

## Partie 1 – Évaluation non destructive des matériaux

# ÉVALUATION DE L'ENDOMMAGEMENT MÉCANIQUE DU BÉTON PAR ÉMISSION ACOUSTIQUE

## EVALUATION OF THE MECHANICAL DAMAGE OF THE CONCRETE BY ACOUSTIC EMISSION

ZM. SBARTAI<sup>(a\*)</sup>, K. SAÏDOUN<sup>(b)</sup>

a. I2M, UMR 5295, Département de génie civil Environnemental, Université de Bordeaux, CNRS, INRA, France.

\* ZM SBARTAI : zm.sbartai@i2m.u-bordeaux1.fr

### RÉSUMÉ

*Cette étude concerne l'analyse temporelle des signaux d'émission acoustique dans le matériau béton soumis à un endommagement mécanique. L'objectif est de localiser et d'évaluer les dimensions de l'endommagement diffus. Cette zone est définie comme étant la zone d'initiation de la fissure (zone endommagée micro-fissurée). Ces informations permettront d'alimenter des modèles de la mécanique de l'endommagement, et aussi de mettre en place une stratégie de surveillance des ouvrages en béton pour prévenir l'ouverture des fissures. Des essais mécaniques en traction par compression d'un cône sur des éprouvettes entaillées en mortier ont été effectués. Les résultats obtenus montrent que les dimensions calculées par les différentes approches sont équivalentes sauf en terme de répétabilité des mesures.*

### ABSTRACT

*In order to characterize the fracture process zone in quasi-brittle materials, measurements of acoustic emission were carried on 9 specimens of mortar concrete, which are subjected to compressive strength using Wedge Splitting Test (WST). The experimental data are analysed by several dif-*

*ferent statistical approaches. The distribution of acoustic events from the absolute energy, the loading rate, and proximity to the initial notch was used to evaluate the size of the FPZ. The results show that the size of the FPZ obtained by different methods is similar. The reputability of the measurements on the 9 tested specimens indicates good results of damage evaluation.*

**Mots-clés :** *Fracture, endommagement, FPZ, énergie acoustique, localisation, variabilité*

\* \* \*

## 1. INTRODUCTION

Les techniques d'inspection pour l'évaluation non destructive des structures montrent un intérêt grandissant pour les industriels et les gestionnaires des ouvrages de génie civil. Par conséquent, une variété de méthodes d'inspection a été étudiée pour fournir une détection précoce des défauts. Pour les matériaux quasi-fragiles comme le béton, il existe une non-linéarité considérable dans la forme des microfissurations même avant d'atteindre le maximum du chargement [1]. Afin de maintenir la sécurité et la performance

des structures, elles doivent être inspectées correctement pour quantifier l'intégrité de la structure, et pour évaluer l'ampleur des dégradations.

Il existe un consensus général relié à la dépendance entre le comportement de rupture des matériaux quasi-fragiles et une zone de microfissuration, ou FPZ (Fracture Process Zone), qui se développe en fond de fissure avant la rupture finale du matériau. La relation qui existe entre la largeur de la FPZ et l'effet d'échelle dans les matériaux quasi-fragiles a une influence sur les paramètres de la rupture [4-5-6]. Parmi plusieurs travaux sur le mécanisme de développement de la FPZ, on remarque ceux de Mihashi [7]. Ce dernier considère que la FPZ est formée initialement par des microfissurations créées au fond d'une fissure préexistante. Wittmann [4] sépare une zone de microfissurations interconnectées d'une autre zone qui contient des microfissurations isolées et qui englobe la première zone. Les études des paramètres influant sur la taille de la zone de microfissurations ont montré que la largeur de la FPZ évolue proportionnellement à la diminution de la densité du matériau [6], et à l'augmentation du diamètre maximum des granulats. Cependant, la présence des gros granulats contribue à la diminution de la profondeur de la FPZ [8]. Le taux de chargement et la taille de l'échantillon ont aussi des effets significatifs sur les dimensions de la FPZ [1-9]. Différentes techniques ont été utilisées afin d'étudier la forme et la taille de la FPZ, y compris la technique des rayons-X [8], ainsi que la technique des ultrasons [1], et l'émission acoustique [1 : 8].

Des travaux menés par Landis [12], Keru et al. [15], Hadjab et al. [16], et Haidar et al. [6] ont permis d'éclaircir la relation entre les événements acoustiques et la formation de la FPZ. Les dimensions de cette dernière sont obtenues à la base de la distribution des événements acoustiques et leurs énergies. L'énergie absolue représente un paramètre crucial dans l'analyse des émissions acoustiques car elle est suffisante pour caractériser un signal acoustique, ce qui n'est pas le cas pour d'autres paramètres comme l'amplitude [8].

Dans la présente étude, la technique d'émission acoustique a été utilisée sur neuf éprouvettes de mortier de ciment. L'objectif est de caractériser en 2D la zone de microfissurations et d'obtenir le maximum d'informations sur les dimensions de cette dernière (largeur, profondeur), et d'étudier ses mécanismes d'évolution. Le traitement des données acoustiques a été basé essentiellement sur la distribution de probabilité des événements acoustiques et des énergies absolues. Une étude comparative des différentes approches de calcul est présentée et discutée ainsi que sur la qualité de reproductibilité des essais.

## 2. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

### 2.1. Matériaux et échantillons testés

Pour la présente étude, neuf éprouvettes (0,3 x 0,25 x 0,1 m) de mortier ont été préparées. Le ciment CEMII 32,5 R,

le sable 0-5 mm, et le gravillon 4-12,5 mm sont les matériaux utilisés dans la composition de ces bétons. Afin d'accélérer la prise, on a ajouté un super-plastifiant pour pouvoir démouler après 24 heures.

Après démoulage, les éprouvettes ont été conservées dans un bac d'eau, entièrement submergées pour éviter tous phénomènes de retrait. En respectant un planning qui a été élaboré au préalable, toutes les éprouvettes ont été testées après 42 jours pour garantir une stabilisation de la résistance mécanique.

### 2.2. Essai WST

WST (Wedge Splitting Test) est un essai de compression à déformation imposée réalisé sur une machine universelle de charge décharge. Le principe de l'essai consiste à enfoncer un coin à demi-angle suivant une force  $F$  dans l'entaille du spécimen. L'éprouvette est placée sur une bille afin d'éviter les effets de torsions, et l'ensemble est posé sur un bâti pour assurer le bon positionnement et la stabilité de l'éprouvette pendant le test. La compression de ce dernier et la présence de roulements posés sur la gorge de l'éprouvette vont permettre l'ouverture et la propagation de la fissure. La vitesse de la traverse est égale à 0,15 mm/min. Les déplacements mesurés concernent l'ouverture de la fissure (CMOD : Crack Mouth Opening Displacement) avec une précision de  $\pm 0,01$  mm à travers deux LVDT placées sur les deux côtés de la gorge de l'éprouvette.

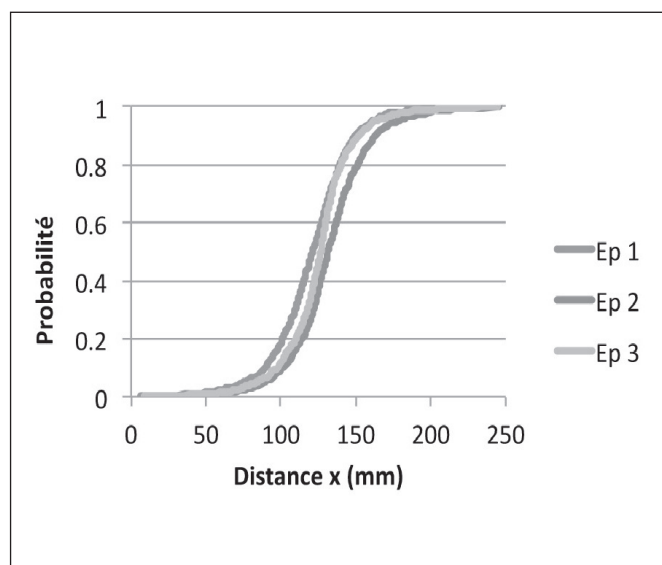
### 2.3. Equipement et mesures acoustiques

L'équipement utilisé pour cette technique est composé de capteurs piézoélectriques R15 d'une fréquence de résonance à 300 kHz et d'une station d'acquisition composée essentiellement de deux cartes d'acquisition de type PCI-DSP-4 du distributeur Français Mistras (10 kHz à 2MHz). Quatre capteurs piézoélectriques ont été répartis sur une face de l'échantillon avec un espacement fixe de 10 cm. Les capteurs sont plaqués sur la surface de l'échantillon par des élastiques et un joint de silicone qui permet un bon couplage entre les deux. Avant chaque mesure d'émission acoustique, un test de bon fonctionnement du système acoustique est effectué [17]. Il consiste à vérifier le couplage entre les capteurs et la surface, de calculer la vitesse de propagation des ondes acoustiques dans le matériau et d'évaluer la précision de la localisation. Le couplage entre les capteurs et la surface de l'échantillon est testé en générant des événements acoustiques à proximité directe du capteur.

## 3. RÉSULTATS

### 3.1. Reproductibilité des mesures

La répétabilité des mesures a été évaluée sur la base de la courbe cumulée des probabilités de répartition spatiale des événements acoustiques de l'ensemble des 9 éprouvettes. Cette courbe représente la probabilité d'existence d'un



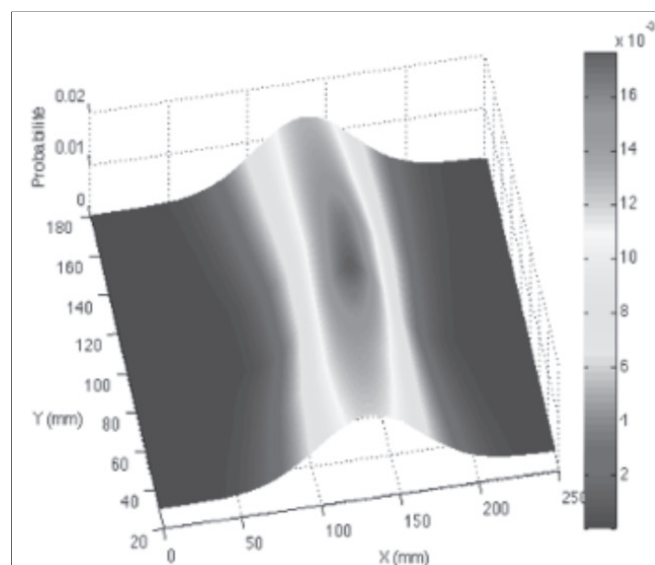
**Figure 1 : Distribution des probabilités cumulées des évènements sur l'axe X pour 3 éprouvettes**

évènement dans l'axe des X (axe horizontal perpendiculaire à l'entaille). Les résultats des trois premiers échantillons sont présentés sur la Figure 1. Les distributions des évènements des trois échantillons sont quasiment superposées ce qui montre une très bonne fiabilité de la reproductibilité de cet essai. Ce résultat est identique pour les 9 éprouvettes testées. Cette figure montre également une répartition des évènements acoustiques entre 50 mm et 200 mm soit une largeur de 150 mm. Cette largeur représente la zone où la totalité des évènements a été localisée. Cependant, les probabilités aux extrémités des courbes sont très faibles avec une distribution pouvant être modélisée par une loi normale (Figure 1). Sur la Figure 2 qui représente la distribution des évènements en 2D, la localisation des évènements (en rouge) est concentrée dans une largeur plus réduite (100 à 170 mm). Pour une meilleure localisation de la largeur de l'endommagement diffus, il est donc nécessaire de filtrer statistiquement les données en fonction de leur répartition spatiale et de l'intensité de leur énergie. Nous présenterons dans la suite de cet article les différentes approches d'évaluation des dimensions de la zone endommagée.

## 3.2. Evaluation des dimensions de l'endommagement diffus

### 3.2.1. Méthode énergétique (approche 1a)

Le traitement des données par cette méthode consiste à étudier l'évolution de l'énergie absolue libérée dans le temps et de corréler cette évolution avec la force [13]. La Figure 3 présente sur la même courbe la force et l'énergie absolue cumulée en fonction du temps. Afin d'éviter toute dépendance entre la mesure de la FPZ et les capteurs, on considère pour chaque évènement acoustique, le maximum de l'énergie absolue enregistré par les 4 capteurs. On note sur la Figure 3 que la courbe de l'énergie absolue est composée de deux phases :



**Figure 2 : Distribution 2D des probabilités de localisation des évènements.**

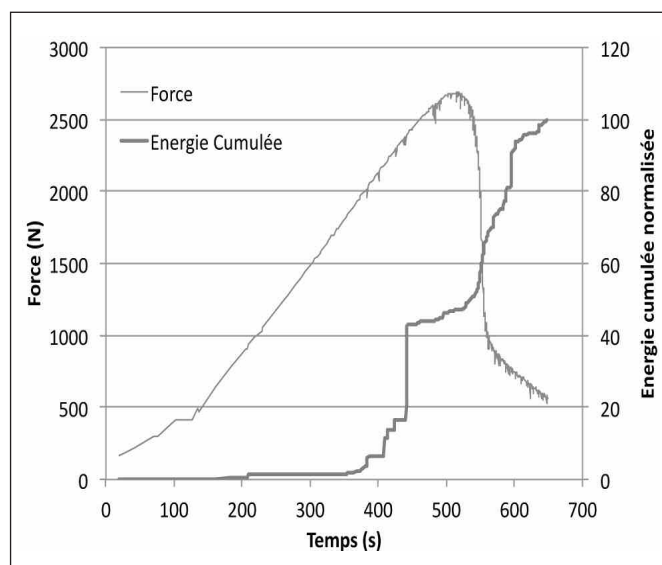
Phase 1 comprise entre 0 et 400 sec caractérisée par une faible libération de l'énergie absolue qui est attribuée à une faible activité acoustique dans le matériau avant la formation de la FPZ [2].

Phase 2 comprise entre 400 et 550 sec durant laquelle une forte libération de l'énergie est enregistrée.

Une augmentation de plus de 88% de cette dernière est due à la formation des microfissurations dans le matériau. On distingue aussi des parties de la courbe avec des pentes raides, cela est dû à des transformations des microfissurations formées précédemment en macro-fissurations après fraction entre eux [2]. La période de cette deuxième phase représente le temps de formation de la FPZ [2]. L'intérêt de l'introduction de la force est de montrer la relation entre la formation des microfissurations et la rigidité du matériau. La Figure 3 montre que l'intensité de l'énergie absolue augmente proportionnellement avec la diminution de la rigidité du matériau (exprimée sur la figure par la chute de la force). Afin de mesurer les dimensions de la FPZ, la distribution des évènements acoustiques appartenant à la plage de temps [400-550] est présentée sur la Figure 4. La largeur et la profondeur de la FPZ déterminées à partir de cette figure sont respectivement 94 mm (sens x) et 179 mm (sens y).

### 3.2.2. Méthode énergétique (approche 1b)

Cette méthode considère que la zone des évènements acoustiques où plus de 95 % de l'énergie est libérée correspond à la formation de la FPZ [8]. Pour identifier cette zone il suffit de fixer un seuil permettant le filtrage des évènements acoustiques de façon à récupérer ceux qui ont un cumule d'énergie proche de 95% de l'énergie total libérée. Afin de mieux éclaircir le principe de cette technique, la Figure 5 montre la courbe représentant l'énergie absolue en fonction des positions (x,y) des évènements acoustiques. Cette même figure montre que la plupart des évènements de forte énergie sont localisés au centre de la largeur de l'éprouvette, et certains de ces évènements se placent autour de l'entaille initiale.

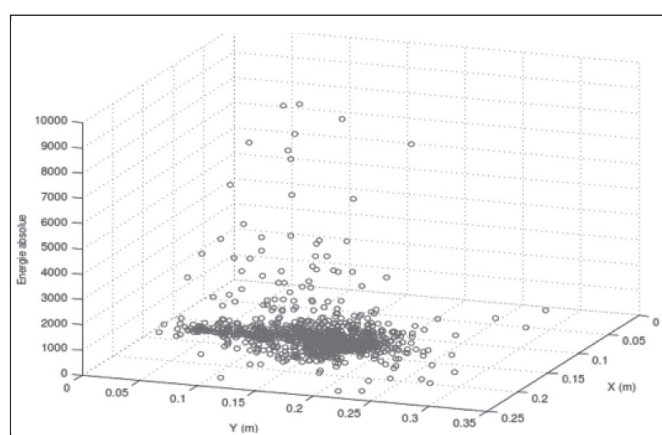


**Figure 3 : Evolution de l'énergie absolue cumulée et la force de chargement en fonction du temps**

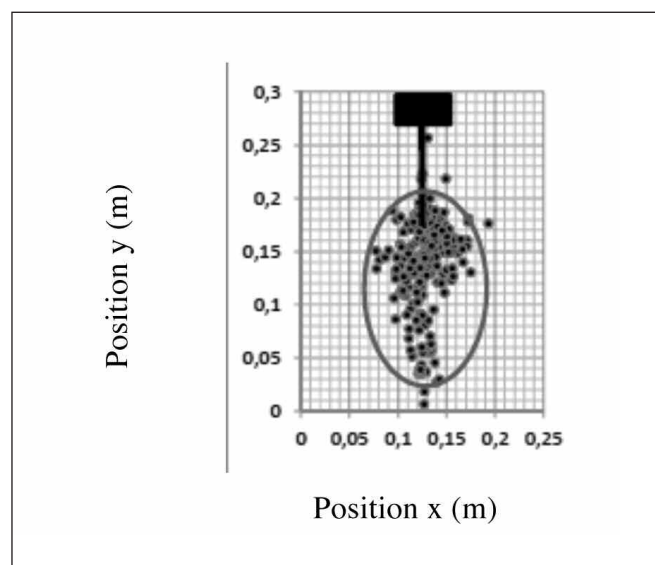
La méthode utilisée dans la présente étude pour fixer le seuil de l'énergie absolue consiste à classer cette dernière par ordre croissant. Ensuite, on calcule, pour chaque énergie, la somme jusqu'à l'énergie maximale. L'énergie absolue qui correspond à une libération de 95% de l'énergie totale est considérée comme le seuil. La Figure 6 représente la distribution des événements après filtrage. Le nombre d'événements est réduit par rapport aux représentations des méthodes précédentes. Néanmoins, ces événements sont bien regroupés au centre de l'éprouvette. Les dimensions de la FPZ sont récupérées à partir de la distribution des événements présentée sur cette figure et elles sont de 96 mm en largeur et 157 mm de profondeur. Le nombre d'éprouvettes traité par cette technique est faible et la distribution des événements est dispersée (figure 6), ce qui rend difficile l'interprétation des résultats.

### 3.2.3. Méthode basée sur le nombre d'événements (2a)

Le principe de cette méthode consiste à étudier l'évolution de l'activité acoustique par rapport au chargement appliqué [8]. Le nombre des événements acoustiques est calculé

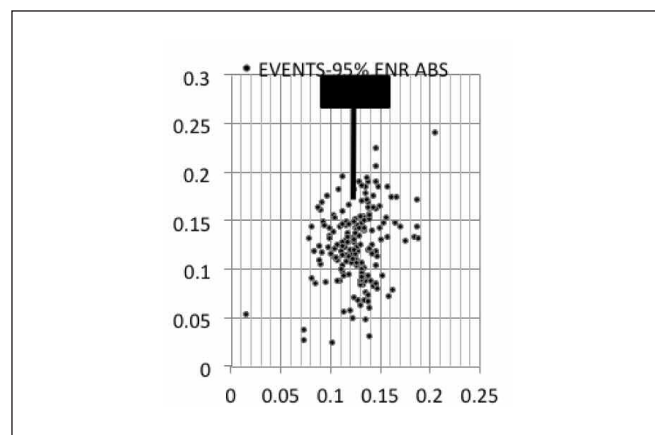


**Figure 5 : Energie absolue en fonction des positions dans le sens x et y**



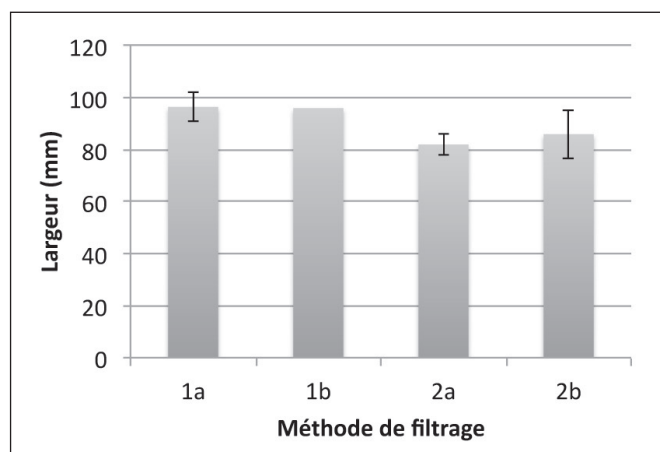
**Figure 4 : Distribution des événements acoustiques entre 400-550 s**

pour cinq paliers de chargement par rapport à la force maximale (30%, 70%, 100% en pré-pic, 70%, et 30% en post pic). Ensuite, le cumule des nombre d'événements est représenté dans une courbe force-déformation. Après le pic de force, une grande activité acoustique est enregistrée. Elle représente environ plus de 70 % du nombre d'événements total. Dans l'étape suivante de cette méthode, les événements acoustiques détectés durant les 5 classes citées précédemment sont représentés. Pour une meilleure précision, on représente les événements acoustiques détectés dans l'intervalle de force suivant [de 0% pré pic à 30% en post-pic] avec un pas de 10%. Les intervalles de force où aucune activité acoustique n'a été détectée ne sont pas représentés. On observe que, entre 70 % de la charge en près pic et 70 % de la charge en post pic, les événements ont tendance à se localiser autour de l'entaille. De plus, les événements qui n'appartiennent pas à cet intervalle se trouvent loin de l'entaille initiale. Ce résultat corrobore avec celui de Koji Otsuka [8] qui considère que la formation de la FPZ se fait entre 70 % en prés pic et 70 % en post pic de la charge appliquée. Dans cet intervalle, les dimen-

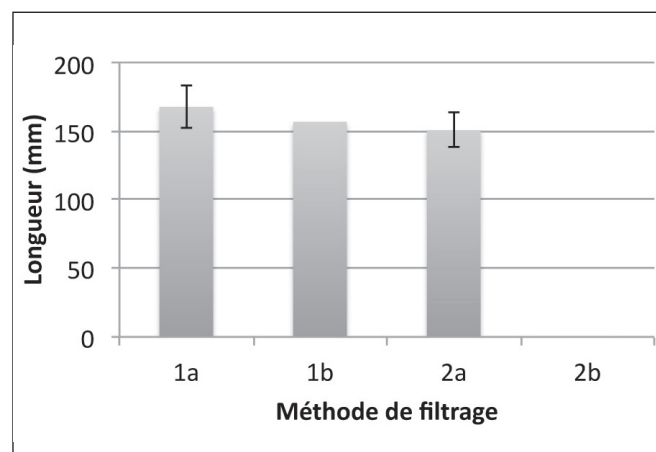


**Figure 6 : Positions des événements en 2D**





**Figure 7 : Comparaison entre les différentes méthodes de calcul (largeur)**



**Figure 8 : Comparaison entre les différentes méthodes de calcul (longueur)**

sions de la FPZ sont de l'ordre de 80 mm en largeur et 153 mm en profondeur.

### 3.2.4. Méthode basée sur le nombre d'évènements (approche 2b)

Cette méthode est beaucoup plus simple. Elle se base sur la distribution des évènements par rapport à la géométrie du spécimen. Elle consiste à tracer en fonction de la position X le nombre d'évènements. Ensuite, une droite est tracée sur la même courbe à 20 % du nombre maximum d'évènements. La largeur de la FPZ est considérée comme étant la distance séparant les deux points d'intersection entre la courbe et la droite [6]. Le seuil 20% a été fixé empiriquement en fonction de simulations numériques [14].

Les résultats de ce filtrage montrent une largeur moyenne de 89 mm. Par ailleurs, les écarts types représentés sur le même histogramme montrent une variabilité statistique plus élevée entre les éprouvettes du même matériau (dispersion de l'ordre de 11 %).

### 3.2.5. Analyse comparative

Nous avons montré à travers des essais mécaniques d'ouverture de fissure sur des échantillons en mortier que deux approches sont possibles pour évaluer les dimensions de l'endommagement diffus par la technique d'émission acoustique. Une approche basée sur l'énergie acoustique et une approche basée sur le nombre d'événement. Bien que la première soit basée sur un fondement plus physique, le résultat des deux approches est très proche comme on peut le voir sur les Figures 7 et 8. Néanmoins, la première approche montre une valeur plus forte pour les deux méthodes d'analyse puisque largeur de l'endommagement est de l'ordre de 95 mm alors que la deuxième approche montre une largeur de l'ordre de 83 mm. L'approche 2b (classification des évènements par rapport au chargement) présente la plus faible dispersion statistique (environ 4%) et d'autre part elle a l'avantage d'être facile à mettre en place par rapport aux méthodes de calcul de l'énergie. Enfin, la méthode 2b (méthode empirique de seuillage statistique) est moins stable puisque la dispersion est 2 à 3 fois plus forte que la méthode 1B.

## 4. CONCLUSION

La présente étude porte sur l'utilisation de la technique d'émission acoustique pour caractériser en 2D la taille de la zone de microfissurations FPZ ainsi que son évolution. Une large campagne expérimentale a été mise en oeuvre sur 9 éprouvettes en mortier. L'énergie absolue mesurée est difficilement contrôlée car elle présente une vulnérabilité vis-à-vis du mode de rupture du matériau. Autrement dit, la libération brusque et rapide de l'énergie absolue, qui est due généralement à une rupture instantanée du matériau, ne favorise pas le traitement des données acoustiques. L'utilisation de plusieurs méthodes de traitement a permis de vérifier la répétabilité des dimensions de la FPZ pour l'ensemble des éprouvettes. Les résultats sont comparables mais leur dispersion diffère notamment pour la méthode de seuillage empirique des événements qui, malgré une dimension de la FPZ bien estimée, présente une analyse statistique instable (variabilité 2,5 fois plus forte). La méthode de classification des événements par rapport au chargement présente une dispersion statistique faible et une mise en œuvre simple et efficace.

Pour confirmer les résultats de cette étude, il est important de coupler la technique d'émission acoustique avec des techniques d'imagerie ultrasonore ou vidéo. D'autre part, un traitement statistique plus approfondi, comme l'utilisation de l'analyse de filtrage par statistique de scan, est en ce moment étudiée en prenant en compte la modification de la rigidité du matériau pendant le chargement, et ce en corrigeant les vitesses acoustiques par un couplage émission acoustique-émission ultrasonore.

## RÉFÉRENCES

- [1] A.Shah, "Concrete Damage Assessment with Innovative Non-Destructive Testing Techniques". International journal of geology. Issue 3, vol 5, 2011.
- [2] S.Mindess, "Fracture Process Zone Detection, in: S.P Shah (Ed.), Fracture Mechanics Test Methods for Concrete (report of RILEM FMT-89).

- [3] H.Tada, P.C Paris, G.R.Irwin, "Stress Analysis Of Cracks Handbook Del Research Corporation". Hellertown, USA, 1973.
- [4] F.H. Wittmann, X.Z. Hu, "Fracture Energy and Fracture Process Zone". *Materials and structures*, 1992, 25, P 319-326.
- [5] X.Z. Hu, "Fracture Process Zone and Strain-Softening In Cementitious Materials". Postdoctoral research report. Institute for building materials, Swiss federal institute of technology, Zürich, 1991.
- [6] K.Haidar et al, "Correlation between the Internal Length, The Fracture Process Zone and Size Effect in Model Materials". *Materials and structures* 38, 2005, P.201-210.
- [7] H.Mihashi, "States Of The Art And A View Of Fracture Mechanics Of Concrete". *Journal of JCI* 1987, 25 (2), P.14-25.
- [8] K.Otsuka, H.Date, "Fracture Process Zone in Concrete Tension Specimen". *Engineering Fracture Mechanics* 2000, 65, P.111-131.
- [9] D. Zhang, K. Wu, "fracture process zone of notched three-point-bending concrete beams". *Cement and concrete research* 1999, 29, P 1887-1892.
- [10] R.L'Hermite, "Influence de la dimension absolue sur la résistance à la flexion". *Annale de l'ITBTP*, 1973 n°30-310, P. 39-41.
- [11] Rüsch H., "Research toward a general flexural theory for structural concrete". *ACI Journal*, 1960, vol. 57, P. 1-28.
- [12] E.N. Landis. "Micro-Macro Fracture Relationships and Acoustic Emissions In Concrete". *Construct Build Mater* 1999, 13 P 65-72.
- [13] S. Muralindhara et al. "Fracture Process Zone Size and True Fracture Energy Of Concrete Using Acoustic Emission". *Construction and Building Materials*, 2010, 24, P. 479-486.
- [14] K.Haidar. "Modelisation De L'endommagement Des Structures En Beton—Approches Numeriques Et Effet De La Microstructure Sur Les Propriétés De Rupture". Thèse, Ecole Centrale de Nantes, 2002.
- [15] W. Keru et al. "Study On The AE Characteristics Of Fracture Process Of Mortar Concrete And Steel-Fiber-Reinforced Concrete Beams". *Cement and concrete research* 2000, 30, P 1495-500.
- [16] H. Hadjab; J.-Fr. Thimus. "fracture process zone in notched concrete beams treated by using acoustic emission". *NDT.Net* 2004, vol 12.
- [17] RILEM TC 212-ACD: acoustic emission and related NDE techniques for crack detection and damage evaluation in concrete. *Materials and Structures* (2010) 43:1177–1181.