

Identifications expérimentale et numérique des micromécanismes de la rupture du béton recyclé

Menghuan GUO

Ecole Centrale de Nantes, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), UMR-CNRS 6183, 1 rue de la Noë, 44321 Nantes

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

RÉSUMÉ. Le recyclage du béton apparaît aujourd'hui comme une solution d'avenir pour répondre au déficit entre production et consommation des granulats. La première caractéristique que l'on doit vérifier pour un béton est sa résistance à la rupture. Une analyse profonde du processus de rupture de poutres en béton de granulats recyclés avec les techniques de corrélation des images (CDI) et d'émission acoustique (EA) a été réalisée. Ces essais ont permis de conclure que la présence des granulats recyclés conduit à une cinétique de fissuration plus importante. Grâce à la méthode EA, une classification des mécanismes d'endommagement a été effectuée ; trois classes avec différentes caractéristiques ont été discriminées. Ce comportement particulier semble être dû à la microstructure complexe des bétons de granulats recyclés. Pour mieux comprendre, une modélisation à l'échelle mésoscopique a été proposée pour tenir compte explicitement de l'ancien mortier attaché sur le granulat recyclé. L'effet de cette fine couche sur le comportement mécanique du béton a été caractérisé et a confirmé les hypothèses expérimentales sur la fragilité de cette zone et son influence sur la cinétique de rupture.

ABSTRACT. Recycling of concrete is now considered to be a promising solution to meet the conflict between production and consumption of aggregates. The first characteristic we should verify for concrete is the fracture strength. A thorough analysis of the fracture process of normal and recycled concrete beams by using the digital image correlation (DIC) and the acoustic emission (AE) techniques was carried out. The experimental results allowed to conclude that the usage of recycled aggregates leads to higher cracking kinetics. With the AE method, a classification of the damage mechanisms was performed; three classes with different characteristics are discriminated. This particular behavior appears to be due to the complex microstructure of recycled aggregate concrete. For a better understanding, a mesoscopic modeling was proposed to take into account explicitly the presences of interfacial transition zone, recycled aggregates and mortar. The effect of the thin transition layer on the mechanical behavior of concrete was analyzed and the result confirmed the experimental hypothesis on the fragility of this zone and its influence on the fracture kinetics.

MOTS-CLÉS : béton, corrélation des images, émission acoustique, granulat recyclé, rupture, auréole de transition.

KEYWORDS : concrete, digital image correlation, acoustic emission, recycled aggregate, fracture, interfacial transition zone.

Aujourd'hui le béton est une base matérielle extrêmement importante pour la société civile moderne. Mais en même temps, le développement rapide de l'industrie du béton conduit à des problèmes économiques et environnementaux, notamment l'épuisement des ressources naturelles pour produire les constituants du béton, mais aussi la gestion des déchets issus de la démolition. Afin de répondre à ces problèmes, le recyclage complet du béton semblerait être une solution prometteuse. La recherche sur ce type de matériau a commencé à prendre de l'importance. Il est généralement admis que les propriétés mécaniques du béton recyclé sont inférieures à celles du béton normal [YAN 08, XIA 12]. Cependant, [IGN 13, KNA 14] ont montré que le comportement mécanique du béton armé en granulats recyclés sous un chargement à court terme est comparable à celui du béton ordinaire. Mais la maîtrise de la fissuration dans le matériau est aussi importante pour le contrôle de l'étanchéité des ouvrages. Peu de recherche a été trouvée pour préciser l'ouverture des fissures dans le béton recyclé. Pour cela, nous avons réalisé des essais de rupture en flexion trois points sur des poutres de granulats recyclés en appliquant les techniques de corrélation des images (CDI) et d'émission acoustique (EA) pour étudier le processus de rupture du matériau. Le béton recyclé a une microstructure très complexe [TAM 05]. Cinq phases se distinguent dans le matériau lorsqu'on observe le matériau à une échelle dite mésoscopique (taille du granulat) : le granulat, une première auréole de transition entre granulat et l'ancien mortier attaché, l'ancien mortier, une deuxième auréole de transition entre ancien et nouveau mortiers et le nouveau mortier [ZHA 15]. La caractérisation de ces différentes phases est importante, mais peu d'étude a été réalisée. Les liaisons entre le granulat recyclé, l'ancien mortier attaché et le nouveau mortier semblent être les zones les plus faibles où les microfissures peuvent s'amorcer [GRO 14, XIA 13]. Mais comment prendre en compte l'effet de ces liaisons sur le comportement mécanique du béton recyclé ? Dans ce travail nous avons proposé une nouvelle modélisation de la rupture du béton recyclé à l'échelle mésoscopique en considérant l'hétérogénéité du matériau. Cet article présente les deux résultats importants de mon travail de thèse : l'analyse expérimentale de la rupture des bétons de granulats recyclés et le développement d'un modèle mésoscopique pour comprendre et reproduire les micromécanismes induits par les granulats recyclés.

2. Protocole expérimental

2.1. Matériaux

Les bétons testés étaient composés de graviers calcaires concassés 4/10 et 6,3/20, de graviers recyclés 4/10 et 10/20, du sable lavé 0/4, du sable recyclé 0/4 et du ciment CEM II/A-L 42.5N de Rochefort. Afin d'éliminer l'effet de l'absorption d'eau, nous avons maintenu constante la saturation initiale des graviers et sables à l'état saturé surface sèche. Du filler calcaire Betocarb HP-OG a été ajouté pour améliorer le squelette granulaire des bétons, et un superplastifiant MC PowerFlow 3140 pour améliorer la maniabilité du béton frais. Quatre formules de béton ont été réalisées : B-N-N - béton avec sable et graviers naturels ; B-N-30R - béton avec sable naturel et 30 % de graviers naturels remplacés en masse par des graviers recyclés ; B-N-100R - béton avec sable naturel et 100 % de graviers recyclés ; B-30R-N - béton avec graviers naturels et 30 % du sable naturel remplacé en masse par du sable recyclé. Tous les mélanges ont été élaborés pour avoir la même gamme de résistance en compression de 25-30 MPa et la même maniabilité définie par un affaissement de 20 cm. Les détails de ces formules ont été présentés lors des Rencontres de l'AUGC en 2015 [GUO 15].

2.2. Procédure expérimentale

Les essais de rupture en flexion trois points ont été réalisés sur des poutres prismatiques de dimensions $10 \times 20 \times 80 \text{ cm}^3$ âgées de 28 jours. Les poutres étaient entaillées avec une profondeur d'entaille de 4 mm. La charge était appliquée à l'aide d'une presse Instron de capacité 160 kN. Les essais étaient pilotés par le déplacement de l'ouverture de l'entaille CMOD (*Crack Mouth Opening Displacement*) avec une vitesse constante de $0,2 \mu\text{m/s}$. La flèche a été mesurée au milieu de la poutre avec un capteur laser sans contact.

2.3. Montage des techniques de corrélation des images et d'émission acoustique

Dans notre programme expérimental, des images numériques ont été prises sur une zone d'environ $110 \times 160 \text{ mm}^2$ au-dessus de l'entaille sur la surface des poutres. Une caméra de résolution 2452×2056 pixels et équipée d'une

lentille macro de 50 mm a été utilisée pour capter les images successives pendant les étapes de chargement (figure 1).

Le matériel d'acquisition et de traitement des signaux des EA était composé : d'un système d'acquisition MIS-TRAS comprenant huit voies, deux cartes PCI-DSP4, un micro-ordinateur (pc-celeron-600 MHz) et huit capteurs piézoélectriques de type R15/C. Deux logiciels ont été utilisés pour étudier l'EA : AEWIn et Noesis. AEWIn sert à l'acquisition des données et à la localisation des évènements. Noesis est spécialement conçu pour l'analyse plus avancée et la classification des données des EA à l'aide des méthodes statistiques d'analyses multi-variables en post-traitement. Huit capteurs piézoélectriques étaient positionnés sur les poutres autour de la zone où la propagation de fissure devait avoir lieu ; quatre capteurs sur chaque face verticale de l'éprouvette (figure 1).

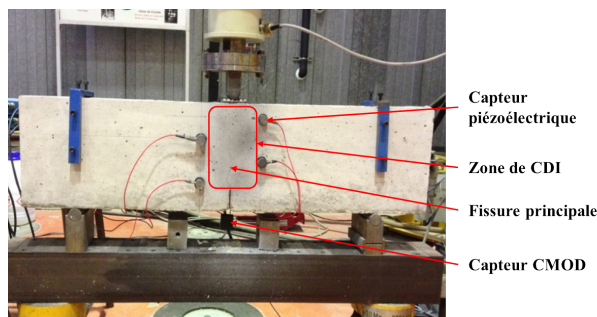


Figure 1 – Montage expérimental.

2.4. Propriétés mécaniques des bétons

D'après notre première étude [GUO 15], les propriétés mécaniques des bétons étudiés ici diminuent avec l'augmentation du taux de substitution des granulats naturels par les recyclés. La figure 2 présente les courbes Force-CMOD moyennes obtenues à partir de trois essais par type de béton. La branche de la phase d'adoucissement après le pic de chargement décroît plus vite pour les bétons recyclés que pour le béton naturel. Cependant, le comportement mécanique total du béton recyclé reste très proche de celui du béton normal. On ne peut pas s'empêcher de se demander si l'ajout de granulats recyclés n'aurait aucun effet sur la résistance du béton. Pour répondre à cette question nous avons analysé la fissuration au moyen de la technique CDI.

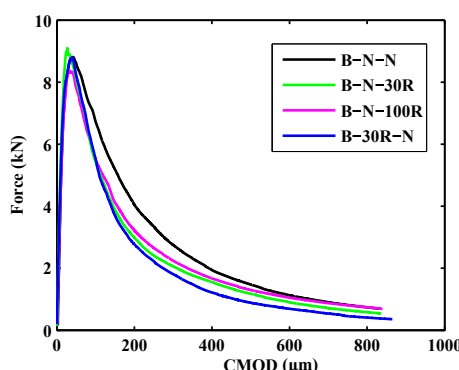


Figure 2 – Courbes Force-CMOD pour les poutres B-N-N, B-N-30R, B-N-100R et B-30R-N.

2.5. Ouverture de fissure

L'ouverture de fissure à la pointe de l'entaille, soit le CTOD (*Crack Tip Opening Displacement*), a été déterminée pendant toute l'étape de chargement (figure 3). On observe que les fissures s'initient avant le pic et se développent rapidement autour du pic pour les quatre types de béton. La formation de fissure commence à partir de 60 % pré-pic pour B-N-100R et B-30R-N, à 70 % pré-pic pour B-N-30R et à 80 % pré-pic pour B-N-N. En outre, pour B-N-100R et B-30R-N les fissures initiales sont aussi plus importantes. Au pic, le CTOD de B-N-100R dépasse 50 mm et augmente vite. En associant ce mécanisme à la perte d'étanchéité du béton, on imagine bien que la

permeabilité du béton. L'acronyme AMPHJ-1 introduit dans cette étape 4, B-N-100R (15 mm), cette ouverture au pic n'atteint pas la valeur limite de l'ouverture des fissures qui est à l'ordre de 300 μm pour les éléments en béton armé selon la norme EN 1992-1-1 : Eurocode 2. Mais dans le cas de chargements plus complexes et accidentels, il est intéressant de comprendre comment se développe la fissure dans les bétons de granulats recyclés.

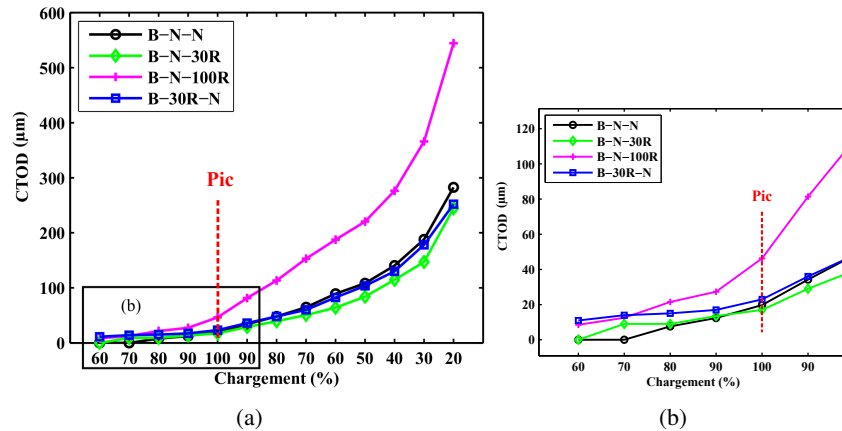


Figure 3 – Evolution de CTOD aux différentes étapes de chargement pour B-N-N, B-N-30R, B-N-100R et B-30R-N.

2.6. Classification des mécanismes d'endommagement

La localisation cumulée des évènements acoustiques au cours des essais est présentée sur la figure 4 pour B-N-N et B-N-100R. Chaque point représente une source d'EA détectée pour six niveaux d'énergie absolue : 0 - 50 aJ, 50 - 100 aJ, 100 - 300 aJ, 300 - 600 aJ, 600 - 900 aJ et ≥ 900 aJ. L'activité acoustique est supposée être proportionnelle à la densité des micro-fissurations qui sont bien distribuées à travers le ligament de la poutre. On s'aperçoit que plus d'évènements sont enregistrés pour le béton recyclé et leur distribution est plus intense autour de la fissure centrale par rapport au béton normal.

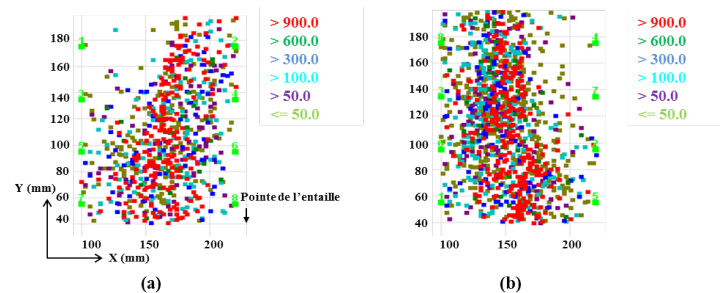


Figure 4 – Localisation des évènements acoustiques pour (a) B-N-N et (b) B-N-100R.

En se basant sur le dendrogramme hiérarchique, la classification des données acoustiques a été réalisée selon la méthode non-supervisée de K-moyenne qui est associée à une analyse en composantes principales (ACP) [SAL 14]. Les résultats d'identification des classes en fonction de la première et la seconde composantes principales sont illustrés dans la figure 5; les deux composantes principales représentent les variances les plus importantes des paramètres d'EA. Trois classes sont distinguées pour les deux bétons. La classe 3 se compose de signaux d'EA ayant la plus grande amplitude. Cette troisième classe qui compte plus que 95 % de l'énergie absolue totale a le plus faible nombre de hits. Ensuite, pour la classe 2 elle est composée principalement par des signaux d'EA avec une faible amplitude et une faible énergie absolue. Le niveau d'amplitude moyen de la première classe est entre celui de la troisième classe et celui de la deuxième classe. A noter ici que l'énergie absolue totale et le nombre de hits total de chaque classe pour B-N-100R sont toujours plus importants que ceux du béton normal.

La distribution expérimentale de la fréquence médiane des hits pour chaque classe est calculée, et ensuite ajustée par la fonction de la densité de probabilité (figure 6). En tenant compte de toutes les caractéristiques

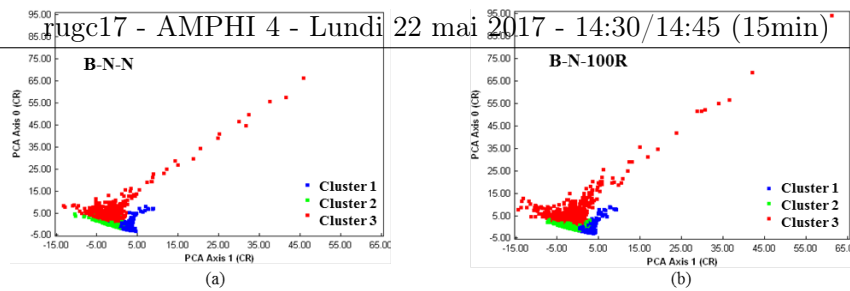


Figure 5 – Visualisation des familles de l'ACP pour (a) B-N-N et (b) B-N-100R.

décrites ci-dessus pour chaque classe, la troisième classe avec une valeur moyenne de la fréquence centroïde 150 kHz et une gamme de 100-200 kHz peut éventuellement être attribuée à la rupture des graviers durant l'essai ; la deuxième classe avec une valeur moyenne de la fréquence centroïde 180 kHz et une gamme de 130-230 kHz peut éventuellement être attribuée à des microfissures dans l'ancien mortier attaché entre le granulat et le mortier. Donc, la première classe avec une valeur moyenne de la fréquence centroïde 200 kHz et une gamme de 150-250 kHz peut être attribuée à des microfissures dans le mortier.

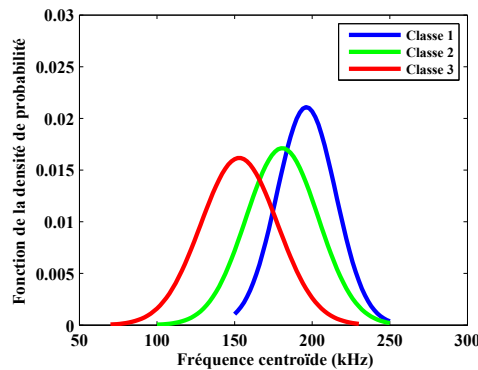


Figure 6 – Fonction de la densité de probabilité de la fréquence centroïde pour les trois classes.

Pour B-N-100R, plus de signaux ont été enregistrés par rapport à B-N-N du fait de la fissuration dans l'ancien mortier attaché et dans le nouveau mortier. Ce qui peut s'expliquer par une microstructure plus complexe du béton recyclé car, de plus, il y aurait deux types d'auréole de transition dans le matériau : une entre le granulat recyclé et le nouveau mortier et une autre entre le granulat recyclé et l'ancien mortier attaché. Les microfissures dans le béton normal se développent d'une manière répartie le long de la x-position alors que pour le béton recyclé les microfissures se localisent autour de la pointe de l'entaille. C'est pourquoi les fissures traversent le ligament de la poutre B-N-100R plus rapidement [GUO 15]. Par ailleurs, plus d'événements dus à la rupture des graviers ont été capturés pour B-N-100R. Ceci correspond aussi à notre observation visuelle des poutres cassées : il y a plus de graviers cassés que de graviers décollés dans la surface de rupture du béton recyclé.

Pour confirmer nos hypothèses, déduites des mesures expérimentales, sur l'effet de la microstructure complexe sur le comportement mécanique du matériau, une modélisation de la rupture des poutres en flexion trois points à l'échelle mésoscopique a été réalisée.

3. Modélisation de la rupture du béton recyclé

3.1. Modèle mésoscopique

Afin de représenter explicitement une auréole autour des granulats recyclés et en même temps économiser le "coût numérique", à l'échelle mésoscopique une épaisseur de 100 μm a été définie pour représenter les phases citées plus haut entre le granulat et le nouveau mortier. Ses propriétés sont égales à la moyenne des propriétés des couches des constituants dans cette épaisseur. En considérant qu'avec le vieillissement du béton, les différences de

résistance mécanique figure 17. Les AURÉOLES et le Mortier 22 paraissent avec l'âge. Dans notre modélisation nous avons fait le choix de ne pas distinguer l'ancienne auréole de transition dans l'ancien mortier en lui affectant les mêmes propriétés. Aussi, afin de limiter les incertitudes sur les propriétés locales, nous n'avons pas non plus considéré la nouvelle auréole de transition pâte-granulat recyclé. Par-conséquent, l'auréole effective autour des granulats recyclés est constituée principalement de l'ancien mortier attaché. Pour des raisons de coûts numériques, cette auréole contient aussi une part de nouveau mortier. Les propriétés mécaniques moyennes sont inférieures à celles du nouveau mortier et permettent de représenter explicitement une zone de plus faible résistance autour des granulats recyclés.

Pour modéliser l'endommagement du béton à l'échelle mésoscopique, le modèle isotrope développé par [FIC 97] a été retenu. Dans ce modèle, l'endommagement évolue quand la déformation équivalente atteint le seuil. La simulation de l'essai de rupture a été réalisée en 2D avec un maillage mésoscopique généré au centre de la poutre pour tenir compte de l'hétérogénéité du matériau (granulat + mortier + auréole). Pour le reste de la poutre, un maillage homogène ayant les propriétés macroscopiques du béton a été choisi. Le chargement a été appliqué en imposant un déplacement vertical de façon incrémentale sur une plaque rigide fixée au milieu de la poutre sur le bord supérieur, dans le but de reproduire correctement les conditions expérimentales (figure 7).

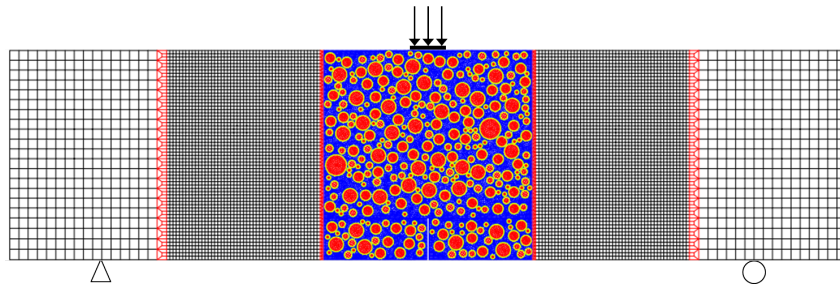


Figure 7 – Maillage de la poutre et conditions aux limites.

3.2. Détermination des paramètres pour la modélisation

Pour définir une phase dans le matériau, il faut cinq paramètres d'entrée pour le modèle : le module d'Young E , le coefficient de Poisson ν , le facteur d'influence α , la résistance à la traction f_t et l'énergie de fissuration G_f . Pour B-N-N, f_t et G_f du mortier ont été calibrées en comparant avec les résultats expérimentaux et les valeurs obtenues sont respectivement 1,68 MPa et 140 J/m². Le modèle d'hydratation développé par [GRO 10] a permis d'estimer $E = 27,45$ MPa et $\nu = 0,33$ pour ce mortier. Le facteur d'influence $\alpha = 10$ est tiré de la littérature. Il n'y a pas d'auréoles dans B-N-N. Avec ce jeu de paramètres la simulation a bien reproduit le comportement à la rupture mesuré expérimentalement.

Ensuite, pour B-N-100R nous avons retenu comme hypothèse que l'auréole entre le granulat recyclé et le nouveau mortier avait une épaisseur de 100 µm avec 20 µm d'épaisseur d'ancien mortier attaché et 80 µm d'épaisseur de nouveau mortier. Ceci afin de respecter une épaisseur d'ancien mortier attaché observée dans des études récentes. Afin de définir les propriétés de l'ancien mortier inconnu, nous avons supposé qu'il était équivalent à des mortiers traditionnels, avec un rapport eau-sur-ciment (E/C) pouvant être égal à 0,4, 0,5, 0,6 et 0,65, et avec un rapport de sable sur ciment (S/C) à 3, 3,46, 5 et 7. Au total, 16 types de mortier ont été étudiés. Pour chaque type de mortier, le module d'Young et le coefficient de Poisson ont été calculés par le modèle d'hydratation. Puis, les valeurs extrêmes ont été prises en compte pour les simulations afin de représenter un minimum et un maximum pour les propriétés de rupture des bétons.

Comme l'énergie de fissuration de l'auréole n'est pas mesurable, nous avons fait l'hypothèse que le rapport entre les modules élastiques de l'auréole et du nouveau mortier est proportionnellement égal au rapport entre leur énergie de fissuration : $\frac{G_f^{au}}{G_f^{nm}} = \frac{E^{au}}{E^{nm}}$. Ceci correspond à la forme d'écriture de G_f proposée par [FIC 97]. Quant à la résistance à la traction, elle a été déterminée selon la relation $f_t = E \cdot \varepsilon_0$ où ε_0 représente le seuil de déformation associé à la résistance limite. Pour un mortier donné, ε_0 varie entre 5e-5 et 1e-4 [FAR 15], alors ici nous avons

Tableau 1 – Paramètres d'entrée du modèle B-N-100R pour les phases du mortier et de l'auréole.

	Mortier	Auréole _{max}	Auréole _{min}
E (GPa)	27.45 (Modèle d'hydratation)	30.2 (Modèle d'hydratation)	27.23 (Modèle d'hydratation)
ν	0.33 (Modèle d'hydratation)	0.33 (Modèle d'hydratation)	0.33 (Modèle d'hydratation)
α	10 [FIC 96]	10 [FIC 96]	10 [FIC 96]
f_t (MPa)	1.6	1.51	1.36
G_f (J/m ²)	140	154	138.88

Rappelons ici que les propriétés du nouveau mortier dans le béton B-N-100R sont les mêmes que celles dans le béton B-N-N. Le résultat de la simulation donne une gamme de zone de la courbe Force-CMOD numérique (figure 8 (a)). On remarque que cette zone englobe presque la totalité de la réponse expérimentale et que la résistance maximale se situe bien entre les valeurs minimale et maximale de la modélisation. On peut conclure que l'hypothèse de fraction pour l'auréole est raisonnable, et que la simulation est capable de reproduire le comportement mécanique du béton B-N-100R. Cependant, pour que le résultat de modélisation soit fiable et représentatif les propriétés minimales de l'auréole ont été retenues pour les analyses suivantes.

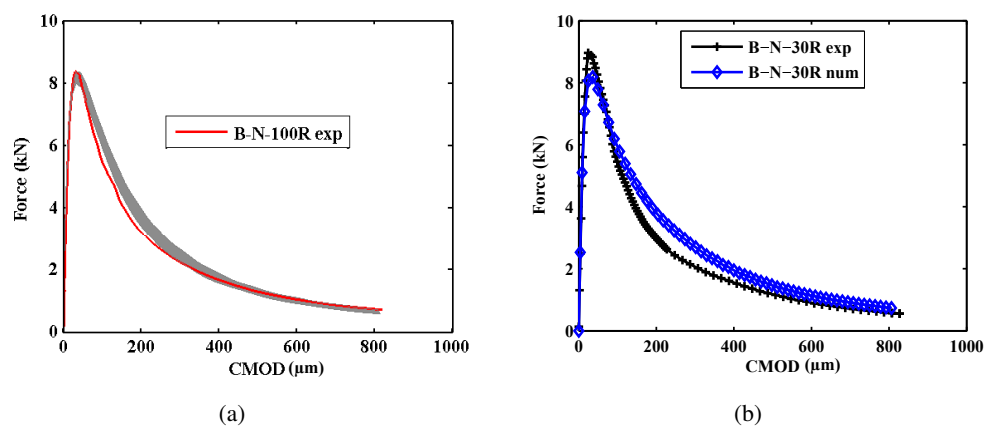


Figure 8 – Comparaisons des courbes Force-CMOD expérimentale et numérique des bétons (a) B-N-100R et (b) B-N-30R.

Pour B-N-30R deux types de granulats ("granulat naturel" et "granulat recyclé + auréole") ont été générés dans la partie mésoscopique de la poutre. Les paramètres pour cette partie ont tous été déterminés précédemment. L'évolution de la courbe Force-CMOD expérimentale et celle de la modélisation sont présentées sur la figure 8 (b). Il existe un léger écart dans la phase adoucissement, venant certainement du choix de la méthode de calcul de G_f . Il serait préférable de poser : $\frac{G_f^{au}}{G_f^{nm}} = \beta \frac{E^{au}}{E^{nm}}$ avec β serait un coefficient de pondération à calibrer. Mais cette légère différence ne remet pas en cause le modèle car elle entre dans le domaine de l'incertitude de mesure. De plus, l'analyse locale des cartes d'endommagement issues de la modélisation indiquent que les fissures dans le béton recyclé se trouvent principalement au sein de l'auréole, puis dans une moindre mesure dans la matrice et les granulats recyclés. Ceci correspond bien à notre observation expérimentale.

4. Conclusion et perspectives

Dans ce travail, une étude complète de la propagation des fissures dans le béton recyclé a été effectuée avec deux techniques CDI et EA. L'analyse du développement de CTOD a montré que la présence de granulats recyclés

pourrait augmenter la fragilité et le risque de fissuration du nouveau. Cependant, 450 (15mm) de fissure maximale dans le béton avec 100 % de granulats recyclés ne dépasse pas les limites de fissuration durant la phase de chargement pré-pic. Par ailleurs, en analysant les signaux acoustiques enregistrés pendant la rupture du béton, trois classes ont été discriminées. Elles correspondent respectivement à la rupture des granulats, à des microfissures dans l'auréole et à des microfissures dans le mortier. La chronologie d'apparition des trois classes montre clairement les différences des caractéristiques mécaniques entre béton normal et béton de granulats recyclés.

L'effet de l'auréole de transition sur le comportement macroscopique du béton a été analysé par une approche mésoscopique. Nous avons supposé que l'auréole entre le granulat recyclé et le nouveau mortier est composée de 20 % d'ancien mortier et 80 % de nouveau mortier. Pour étudier les propriétés de l'ancien mortier inconnu, seize types de mortier traditionnel ont été choisis. Cette hypothèse de fraction a été vérifiée par la courbe Force-CMOD expérimentale du béton B-N-100R et ensuite validée sur l'essai de rupture B-N-30R. Notre modèle a montré une certaine capacité à reproduire le comportement mécanique du béton de granulats recyclés. Toutefois, une modélisation de type champ de phase devrait permettre une simulation plus fine à l'échelle microstructure.

Remerciements

De sincères remerciements sont adressés à toutes les personnes dans l'entourage de la thèse ainsi qu'à China Scholarship Council pour le financement durant les trois années de l'étude au GeM à l'Ecole Centrale de Nantes.

Bibliographie

- [FAR 15] FARAH M., Développement d'un modèle multi-échelles et d'une procédure expérimentale pour l'analyse du couplage fluage-endommagement du béton au jeune âge, PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes, 2015.
- [FIC 96] FICHANT S., Endommagement et anisotropie induite du béton de structures. Modélisation approchées., PhD thesis, ENS Cachan, France, 1996.
- [FIC 97] FICHANT S., PIJAUDIER-CABOT G., LA BORDERIE C., « Continuum damage modelling : approximation of crack induced anisotropy », *Mechanics Research Communications*, vol. 24, n° 2, p. 109–114, Pergamon, 1997.
- [GRO 10] GRONDIN F., BOUASKER M., MOUNANGA P., KHELIDJ A., PERRONNET A., « Physico-chemical deformations of solidifying cementitious systems : multiscale modelling », *Materials and Structures*, vol. 43, n° 1-2, p. 151–165, 2010.
- [GRO 14] GRONDIN F., MATALLAH M., « How to consider the Interfacial Transition Zones in the finite element modelling of concrete ? », *Cement and Concrete Research*, vol. 58, p. 67 - 75, 2014.
- [GUO 15] GUO M., ALAM S. Y., GRONDIN F., LOUKILI A., « Analyse de la propagation de fissure dans le béton recyclé par la méthode de corrélation des images », *Rencontres Universitaires de Génie Civil*, 2015.
- [IGN 13] IGNJATOVIĆ I. S., MARINKOVIĆ S. B., MIŠKOVIĆ Z. M., SAVIĆ A. R., « Flexural behavior of reinforced recycled aggregate concrete beams under short-term loading », *Materials and structures*, vol. 46, n° 6, p. 1045–1059, 2013.
- [KNA 14] KNAACK A. M., KURAMA Y. C., « Behavior of reinforced concrete beams with recycled concrete coarse aggregates », *Journal of Structural Engineering*, vol. 141, n° 3, pageB4014009, 2014.
- [SAL 14] SALIBA J., LOUKILI A., GRONDIN F., REGOIN J., « Identification of damage mechanisms in concrete under high level creep by the acoustic emission technique », *Materials and Structures*, vol. 47, n° 6, p. 1041-1053, 2014.
- [TAM 05] TAM V. W., GAO X., TAM C., « Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach », *Cement and Concrete Research*, vol. 35, n° 6, p. 1195–1203, 2005.
- [WAN 97] WANG K., JANSEN D. C., SHAH S. P., KARR A., « Permeability Study of Cracked Concrete », *Cement and Concrete Research*, vol. 27, n° 3, p. 381-393, 1997.
- [XIA 12] XIAO J., LI W., FAN Y., HUANG X., « An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011) », *Construction and Building Materials*, vol. 31, p. 364–383, 2012.
- [XIA 13] XIAO J., LI W., SUN Z., LANGE D. A., SHAH S. P., « Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation », *Cement and Concrete Composites*, vol. 37, n° 1, p. 276–292, 2013.
- [YAN 08] YANG K.-H., CHUNG H.-S., ASHOUR A. F., « Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties. », *ACI Materials Journal*, vol. 105, n° 3, p. 289–296, 2008.
- [ZHA 15] ZHAO Z., REMOND S., DAMIDOT D., XU W., « Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars », *Construction and Building Materials*, vol. 81, p. 179–186, 2015.