

Détection et suivi de l'endommagement mécanique du béton recyclé par émission acoustique

Hadjari Mohammed ¹, Dahou Zohra ², Marouf Hafida ³

¹ *Laboratoire des Structures Intelligentes SSL, Université Belhadj Bouchaïb - Ain Témouchent, Algérie*

² *Laboratoire Mécanique des Structures LMS, Université Tahri Mohamed - Bechar, Algérie*

³ *Laboratoire LABMAT EnpOran-Maurice Audin, Université Belhadj Bouchaïb - Ain Témouchent, Algérie*

RESUME Dans cette contribution, le processus de fissuration et suivi d'endommagement d'un béton recyclé est étudié en associant la technique d'émission acoustique. Trois bétons ont été formulés, un béton ordinaire et deux bétons recyclés. La composition des béton recyclés a été obtenue en substituant la masse de gravier naturel par 30% de gravier recyclé ; Le principal paramètre variable est la classe granulaire (4/8 et 8/16). Des essais de flexion trois points suivis par émission acoustique « EA » sont conduits à 28 jours sur des éprouvettes prismatiques (10x10x40cm³) sur les trois types de bétons. Les résultats obtenus révèlent une relation entre la taille de la classe granulaire recyclée et les paramètres d'EA. En effet, le nombre de hits, le nombre d'évènements et les énergies d'EA augmentent avec l'augmentation de la taille de la classe granulaire recyclée.

Mots-clefs béton, graviers recyclés, endommagement, comportement flexionnel, EA

I. INTRODUCTION

Le béton, avec des granulats recyclés est de plus en plus utilisé dans la construction ; C'est une alternative au besoin accrue en granulat naturel, imposé par l'épuisement des gisements naturels et des difficultés d'exploiter de nouvelles carrières. L'utilisation des déchets de béton issus de la démolition en tant que granulats dans le béton se représente comme une solution prometteuse pour la préservation des ressources naturelles.

En général, la principale différence entre le béton naturel et le béton recyclé réside dans la zone de transition interfaciale (ITZ) [Men et al., 2020]. Pour le béton recyclé, il y a deux ITZ : la première qu'on qualifie d'ancienne ITZ, correspond à celle du béton ordinaire soit l'interface entre les graviers et mortier ; la nouvelle ITZ est en relation avec l'interface des mortiers du béton ordinaire et du béton recyclé. En raison de sa porosité élevée et de la présence de microfissures initiales, l'ITZ est généralement considérée comme la phase la moins résistante du béton, et ceci en comparaison avec le gravier et le mortier [Djerbi, 2018].

Les caractéristiques de l'ITZ ont un impact sur le comportement mécanique et de rupture du béton recyclé. De manière générale, l'incorporation de graviers recyclés entraîne une diminution de la résistance à la compression, de la résistance à la traction, ainsi que des changements dans le processus de fissuration du béton recyclé [Guo et al., 2017 ; Ghorbel and Wardeh, 2017].

Différents travaux de recherche [Guo et al., 2017 ; Ghorbel and Wardeh, 2017 ; Li et al., 2019] ont étudié et comparé le comportement à la rupture des bétons à base de graviers naturels et recyclés sous flexion trois points. La composition des bétons recyclés a été obtenue soit par la substitution massique ou volumique avec différents taux de graviers recyclés. Toutes les classes de graviers naturels ont été remplacées par des classes de graviers recyclés avec différents taux de substitution [Ghorbel and Wardeh, 2017]. Les résultats ont révélé que les bétons recyclés sont plus fragiles que les bétons naturels et que l'énergie de rupture diminue à mesure que le taux de substitution par des graviers recyclés augmente.

On s'intéresse dans cette contribution à l'effet indépendant de deux classes granulaires de graviers recyclés sur le comportement à la rupture du béton. Nous étudions le processus de fissuration et d'endommagement d'un béton recyclé durant un chargement flexionnel trois points suivis par la technique d'EA. Trois bétons ont été étudiés : un béton ordinaire, qui est aussi un béton témoin, et deux bétons recyclés ; Le premier avec uniquement la substitution de la classe granulaire 4/8, tandis que le deuxième concerne la classe granulaire 8/16. L'étude des paramètres des signaux durant les différentes phases des essais et la localisation cumulée des événements acoustiques permettra de comparer les trois bétons.

II. PROGRAMME EXPERIMENTAL

II.1. MATERIAUX ET BETON ORDINAIRE

La formulation de béton ordinaire « BO » de classe C35, dont la dimension maximale des granulats est de 16 mm, est obtenue en utilisant du ciment Portland (CEM II/A-L 42.5 N) et des granulats calcaires concassés (Tableau 1) fournis par l'entreprise Nationale des Granulats (ENG) située à Sidi-Abdelli, wilaya de Tlemcen. Le sable a un module de finesse de 2,43.

Ce béton ordinaire « BO » est utilisé pour la préparation des graviers recyclés. La préparation des graviers recyclés est conduite au laboratoire en utilisant le BO ayant une maturité d'au moins six (06) mois. Les distributions granulométriques des granulats concassés et recyclés sont présentées dans la figure 1. Le tableau 2 compare les principales caractéristiques entre les graviers recyclés obtenus et les graviers naturels sources.

TABLEAU 1. Composition du béton ordinaire « BO »

| Constituants | Dosage [kg/m ³] |
|-----------------------|-----------------------------|
| Ciment | 430,91 |
| Eau | 218,08 |
| E/C | 0,51 |
| Sable concassé 0/3,15 | 646,80 |
| Gravier concassé 4/8 | 171,78 |
| Gravier concassé 8/16 | 895,47 |

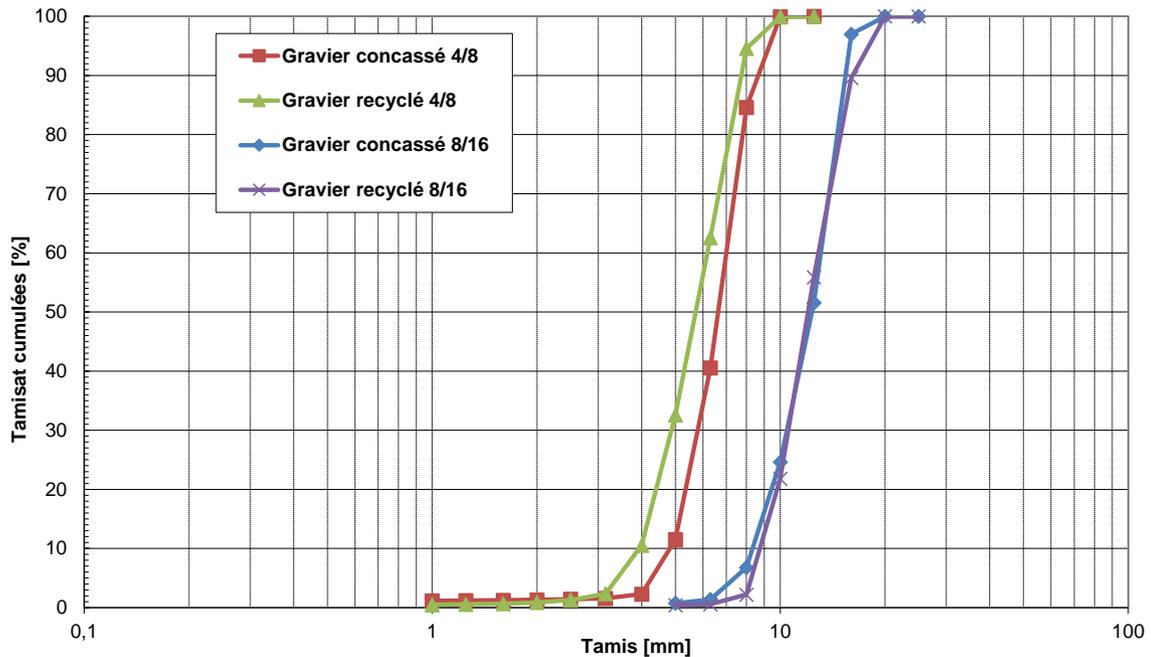


FIGURE 1. Courbes granulométriques des granulats

TABLEAU 2. Caractéristiques des granulats

| | Graviers concassés | | Graviers recyclés | |
|--|--------------------|------|-------------------|------|
| | 4/8 | 8/16 | 4/8 | 8/16 |
| Masse volumique absolue [g/cm ³] | 2,64 | 2,60 | 2,52 | 2,50 |
| Absorption d'eau [%] | 1,34 | 0,58 | 6,23 | 5,17 |

Le gravier recyclé 8/16 présente une distribution granulométrique presque identique à celle du gravier concassé 8/16. Cependant, la distribution granulométrique du gravier recyclé 4/8 diffère légèrement de celui du gravier concassé 4/8. Cette différence est due à la présence du mortier attaché dans la fraction fine que dans la fraction grossière.

Les graviers recyclés 4/8 et 8/16 se caractérisent par une masse volumique absolue plus faible et une capacité d'absorption d'eau plus importante que les graviers concassés 4/8 et 8/16. Cette diminution des caractéristiques est due à la présence de mortier attaché à la surface des graviers recyclés.

II.2. COMPOSITION DES BETONS RECYCLES

Le programme expérimental est conduit avec deux bétons recyclés obtenus en substituant alternativement 30% de chaque classe granulaire des graviers naturels. Nous désignons par la suite ces bétons recyclés par « BR-4/8 » et « BR-8/16 » et qui correspondent respectivement à des classes granulaire 4/8 et 8/16. Le tableau 3, donne les compositions des bétons recyclés.

Le choix du taux de 30%, plus petit pourcentage de substitution des graviers naturels par des graviers recyclés, se base sur les travaux d'autres chercheurs [Guo et al., 2017 ; Ghorbel and

Wardeh, 2017]. Ce taux respecte aussi le pourcentage maximal de 60% autorisé par la norme [EN 206/CN, 2022].

Afin d'éliminer l'influence de la forte absorption d'eau des graviers recyclés sur le rapport E/C, ceux-ci ont été utilisés à l'état saturée à surface sèche (SSD) par immersion dans l'eau pendant 24 heures avant le mélange, puis leur surface a été essuyée avec un chiffon. Les graviers naturels ont été utilisés à l'état sec. Tous les bétons ont été préparés avec un rapport E/C constant de 0,51 et un même affaissement plastique visé de 9 cm. Les affaissements expérimentaux obtenus sont de 7cm et 8 cm pour respectivement BO, BR-4/8 et BR-8/16.

TABLEAU 3. Composition (en [kg/m³]) des bétons recyclés « BR 4-8 » et « BR 8-16 »

| | Ciment | Eau | Sable | Classe 4/8 | | Classe 8/16 | |
|---------|--------|--------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | | | Gravier naturel | Gravier recyclé | Gravier naturel | Gravier recyclé |
| BR-4/8 | 430,91 | 218,08 | 646,8 | 120,24 | 51,53 | 895,47 | 0 |
| BR-8/16 | 430,91 | 218,08 | 646,8 | 171,78 | 0 | 626,83 | 268,64 |

II.3. PROCEDURE EXPERIMENTALE

Pour les trois bétons, des essais de flexion trois points suivis par l'EA ont été effectués à 28 jours sur des éprouvettes prismatiques (10x10x40cm³) munis de rainures d'une épaisseur de 4 mm et d'une profondeur de 20 mm. La charge de flexion a été appliquée à l'aide d'une presse électromécanique de capacité 50 kN et pilotés par ouverture de fissure avec une vitesse constante de 0,05 µm/s.

Le matériel d'acquisition et de traitement des signaux des EA est composé : un système d'acquisition MISTRAS comprenant quatre voies, une carte PCI/DSP-4 et quatre capteurs piézoélectriques de type R15/α. Les signaux enregistrés ont été amplifiés par un amplificateur différentiel de 40 dB de gain. Le seuil de détection est fixé à 40 dB.

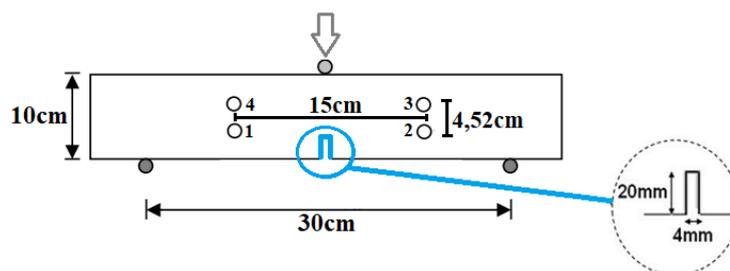


FIGURE 2. Dispositions des capteurs d'EA et dimensions de l'éprouvette

III. RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSIONS

III.1. PROPRIETES MECANIQUES DES BETONS

Le tableau 4 résume les résistances de compression et de traction par fendage conduits à 28 jours sur des éprouvettes cylindriques 16x32 cm² [NF EN 12390-3, 2003] et [NF EN 12390-6, 2001].

On déduit que l’incorporation de graviers recyclés dans le béton entraine une diminution des résistances mécaniques par rapport au béton ordinaire. Pour la résistance à la compression, la diminution est de 10% et 4% pour respectivement BR-8/16 et BR-4/8. Dans le même ordre ces taux sont de 8% et 5% pour la résistance à la traction par fendage.

Ainsi, nous pouvons en conclure que la substitution d’un taux de 30 % de chaque classe granulaire par des graviers recyclés a un effet négatif sur les résistances mécaniques. Nous notons que la résistance à la compression reste plus sensible en comparaison avec la résistance à la traction par fendage. Pour le béton BR 8/16, correspondant à la plus grande classe granulaire, le taux de diminution de la résistance à la compression est presque trois fois plus grand que pour le BR 4/8, et il est d’environ la moitié pour la résistance à la traction. Cette observation a déjà été rapportée dans la littérature. En effet, l’auteur [Laneyrie, 2014] a constaté pour le cas de température ambiante la résistance à la compression des bétons recyclés est inférieure à celle du béton ordinaire de référence ; Cependant, les résistances en traction par fendage sont supérieures à celles du béton ordinaire. Selon l’auteur, cela s’explique par l’amélioration de la nouvelle ITZ entre l’ancien mortier et le nouveau mortier, grâce à la rugosité significative du gravier recyclé.

TABLEAU 4. Propriétés mécaniques des bétons – Valeurs moyennes avec écart type

| | R_{c28} (MPa) | R_{t28} (MPa) |
|---------|------------------|-----------------|
| BO | $36,45 \pm 0,64$ | $2,81 \pm 0,14$ |
| BR-4/8 | $34,93 \pm 1,53$ | $2,66 \pm 0,19$ |
| BR-8/16 | $32,78 \pm 0,36$ | $2,59 \pm 0,13$ |

La figure 3 présente et compare les courbes moyennes force en fonction de la flèche et du déplacement de l’ouverture de la fissure (CMOD « Crack Mouth Opening Displacement»). Le béton BR-8/16 présente la force au pic la plus élevée en comparaison des deux autres bétons ; ce qui peut s’expliquer par la rugosité significative des graviers recyclés ayant des diamètres supérieurs à 8mm. Cependant, il se montre plus fragile par rapport au BO et au BR-4/8 en raison de la fragilité des graviers recyclés, ainsi que de la présence de fissures préexistantes dans le gravier recyclé apparues durant le processus de concassage pour l’élaboration des granulats recyclés. Le remplacement de 30% des graviers naturels par des graviers recyclés 4/8 n’a pas beaucoup influencé la force maximale. Toutefois il est noté une amélioration de la résistance à la fissuration et flexion autour de 0,07mm.

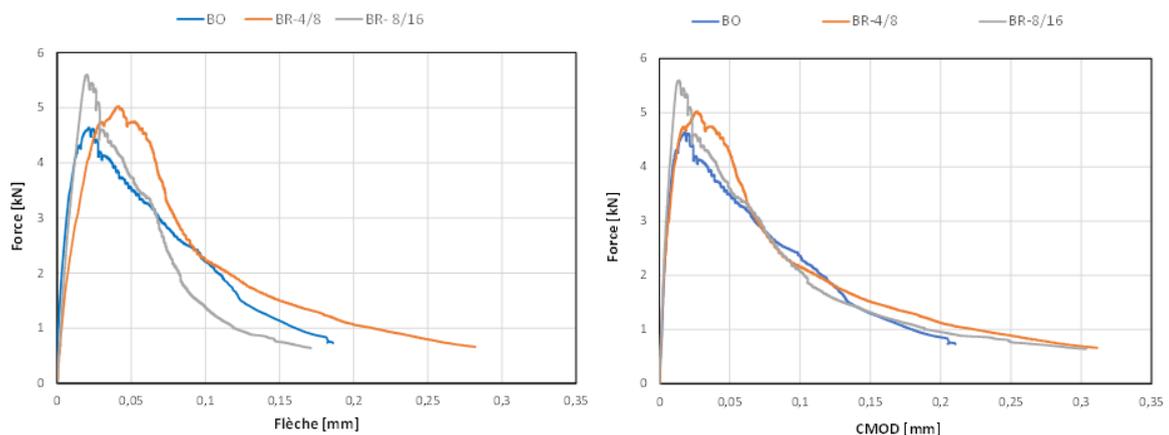


FIGURE 3. Force-Flèche et Force-CMOD pour BO, BR-4/8 et BR-8/16

III.2. PROPRIETES DE RUPTURE DES BETONS

L'énergie de rupture est définie comme l'énergie nécessaire pour créer une unité de fissure en mode I de rupture [Ghorbel and Wardeh, 2017]. Selon la norme RILEM TC50-FMC [RILEM, 1985] le tableau 5 présente les valeurs obtenues de " G_F " pour chaque béton (Figure 3).

Par rapport au béton avec des graviers naturels, nous notons que l'utilisation de 30% de graviers recyclés 8/16 a diminué l'énergie de rupture d'environ 11%. Par contre, une augmentation de 32% est notée pour le BR-4/8. Or pour les essais de flexion pour ce béton recyclé avec une classe intermédiaire de gravier une plus grande étendue de flèche a été enregistré.

En référence aux travaux des chercheurs [Guo et al., 2017], un béton recyclé avec 30% de taux de substitution par de graviers recyclés des deux classes (4/10 et 10/20) a donné un béton plus fragile par rapport au béton ordinaire ; et aussi, une diminution de 11% de son énergie de rupture.

TABLEAU 5. Energie de rupture des bétons

| Type de béton | G_F (N/m) |
|---------------|-------------|
| BO | 59,89 |
| BR-4/8 | 79,59 |
| BR-8/16 | 52,74 |

III.3. ACTIVITE ACOUSTIQUE

La figure 5 illustre une corrélation entre le comportement mécanique (Force-CMOD) et le nombre de hits pour chaque type de béton (BO, BR-4/8 et BR-8/16). On peut observer qu'à environ 70% de F_{max} , le BO présente une activité acoustique plus importante que BR-4/8 et BR-8/16. Cette différence peut s'expliquer par le fait que la rugosité des graviers recyclés améliore la force de liaison entre l'ancien mortier et le nouveau mortier. Cependant, à environ 45% du post-pic, BO et BR-4/8 montrent une activité acoustique similaire, tandis que BR-8/16 présente l'activité acoustique la plus élevée. A la rupture, on observe une activité acoustique importante pour BR-8/16 par rapport au BO et BR-4/8. Cette différence peut être attribuée à la fragilité des graviers recyclés ainsi qu'à la présence de fissures préexistantes dans le gravier recyclé, qui sont apparues lors du concassage pour l'élaboration des graviers recyclés.

En termes de nombre d'évènement (Tableau 6 et figure 6), la différence entre béton ordinaire et recyclés est plus apparente dans la phase post pic (après 50%). A la fin des essais, le béton BR-8-16 enregistre le plus grand nombre d'évènements ayant les plus grandes énergies absolues.

Ces résultats montrent que la substitution des graviers naturels par les deux classes de graviers recyclés engendre une augmentation de l'activité acoustique ; ce qui peut s'expliquer par la microstructure plus complexe du béton recyclé en raison de la présence de deux types d'ITZ. Les fissures dans le béton recyclé apparaissent autour des anciennes et des nouvelles ITZ, puis se propagent dans la matrice du mortier et leur combinaison avec les fissures de la matrice pour former des macrofissures. Ces résultats sont en concordance avec les travaux menés par [Guo et al., 2017], dont les résultats ont révélé que plus d'évènements sont enregistrés pour les bétons recyclés par rapport au béton naturel.

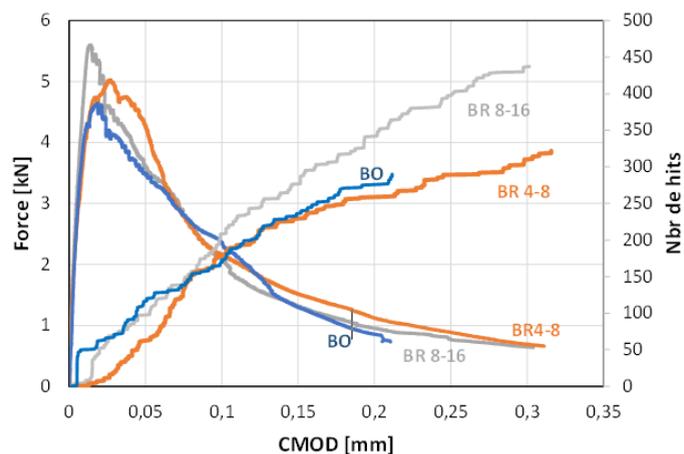


FIGURE 5. Comportements flexionnels et activités acoustiques

TABLEAU 6. Nombre d'évènements

| | BO | BR-4/8 | BR-8/16 |
|--------------------|----|--------|---------|
| Au pic de charge | 4 | 2 | 2 |
| À 50 % du post-pic | 42 | 38 | 36 |
| A la rupture | 65 | 77 | 107 |

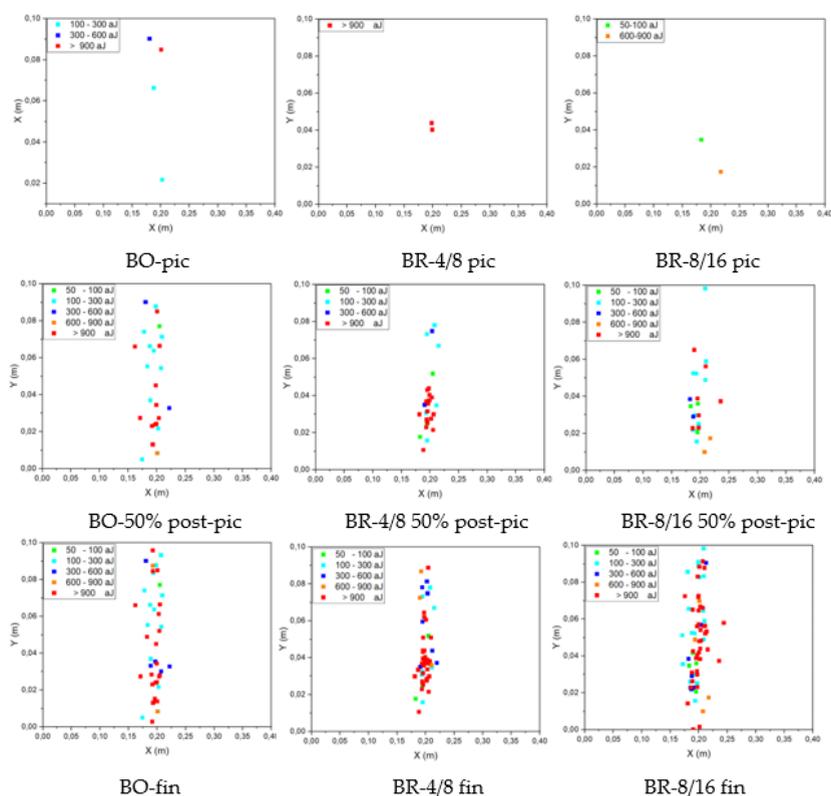


FIGURE 6. Cartes de localisation des évènements d'EA à différents stades de chargement pour BO, BR-4/8 et BR-8/16.

La comparaison des énergies d'EA pour les trois bétons sont présentées sur la figure 7. Ces énergies sont relatives aux signaux et sont des énergies absolues. Elles sont obtenues par intégration du carré de la tension du signal, divisée par la résistance de référence (10 kOhms), sur la durée de la salve.

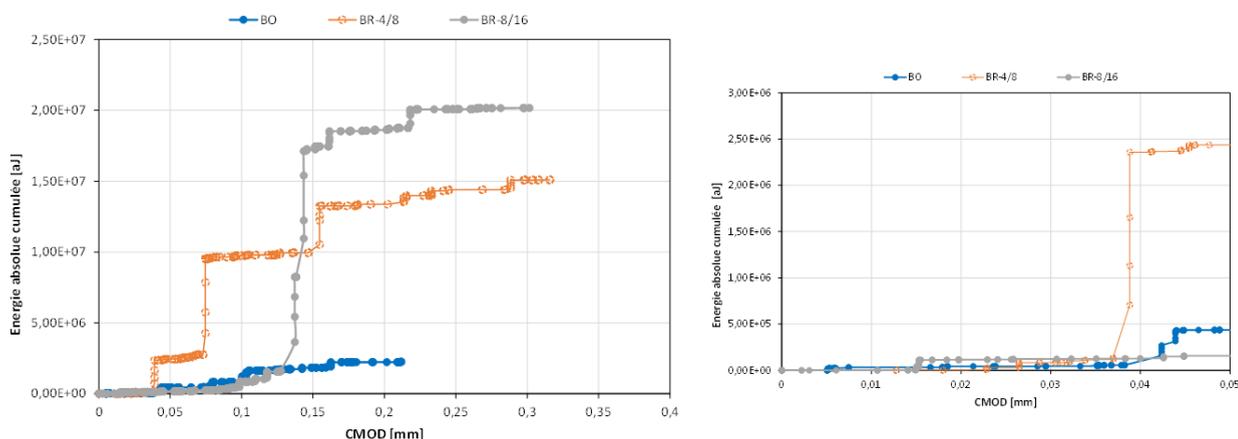


FIGURE 7. Comparaison des énergies d'EA absolues cumulé pour BO, BR-4/8 et BR-8/16

Plusieurs sauts ont été observés dans l'évolution des énergies absolues, indiquant la présence des fissures. À la fin des essais, BO, BR-4/8 et BR-8/16 ont atteint respectivement $2,25.10^6$, $1,51.10^7$ et $2,02.10^7$ a.J. On peut constater que l'ajout de graviers recyclés dans le béton entraîne une augmentation des énergies d'EA et que cette augmentation est plus marquée pour le BR-8/16. Ces résultats montrent un effet significatif des évolutions des énergies d'EA des bétons recyclés et plus précisément pour la classe des gros granulats.

IV. CONCLUSIONS

Cette étude expérimentale traite de l'influence de la classe granulaire recyclée sur le processus de fissuration et d'endommagement d'un béton recyclé lors d'essai de flexion trois points suivi par émission acoustique. Nous concluons que les paramètres d'EA : le nombre de hits, le nombre d'évènements et les énergies d'EA sont nettement influencés par la classe granulaire recyclée. En effet, plus la taille de la classe granulaire recyclée est grande plus le nombre de hits, le nombre d'évènements et les énergies d'EA deviennent importants, dénotant une amélioration de la résistance à la fissuration du béton ordinaire. Les présents résultats expérimentaux seront étendus à d'autres essais et paramètres pour des résultats plus concluants.

REFERENCES

RILEM 50-FMC Draft Recommendation. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams, 1985. Mater. Struct. 18, 287–290. <https://doi.org/10.1007/BF02472918>

Djerbi, A., 2018. Effect of recycled coarse aggregate on the new interfacial transition zone concrete. Constr. Build. Mater. 190, 1023–1033. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.180>

Ghorbel, E., Wardeh, G., 2017. Influence of recycled coarse aggregates incorporation on the fracture properties of concrete. *Constr. Build. Mater.* 154, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.183>

Guo, M., Alam, S.Y., Bendimerad, A.Z., Grondin, F., Rozière, E., Loukili, A., 2017. Fracture process zone characteristics and identification of the micro-fracture phases in recycled concrete. *Eng. Fract. Mech.* 181, 101–115. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.07.004>

Li, T., Xiao, J., Zhang, Y., Chen, B., 2019. Fracture behavior of recycled aggregate concrete under three-point bending. *Cem. Concr. Compos.* 104, 103353. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103353>

Laneyrie, C., 2014. Valorisation des déchets de chantiers du BTP : comportement à haute température des bétons des granulats recyclés (phdthesis). Université de Cergy Pontoise.

Men, J., Wang, J., Guo, L., Wang, K., 2020. Acoustic emission behavior and damage evaluation of recycled aggregate concrete under compression. *Struct. Control Heal. Monit.* 27, 1–21. <https://doi.org/10.1002/stc.2612>

NF EN 12390-3: 2003. Essai pour béton durci-Partie 3. AFNOR.

NF EN 12390-6: 2001. Testing hardened concrete-Part 6. AFNOR.

NF EN 206+A2/CN :2022. Béton — Spécification, performance, production et conformité — Complément national à la norme NF EN 206+A2. AFNOR.