

Effet du squelette granulaire sur le développement de la FPZ dans le béton – Apport de la technique d'émission acoustique

Amar Boukais¹, Zohra Dahou¹, Mohammed Matallah²

¹Laboratoire mécanique des structures (LMS) – Université Tahri Mohamed Béchar, BP n° 417 route Kenadsa, Béchar 08000, Algérie, Algérie.

²Laboratoire de RISAM (Risk Assesment and Management) – Université Aboubekr Belkaid Tlemcen, BP n° 230, Tlemcen, Algérie.

RESUME Une investigation expérimentale est présentée pour étudier l'effet du squelette granulaire sur l'évolution de la zone d'élaboration de la rupture (fracture process zone, FPZ) dans le béton de classe de résistance constante (25 MPa). La technique d'émission acoustique (EA) a été utilisée pour surveiller les essais de flexion trois points effectués sur des poutres entaillées pilotés par l'ouverture d'entaille (Crack Mouth Opening Displacement, CMOD). La discussion des résultats compare le comportement mécanique et les activités d'émission acoustique. Il a été conclu que la présence de la discontinuité au niveau du squelette granulaire a un effet significatif sur le processus de rupture dans le béton, il contribue à une augmentation de la taille de la zone d'élaboration de la rupture (FPZ).

Mots-clefs Squelette granulaire, Emission acoustique (EA), Zone d'élaboration de la rupture (FPZ), Flexion trois points.

I. INTRODUCTION

Le processus de rupture dans le béton est caractérisé par la formation d'une zone d'élaboration de la rupture (fracture process zone, FPZ) qui représente des microfissures qui précèdent les fissures macroscopiques. Cette zone (FPZ) a été considérée comme une clé pour étudier le comportement quasi-fragile du béton (Hu and Duan, 2008; Zhang and Zhou, 2022). Bien que, sous chargement statique, les fissures se propagent dans la matrice cimentaire, les granulats ont une grande influence sur le comportement à la rupture du béton. L'effet des granulats sur la (FPZ) dans le béton a fait l'objet de nombreuses recherches, notamment l'effet du diamètre maximal des granulats, la fraction volumique et la nature minéralogique (Boukais et al., 2023; Chen and Liu, 2004; Wu et al., 2001). Notre présente contribution s'intéresse à l'effet de la distribution du squelette granulaire sur le développement de la FPZ. Expérimentalement, la technique d'émission acoustique (EA) a été

largement utilisée dans la littérature pour suivre le processus de rupture dans le matériau béton (Boukais et al., 2023; Chen et al., 2020; Saliba et al., 2016).

Dans ce travail, une étude expérimentale basée à la technique d'émission acoustique (EA) sur des éprouvettes entaillées avec des tailles similaires ($10 \times 10 \times 40$ cm³) est proposée pour étudier l'effet du squelette granulaire sur les propriétés mécaniques et acoustiques et l'évolution de la FPZ dans le matériau béton, en considérant deux types de squelette granulaire (C : continu et D : discontinu) pour une classe de résistance similaire. Les résultats mécaniques et acoustiques des essais de flexion trois points montrent que la présence de la discontinuité au niveau du squelette granulaire a un effet significatif sur le comportement mécanique ainsi sur le processus de rupture dans le béton. La discontinuité au niveau du squelette granulaire augmente la taille de la zone d'élaboration de la rupture (FPZ).

II. PROGRAMME EXPERIMENTAL

A. Matériaux et spécimens

Pour la composition des bétons expérimentés, à base de Ciment Portland Ordinaire (CEM II/B 42,5 N), nous utilisons un sable de rivière naturel avec un module de finesse de 2,54 et une taille maximale de 4 mm, avec trois tailles différentes des graviers soit : 3/8 mm, 8/16 mm, 16/25 mm. Les courbes granulométrique des granulats sont présentées à la figure 1

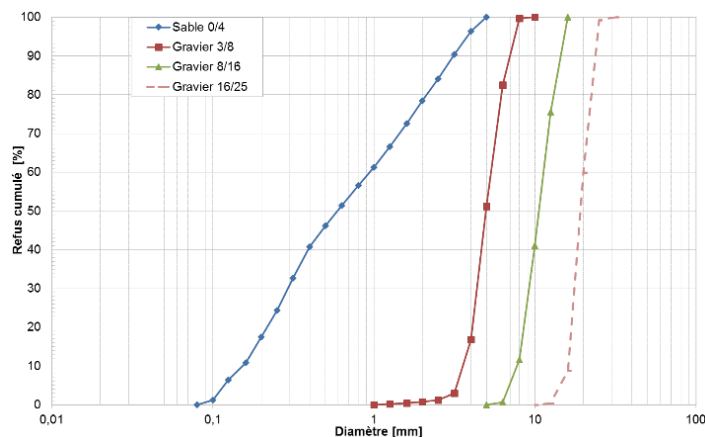


FIGURE 1. Courbe granulométrique des granulats

Deux types de béton ont été formulés afin d'étudier l'effet de types de squelette granulaire (C : continu et D : discontinu) sur le développement de la FPZ dans le matériau béton pour une classe de résistance constant (25 MPa). Selon la méthode Dreux-Gorisse, il a été fixé les trois variables (fraction volumique de granulats, diamètre maximal des granulats 'D_{max}=25mm' et la résistance à la compression). Les deux bétons B25-C et B25-D testés correspondent respectivement à un squelette granulaire continu et un squelette granulaire discontinu (B25-C : continu et B25-D : discontinu). La figure 2 montre la distribution granulométrique des deux types de squelette granulaire étudiés. Le squelette granulaire continue se compose de trois tailles différentes de gravies soit : 3/8 mm, 8/16 mm et 16/25 mm. Tandis que l'autre est considérée comme discontinue en supprimant une classe granulaire (8/16 mm) et en la remplaçant par une masse égale de graviers (3/8 mm et 16/25 mm) répartie comme suit (25 % de cette masse est ajoutée à le gravie 3/8 mm et

75% à le gravie 16 / 25 mm) tout en conservant la même fraction volumique des granulats (69%)
 Tableau 2, cette répartition a été faite selon la méthode de Dreux-Gorisse afin de conserver la même
 résistance visée (25 MPa)

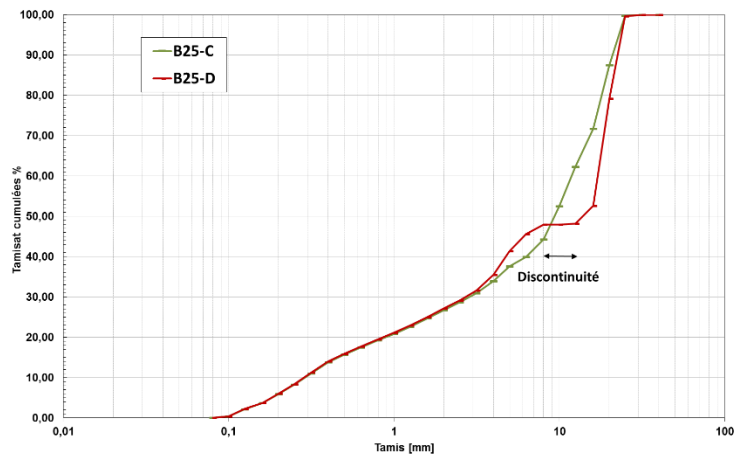


FIGURE 2. Distribution granulométrique des deux types de squelette granulaire (B25-C et B25-D)

Le tableau 1 résume la formulation des bétons confectionnés. Pour une maturité de 28 jours, des essais de résistance standard (essais de compression et de traction) ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques de dimensions 11x22 (11 cm de diamètre et 22 cm de hauteur). Le tableau 1 résume les propriétés à l'état frais ainsi les propriétés mécaniques des bétons testés.

TABLEAU 1. Constituants des bétons

Béton	B25-C	B25-D
Constituants	Dosage (kg.m-3)	
Ciment (CEM II/B 42,5 N)	388	388
Sable 0/4	580	589
Gravillons 3/8	130	250
Gravillons 8/16	497	0
Gravillons 16/25	564	946
Eau	209	209

TABLEAU 2. Les propriétés des bétons

Béton	B25-C	B25-D
Affaissement (cm)	7.50	7.00
Fc [MPa]	32.5	33.8
Ft [MPa]	3.1	2.4

(1)

B. Essai de flexion trois points

Dans le programme expérimental élaboré, nous avons prévu des essais en flexion trois points sur des éprouvettes prismatiques 10x10x40 (en cm). Elles sont munies de rainures ayant des épaisseurs de 4mm et des hauteurs 2 cm. Les essais sont conduits avec une vitesse d'ouverture des fissures (CMOD) constant : $V=0.05 \mu\text{m/s}$

Le système d'émission acoustique comprend un système d'acquisition MISTRAS de quatre voies (carte PCI/-DSP-4). Les signaux d'émission acoustique sont convertis par quatre capteurs différentiels piézoélectriques, de type (R15a), d'une bande de fréquence comprise entre 50 et 200

kHz. La figure 3 montre une éprouvette instrumentée des capteurs EA et mise en place pour l'essai de flexion.

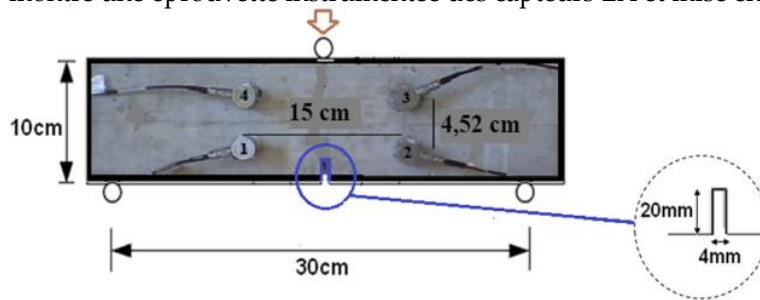


FIGURE 3. Géométrie de l'échantillon de béton et position des capteurs

III. Résultats et discussion

A. Comportement mécanique

La figure 4 illustre les relations expérimentales moyennes entre les forces appliquées et les déplacements de l'ouverture de l'entaille (CMOD). Le comportement des deux bétons est d'abord caractérisé par une même relation élastique linéaire. Suivie d'une relation non linéaire indiquant le développement de dommages dans le matériau. Nous pouvons voir que la valeur de la charge maximale est proche dans les deux bétons.

Après le pic du chargement, les poutres B25-C et B25-D se comportent différemment. Le déplacement de l'ouverture de l'entaille (CMOD) continue d'augmenter et une chute de charge importante se produit pour les deux bétons qui sont plus prononcée pour les poutres B25-C.

Pour le béton B25-C qui a du squelette granulaire continu, le comportement mécanique est plus fragile.

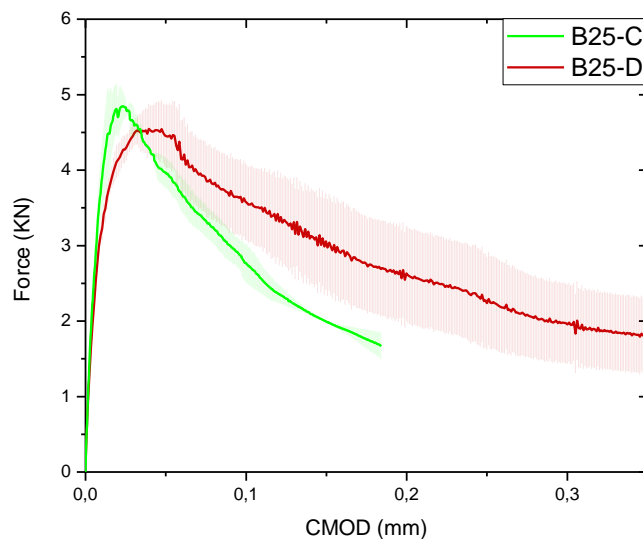


FIGURE 4. Courbes Force-CMOD (Avec l'écart type)

B. Activités d'émission acoustique

La figure 5 représente une corrélation entre le comportement mécanique (courbes Force-CMOD) et les signaux EA. Cette relation était similaire dans les deux cas comme suit: (i) Au début du chargement, il y a eu très peu nombre de Hit EA et le comportement mécanique était élastique. (ii)

Avant le Pic du chargement (environ 80 % de F_{max}), l'activité EA devient plus intense et la réponse est non linéaire, cela indique le début de la formation de micro-fissures. (iii) Dans la phase post-pic, une accumulation brutale des Hits EA se produit impliquant l'existence de macro-fissures. On note une activité acoustique importante dans le béton B25-C qui a du squelette granulaire continu

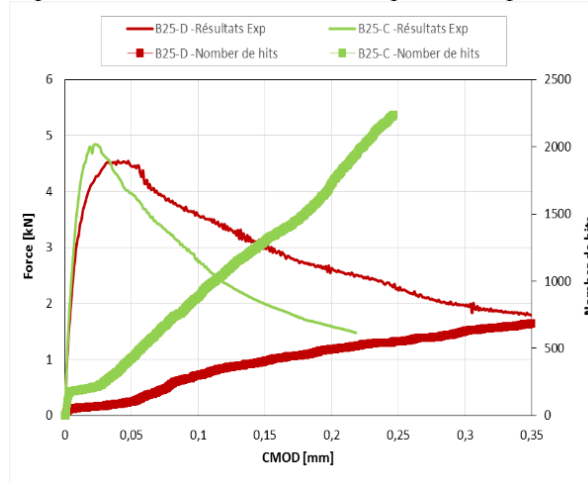


FIGURE 5. Corrélation de la courbe Force-CMOD avec le nombre de hit cumulé

C. Localisation d'endommagement par EA

Un algorithme de localisation planaire (2D) du logiciel AEWIn est utilisé pour la localisation des sources d'EA. Cet algorithme est basé sur la triangulation des différences de temps de propagation sur chacun des quatre capteurs. Pour qu'une source soit localisée, il suffit qu'une salve atteigne au moins trois capteurs.

Afin d'obtenir plus d'informations sur le processus de propagation des fissures, une localisation des événements AE à différents phases de chargement (au pic de charge, à 80 % de F_{max} , et à la fin de l'essai de rupture) est représentée dans une fenêtre couvrant une hauteur de 0,1 m et une largeur de 0,4 m (représentant la poutre). La classification est faite en termes de niveaux d'énergie (Figure 6).

Au Pic de chargement, des activités acoustiques très faibles sont enregistrées correspondant aux quelques événements EA qui sont détectés.

À 80 % après le pic, l'activité acoustique devient plus intense et plus d'événements AE sont détectés, indiquant la progression des dommages et l'apparition de microfissures. De même, dans cette phase de chargement, le nombre d'événements AE détectés dans le béton B25-C est plus important que dans le B25-D.

À la fin de l'essai de rupture, cette étape est caractérisée par une grande activité acoustique avec une augmentation continue des événements AE détectés.

On peut noter que les sources d'énergie plus élevées sont situées dans le cœur du FPZ à partir duquel le chemin de fissure peut être identifié

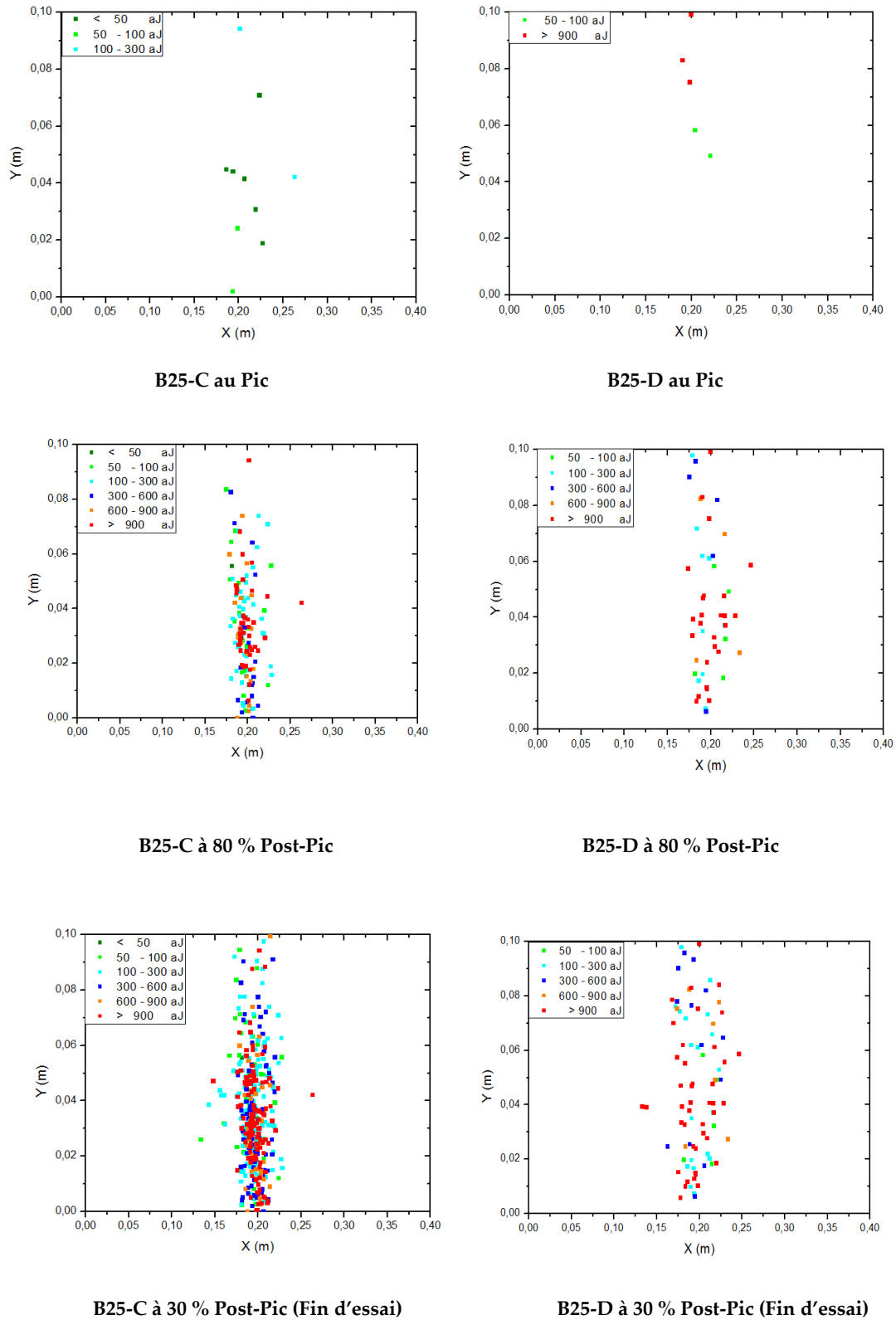


FIGURE 6. Cartes de localisation des événements EA à différentes phases de chargement pour les poutres B25-C et B25-D (aJ : atto joules).

D. Caractérisation de la FPZ par EA

Les limites de FPZ ont été estimées en suivant une méthode simple et pratique qui a été utilisée dans de nombreuses études (Alam et al., 2014; Boukais et al., 2023; Haidar et al., 2005; Saliba et al., 2016). Les événements AE cumulés sont tracés à chaque position X et Y pour évaluer respectivement la largeur et la longueur de FPZ (Figure 7), où les limites de FPZ sont considérées avec plus ou égal à 20 % du pic de les événements EA cumulés (N_{max}).

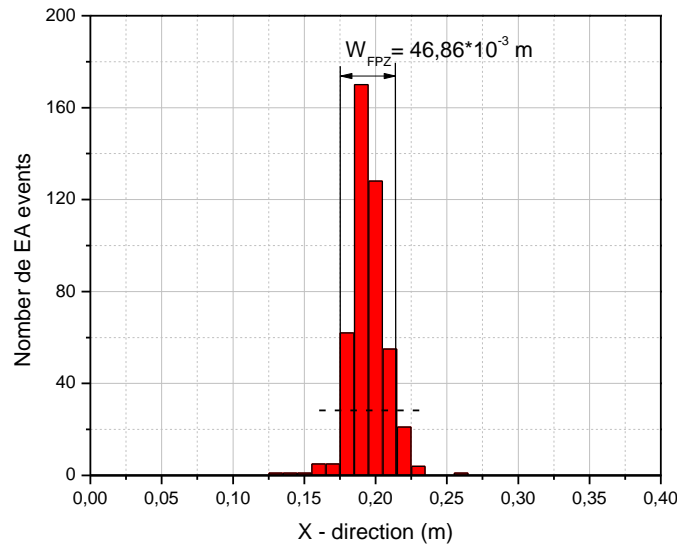


FIGURE 7. Calcul de la largeur FPZ – Exemple de poutre B25-C à 30 % Post-Pic (Fin d’essai)

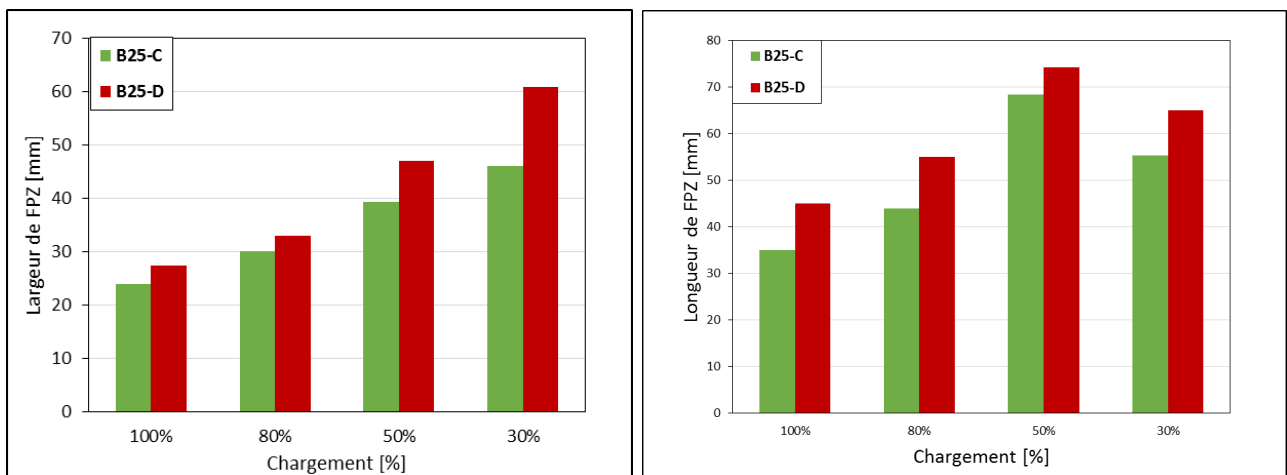


FIGURE 8. Évolution de la FPZ au cours du processus de rupture.

La figure 8 présente l'évolution de la largeur et la longueur du FPZ au cours de différentes phases de chargement (au Pic de chargement, 80 % et 50 % de post-pic, à la fin de l'essai de rupture). On remarque qu'il y a une augmentation progressive de la largeur de FPZ qui se poursuit jusqu'à la fin de l'essai de rupture. En revanche, on peut observer que l'évolution de la longueur FPZ se divise principalement en deux parties. Dans la première partie, la FPZ apparaît près de la pointe de l'entaille et continue d'augmenter jusqu'à ce qu'elle atteigne son plein développement à 50 % du

stade de charge post-pic. La deuxième partie est caractérisée par le rétrécissement de la longueur de la FPZ. Ces résultats rejoignent les conclusions des études effectuées par (Boukais et al., 2023; Matallah and Aissaoui, 2020; Wu et al., 2011) sur le développement de la longueur du FPZ dans le béton, où l'on peut attribuer sa restriction à la partie des ligaments disponible pour son plein développement, qui devient de plus petite. La comparaison entre les deux cas (B25-C et B25-D) indique qu'avec la discontinuité au niveau du squelette granulaire, la taille de la FPZ augmente.

IV. Conclusion

Dans ce manuscrit, une étude expérimentale est présentée afin d'étudier l'effet de la discontinuité au niveau du squelette granulaire sur l'évolution du FPZ dans des bétons de classe de résistance similaire (25 MPa). L'investigation a été réalisée en utilisant la technique EA. Bien que les bétons testés soient de même catégorie de résistance, la présence de discontinuités au niveau de la structure granulaire a contribué à renforcer la résistance à la fissuration. Nous expliquons ceci que, dans le béton B25-D une plus grande quantité de granulats grossiers (16/25) a été utilisée que dans le béton B25-C. Cela a provoqué un développement tortueux du chemin de la fissure et donc un béton plus ductile, nous pouvons confirmer ces résultats ultérieurement par une investigation numérique au niveau de l'échelle méso. Cette investigation a également conclu que la présence de discontinuité au niveau de la structure granulaire contribue à l'augmentation de la taille de la (FPZ).

REFERENCES

- Alam, S.Y., Saliba, J., Loukili, A., 2014. Fracture examination in concrete through combined digital image correlation and acoustic emission techniques. *Construction and Building Materials* 69, 232–242. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.044>
- Boukais, A., Dahou, Z., Matallah, M., 2023. Maximum aggregate size effects on the evolution of the FPZ and crack extensions in concrete – Experimental and numerical investigation. *International Journal of Solids and Structures* 269, 112181. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2023.112181>
- Chen, B., Liu, J., 2004. Effect of aggregate on the fracture behavior of high strength concrete. *Construction and Building Materials* 18, 585–590. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.013>
- Chen, C., Fan, X., Chen, X., 2020. Experimental investigation of concrete fracture behavior with different loading rates based on acoustic emission. *Construction and Building Materials* 237, 117472. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117472>
- Haidar, K., Pijaudier-Cabot, G., Dubé, J.F., Loukili, A., 2005. Correlation between the internal length, the fracture process zone and size effect in model materials. *Mat. Struct.* 38, 201–210. <https://doi.org/10.1007/BF02479345>
- Hu, X., Duan, K., 2008. Size effect and quasi-brittle fracture: the role of FPZ. *Int J Fract* 154, 3–14. <https://doi.org/10.1007/s10704-008-9290-7>
- Matallah, M., Aissaoui, N., 2020. Mesomechanical Investigation of the Relationship between the Length of the Fracture Process Zone and Crack Extensions in Concrete. *Phys Mesomech* 23, 494–508. <https://doi.org/10.1134/S1029959920060053>
- Saliba, J., Matallah, M., Loukili, A., Regoin, J.P., Grégoire, D., Verdon, L., Pijaudier-Cabot, G., 2016. Experimental and numerical analysis of crack evolution in concrete through acoustic

emission technique and mesoscale modelling. *Engineering Fracture Mechanics* 167, 123–137. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2016.03.044>

Wu, K., Chen, B., Yao, W., 2001. Study of the influence of aggregate size distribution on mechanical properties of concrete by acoustic emission technique. *Cement and Concrete Research* 31, 919–923. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00504-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00504-X)

Wu, Z., Rong, H., Zheng, J., Xu, F., Dong, W., 2011. An experimental investigation on the FPZ properties in concrete using digital image correlation technique. *Engineering Fracture Mechanics* 78, 2978–2990. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2011.08.016>

Zhang, J.-Z., Zhou, X.-P., 2022. Fracture process zone (FPZ) in quasi-brittle materials: Review and new insights from flawed granite subjected to uniaxial stress. *Engineering Fracture Mechanics* 274, 108795. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108795>