
Développement d'outils d'évaluation des ouvrages maçonnés- Apport de la technique d'émission acoustique

Shuang PENG, Thomas Parent, Mehdi Sbartai

Université de Bordeaux, UMR 5295, Institut de Mécanique et d'Ingénieur (I2M), 351 cours de la Libération, 33400 Talence, France (shuang.peng@u-bordeaux.fr ; thomas.parent@u-bordeaux.fr ; zoubir-mehdi.sbartai@u-bordeaux.fr)

RÉSUMÉ. Les travaux de recherche présentés ont pour objectif d'évaluer la technique d'émission acoustique pour la détection et le suivi de l'endommagement des structures maçonnées anciennes. Deux modes classiques de rupture d'assemblages bloc-mortier-blocs sont analysés : essai de traction sur duo (mode I) et essai de cisaillement sous chargement normal sur triplet (mode II). Premièrement, une analyse de la réponse mécanique de ces deux types d'essai est proposée. Ensuite l'activité acoustique est étudiée pour évaluer sa capacité dans le suivi de l'endommagement et pour améliorer la compréhension des mécanismes de rupture. Enfin la corrélation entre énergie acoustique et énergie mécanique a été également analysée. L'ensemble de ces résultats montre que la méthode d'EA est prometteuse dans l'évaluation, le suivi des sources d'endommagement au sein du matériau maçonnerie

ABSTRACT. The present study investigates the acoustic emission (AE) technique for damage monitoring in masonry. This technique was applied to a series of small-scale laboratory specimens under tensile and shear loading. A mechanical analysis is firstly required to characterize these two cracking modes. Different AE indices are correlated with damage accumulation to identify its response to each loading and a good correlation was observed between fracture damage and recorded AE energy in tensile test. These results show that AE is a promising method in damage assessment in masonry.

MOTS-CLÉS : émission acoustique, maçonnerie, endommagement, contrôle non destructif.

KEY WORDS: acoustic emission, masonry, damage, NDT.

1. Introduction

Le patrimoine architectural en maçonnerie à travers l'Europe est riche et varié : édifices religieux, ouvrages d'arts, bâtiments, etc... La préservation de ces ouvrages constitue un enjeu culturel, économique, scientifique et sociétal majeur. Dans ce contexte, la compréhension du comportement mécanique des monuments en maçonnerie ainsi que leur suivi en temps réel est indispensable pour la réparation, le renforcement et la restauration du patrimoine.

Les méthodes non destructives de suivi des ouvrages sont des méthodes non invasives (CND) à privilégier dans un contexte de patrimoine à forte valeur architecturale. La technique de détection des émissions acoustiques (EA) est une de ces méthodes CND qui a fait ses preuves sur le matériau béton. Le principe de l'EA est de détecter l'onde élastique générée par l'endommagement du matériau et qui se propage au sein du milieu continu. L'intérêt de cette méthode est qu'elle offre la possibilité de localiser [OHT 88], classifier [OHN 10] et prédire dans certains cas l'évolution des désordres mécaniques qui apparaissent lorsque le matériau s'endommage [VER 10], [SAN 13].

Les mécanismes de rupture dans une maçonnerie sont divers et complexes. En effet, ce matériau hétérogène et multi-échelle composé de blocs assemblés par des joints de mortier met en œuvre des ruptures faisant intervenir chaque matériau qui la compose [ROC 10]. En vue d'évaluer la capacité de l'EA à prévoir, identifier et localiser les sources d'endommagement, ce travail de recherche se propose d'étudier spécifiquement l'endommagement d'éléments de maçonnerie à l'échelle de l'assemblage bloc-mortier-bloc. Deux types d'essais sont réalisés : (i) essai de traction sur duo bloc-mortier-bloc et (ii) essai de cisaillement sous charge normale constante sur triplet de pierre.

Premièrement le comportement mécanique de ces interfaces sollicitées en traction et cisaillement est analysé. Ensuite, le suivi de l'endommagement au moyen de la méthode d'émission acoustique et son activité (énergie et nombre de signaux) est proposé pour chaque type d'essai. Enfin une corrélation entre énergie mécanique et énergie acoustique de l'essai de traction est réalisée.

2. Protocole expérimental

Pour chaque type d'essai, les assemblages sont composés de pierre calcaire tendre issue de la carrière de Frontenac assemblés par un joint de mortier à la chaux hydraulique NHL 3.5. Les éprouvettes sont conditionnées avant essai à température ambiante pendant trois mois.

2.1. Essais de traction. L'éprouvette est composée de deux pierres calcaires de $0.1 \times 0.1 \times 0.07 \text{ m}^3$, assemblées par un joint de mortier de 7 mm d'épaisseur. Pour appliquer la contrainte de traction, l'éprouvette est encastrée et collée la veille de l'essai dans des équipages métalliques. L'essai est asservi en déplacement d'ouverture de fissure. L'ouverture est mesurée par quatre extensomètres (HBMs), placés dans chaque coin de l'éprouvette. L'activité acoustique est enregistrée en continue pendant l'essai mécanique par 4 capteurs d'EA, positionnés de part et d'autre du joint dans les quatre coins. (Figure 1(b)).

2.2. Essais de cisaillement. L'éprouvette est composée de trois pierres de dimensions $0.1 \times 0.1 \times 0.1 \text{ m}^3$. Préalablement à l'application de l'effort de cisaillement, un effort de compression normal aux joints est appliqué. Trois taux de contrainte normale sont testés : 0.4, 0.6 et 0.8 MPa. La contrainte de cisaillement est assurée de manière symétrique dans les deux joints au moyen d'un effort appliqué verticalement sur le bloc central. Cet essai est également asservi par le déplacement moyen de cisaillement plan en mode II. Deux HBM sont ainsi positionnés au niveau de chaque joint de mortier. L'activité acoustique est enregistrée par 8 capteurs d'EA collés sur les blocs calcaires et positionnés de part et d'autre des deux joints de mortier (Figure 1(d)).

3. Comportement mécanique

3.1 Essais de traction. La courbe contrainte de traction en fonction de l'ouverture de joint en mode I est illustrée en noir sur la Figure 1(a). Une phase élastique est tout d'abord observée jusqu'au pic de rupture où la contrainte atteint environ 0.055 MPa. Au-delà du pic, l'interface commence à s'endommager et la fissure se propage, un écrouissage négatif attendu dans les matériaux quasi-fragile est observé. L'artefact constaté sur la courbe contrainte déplacement à quelque dizaine de microns est lié à la rotation de l'éprouvette lors de l'essai. Avant cet accident, la fissure a tendance à s'ouvrir tout d'abord dans un coin. L'artefact survient lorsque l'éprouvette se rééquilibre en rotation et que les 4 coins retrouvent la même ouverture.

La courbe contrainte-déplacement permet d'identifier l'énergie de fissuration consommée nécessaire pour séparer les deux lèvres de la fissure. Celle-ci est déterminée selon l'hypothèse qu'aucune plasticité n'intervient dans le comportement mécanique de traction *i.e.*, la décharge se produit sans déplacement résiduel. Pour un incrément de déplacement donné l'énergie mécanique peut être calculée comme l'aire du triangle en rouge dans la Figure 1(a). L'énergie mécanique calculée par cette méthode sera présentée en dernière partie de ce travail (Figure 4).

3.2 Essais de cisaillement. Les courbes contrainte de cisaillement en fonction du déplacement de mode II sont présentées Figure 1(c). Chaque famille de courbe correspond à un niveau de contrainte normale appliquée (0.4 MPa, 0.6 MPa et 0.8 MPa). Quel que soit le palier de contrainte normale, les courbes présentent la même allure : (1) une phase élastique, (2) un pic de contrainte de cisaillement, (3) un écrouissage négatif jusqu'à l'obtention d'un plateau horizontal correspondant au frottement pur de l'interface sans cohésion. On observe que la résistance au cisaillement de contrainte et le niveau de contrainte du plateau horizontal en fin d'essai sont d'autant plus importants que la contrainte normale appliquée sur les joints de mortier est élevée.

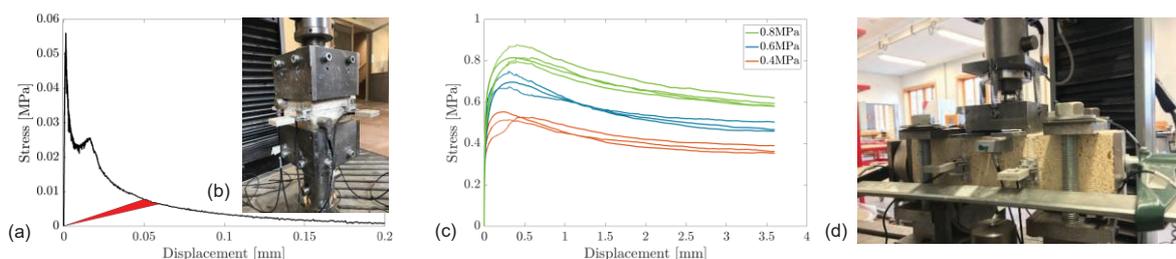


Figure 1. Montages expérimentaux : (b) Essai de traction, (d) Essai de cisaillement et Courbe Contrainte vs. Déplacement en (a) traction, (c) cisaillement en 3 paliers de contrainte.

4. Analyse de l'activité acoustique : Suivi de l'endommagement par la méthode de l'EA

Le suivi de l'activité acoustique est assuré par une chaîne d'acquisition comprenant notamment des capteurs A15R de fréquence de résonance de 150kHz. Les signaux sont préalablement amplifiés par des préamplificateurs de 40dB, un seuil de détection fixé à 35dB est appliqué pour s'affranchir de l'enregistrement du bruit environnant. Ces signaux reçus par les capteurs sont aussi appelés *hit* et l'étude de leur apparition donne une première information de l'endommagement occasionné au sein du matériau tout au long de l'essai mécanique. La Figure 2 présente le nombre de hits générés par incrément de déplacement de 1 μ m pour un essai de traction (Figure 2(a)) et un essai de cisaillement (Figure 2(b)).

En traction, le domaine élastique ne laisse apparaître que très peu de hit ce qui implique qu'aucun endommagement ne semble s'amorcer avant le pic de rupture. Après le pic, l'apparition des hits indique que l'interface s'endommage. Pendant la phase d'écrouissage négatif (et donc l'ouverture de fissure) le nombre de hits observé par unité de déplacement semble diminuer progressivement à mesure que la contrainte de traction décroît (Figure 2(a)).

En cisaillement, le nombre de hits augmente progressivement de la phase élastique jusqu'à la phase de frottement pur ou un nombre constant d'environ 400 Hit/ μ m est observé. Notons que l'activité acoustique en cisaillement (1.2×10^6 Hits) est bien plus élevée qu'en traction (2.2×10^3 Hits) ce qui s'explique principalement par le fait que l'essai de mode II met en jeu des mécanismes de frottement qui sont largement plus énergétiques que les mécanismes de décohesion.

Le suivi d'endommagement lors d'un essai mécanique peut être également assuré par l'étude de l'énergie acoustique cumulée de chaque Hit enregistrés. La Figure 4 présente ainsi l'énergie cumulée en fonction du déplacement imposé. En traction (Figure 3(a)), l'énergie d'EA s'active dès la fin du domaine élastique et présente une augmentation en escalier pendant la phase d'écrouissage. Ces phénomènes sont probablement liés à la coalescence des microfissures entraînant, par à-coups, la propagation de la macrofissure à travers l'interface bloc-mortier. L'énergie d'EA en cisaillement (Figure 3(b)) est faible dans le domaine élastique et jusqu'au pic, et augmente avec une pente relativement constante à partir du pic de contrainte. L'évolution constante de l'énergie cumulée s'explique par fait qu'un régime permanent de frottement pur se met en place au sein de l'échantillon.

En conclusion de cette partie, la comparaison de l'activité acoustique entre les deux essais mécaniques met en évidence les points suivants :

- Aucun signal n'est détecté dans le domaine linéaire
- Le cisaillement est plus énergétique que la traction ce qui se traduit par un plus grand nombre de Hit et une énergie cumulée plus élevée.
- La décohesion se réalise par à-coups liés à la coalescence des microfissures tandis que le frottement semble se mettre en place de manière plus stable et contrôlée.

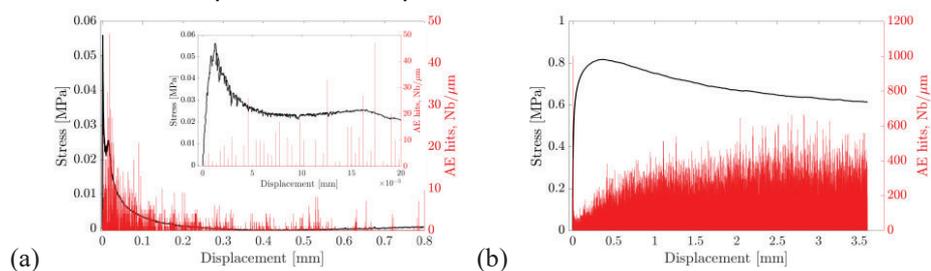


Figure 2. Contrainte/ Nombre de hit vs. Déplacement en (a) traction, (b) cisaillement.

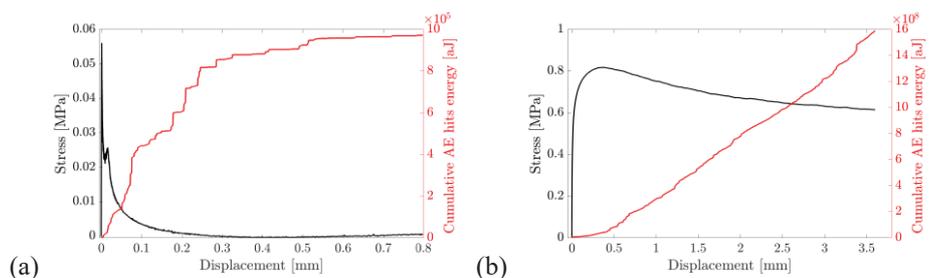


Figure 3. Contrainte/ Energie cumulée vs. Déplacement en (a) traction, (b) cisaillement.

5. Corrélation entre l'énergie d'endommagement et l'énergie d'EA au cours d'un essai de traction

Comme mentionné dans la partie traitant du comportement mécanique, l'énergie mécanique pour un incrément de déplacement donné peut être calculée comme l'aire du triangle considérant la décharge sans déplacement plastique. L'énergie mécanique est calculée ici pour des incréments de déplacement de $5\mu\text{m}$. A chaque incrément, l'énergie d'émission acoustique peut également être calculée en considérant la somme de l'énergie de tous les signaux survenant dans cet intervalle de déplacement. Afin d'éviter de prendre en considération des signaux fortement énergétique et qui n'ont pourtant pas d'impact visuel d'un point de vue mécanique sur la courbe force déplacement, on se limite aux signaux présentant une durée inférieure $400\mu\text{s}$. Cette famille de hit représente néanmoins environ 65% de l'ensemble des signaux enregistrés.

La Figure 4(a) présente l'évolution de l'énergie cumulée acoustique et mécanique, toutes deux normalisées, en fonction du déplacement de traction imposé. La corrélation entre les types d'énergie semble pertinente et est validée par la régression linéaire présentée sur la Figure 4(b). Celle-ci présente une pente et un coefficient de détermination proches de 1. Ainsi, l'étude de l'énergie acoustique d'une partie des hits est un bon indicateur pour estimer de manière qualitative et quantitative l'énergie mécanique de fissuration consommée lors d'un essai de traction directe.

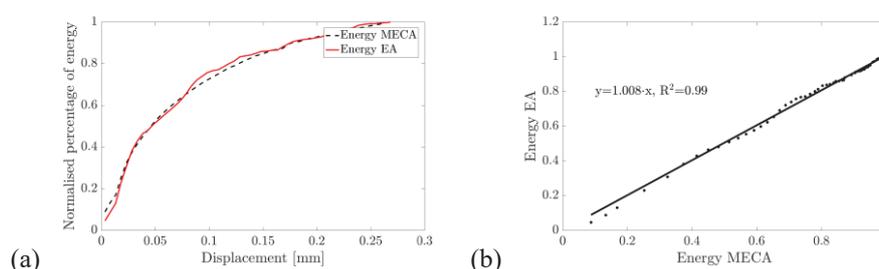


Figure 4 Essai de traction (a) énergie mécanique/ EA vs. Déplacement, (b) corrélation entre deux types d'énergies.

6. Conclusion

Le travail présenté dans cet article a pour objectif d'étudier la capacité de la technique d'émission acoustique à suivre l'évolution de l'endommagement qui se produit lorsque le matériau maçonnerie subit un chargement mécanique.

L'analyse de l'activité acoustique au cours de l'essai mécanique permet une meilleure compréhension des mécanismes de ruptures. La décohésion de l'interface intervient uniquement après le pic de rupture et de manière discontinue tandis que le régime de frottement s'établit de manière plus stable. En outre, la comparaison des énergies cumulées et du nombre de hit entre traction et cisaillement confirme le fait que les mécanismes de frottement sont bien plus énergétiques que ceux liés à la décohésion. Une bonne corrélation entre énergie mécanique et énergie acoustique a été mise en évidence lors de ce travail de recherche.

Remerciements Les essais ont été réalisés sur le plateau Xyloplate de l'EQUIPEX XyloForest (ANR-10-EQPX-16).

7. Bibliographie

- [OHT 88] M. OHTSU, K. ONO, « AE source location and orientation determination of tensile cracks from surface observation », *NDT Int.*, vol. 21, n° 3, p. 143-150, juin 1988.
- [OHN 10] K. OHNO, « Crack classification in concrete based on acoustic emission », *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, n° 12, p. 2339-2346, déc. 2010.
- [VER 09] E. VERSTRYNGE, L. SCHUEREMANS, D. Van Gemert, et M. Wevers, « Monitoring and predicting masonry's creep failure with the acoustic emission technique », *NDT E Int.*, vol. 42, no 6, p. 518-523, sept. 2009.
- [SAN 13] S. De SANTIS et A. K. TOMOR, « Laboratory and field studies on the use of acoustic emission for masonry bridges », *NDT E Int.*, vol. 55, p. 64-74, avr. 2013.
- [ROC 10] P. ROCA et G. ARAIZA, « Shear response of brick masonry small assemblages strengthened with bonded FRP laminates for in-plane reinforcement », *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, n° 8, p. 1372-1384, août 2010.