

Analyse par émission acoustique d'une liaison voile-dalle en béton armé soumise à un chargement cyclique alterné

Nadège REBOUL¹, Cécile GRAZIDE¹, Nathalie ROY²

¹ Université de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Laboratoire des Matériaux Composites pour la Construction (LMC²), 82 boulevard Niels Bohr, 69100 Villeurbanne, France. nadege.reboul@univ-lyon1.fr, cecile.grazide@univ-lyon1.fr

² Université de Sherbrooke, Département génie civil, Sherbrooke, Canada,

RÉSUMÉ. Cette étude vise à identifier, par émission acoustique, les mécanismes d'endommagement d'une liaison voile-dalle en béton armé (BA) soumise à un chargement cyclique alterné. La méthodologie d'analyse des signaux acoustiques repose tout d'abord sur une sélection des descripteurs par classification hiérarchique. Une analyse en composantes principales est ensuite effectuée et la classification des signaux est enfin établie par la méthode des *k*-moyennes. Cette méthode conduit à la définition de quatre classes d'endommagement (modes I et II de fissuration ainsi que deux modes mixtes) dont les séquences d'apparition peuvent être corrélées aux résultats mécaniques (notamment, non-linéarité de la courbe enveloppe, plastification des armatures). L'analyse menée de façon dissociée sur deux spécimens identiques, l'un chargé jusqu'à sa ruine, l'autre uniquement jusqu'à la plastification des armatures, conduit à des classes aux propriétés similaires, malgré le nombre d'événements détectés largement inférieur dans le second cas.

ABSTRACT. This study uses the acoustic emission technique to investigate the damage mechanisms of a reinforced concrete (RC) wall/slab connection under a cyclic reverse loading. Acoustic Emission (AE) signals descriptors are selected by a hierarchical method, then reduced by a principal component analysis. AE signals are classified by using *k*-means clustering method. Thus, four damage mechanisms are identified for the RC wall-slab connection (modes I- and II-crackings and two mixed modes) and the chronology of the clusters is correlated with mechanical results (non-linear part of the envelope curve, steel yielding). The analysis of acoustic signals is conducted on two identical specimens, independently- the first one is tested until failure whereas the second one is only tested up to yielding. The four clusters are similar for both specimens (same distributions of acoustic descriptors), although the number of detected events is far lower in the second case.

MOTS-CLÉS : Emission acoustique, Classification, Béton armé, Mécanismes d'endommagement, Contrôle Non Destructif

KEYWORDS: Acoustic emission, Clustering, Reinforced concrete, Damage mechanisms, Nondestructive Testing

1. Introduction

Cette étude s'inscrit dans le cadre de travaux menés au laboratoire LMC² visant à étudier le comportement d'une liaison voile-dalle en T en béton armé (BA), éventuellement renforcée à l'aide de matériaux composites, dans une approche globale, valorisant la complémentarité de diverses méthodes expérimentales employées au laboratoire. Lors d'une même campagne d'essais, ont été utilisés des appareillages de mesure « classiques » (capteurs de déplacement, de force, jauges), un dispositif de mesures surfaciques par corrélation d'images pour analyser les phénomènes (la fissuration notamment) localisés autour de la jonction ainsi qu'un dispositif de mesure par émission acoustique pour suivre les endommagements internes et non nécessairement décelables par une inspection visuelle. Les résultats mécaniques, obtenus dans le cadre de la thèse d'Antoine Chalot, ont déjà fait l'objet d'une présentation lors des dernières rencontres universitaires de génie civil [CHA 18] et ne seront donc que brièvement rappelés ici. L'objet de la présente étude est d'analyser les données acoustiques émises lors des essais sur la liaison BA voile-dalle non renforcée, afin d'identifier les différents modes d'endommagement et de comprendre la contribution de chacun de ces modes à la ruine de la structure.

La technique d'Emission Acoustique (EA) consiste à instrumenter la structure à l'aide de capteurs piézo-électriques et à recueillir l'ensemble des signaux (ou salves) induits par les ondes élastiques produites par la structure sous sollicitation mécanique. La littérature montre que cette méthode, couplée notamment à des méthodes de traitement statistique des données, est prometteuse pour détecter et identifier les endommagements dans des éléments de structure en béton armé (poutres fléchies [VID 17], poteaux, confinés ou non [ROU 16]). L'objectif de la présente étude est de proposer une méthodologie d'analyse des signaux acoustiques pour qualifier et quantifier le processus d'endommagement de la liaison BA voile-dalle non renforcée.

2. Corps d'épreuve et dispositifs expérimentaux

La présente étude repose sur deux corps d'épreuve identiques. Dans chacun d'eux, l'élément voile possède une épaisseur de 16cm pour une hauteur de 100cm et une largeur de 50cm. Son ferrailage se compose de 3 cadres HA10 dans la direction longitudinale et de 8 cadres HA10 dans la direction transversale. La dalle, encastrée dans le voile à mi-hauteur, a une épaisseur de 9cm pour une portée de 100cm. Elle est renforcée par un lit de 9 HA6 sur chaque face et par 7 cadres en HA6 transversalement.

Lors de l'essai, la dalle est positionnée verticalement et les déplacements du voile sont bloqués par un système d'équerres et de profilés métalliques fixés au sol. Un chargement horizontal cyclique alterné est appliqué à l'extrémité libre de la dalle par l'intermédiaire d'un vérin hydraulique d'une capacité de 500kN et d'une amplitude de ± 50 mm. Le chargement est contrôlé en déplacement et constitué de trains (séries) de cycles, d'amplitude croissante (incrément d'amplitude de 0.5mm à chaque série de 0 à 6mm de déplacement imposé, puis de 1mm de 6 à 10mm, puis de 2mm de 10 à 20mm, puis de 5mm de 10 à 50mm), chaque série comprenant trois cycles de même amplitude. L'essai est mené jusqu'à la ruine de la liaison pour l'un des corps d'épreuve (RC-REF), ce qui correspond à 24 séries de 3 cycles de chargement. Le second spécimen (RC-REP) n'est qu'endommagé (en vue d'une réparation ultérieure avec des matériaux composites) et n'est chargé que jusqu'à la plastification des aciers (soit 17 séries de 3 cycles de déplacement). La vitesse de chargement imposée est de 30mm/min de 0 à 20mm et de 60mm/min au-delà.

Une chaîne d'émission acoustique commercialisée par MISTRAS et munie d'une carte d'acquisition 8 voies EXPRESS 8 a été utilisée et équipée de 6 capteurs de type R15, numérotés [1-2-3-5-6-7], et de 2 capteurs de type micro-80, numérotés [4-8] (**Figure 1**) pré-amplifiés à 40dB. Les paramètres d'acquisition sont les suivants : seuil de détection= 40dB, PDT=50 μ s, HDT=200 μ s, HLT=300 μ s. La fréquence d'acquisition est de 2 MS/sec. Les descripteurs des salves sont identifiés à l'aide du logiciel AE Win. Les événements reçus par les capteurs 4 et 8 représentent moins de 5% des événements enregistrés. Ils sont écartés de l'analyse pour ne conserver que des signaux émis de capteurs de mêmes caractéristiques.

3. Méthode d'analyse des signaux acoustiques

3.1.1. La sélection d'un nombre réduit de descripteurs pertinents

Les salves transitoires (événements) détectées par les capteurs EA sont décrites à l'aide de descripteurs, temporels ou fréquentiels, potentiellement nombreux : à ceux directement fournis par le logiciel d'acquisition (amplitude, temps de montée,...) s'ajoutent ceux que l'on peut créer par combinaisons non-linéaires des premiers descripteurs (amplitude/temps de montée,...). Pour identifier les descripteurs non-informatifs et/ou fortement

corrélés (qui pourraient biaiser la classification des signaux), une classification hiérarchique avec un critère de saut minimum est appliquée sur les descripteurs potentiels. Au préalable, les données acoustiques sont normées réduites et, si nécessaire, un logarithme est appliqué pour s'approcher d'une loi normale plus favorable au traitement statistique. La classification hiérarchique conduit à un arbre – un dendrogramme – qui fusionne les descripteurs en fonction de leur degré de corrélation. Une coupure de ce dendrogramme à un coefficient de corrélation de 0.75, telle que préconisée dans [GOD 18], permet de sélectionner 8 descripteurs : Temps de montée [log], 2-Temps de montée/Durée [log], 3-Angle de descente [log], 4-Energie absolue [log], 5-Amplitude/Fréquence moyenne [log], 6- Fréquence moyenne, 7- Fréquence de montée, 8- Angle de montée [log]. Les mêmes descripteurs s'avèrent pertinents aussi bien pour RC-REF que pour RC-REP. Une analyse en composantes principales (ACP) permet ensuite de réduire la dimension du problème à trois composantes, représentant respectivement 93.7% et 94.3% de la variance pour RC-REF et RC-REP, sur lesquelles est menée la procédure de classification des signaux.

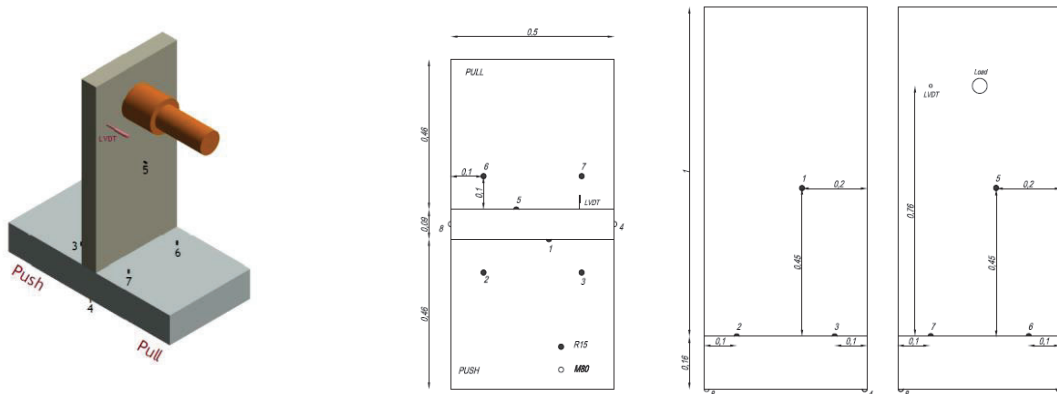


Figure 1. Dispositif expérimental et localisation des capteurs d'émission acoustique

3.1.2. La classification des signaux acoustiques

Une classification non-supervisée basée sur la méthode des k-moyennes est alors mise en œuvre. Elle repose sur une connaissance *a priori* du nombre de classes, k . Dans la présente étude, 9 classifications sont effectuées avec un nombre de classes variant de 2 à 10. La sélection de la « meilleure » classification repose sur l'indice de Davies-Bouldin et sur le coefficient Silhouette. Le meilleur compromis est ici le choix de 4 classes de signaux différentes, pour RC-REF comme pour RC-REP. L'objectif est désormais de relier ces classes à la réponse mécanique observée.

4. Résultats et discussions

La position relative des quatre classes dans un diagramme de la fréquence moyenne des signaux acoustiques en fonction du rapport du temps de montée sur l'amplitude (**Figure 2**) permet de distinguer les événements provenant d'une ouverture de fissure par traction (mode I) – Classe 3 ici - de ceux issus d'un cisaillement du béton (mode II) – Classe 2 ici. Ce résultat est corrélé par l'alternance observée sur la **Figure 3(b)** : les capteurs acoustiques 5-6-7 enregistrent des événements de mode I en sens poussant et des événements de mode II en sens tirant, ce qui est cohérent compte tenu de leurs positions.

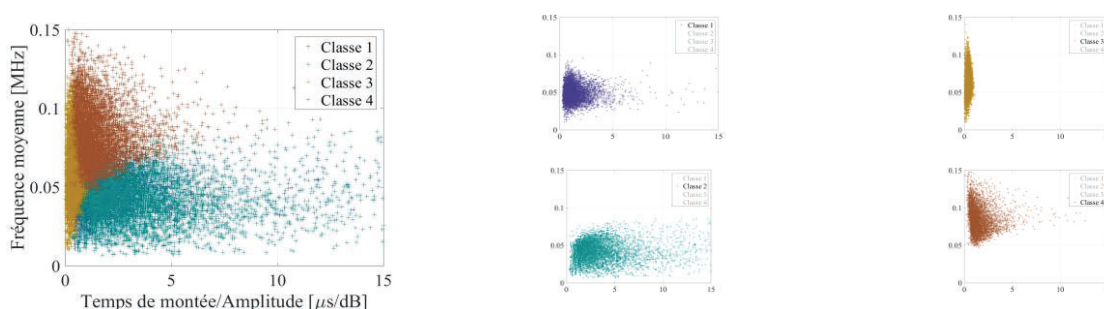


Figure 2. Représentation des événements selon leur classe dans un diagramme fréquence moyenne versus Temps de montée/Amplitude (RC-REF).

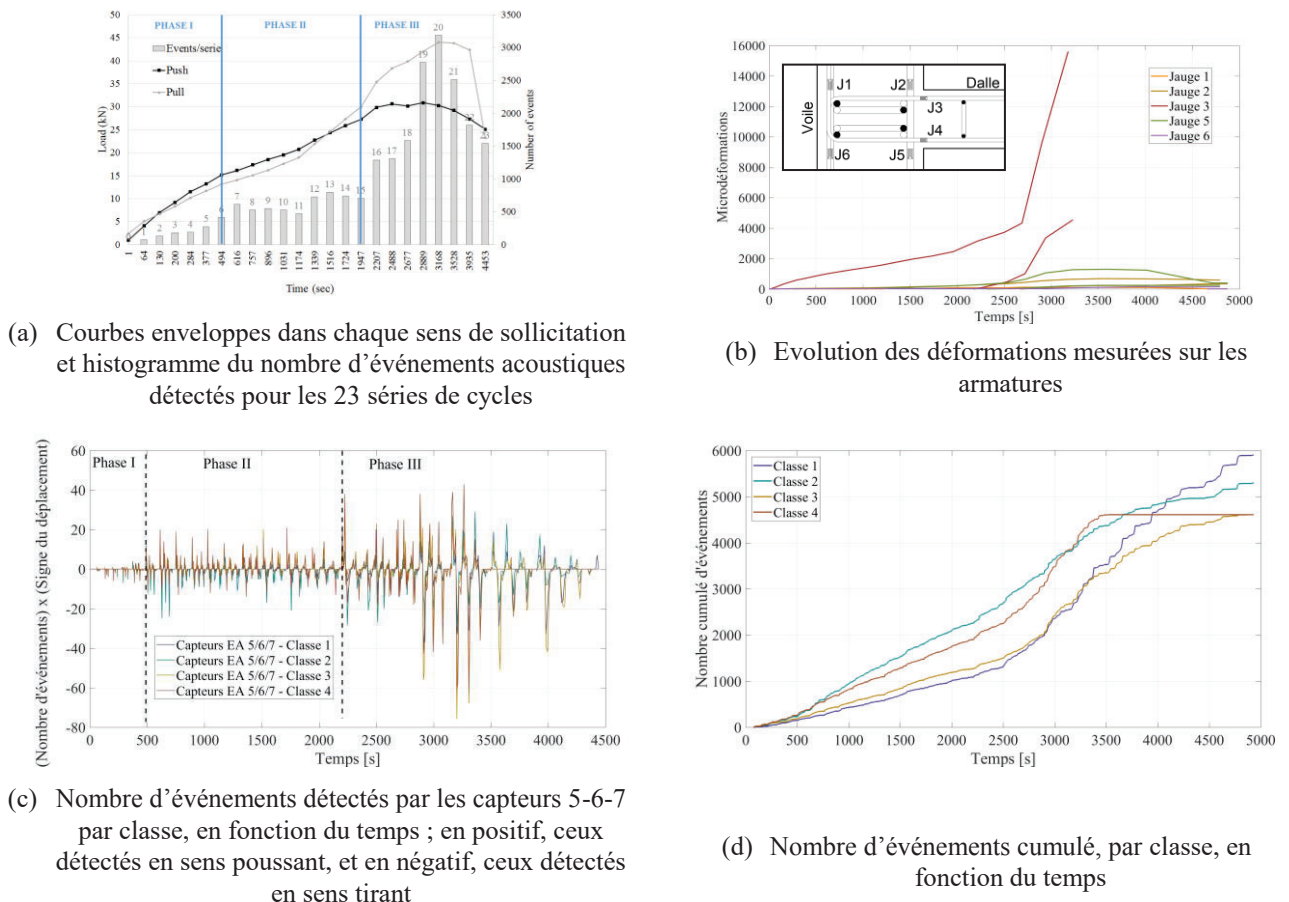


Figure 3. Mise en relation des données mécaniques et des classes de signaux acoustiques (RC-REF).

Pour la liaison RC-REF, la **Figure 3(d)** montre que les classes 1 et 4 s'expriment particulièrement dans la phase III des courbes enveloppes (**Figure 3(a)**), dès lors que la déformation mesurée par la jauge 3 collée sur l'un des aciers longitudinaux de la dalle augmente de façon brutale (**Figure 3(b)**). L'analyse des signaux acoustiques permet donc de détecter différents mécanismes d'endommagement dans la liaison BA voile-dalle.

5. Conclusion

Cette étude propose une méthode d'analyse des signaux acoustiques émis par une liaison voile/dalle en BA, soumise à une sollicitation cyclique alternée. Cette méthode conduit à une identification de quatre classes, directement reliées aux mécanismes d'endommagement par la corrélation entre leur séquence d'apparition et la réponse mécanique de la liaison. Pour les deux configurations RC-REF et RC-REP, dont les études sont conduites de façon dissociée, il est intéressant de noter que les distributions des descripteurs sont proches pour chacune des quatre classes.

6. Bibliographie

- [CHA 18] CHALOT A., MICHEL L., FERRIER E., ROY N., « Etude du comportement mécanique de liaison BA Voile-dalle renforcé par PRFC sous chargement cyclique alterné », *36èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil (RUGC)*, Saint Etienne, 20-22 juin 2018, p.351-355.
- [GOD 18] GODIN N., REYNAUD P., FANTOZZI G., « Challenges and limitations in the identification of acoustic emission signature of damage mechanisms in composite materials », *Applied sciences*, vol.8, 2018.
- [ROU 16] ROULEAU TURCOTTE A., *Etude du comportement des piles de pont confinées de PRFC par émission acoustique*, Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke (Québec), Canada, avril 2016.
- [VID 17] VIDYA SAGAR R., « Acoustic emission characteristics of reinforced concrete beams with varying percentage of tension steel reinforcement under flexural loading », *Case Studies in Construction Materials*, vol.6, 2017, p.162-176.