

Analyse du Comportement de Coupleurs Mécaniques dans les Éléments en Béton Armé par Corrélation d'Images et Capteurs à Fibre Optique.

A. Ben-dahou¹, E. Ferrier¹, A. Gabor¹, L. Michel¹, R. Gardes², R. Boisson², P. Huet², J.M. Dolo³

¹Laboratoire LMC2, Université Claude Bernard Lyon 1, 82 bd Niels Bohr, 69100 Villeurbanne, France, amine.ben-dahou@univ-lyon1.fr

²Bartec Company, 355 Avenue Henri Schneider 69330 Meyzieu – France, r.boisson@linxion.com

³Eiffage Infrastructures, 3-7 place de l'Europe, 78140 Vélizy-Villacoublay, France, jean-marie.dolo@eiffage.com

RESUME

Cette étude examine le comportement mécanique de nouveaux coupleurs mécaniques développés ayant une réduction de leur taille et une normalisation des barres adjacentes afin d'éliminer les contraintes résiduelles. Des essais de flexion quatre points monotones ont été réalisés sur des poutres béton armé constituées d'armatures soit continues, soit liaisonnées avec des coupleurs de géométries variées. Le comportement non linéaire des poutres a été analysé à travers les courbes charge-flèche, la distribution et l'ouverture des fissures dans le béton, ainsi que les déformations des armatures, en utilisant des techniques avancées comme la corrélation d'image (DIC) et les capteurs à fibre optique distribués (DFOS). Les résultats mettent en évidence l'importance de la géométrie des coupleurs pour optimiser les performances des éléments en béton armé. Les coupleurs à géométrie réduite favorisent un meilleur transfert de charge, limitent les fissures et favorisent une répartition homogène des déformations.

Mots-clefs Coupleurs mécaniques, béton armé, fissuration, corrélation d'images, fibre optique.

Modalité de présentation : Présentation orale.

I. INTRODUCTION

Contrairement aux méthodes traditionnelles de recouvrement, les coupleurs de barres d'armature permettent de relier deux armatures de manière plus efficace et économique, offrant ainsi de nombreux avantages. Ces raccords sont particulièrement adaptés aux nouvelles constructions, où ils peuvent être intégrés dès le stade de la conception (Kheyroddin et al., 2020) (Mohamed et al., 2025).

Dans la littérature scientifique, plusieurs types de coupleurs de barres d'armature ont été développés et étudiés afin de comparer leurs performances par rapport à la méthode traditionnelle de recouvrement. Parmi ces types de coupleurs, on trouve les coupleurs mécaniques tels que les coupleurs à filtrage (Ben-dahou et al., 2024), à vis de cisaillement, à tête serrées et à manchon (Zhao et al., 2019) (Lin and Wu, 2016), ainsi que les coupleurs soudés réalisés par forgeage (YAMAMOTO et al., 2002). Ces études visent à évaluer les propriétés mécaniques, la résistance et la déformation des structures en béton armé utilisant ces différents types de coupleurs. Parmi les travaux les plus significatifs, on peut citer les études de (Lu et al., 2021a) et (Chidambaram and Agarwal, 2018) qui ont démontré que l'utilisation de manchons « double-grouted » et de coupleurs hybrides améliorent la capacité de déformation et le transfert des charges entre les armatures et le béton. Les essais de flexions 4 points menés par Cho et al., 2021 ont montrés que les poutres avec coupleurs surpassent les poutres avec recouvrement en termes

de charge maximale, avec des augmentations de 21,5%. Les poutres avec coupleurs ont montré une absence de défaillance par glissement ou rupture de l'adhérence.

La corrélation d'images est une méthode puissante permettant d'étudier le comportement en fissuration des structures en béton armé (Fayyad and Lees, 2017). Elle consiste à capturer des images de la surface d'une structure avant et après l'application de charges. En utilisant des algorithmes de corrélation d'images, les déplacements et les déformations locales peuvent être analysés avec une grande précision. Cette technique permet de visualiser les fissures et de quantifier leur ouverture, leur propagation et leur distribution. D'autre part, l'utilisation de fibres optiques distribuées offre une méthode novatrice pour mesurer les déformations dans les barres d'acier (Mehdi Mirzazadeh and Green, 2018; Tan et al., 2021). Les fibres optiques peuvent être intégrées à proximité des barres d'acier dans le béton lors de la fabrication, ce qui permet de suivre en temps réel les déformations subies par les barres (Berrocal-et-al, 2021). Cette technologie offre une grande sensibilité et une résolution spatiale élevée, ce qui permet de mesurer les déformations locales avec précision.

L'objectif de cette étude est d'analyser le comportement non linéaire des poutres en béton armé avec coupleurs d'armatures de différentes géométries extérieures. Le comportement des poutres est analysé à travers des essais de flexion 4 points soumis à des chargements monotones, en analysant les courbes charge-flèche, la distribution des fissures et leur ouverture dans le béton, ainsi que les déformations dans les armatures.

II. PROGRAMME EXPERIMENTAL

A. Description des échantillons

Les poutres soumises aux essais ont une dimension de 0,23 x 0,30 x 3,50 m³. Les aciers utilisés sont de nuance S500B, conformément au plan de ferrailage illustré en FIGURE 1. Les armatures longitudinales de traction sont constituées de deux armatures de diamètre 20 mm, correspondant à un pourcentage volumique d'acier de 1 %. Le programme se compose de 7 séries, chaque série comprenant trois poutres. La première série sert de référence avec des armatures continues, la deuxième série teste des poutres avec un recouvrement standard conforme à l'Eurocode 2. La troisième série est munie de coupleurs à haute adhérence avec des barres normalisées. La quatrième série utilise des coupleurs de type "Olive", avec des barres normalisées. La cinquième série concerne des poutres équipées de coupleurs lisses et de barres normalisées. Enfin, les sixième et septième série testent des poutres avec de gros coupleurs, l'une avec des coupleurs courts (6^{ème}) et l'autre avec des coupleurs longs (7^{ème}) (TABLEAU 1, FIGURE 1). Les autres armatures telles que les cadres d'effort tranchant et les barres de montage utilisent des barres de 8 mm de diamètre, identiques pour toutes les séries.

TABLEAU 1. Désignation des poutres et nombre d'échantillons pour chaque type

Poutre	Type de liaison	N échantillons
P-REF	Poutre avec armatures continues	3
P-RC	Poutre avec recouvrement	3
P-ONC	Poutre avec liaisons OLIVE normalisées	3
P-HNC	Poutre avec liaisons HA normalisées	3
P-LNC	Poutre avec liaisons lisses normalisées	3
P-GCC	Poutre avec gros coupleurs et courts	3
P-CL	Poutre avec long coupleurs	3

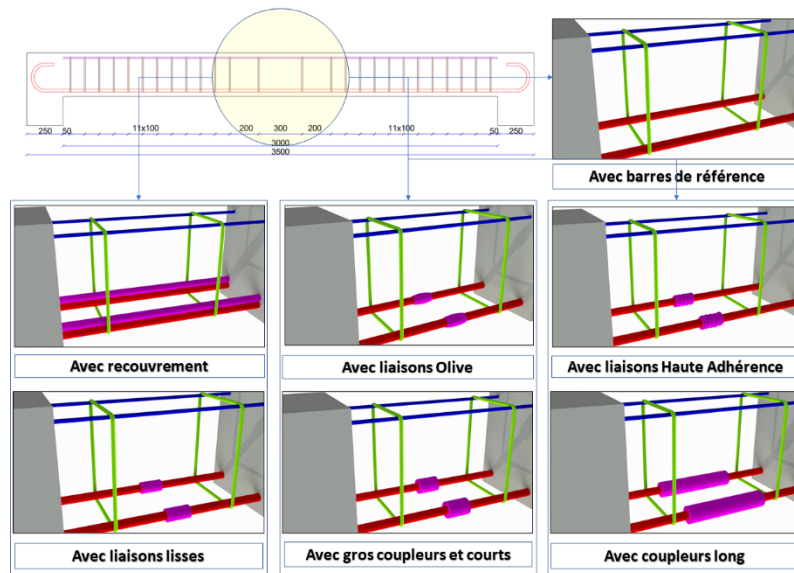


FIGURE 1. Géométrie et position des coupleurs dans la poutre

B. Protocole de l'essai

Un béton de type C35/40 a été utilisé, dont les granulats ont un diamètre maximal de 16 mm. Le protocole d'essai de flexion 4 points a été adopté pour appliquer un chargement monotone sur la partie centrale de chaque poutre. Les essais ont été réalisés sur un bâti expérimental, dont le vérin hydraulique permet d'appliquer une force contrôlée en déplacement sur les poutres avec une vitesse de 2mm/min (FIGURE 3.a).

C. Instrumentation

Pour les essais, l'instrumentation suivante est mise en place : Un capteur d'effort de capacité 500 kN de précision $\pm 0,1$ % entre le vérin hydraulique et le chevrete d'appui ; Un capteur à fil est disposé à mi-travée de la poutre pour la mesure de la flèche. L'instrumentation est complétée par des jauges de déformation collées sur les barres d'aciers tendues au droit de la section centrale.

Toutes les poutres munies de coupleurs d'armature sont instrumentées avec une jauge de déformation située à une distance de 2 cm de la zone de filetage sur l'armature et une autre au droit des coupleurs. Pour la poutre avec recouvrement l'éprouvette est instrumentée par trois jauges de déformation, la première au droit du recouvrement, la deuxième et la troisième sont à l'extrémité du recouvrement à gauche et à droite. Pour la poutre de référence avec les barres longitudinales continues, une jauge de déformation est positionnée au milieu de la barre. Les jauges d'extensométrie ont une résistance de 120 Ω et une longueur de grille de 10mm (FIGURE 2).

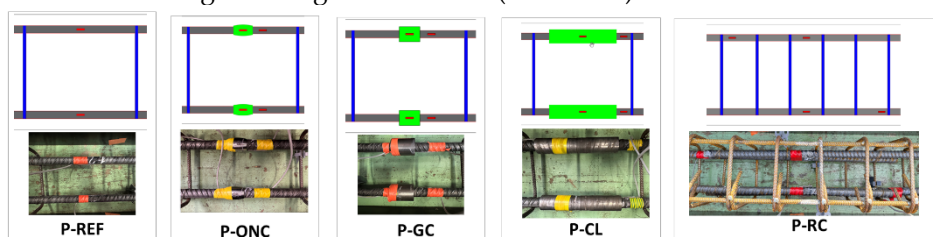


FIGURE 2. Positionnement des jauges d'extensométrie dans les poutres.

L'instrumentation est complétée par une mesure de champs sans contact par la corrélation d'images numériques (DIC) permettant de visualiser le champ de déplacement sur une surface de 300 mm x 650

mm située au niveau de la zone centrale ou dans la zone de recouvrement. La caméra est placée perpendiculairement à la surface à une distance de 550mm (Ben-dahou et al., 2024).

La technique de mesure par fibre optique a également été utilisée pour analyser l'évolution des déformations dans les barres de traction des poutres en béton armé. Des fibres optiques ont été positionnées le long des barres d'armatures longitudinales afin de mesurer avec précision les déformations subies par celles-ci lors des essais de flexion. Cette méthode permet de suivre en temps réel les déformations, fournissant ainsi des données précises sur le comportement sous l'influence des charges appliquées (FIGURE 3.b).

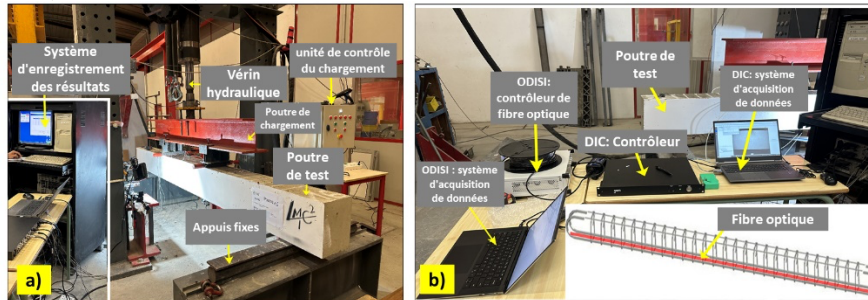


FIGURE 3. a) Dispositif d'essai mis en place pour les essais de flexion 4 points. b) photos du dispositif de la corrélation d'images et de la fibre optique.

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

A. Courbes charge-flèche

La FIGURE 4 présente la réponse charge-flèche à mi-portée des poutres P-REF, P-ONC, P-GCC, P-LC. Sur chaque courbe, la force de limite d'élasticité, la force maximale et leurs déplacements élastique et maximal équivalents ont été marqués. Le point où la raideur de la poutre EI n'est plus constant marque la transition entre la zone élastique et la zone plastique. La rigidité diminue légèrement après la limite d'élasticité, ce qui signifie que les déformations augmentent plus rapidement par rapport à la charge (Park, 1988).

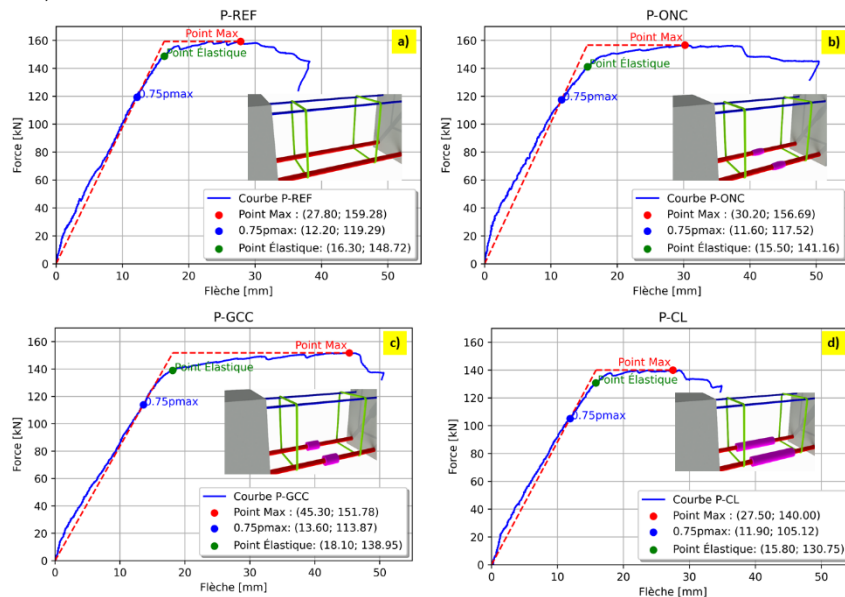


FIGURE 4. Courbes charges flèche des poutres : a) P-REF, b) P-ONC, c) P-GCC, d) P-LC

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques spécifiques des différentes configurations d'essai. La force de fin de linéarité F_{elas} , la force F_{max} correspond à la force maximale appliquée sur la poutre. Pour chaque configuration, les termes associés aux flèches δ_{elas} , δ_{max} et leurs rapports de différence de charges par rapport à la poutre avec armatures continues en % sont résumés.

Les résultats expérimentaux montrent que les poutres P-REF présentent une force de limite d'élasticité moyenne la plus élevée mesurée à 145 kN. Les poutres P-ONC présentent des forces élastique et maximale moyenne proches de celles des poutres P-REF (98.6% et 101%). Les poutres P-CL ont présenté les forces de limite d'élasticité maximale les plus faibles, mesurées respectivement à 131 kN et 139kN (FIGURE 4, TABLEAU 2. Valeurs expérimentales pour chaque configuration TABLEAU 2). L'essai est considéré comme terminé lorsque la rupture intervient en zone comprimée au droit de la rotule plastique. Une rupture de la poutre sur la fibre comprimée est observée pour toutes les configurations.

TABLEAU 2. Valeurs expérimentales pour chaque configuration

Type	F_{elas} [kN]	%	δ_{elas} [mm]	F_{max} [kN]	%	δ_{max} [mm]
P-REF	145,80 ±1,30	-	17,56 ±0,56	158,01 ±1,22	-	46,10 ±6,00
P-ONC	143,67 ±1,15	98,6	18,70 ±0,44	158,33 ±1,53	101,0	50,37 ±3,46
P-LNC	142,67 ±5,13	98,0	15,84 ±1,19	157,09 ±6,19	99,0	38,23 ±12,07
P-HNC	136,33 ±6,51	93,5	17,65 ±0,60	151,67 ±10,02	95,0	43,30 ±14,78
P-GCC	135,50 ±3,53	92,9	17,40 ±0,98	146,00 ±7,07	96,2	32,35 ±18,31
P-RC	134,25 ±4,99	92,0	16,08 ±0,72	145,75 ±6,07	99,8	36,30 ±4,78
P-GCL	131,00 ±1,41	89,8	15,75 ±0,07	139,50 ±0,70	95,7	32,35 ±4,24

Les rapports entre les charges élastiques des poutres avec les différentes méthodes de liaisonnement et celles des poutres à barres continues révèlent des écarts allant de 89,85% à 98,6%. La configuration se rapprochant le plus des valeurs des poutres avec armatures continues en termes de F_{elas} et F_{max} est celle avec des coupleurs Olive et filetages des barres filetées normalisées notée P-ONC.

B. Schéma de fissuration

Pour caractériser l'état de fissuration des poutres, l'accent est mis plus particulièrement sur la partie centrale (une distance de 35cm à gauche et à droite de la poutre a été adoptée pour cette analyse), où le moment est maximal et constant. Les résultats ont révélé que la géométrie du coupleur influence la distribution des fissures dans la poutre (FIGURE 5). En général, toutes les poutres présentent des fissures de flexion pendant la phase de chargement initiale, et avec la poursuite du chargement, certaines des fissures de flexion se sont transformées en fissures de flexion-cisaillement et finalement en fissures de cisaillement (Lu et al., 2021b).

Les poutres P-ONC ne présentent aucune fissure, ni aux emplacements des coupleurs ni à leurs extrémités. En revanche, les poutres P-LNC et P-CL montrent des fissures uniquement aux extrémités des coupleurs, tandis que les poutres P-HNC et P-GCC présentent des fissures directement à l'emplacement des coupleurs.

Seules les poutres avec recouvrement P-RC et les poutres avec coupleurs longs P-LC montrent un effet sur les espacements entre les fissures. L'espacement moyen entre fissures est de 18,4 cm pour les poutres P-RC, soit près du double de celui observé sur les poutres P-REF. Les poutres (P-CL) présentent un

espacement de 16,1 cm entre fissures (FIGURE 6).

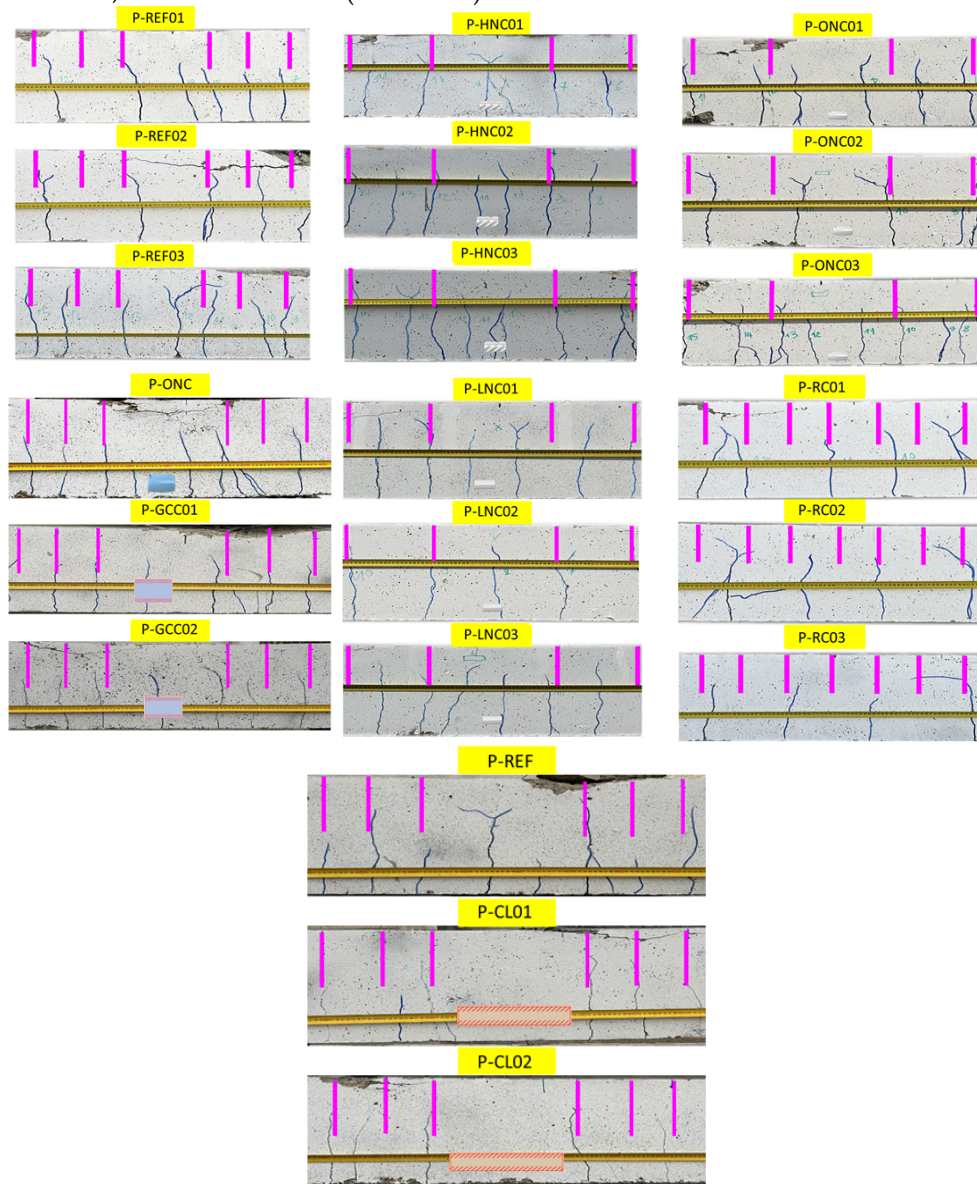


FIGURE 5. Etat de fissuration des poutres avec différentes configurations de liaisonnement après la rupture

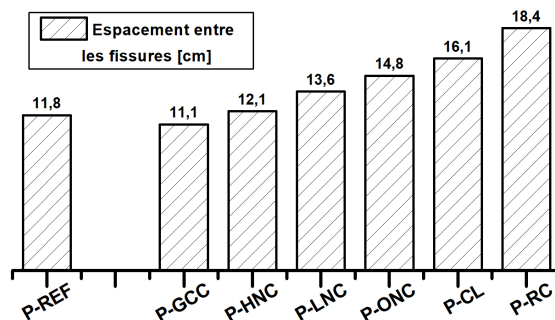


FIGURE 6. Espacement moyen entre les fissures pour tous les types des poutres.

C. Analyse de l'ouverture des fissures par corrélation d'image digitale

Une analyse approfondie de l'évolution de la fissure la plus grande (FIGURE 7) pour des charges de service de $0.2 \times F_{yk}$, $0.4 \times F_{yk}$ et $0.8 \times F_{yk}$ (Standard, 2004) pour toutes les configurations testées a été faite.

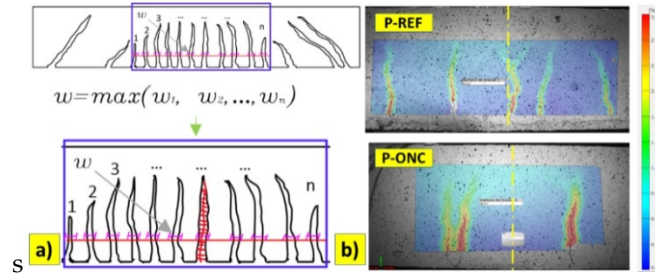


FIGURE 7. a) Définition de l'ouverture de la fissure la plus grande dans la poutre, b) mesure de l'ouverture de fissure par la DIC avec le logiciel GOM Correlate (Peretzki et al., 2019).

Comme le montre la FIGURE 8.a, le point central avant la déformation est le point P ; il devient le point P* après la déformation. La relation fonctionnelle est exprimée comme suit (Tung et al., 2008)

$$\begin{aligned} x^* &= x + u(x, y) \\ y^* &= y + v(x, y) \end{aligned}$$

la méthode des éléments finis (FEM) est utilisée pour diviser les images en plusieurs sous-images, comme la montre FIGURE 8.a. En supposant que la sous-image non déformée est A et que la sous-image déformée est B, le coefficient de corrélation défini par l'équation ci-dessous de Chu et al., 1985 est utilisé pour définir la relation entre les sous-images A et B. Lorsque la sous-image B est exactement la même que la sous-image A après déformation, le coefficient de corrélation est égal à 1.

$$COF = \frac{\sum g_{ij} \tilde{g}_{ij}^2}{\sqrt{\sum g_{ij}^2 \cdot \sum \tilde{g}_{ij}^2}}$$

Où g_{ij} et \tilde{g}_{ij} sont les niveaux de gris de l'image A sur la coordonnée (i, j) et de l'image B sur la coordonnée i, j , respectivement ;

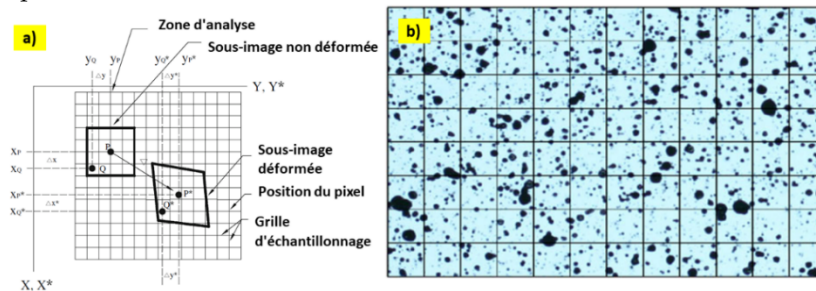


FIGURE 8. a) Schéma de l'emplacement relatif des sous-images déformées et non déformées sur l'élément (Shih and Sung, 2013), b) schéma des sous-images avec mouchetis sur la surface

Le TABLEAU 3 ci-dessous, synthétise les résultats de l'étude pour chaque configuration avec :

- Ouverture de $F[\mu m]$: Ouverture de la plus grande fissure dans les poutres pour les charges $0,2F_{yk}$, $0,4F_{yk}$ et $0,8F_{yk}$;

- % : présente les écarts par rapport aux poutres avec barres continues ;

TABLEAU 3. Ouverture de la plus grande fissure dans les poutres pour 0,2F_{yk}, 0,4F_{yk} et 0,8F_{yk} pour chaque configuration.

Type de poutre	Ouv.F : 0,2F _{yk} [um]	Ouv .F : 0,4 F _{yk} [um]	Ouv.F : 0,8 F _{yk} [um]	%
P-REF	0	113±12	228±46	-
P-RC	0	59±11	165±44	-28
P-GCC	0	60±7	163±12	-29
P-ONC	0	95±5	169±40	-26
P-HNC	0	74±24	195±12	-15
P-LC	0	100±27	206±15	-10
P-LNC	0	120±36	246±92	+8

Les résultats ont révélé que pour une valeur de 0,2 F_{yk}, aucune fissure ne se produit dans aucun des types d'échantillons. Le changement de la géométrie des coupleurs ne semble pas avoir d'effet significatif sur l'ouverture des fissures dans les poutres. Les valeurs présentées dans le tableau montrent de faibles variations des ouvertures des fissures entre les différentes configurations de poutres. Il convient de noter que toutes les configurations de poutres étudiées ont présenté des valeurs d'ouverture de fissure comprises entre 163 µm et 250 µm. Ces valeurs se situent dans les limites recommandées par l'Eurocode (400 µm), qui définit une valeur maximale acceptable pour l'ouverture des fissures.

D. Analyse des déformations par la fibre optique

- Profil de déformation DOFS expérimental par rapport à la prédiction théorique

L'équation $\epsilon(x) = \frac{M}{E_c I_z} Z$, représente la déformation de flexion, où M représente le moment de flexion au niveau de la section considérée de la poutre, I_z est le moment d'inertie de la section transversale fissurée de la poutre, Z est la distance perpendiculaire à l'axe neutre, et E_c est le module d'élasticité du béton (FIGURE 9.a).

Une comparaison a été effectuée sous une charge de 1kN, qui présente la charge avant l'apparition des pics de déformations dans les profils. Les résultats ont révélé une bonne concordance entre les profils de déformations observés expérimentalement et ceux prédits par l'analyse théorique, pour toutes les configurations de renforcement examinées. Ce constat confirme la fiabilité des résultats obtenus par la méthode de la fibre optique, conférant ainsi une validité supplémentaire aux données expérimentales (FIGURE 9.b).

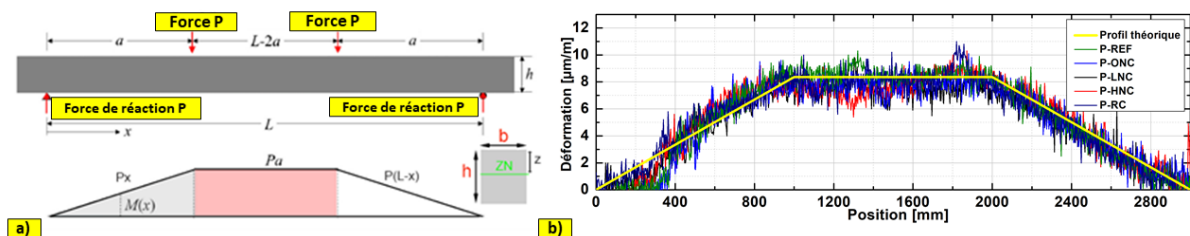


FIGURE 9. a) Diagramme des moments et la section transversale de la poutre, b) Comparaison des distributions de déformation issues de l'analyse mécanique et de la fibre optique pour les toutes les poutres pour un chargement de 1 kN

- **Corrélation entre la distribution des fissures et les profils de déformations mesurés par fibre optique**

Les résultats ont révélé une corrélation significative entre la position des fissures et les valeurs de déformations de la fibre optique. À mesure que la charge appliquée augmente, des fissures se forment dans le béton. Les fissures dans le béton traversent les capteurs répartis et provoquent des points de concentration des déformations dans les distributions mesurées par les fibres réparties.

La **FIGURE 10** représente les profils de distribution des déformations mesurées par capteur à fibre optique réparti dans la poutre lorsque la charge appliquée était de $P=15\text{kN}$ qui correspond à 10% de la charge élastique jusqu'à la rupture de la poutre. Les points de concentration des déformations indiquent les emplacements des fissures dans le béton. Par conséquent, les capteurs répartis peuvent être utilisés pour détecter, localiser et quantifier les fissures dans le béton. Avec l'augmentation de la charge, de nouveaux points de concentration des déformations apparaissent dans les profils de distribution de déformation, ce qui signifie que de nouvelles fissures se forment dans la poutre. Les amplitudes des pics augmentent, ce qui signifie que la largeur des fissures augmente.

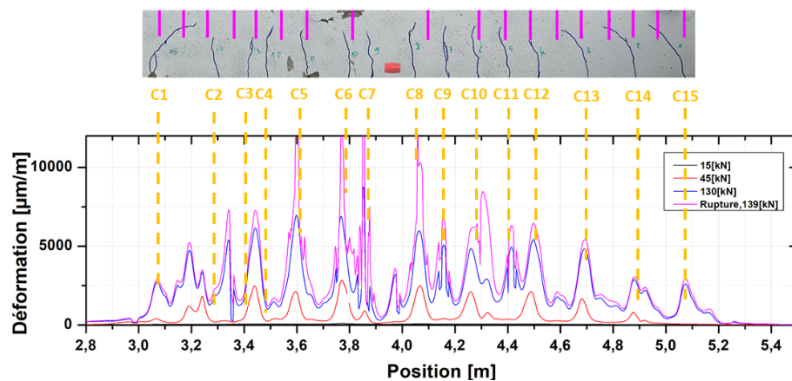


FIGURE 10. Corrélation entre la distribution des fissures et les profils de déformations mesurés par fibre optique dans la poutre P-ONC

- **Analyse des profils de déformation**

L'analyse des profils de déformation des poutres renforcées avec différentes méthodes sous une charge de 5 kN (soit environ 5 % de la charge élastique des poutres P-REF), a permis d'identifier les premières divergences par rapport au comportement théorique de déformation (**FIGURE 11**). Il a été observé que, les poutres P-RC, P-LNC, P-REF présentent des points de concentration de déformation mesurés à 200 $\mu\text{m/m}$, 100 $\mu\text{m/m}$ et 147 $\mu\text{m/m}$ respectivement. Cependant, les poutres P-ONC et P-HNC ont montré des déformations plus cohérentes avec le profil de déformation théorique, sans présenter de points de concentration de déformation.

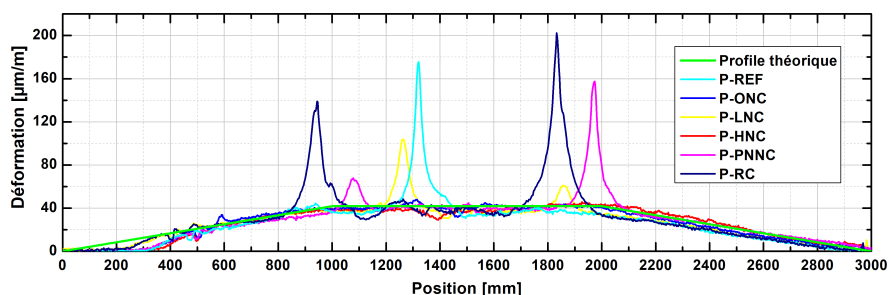


FIGURE 11. Profils de déformations pour les poutres avec toutes les configurations, pour un niveau de chargement de 5[kN].

VI. CONCLUSIONS

Cet article décrit un programme expérimental de flexion quatre points sous conditions monotones sur des poutres en béton armé avec différentes configurations de renforcement : poutres de références avec barres continues, poutres avec liaisons « Olive », poutres avec liaisons haute-adhérence, poutres avec liaison lisse, poutres avec gros coupleurs et courts, et poutres avec coupleurs longs. CE programme permet de comprendre l'effet de la variation de la géométrie du coupleur sur le comportement global et local de la poutre.

Les résultats ont révélé que le comportement charge-flèche des poutres P-ONC est celui qui se rapproche le plus des grandeurs données par les poutres de référence P-REF (inférieure de 1%). Ces résultats montrent que l'augmentation du diamètre ou de la longueur du coupleur influence les charges élastiques et maximales, en induisant une réduction de ces deux paramètres.

L'analyse de l'état de fissuration a permis de constater que la distribution des fissures et les espacements entre elles dans la poutre sont influencés par la géométrie des coupleurs, avec des espacements uniformes entre les fissures dans le cas des coupleurs courts, sans apparitions des fissures dans la zone des coupleurs « Olive ». Des grands espacements sont observés dans la zone des coupleurs pour les coupleurs longs similaires à ceux remarquées dans les poutres avec recouvrement, un espacement moyen entre fissures de **18,4cm**, proche du double de celui des poutres de référence. Toutes les configurations de poutres étudiées ont présenté des valeurs d'ouverture de fissure comprises **entre 165 μm et 250 μm pour un niveau de charge de 0,8 F_{yk}** . Ces valeurs se situent dans les limites recommandées par l'Eurocode (400 μm), qui établit une valeur maximale recommandée pour l'ouverture des fissures.

Les résultats de l'analyse des profils de déformation, sous une charge d'environ 5 % de la charge élastique des poutres P-REF, montrent que les poutres avec des coupleurs de géométrie optimisée (P-ONC et P-HNC) ont des profils de déformation plus homogènes, similaires au comportement théorique. Cela suggère que l'optimisation de la géométrie des coupleurs améliore la répartition des déformations. Elle permet ainsi de réduire les concentrations locales de déformation dans la poutre.

V. REFERENCES

- Ben-dahou, A., Ferrier, E., Gabor, A., Michel, L., Gardes, R., Boisson, R., Poissonnet, C., Dolo, J.-M., 2024. Influence of rebar couplers on the cracking behavior of reinforced concrete beams. *Nuclear Engineering and Design* 416, 112801.
- berrocal-et-al, 2021. Assessment and visualization of performance indicators of reinforced concrete beams by distributed optical fibre sensing.
- Chidambaram, R.S., Agarwal, P., 2018. Performance evaluation of innovative hybrid rebar coupler in reinforced concrete beams subjected to monotonic loading. *Structural Concrete* 19, 892–903.
- Cho, S., Lim, M., Lee, C., 2021. Study on the bending and joint performances of reinforced concrete beams using high-strength rebars. *Sustainability* 13, 3482.
- Chu, T.C., Ranson, W.F., Sutton, M.A., 1985. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Experimental mechanics* 25, 232–244.
- Fayyad, T.M., Lees, J.M., 2017. Experimental investigation of crack propagation and crack branching in lightly reinforced concrete beams using digital image correlation. *Engineering Fracture Mechanics* 182, 487–505.

- Kheyroddin, A., Mohammadkhah, A., Dabiri, H., Kaviani, A., 2020. Experimental investigation of using mechanical splices on the cyclic performance of RC columns, in: *Structures*. Elsevier, pp. 717–727.
- Lin, F., Wu, X., 2016. Mechanical performance and stress–strain relationships for grouted splices under tensile and cyclic loadings. *International Journal of Concrete Structures and Materials* 10, 435–450.
- Lu, Z., Wu, B., Yang, S., Hou, J., Ji, Z., Li, Y., Huang, J., Zhang, M., 2021a. Experimental study on flexural behaviour of prefabricated concrete beams with double-grouted sleeves. *Engineering Structures* 248, 113237.
- Lu, Z., Wu, B., Yang, S., Hou, J., Ji, Z., Li, Y., Huang, J., Zhang, M., 2021b. Experimental study on flexural behaviour of prefabricated concrete beams with double-grouted sleeves. *Engineering Structures* 248, 113237.
- Mehdi Mirzazadeh, M., Green, M.F., 2018. Fiber optic sensors and digital image correlation for measuring deformations in reinforced concrete beams. *Journal of Bridge Engineering* 23, 04017144.
- Mohamed, N., Laurent, M., Emmanuel, F., Aron, G., Rémi, G., Richard, B., Philippe, H., Poissonnet, C., 2025. Impact of incorporating parallel-threaded mechanical coupler splices on the seismic behaviour of reinforced concrete columns. *Engineering Structures* 323, 119289.
- Park, R., 1988. Ductility evaluation from laboratory and analytical testing, in: *Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering*. Tokyo-Kyoto Japan, pp. 605–616.
- Peretzki, E., Stockmann, M., Lehmann, T., Ihlemann, J., 2019. A new surface preparation method for microscopic digital image correlation applications. *Materials Today: Proceedings*, 35th Danubia Adria Symposium on Advances in Experimental Mechanics 12, 377–382. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.03.138>
- Shih, M.-H., Sung, W.-P., 2013. Application of digital image correlation method for analysing crack variation of reinforced concrete beams. *Sadhana* 38, 723–741. <https://doi.org/10.1007/s12046-013-0141-5>
- Standard, B., 2004. Eurocode 2: Design of concrete structures— . Part 1, 230.
- Tan, X., Abu-Obeidah, A., Bao, Y., Nassif, H., Nasreddine, W., 2021. Measurement and visualization of strains and cracks in CFRP post-tensioned fiber reinforced concrete beams using distributed fiber optic sensors. *Automation in Construction* 124, 103604.
- Tung, S.-H., Shih, M.-H., Sung, W.-P., 2008. Development of digital image correlation method to analyse crack variations of masonry wall. *Sadhana* 33, 767–779. <https://doi.org/10.1007/s12046-008-0033-2>
- YAMAMOTO, R., FUKADA, Y., TATSUMI, M., UEYAMA, K., 2002. New quality inspection method for gas pressure welds. *Quarterly Report of RTRI* 43, 7–12.
- Zhao, C., Zhang, Z., Wang, J., Wang, B., 2019. Numerical and theoretical analysis on the mechanical properties of improved CP-GFRP splice sleeve. *Thin-Walled Structures* 137, 487–501.