système d'acquisition

enfin un capteur piézoélectrique (PZT). Ces capteurs sont robustes et de faible coût ce qui peut autoriser leur installation sur des structures de grandes dimensions comme les ouvrages d'art. L'utilisation d'accéléromètres dans les trois directions de la poutre permettra de vérifier la pertinence des informations délivrées par les capteurs PZT (figure 3).

3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

La figure 4 montre que la réponse des capteurs PZT est omnidirectionnelle dans le plan (longitudinale et transverse) et qu'elle intègre les vibrations suivant les axes X et Y qui eux sont bien séparées dans le cas des accéléromètres. Par ailleurs, on constate également que les capteurs PZT permettent d'obtenir une réponse en haute fréquence ($>1\text{kHz}$) ce qui n'est pas le cas des accéléromètres. Ces derniers présentent une bande passante réduite ($\sim 2\text{kHz}$),

mais aussi et surtout un rapport signal sur bruit limité à 40dB qui ne leur permet pas de mesurer des vibrations sur plus de deux décades. Pour sa part, le capteur PZT n'est pas limité par sa réponse fréquentielle et permet des mesures sur une dynamique de signal supérieure à quatre décades. Cela s'avère précieux pour l'analyse des signaux au-delà du kilohertz où l'amplitude des signaux s'atténue rapidement de 3 à 4 ordres de grandeur. Ainsi, on note clairement la présence de vibrations jusqu'à environ 10kHz ($50\mu\text{s}$).

La figure 5 montre la comparaison des spectres obtenus par les capteurs PZT sur la poutre non sollicitée et la poutre après chargement à 30 kN (puis déchargement). On constate qu'à basse fréquence (zone A $f < 400\text{Hz}$) seule l'amplitude des pics mesurée est affectée. Entre 400Hz et environ 1000Hz les amplitudes sont bien plus élevées mais très semblables. Enfin au-delà de 1000 Hz, on note clairement un comportement spectral distinct (fréquence et amplitude).

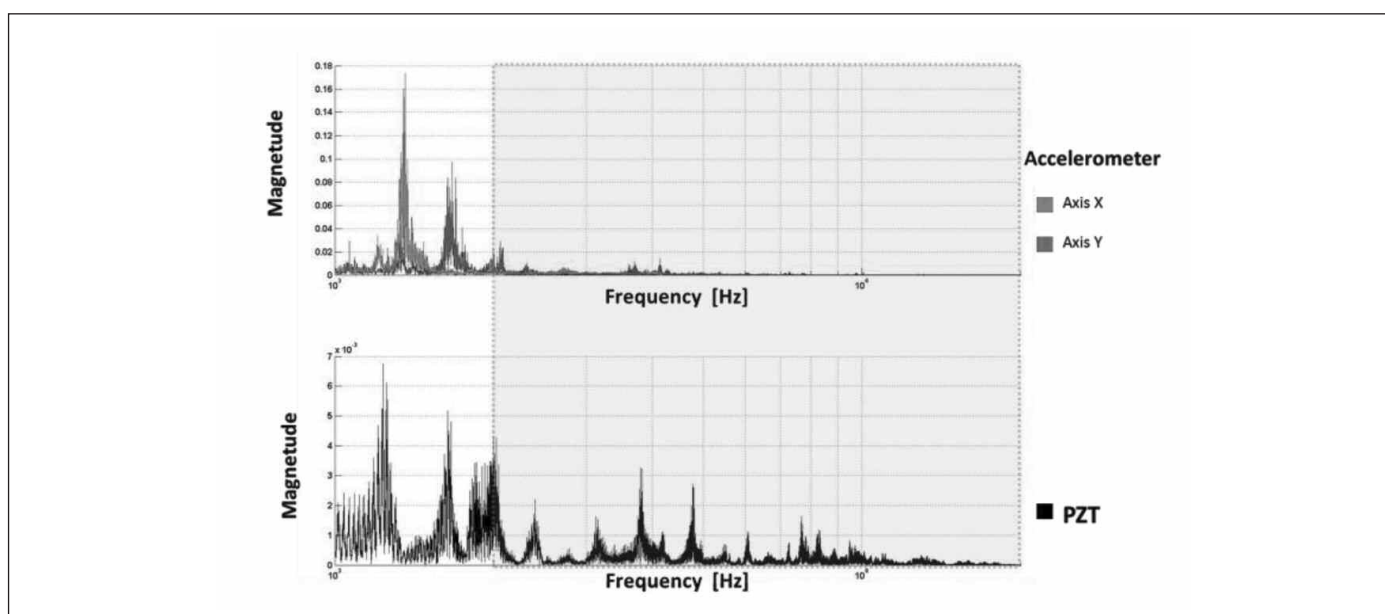


Figure 4 : Comparaison des profils spectraux suivant X et Y pour les accéléromètres avec le profil « mixte » mesuré par les PZT

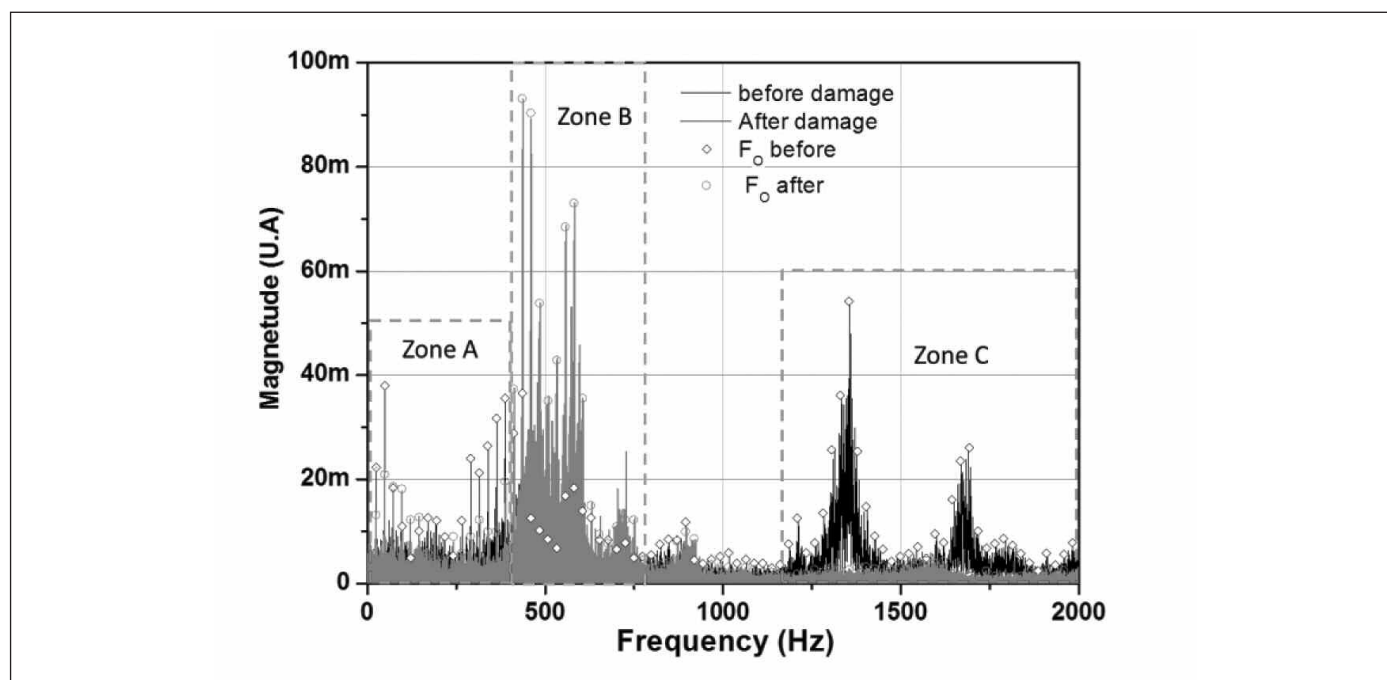


Figure 5 : Comparaison des profils spectraux avant chargement et après chargement jusqu'à 30kN et déchargement

Pour faire l'analyse du comportement de la poutre, on va se baser sur la fréquence d'excitation imposée par le marteau piqueur et simplifier le spectre en le discrétisant. A titre d'exemple, nous allons traiter le spectre après endommagement à 30 kN (figure 6) en limitant l'analyse à 2 kHz. Après une acquisition temporelle de 5 secondes avec un échantillonnage à 50 kHz, on dispose de 250000 points de mesure. Les deux premières secondes, correspondant au régime transitoire sont supprimées, et on réduit l'acquisition aux trois seconde en régime établi (150000pts). Ce nombre de points est très élevé, et dans la perspective de réaliser un système autonome et compact, il est nécessaire dans notre prétraitement de réduire drastiquement ce

nombre de points à quelques centaines. La transformée de Fourier de ce signal temporel nous donne un spectre allant de 10 à 20 kHz, bien résolu (0,33Hz), et cela fait encore près de 60000 points à traiter. A ce spectre complet, on préférera le spectre discrétisé qui se limite à conserver les points du spectre correspondant aux multiples de la cadence d'impact d'excitation (24,17Hz). Cette FFT décimée ne comprend plus que 827 points en accord avec nos attentes. Même si cette enveloppe du spectre semble grossière, elle reste pertinente pour une quantification de la dégradation. Pour affiner cette résolution, nous aurions pu réduire à 10 impacts par seconde pour obtenir une résolution de 10Hz.

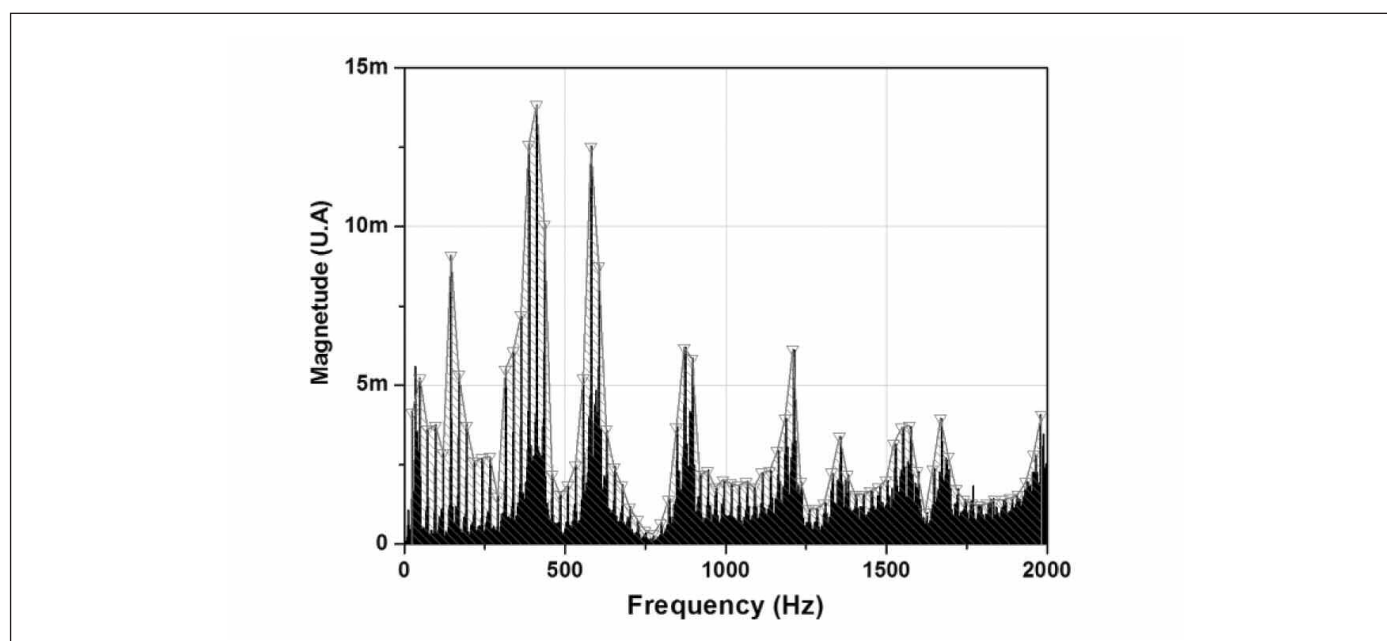


Figure 6 : Discrétisation du spectre à partir de la fréquence d'excitation et de ses harmoniques

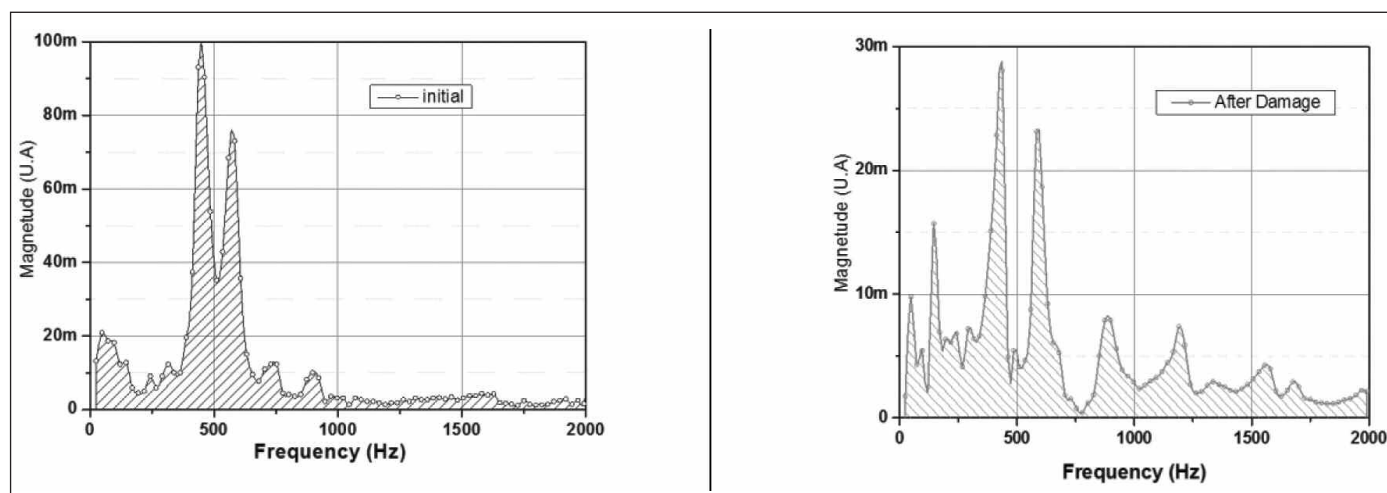


Figure 7 : Analyse de l'évolution de l'enveloppe des harmoniques de la fréquence d'excitation avant (a) et après (b) chargement à 30kN

Les figures 7 (a) & (b) montrent les deux spectres discrétisés avant et après l'endommagement mécanique en flexion 4 points par une charge de 30 kN.

Pour mieux visualiser l'évolution de la réponse spectrale, on trace le rapport entre l'amplitude du spectre avant et après l'endommagement dû au chargement (30kN) au-delà du palier de plasticité des aciers tendus. Ce rapport d'amplitude donne une information sur l'endommagement irréversible subi par la poutre. On peut ainsi proposer une méthode de surveillance de l'ouvrage par rapport à une certaine définition du niveau d'endommagement. Ainsi en fixant un seuil (exemple d'un rapport 3 en pointillé sur la figure 8) on peut piloter le niveau d'endommagement et lancer un contrôle quand ce seuil est atteint. En pratique, il sera sans doute plus pertinent de définir le seuil d'endommagement par rapport à une aire plutôt qu'un niveau.

Il reste bien sûr à quantifier le niveau d'endommagement mesuré par ce ratio d'amplitude. De plus, les domaines fréquentiels où ce seuil est dépassé sont susceptibles d'informer sur la taille et la nature de l'endommagement. Ceci fera l'objet d'une campagne d'essais à différents niveaux de chargement et types d'endommagements irréversibles sur des éléments de béton armé, pour ensuite être quantifié par des approches basées sur un apprentissage par réseaux neuronaux.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'analyse de la réponse spectrale d'une poutre en béton armé sollicitée par des vibrations longitudinales pouvant simuler le trafic routier sur le tablier d'un pont, montre que sa réponse spectrale est sensible à l'endommagement mécanique irréversible subi par la poutre. Une première analyse basée sur la différence d'amplitude des réponses dans les harmoniques de la sollicitation montre qu'il est possible de quantifier un endommagement par analyse spectrale. Il reste bien sûr à progresser sur la signification

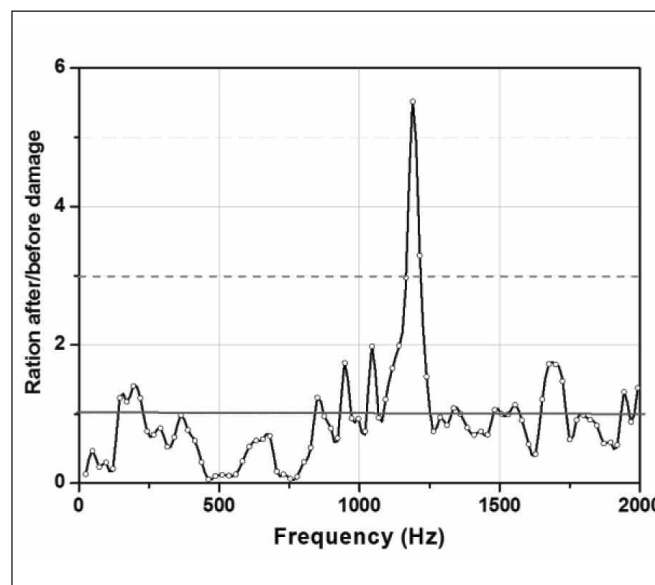


Figure 8 : Evolution du rapport entre l'amplitude du spectre avant et après endommagement par un chargement à 30kN

et la classification de l'endommagement en corrélant l'évolution spectrale à l'endommagement mécanique.

Par ailleurs, la figure 9 montre que c'est dans la gamme 1kHz à 20kHz que les deux spectres, avant et après dégradation de la poutre, commencent à se dissocier plus distinctement (apparition de nouvelles résonances) et nous pensons que c'est dans cette gamme qu'il faudra investiguer pour extraire une signature spectrale de la dégradation.

Pour y parvenir il nous faudra encore, en modifiant le premier étage « amplificateur de charge » intégrer un filtre passe haut à (FC~2kHz), et ainsi réduire l'amplitude des signaux basse fréquence de fortes amplitudes (mode longitudinal). Ceci permettra notamment, avant la conversion A/N, d'amplifier davantage les signaux temporels et de réduire aussi le temps d'acquisition à 0,3 seconde tout en conservant une bonne précision.

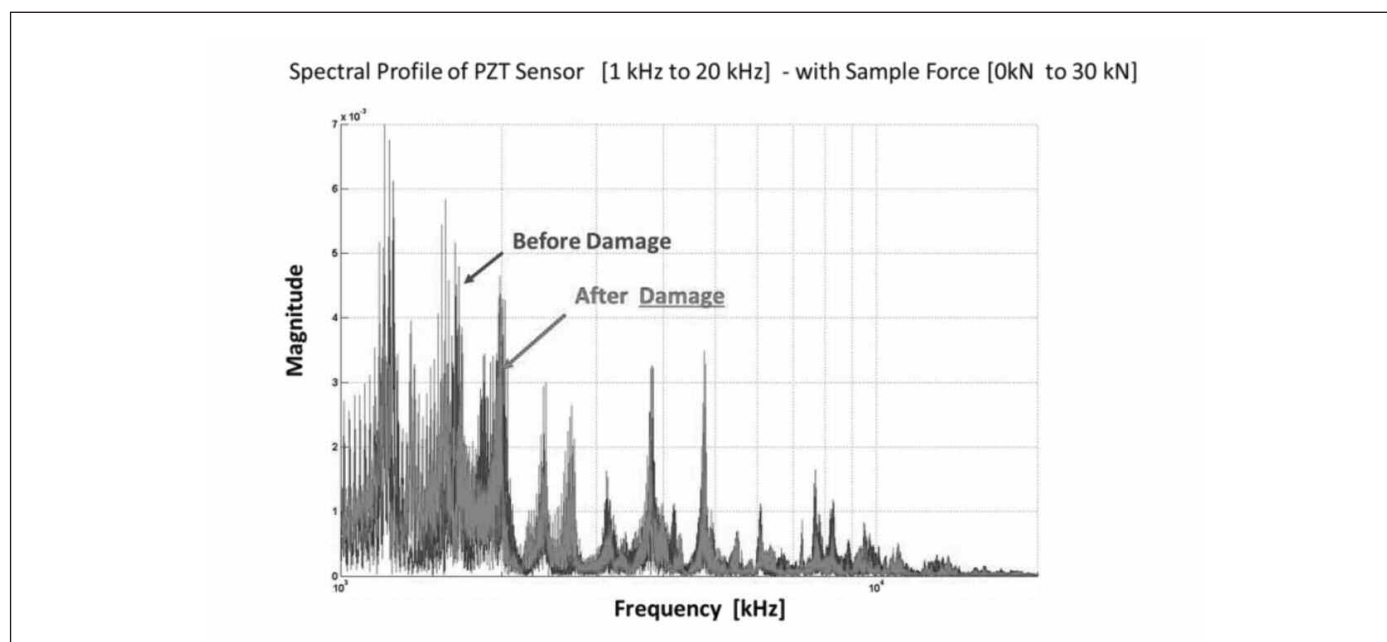


Figure 9 : Evolution des spectres mesurés par les PZT dans la gamme 1kHz à 20kHz avant et après endommagement par un chargement à 30kN

RÉFÉRENCES

- [1] SOHN, Hoon; FARRAR, Charles R.; Hemez Francois M.; *et al.* A review of Structural Health Monitoring Literature : 1996–2001. 2004. Los Alamos National Laboratory (*Report LA-13976-MS*). NM, USA 2004. 311 p.
- [2] KEITH, Worden; FARRAR, Charles R.; MANSON, Graeme; *et al.* The Fundamental Axioms of Structural Health Monitoring. 2007. Philosophical Transactions of the Royal Society:

Mathematical, Physical & Engineering Sciences 463 (2082): 1639–1664. doi:10.1098.

- [3] BALAGEAS, Daniel; FRITZEN, Claus-Peter; GUEMES, Alfredo. Structural Health Monitoring. London : ISTE. 499p. ISBN 1-905209-01-0

- [4] BARTOLOME, Eduardo. Signal Conditioning for Piezoelectric Sensors. 2010. Texas Instruments Application Note SLYT369.