

ÉVALUATION DES ENDOMMAGEMENTS À L'ÉCHELLE LOCALE DES PORTIQUES EN BÉTON ARMÉ PAR MESURES DYNAMIQUES

ASSESSING LOCAL-SCALE DAMAGE IN REINFORCED CONCRETE FRAME STRUCTURES USING DYNAMIC MEASUREMENTS

Q.-B. BUI^(a), M. MOMMESSIN^(a), P. PERROTIN^(a), J.-P. PLASSIARD^(a), O. PLÉ^(a)

a. Université de Savoie, LOCIE - CNRS UMR-5271, Polytech Annecy-Chambéry, 73376 Le Bourget-du-Lac

* auteur correspondant : Quoc-Bao.Bui@univ-savoie.fr

RÉSUMÉ

Les applications des mesures dynamiques sur les structures des bâtiments existants sont nombreuses : vérification de la vulnérabilité sismique des structures ; auscultation de la capacité des structures en situation post-sismique ou après des modifications au voisinage ; ... A l'heure actuelle, ce type de mesures permet le diagnostic d'une structure à l'échelle globale (toute la structure) alors que l'identification et la localisation des endommagements à l'échelle locale (chaque élément de la structure) restent encore à approfondir. Dans le cadre de cette recherche, le diagnostic à l'échelle locale d'une structure poteaux-poutres béton armé instrumentée en laboratoire est étudié. Le portique se compose de deux poteaux et d'une poutre (forme en H). Il a été chargé en partie centrale de la poutre, en plusieurs étapes et ce jusqu'à sa rupture. Les déplacements ont été mesurés simultanément par capteurs de déplacement et analyse d'images. Après chaque cycle charge-décharge, des mesures dynamiques ont été réalisées à l'aide d'accéléromètres.

Dans une première partie, les observations issues de l'expérimentation sont présentées, avec l'apparition d'endommagement et la diminution des fréquences propres simultanément à celle de la rigidité. Par la suite, la technique de caractérisation d'endommagement développée

prenant en compte des connexions semi-rigides du portique est exposée. Les rigidités ont été identifiées en calibrant les réponses dynamiques de la structure par rapport au modèle. Des facteurs de rigidité (« fixity factor ») ont été utilisés pour évaluer la perte de rigidité des connexions semi-rigides du portique. La validité des facteurs de rigidité identifiés a été évaluée en utilisant les résultats expérimentaux statiques.

Cette étude montre que des mesures dynamiques couplées à une analyse par éléments finis peuvent fournir une méthode rapide et efficace pour évaluer la qualité des connections des structures en béton armé.

ABSTRACT

The applications of dynamic measurements on the structures of existing buildings are numerous: the verification of the seismic vulnerability of structures, the auscultation of the structure's capacities in post-earthquake situations or after changes in the vicinity, etc. At present, this type of measurement enables the diagnosis of a structure on a global scale (the whole structure), while the identification and location of local damage (each element of the structure) remains to be explored. Diagnosis at the local scale was studied in the laboratory on an instrumented structure

consisting of two columns and one beam (H form). It was loaded in the central part of the beam in several stages until it broke. Displacements were measured simultaneously using displacement sensors and image correlation. After each load/unload cycle, dynamic measurements were taken using accelerometers.

In the first part of this paper, the observations from the experiment are presented, with the appearance of damage and the decrease in natural frequencies that occurred simultaneously with stiffness. Thereafter, the technique characterizing damage that was developed taking into account the semi-rigid connections of the frame is presented. The stiffness of the connections was identified by calibrating the dynamic responses of the structure with respect to a model. The fixity factors were used to assess the loss of stiffness in the semi-rigid connections. The validity of the fixity factors identified was evaluated using the static experimental results.

This study shows that dynamic measurement coupled with finite element analysis can provide a fast and effective method to assess the quality of connections of reinforced concrete structures.

Mots-clés : mesures dynamiques, auscultation, portique, béton armé, NDT

* * *

1. INTRODUCTION

Les mesures dynamiques in-situ sont des tests généralement non-destructifs réalisés directement sur des structures réelles [4]. Les applications des mesures dynamiques sur les structures des bâtiments existants sont nombreuses : vérification de la vulnérabilité sismique des structures qui ont été construites avant l'évolution des règles parasismiques [3] ; auscultation de la capacité des structures en situation post-sismique ou après des modifications du voisinage (creusement d'un tunnel, démolition des immeubles voisins par exemple,...) ; l'étude du comportement structural des ouvrages inhabituels [5], [15]. A l'heure actuelle, ce type de mesure permet le diagnostic d'une structure à l'échelle globale (toute la structure) alors que l'identification et la localisation des endommagements à l'échelle locale (pour chaque élément de la structure voire entre éléments) restent encore à approfondir. Dans le cadre de cette recherche, le diagnostic à l'échelle locale d'une structure poteaux-poutres instrumentée en laboratoire est étudié. Cette étude s'insère dans un contexte national de réévaluation des structures existantes.

2. EXPÉRIMENTATION

2.1. Description du dispositif

Le portique (Fig. 1) se compose de deux poteaux de 2m de hauteur, 20x25 cm² de section, ferrailés par 4 HA10 et 17

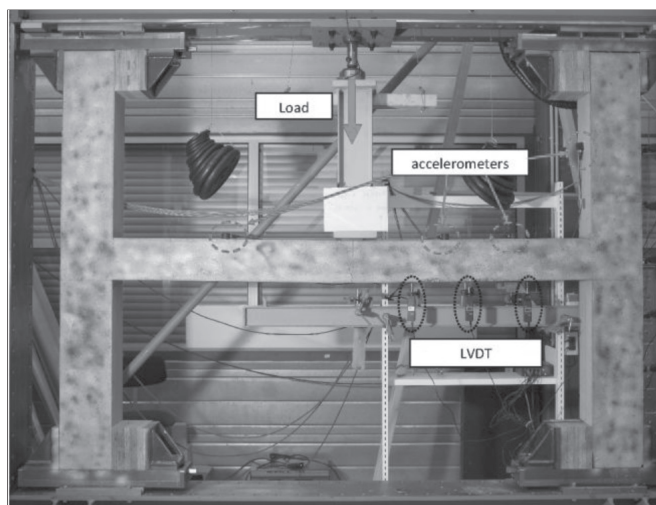


Figure 1. Portique en béton armé.

cadres $\Phi 6$ mm espacés de 12cm et d'une poutre de 2,27m de travée, 20x20 cm² de section, ferrailés par 2 barres longitudinales supérieures HA10 (ancrage de 40 cm dans les poteaux), 2 barres longitudinales inférieures HA12 (ancrage de 12 cm dans chaque poteau), 18 cadres $\Phi 6$ mm espacés de 13cm. Le bâti de chargement est constitué d'un châssis métallique composé de poutres HEB 400 et UPN 400.

Les déplacements ont été mesurés simultanément par le capteur de la presse, les capteurs de déplacement positionnés à la face inférieure de la poutre et par la technique de corrélation d'images [14]. Les caractéristiques dynamiques de la structure ont été déterminées au moyen de quatre accéléromètres unidirectionnels (figure 1), dont l'un a été collé sur un poteau pour mesurer l'accélération horizontale et les trois autres ont été collés sur la poutre pour mesurer les accélérations verticales.

2.2. Déroulement du test

Avant le test, des mesures dynamiques au marteau à choc ont été effectuées pour caractériser l'état initial de la structure. Le portique a été ensuite chargé au milieu de la poutre avec un pilotage en déplacement (0,02 mm/s). Après les chargements respectivement à 21kN, 58kN et à la rupture, le portique a été totalement déchargé pour réaliser des mesures dynamiques, dans l'objectif de déterminer les fréquences propres et les déformées modales à des états d'endommagement différents.

2.3. Résultats dynamiques

Deux techniques de traitement des données ont été utilisées : la FFT (Fast Fourier Transform) et la FDD (Frequency Domain Decomposition [1]).

La figure 2 montre que les résultats des fréquences obtenues sont similaires pour les deux méthodes. La figure 3 présente l'exemple de deux déformées modales respectivement à 73 et 195 Hz obtenus par FDD.

La fig. 4 (en haut) présente la diminution des fréquences propres des cinq premiers modes, en fonction de la charge

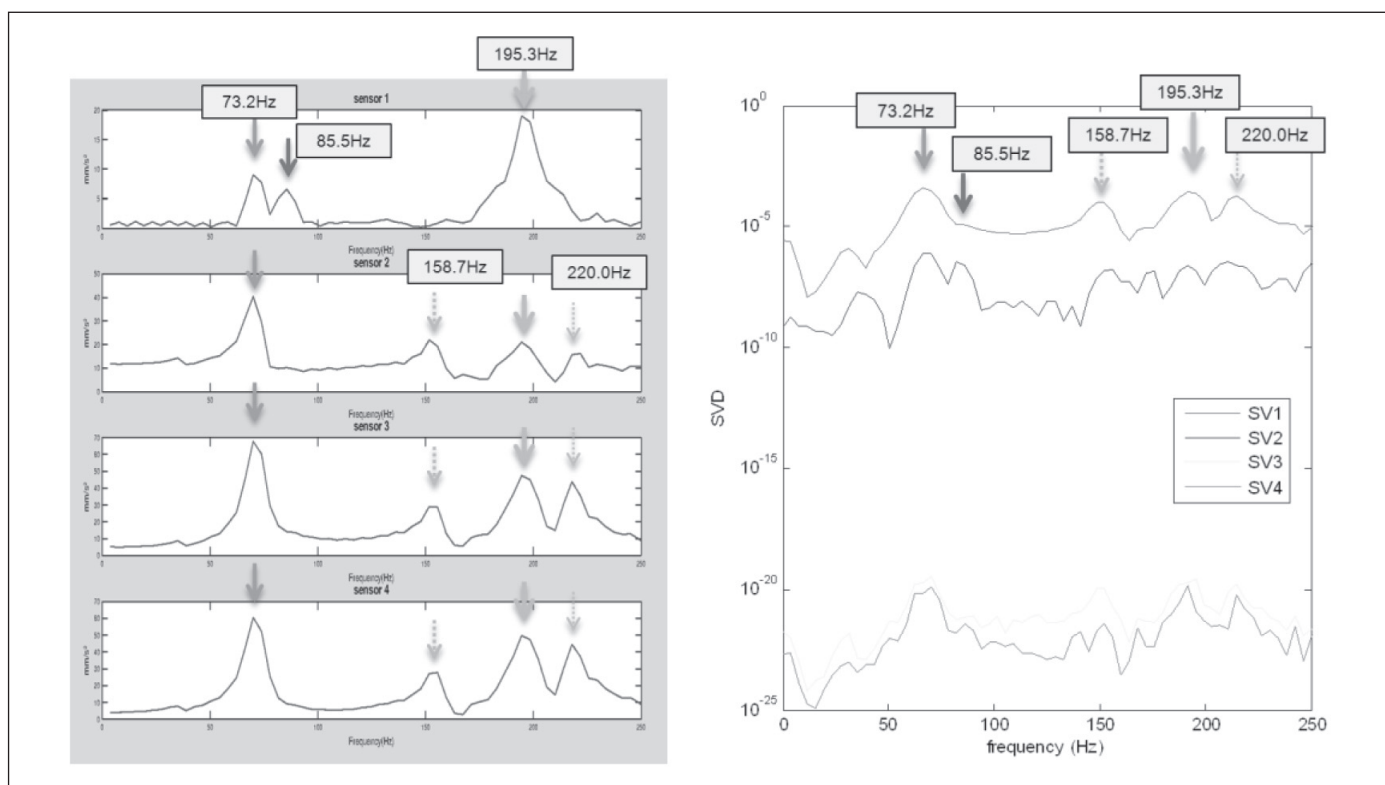


Figure 2. Fréquences identifiées par la méthode FFT (à gauche) et la méthode FDD.

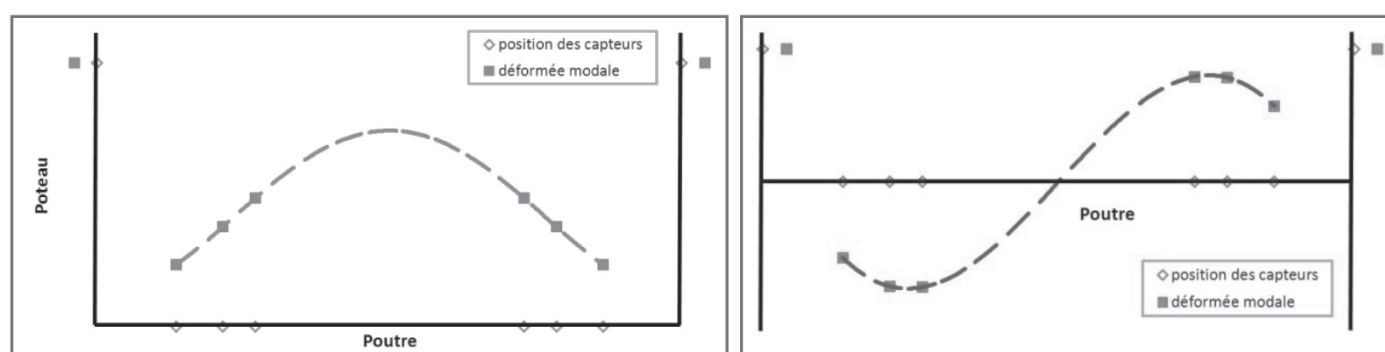


Figure 3. Déformées modales obtenues par des mesures dynamiques. A gauche : à 73 Hz, à droite : à 195 Hz.

préalablement exercée. Les modes 1, 2 et 4 correspondent aux modes propres du portique en béton armé. Les modes 3 et 5 sont dus aux vibrations du bâti de chargement, en interaction avec le portique BA, ce qui sera confirmé plus tard par les modélisations numériques. La fig. 4 (en bas) présente le taux de diminution des fréquences propres en fonction des niveaux de chargement. L'apparition des microfissures a provoqué une diminution de la rigidité. A la rupture, la première fréquence propre diminue d'environ 19 % par rapport à l'état initial. Ce résultat est similaire à ceux obtenus dans la littérature [11] et sera discuté dans la suite de cet article.

3. PROPOSITION D'UNE MÉTHODE DE CARACTÉRISATION D'ENDOMMAGEMENTS

3.1. Approche proposée

Une hypothèse est prise : dans les structures poteau-poutre en béton armé, les endommagements se situent principalement aux deux extrémités et au milieu des poutres ou aux extrémités des poteaux car les moments de flexion et les efforts tranchants sont habituellement les plus importants en ces points. En réalité, les endommagements peuvent avoir lieu à n'importe quel endroit dans la structure mais ces zones sont les plus sensibles à surveiller. Ces zones importantes sont donc modélisées par des connexions semi-rigides en rotation. Les rigidités actuelles des liaisons

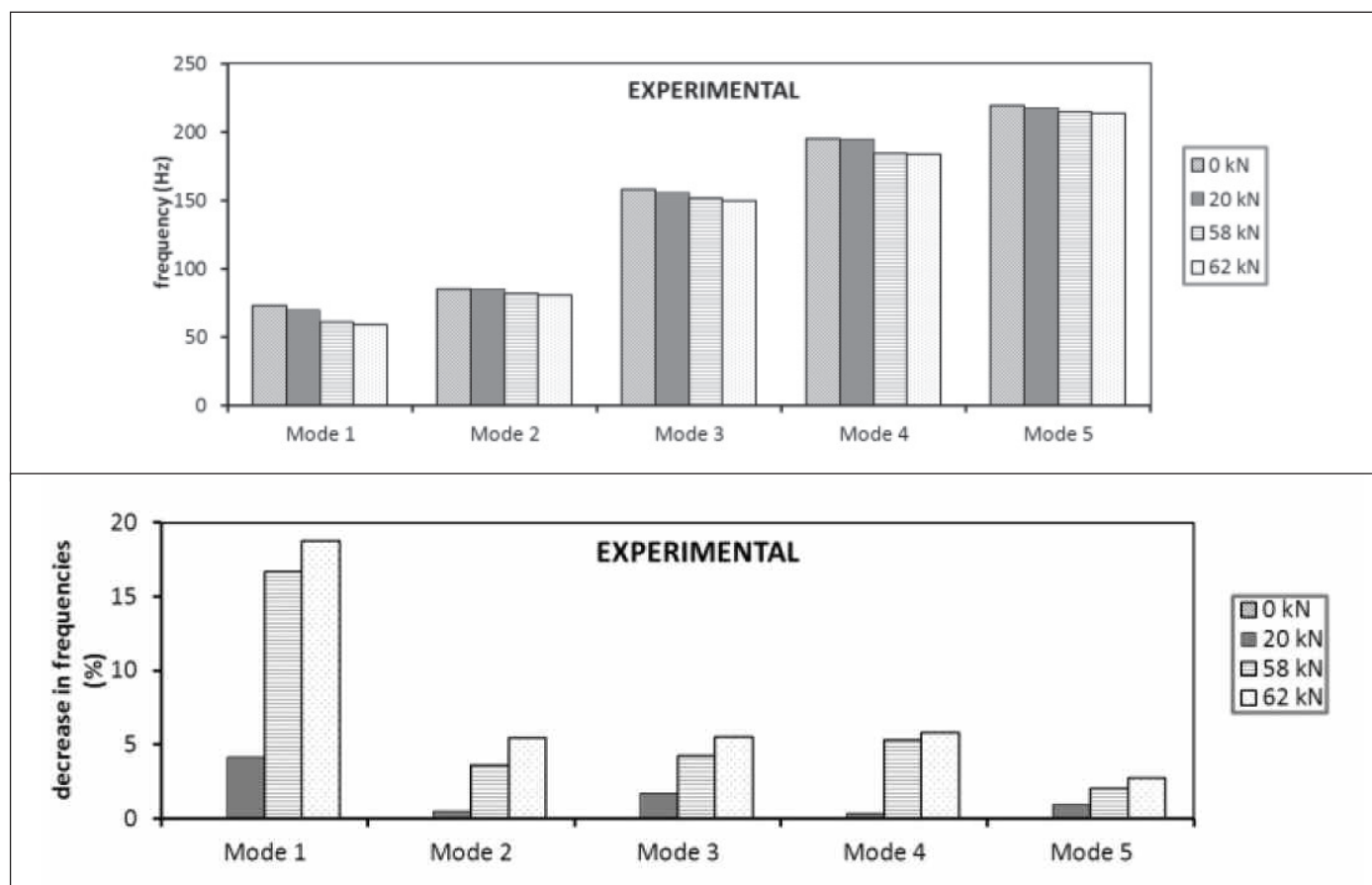


Figure 4. Résultats expérimentaux et numériques de la variation des fréquences propres suivant les niveaux de chargement.

sont les inconnues à identifier. Une fois les rigidités identifiées, le facteur de rigidité sera utilisé pour mieux évaluer l'état de ces connexions.

Il existe très peu d'études qui prennent en compte des liaisons semi-rigides dans leurs modèles en vue de caractériser la structure. Cette approche a été appliquée avec succès dans le domaine temporel sur des structures métalliques [10]. A notre connaissance, il n'y a pas encore d'études qui utilisent ce principe pour caractériser les structures en béton armé. Cet article étudie la possibilité d'appliquer des liaisons semi-rigides en rotation et les facteurs de rigidité dans l'évaluation de l'endommagement à l'échelle locale des portiques en béton armé, en exploitant les informations dans le domaine fréquentiel.

3.2. Facteur de rigidité

Dans le cas d'un nœud encastré, la rigidité est supposée égale à l'infini. L'angle entre la poutre et les poteaux reste constant. Dans le cas où la connexion n'est plus rigide (apparition des fissures,...), une rotation θ_c s'ajoute dans la rotation du nœud. La structure peut être modélisée avec des nœuds semi-rigides de rigidité en rotation k_c , avec $k_c = M_c / \theta_c$. Le coefficient de fixation p est introduit, qui a des valeurs entre 0 et 1 (0 pour des rotules parfaites et 1 pour des connexions rigides). La relation entre p et k_c est la suivante [13] : $p = 1 / (1 + 3EI / (k_c L))$. L'utilisation des facteurs de rigidité facilite la quantification de la perte de rigidité d'un nœud par rapport à son état initial.

4. EVALUATION DE L'APPROCHE PROPOSÉE

4.1. Application de l'approche proposée au portique expérimental

Des modélisations éléments finis 2D ont montré que le châssis métallique avait une influence sur le comportement dynamique du portique BA. Le châssis devra donc être introduit aussi dans le modèle numérique (Fig. 5). Le système châssis métallique + portique BA a été modélisé par des éléments « poutres » qui ont un comportement élastique linéaire et avec des nœuds semi-rigides élastiques linéaires en rotation aux extrémités.

L'identification des facteurs de rigidité p_1, p_2, p_3, p_4 qui reproduisent le mieux la réponse dynamique expérimentale, est obtenu en minimisant l'écart entre les 3 premières fréquences cibles à trouver et les fréquences identifiées expérimentalement. La concordance entre déformées modales expérimentales et celles du système identifié est ensuite vérifiée au moyen du coefficient MAC (Modal assurance criterion). Si les valeurs du MAC sont supérieures à 0.9, les déformées sont considérées comme corrélées [6]. Le Tab. 1 présente les p_i optimaux identifiés par le programme. La pertinence de ces valeurs sera évaluée dans la section suivante. Les résultats numériques du Tab. 1 montrent qu'à l'état initial, les liaisons ne sont pas parfaites.

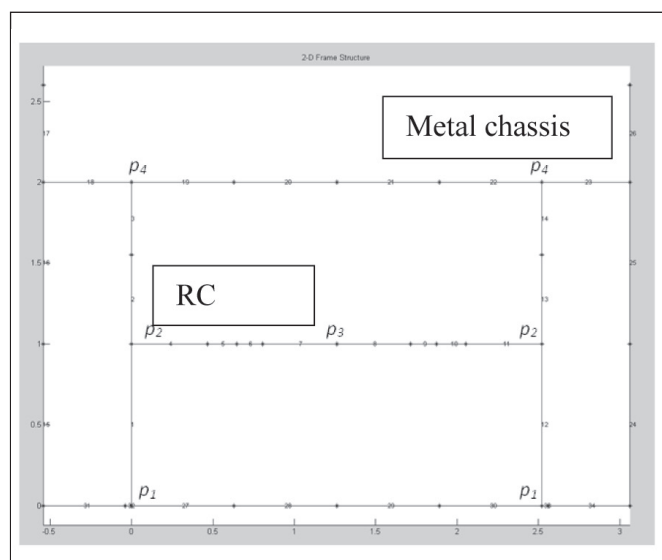


Figure 5. Discretisation du châssis métallique et du portique BA

tement rigides ($p_1 = p_2 = 0.8$). La valeur de p_1 peut être expliquée par le fait que la fixation du portique BA au châssis se fait via des éléments en bois (figure 1). La valeur de p_2 n'est pas vraiment surprenant car les fissures de retrait ont été visibles sur le portique avant le test. La valeur nulle de p_4 , différente de celle de p_1 peut être expliquée par le fait que les têtes de poteau ont été fixées horizontalement mais pas verticalement (pas d'appui vertical comme les pieds de poteau), ce qui s'apparente plus à un appui simple horizontal qu'à une liaison rigide. Ensuite, à 20 kN, les deux extrémités de la poutre commencent à perdre leur rigidité ($p_2 = 0.72$). A 58 kN, les rotules aux extrémités continuent de perdre leur rigidité ($p_2 = 0.56$) et une rotule plastique apparaît en milieu de travée ($p_3 = 0.6$). Avec l'augmentation du chargement, le milieu de la poutre continu à fissurer et une redistribution des efforts internes peut être observée. A 62 kN, avec l'augmentation de la fissuration, ces rotules perdent encore leurs rigidités ($p_2 = 0.48$ et $p_3 = 0.4$). Ces résultats numériques sont cohérents par rapport à l'apparition des fissures qui ont été observées pendant l'expérimentation. Suivant ces résultats, à la rupture, les deux extrémités et le milieu de la poutre perdent respectivement 52% et 60% de rigidité par rapport à l'état parfaitement rigide théorique ($p_i = 1$).

F (kN)	p1	p2	p3	p4
0	0.8	0.8	1	0
20	0.8	0.72	1	0
58	0.8	0.56	0.6	0
62	0.8	0.48	0.4	0

Tableau 1 : facteurs de rigidité identifiés

4.2. Validation des valeurs numériques obtenues

Les facteurs de rigidité obtenus peuvent être retrouvés en déterminant la rigidité expérimentale des ressorts semi-rigides : par définition, la rigidité k d'un ressort semi-rigide peut être déterminée à partir des données expérimen-

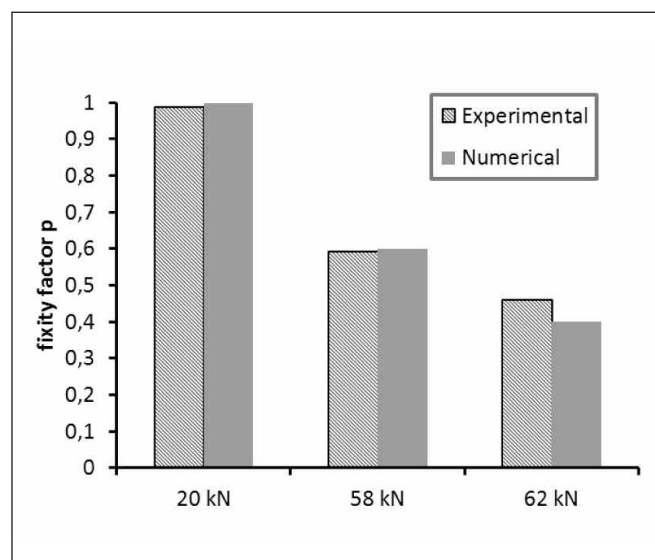


Figure 6 : Comparaison des facteurs de rigidité en milieu de travée de la poutre, obtenus par l'expérimentation et par le modèle.

tales par le rapport entre le moment M et l'angle de rotation expérimental θ^{exp} . θ^{exp} est évalué expérimentalement grâce à l'analyse d'image et M le moment expérimental est déterminé en prenant en compte les caractéristiques de la poutre et les déformations des armatures inférieures issues des mesures obtenues par des jauges collées sur ces barres. La figure 6 présente la comparaison des facteurs de rigidité en milieu de travée de la poutre, obtenus par l'expérimentation et par le modèle. Ces valeurs montrent une bonne correspondance entre les valeurs obtenues.

5. VERS UN CRITÈRE DE RUPTURE?

Le tableau 2 présente la synthèse des résultats issus de la littérature sur des pertes de rigidité de structures en béton armé à la rupture (post-pic). Bien que ces résultats soient obtenus à partir de diverses études, avec des structures et des ferraillements différents, ils ont les mêmes ordres de grandeur. Suivant les résultats disponibles dans la littérature et de la présente étude, si une structure perd environ 20% de sa rigidité initiale, il faudra vérifier à l'échelle locale ses éléments. Si un élément structural perd 30-60% de sa rigidité ($p < 0.7$), il est déjà gravement endommagé et devra être réparé. En effet, comme le « fixity factor » est une fonction de la rigidité en rotation, il est donc une fonction de la rotation des rotules plastiques. Suivant les formules mentionnées au-dessus, la rotation est une fonction des caractéristiques de la section du béton non-fissuré et de l'adhérence entre des armatures et du béton. Par conséquence, le « fixity factor » représente le comportement global d'une section fissurée (béton + armatures) ce qui explique la reproduction des résultats du modèle utilisant des ressorts en rotation. Cette remarque suggère que le « fixity factor » pourra être un critère pour évaluer la performance des structures en béton armé. Si ce point se confirme, il est très important car dans la plupart de cas d'auscultations structurales, les informations concernant les armatures de renforcement ne sont pas disponibles et

Auteurs	Perte de rigidité globale (structure complète)	Perte de rigidité locale (éléments de la structure)
Hans [9]	18%	N.D.
Fang [8]	N.D.	38%
Masi [12]	15-25%	40-50%
Maas [11]	15%	N.D.
Antunes [2]	N.D.	32-48%
Présente étude	19%	50-60%

Tableau 2 : Synthèse des pertes de rigidité de structures BA à la rupture (post-pic)
(La perte de rigidité globale correspond à la diminution relative de la fréquence du premier mode)

L'utilisation d'un critère simple sur la rigidité est nécessaire. Cependant, un nombre plus important d'expérimentations est nécessaire pour confirmer ce résultat.

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cet article étudie la faisabilité d'utiliser des mesures dynamique pour évaluer la qualité structurelle des portiques en BA. Une expérimentation a été réalisée sur un portique en forme de H. Des mesures dynamiques et statiques ont été réalisées. Les résultats dynamiques ont été utilisés pour identifier les caractéristiques des rotules plastiques du portique. Les résultats statiques obtenus grâce à la corrélation d'image ont été utilisés pour vérifier la fiabilité du modèle simplifié proposé.

L'identification des rigidités des rotules plastiques peut servir pour établir une méthode rapide et efficace dans l'auscultation structurelle des bâtiments existants. Si la méthode est appliquée pour une structure complète, le nombre de « fixity factor » à identifier devient rapidement important, la méthode nécessitera d'utiliser un algorithme d'optimisation plus puissant pour traiter le problème ou d'utiliser des méthodes de sous-structuration.

Dans cette étude, la dégradation de la rigidité des nœuds suivant l'augmentation des chargements a été établie. Suivant ces résultats, un élément perd sa capacité portante quand il perd environ 30-60% de sa rigidité, alors que la structure est totalement endommagée quand elle perd environ 20% de sa rigidité globale. Ce résultat est similaire à ce qui est noté dans la littérature et montre que l'effet des armatures a été pris en compte en évaluant la perte de rigidité des connexions. En effet, à l'aide d'adhérence entre des armatures et le béton, les armatures peuvent limiter la propagation des fissures dans la structure en béton armé. Cette remarque est importante car elle permet de proposer le critère d'évaluation des structures en BA par la rigidité des nœuds de connexion. Ce critère permet de faire des diagnostics simples sur des structures BA, sans avoir besoin de connaître le ferrailage. Un nombre d'expérimentations plus important sera réalisé dans le temps prochain pour valider cette remarque. Des tests pour passer à l'échelle du bâtiment sont aussi prévus.

RÉFÉRENCES

- [1] Andersen, P., Brincker, R., Goursat, M., & Mevel, L.. "Automated Modal Parameter Estimation for Operational Modal Analysis of Large Systems", *Proceedings of the 2nd International Operational Modal Analysis Conference* (2007), 299-308.
- [2] Antunes P., Lima H., Varum H., André P. "Optical fiber sensors for static and dynamic health monitoring of civil engineering infrastructures: Adobe wall case study", *Measurement* 2012; 45, p. 1695-1705.
- [3] Boutin C., Hans S., Ibraim E., Roussillon P. "In situ experiments and seismic analysis of existing buildings. Part II: Seismic integrity threshold", *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 2005; 34, p. 1531-1546.
- [4] Brownjohn J.M.W. "Ambient vibration studies for system identification of tall building", *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 2003,32, p. 71-95.
- [5] Bui Q B, Morel J C, Hans S, Do A-P. "First exploratory study on dynamic characteristics of rammed earth buildings", *Eng. struct.* (2011) p. 3690-3695
- [6] Chang P. C., Flatau A, Liu S. C. « Review paper: health monitoring of civil infrastructure », *Structural Health Monitoring* 2003, 2, p. 257-267.
- [7] Clough R. W., Penzien J., *Dynamics of Structures*, Computers & Structures Inc., Berkeley, 746p, 1995.
- [8] Fang S.E., Perera R., Roeck G.D. "Damage identification of a reinforced concrete frame by finite element model updating using damage parameterization", *Journal of Sound and Vibration* 313 (2008) 544-559
- [9] Hans S., Boutin C., Ibraim E., Roussillon P. "In situ experiments and seismic analysis of existing buildings. Part I: Experimental investigations" *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 2005; 34, p.1513-1529.
- [10] Katkhuda H.N., Dwairi H.M., Shatarat N. "System identification of steel framed structures with semi-rigid connections". *Structural Engineering and Mechanics, Vol. 34, No. 3* (2010) 351-366.
- [11] Maas S., Zürbes A., Waldmann D., Waltering M., Bungard V., De Roeck G. "Damage assessment of concrete structures through dynamic testing methods. Part 1- Laboratory tests", *Eng. Struct.* 2012, 34, p. 351-362.
- [12] Masi A., Vona M. "Experimental and numerical evaluation of the fundamental period of undamaged and damaged RC framed buildings", *Bull. Earthquake Eng.* 2010, 8, p. 643-656.
- [13] Sucuoglu H. "Effect of connection rigidity on seismic response of precast concrete frames", *PCI Journal*, Jan-Feb 1995, p. 94-103.
- [14] Vacher P., Dumoulin S., Morestin F., Mguil-Touchal S., "Bidimensional strain measurement using digital images", *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, vol. 213 Part C ImechE, 1999, p. 811-817.
- [15] Ventura C.E., Finn W.D.L., Lord J.F., Fujita N. "Dynamic characteristics of a base isolated building from ambient vibration measurements and low level earthquake shaking" *Soil dynamics and earthquake engineering* 2002; 22, p.1159-1167.