

Analyse de la géométrie des liaisons mécaniques et de leur impact sur le comportement global et local du Béton Armé.

Amine BEN-DAHOU

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

RESUME

Cette étude analyse le comportement mécanique de coupleur d'armature de nouvelle génération. Le procédé de fabrication des liaisons d'armatures est couplé à une « normalisation de l'acier », qui consiste à libérer les contraintes résiduelles induites par le processus d'emboutissage des barres d'acier. Cette "normalisation" permet de retrouver une loi de comportement identique à celle de l'acier, avec des seuils élastiques et plastiques inchangés. L'analyse du comportement local et global des éléments en béton armé, de type poutres et tirants prend également en compte la géométrie des liaisons d'armatures. Les performances mécaniques des liaisons ont été évaluées à travers les mécanismes de fissuration, les distributions de déformation, les courbes charge-flèche, en utilisant des outils avancés comme la corrélation d'images (DIC) et les capteurs à fibre optique distribués (DFOS). Les résultats montrent que la normalisation des barres améliore le transfert de charges, réduit l'ouverture des fissures et homogénéise la distribution des déformations et également que la géométrie des coupleurs joue un rôle clé dans le comportement non linéaire global des éléments en béton armé.

Mots-clés : liaisons mécaniques, béton armé, fissuration, corrélation d'images, fibre optique

I. INTRODUCTION

Les liaisons d'armatures constituent une avancée récente dans l'industrie de la construction, offrant une alternative efficace aux recouvrements traditionnels pour relier deux barres d'armatures (Chidambaram and Agarwal, 2018). Ces coupleurs présentent de nombreux avantages par rapport aux méthodes conventionnelles, notamment une meilleure efficacité dans le transfert des charges entre les barres (Ben-dahou et al., 2024), tout en réduisant la consommation de matériaux. Différents types de coupleurs sont disponibles sur le marché, mais les coupleurs filetés parallèles sont particulièrement appréciés en raison de leur petite taille et de leur installation moins laborieuse.

La géométrie extérieure des coupleurs (Bompa and Elghazouli, 2018a) ainsi que les procédés associés à leur conception et fabrication, jouent un rôle déterminant dans leurs performances mécaniques et leur interaction avec les structures en béton armé. Parmi ces procédés, l'emboutissage de l'extrémité des barres pour la réalisation des filetages sur les barres d'armature modifie le comportement de l'acier par un effet Bauschinger. Une innovation proposée par Bartec consiste à effectuer une « normalisation » des barres d'acier qui modifie la loi de comportement de l'acier. Ce procédé, qui consiste à éliminer les contraintes résiduelles générées lors de l'emboutissage, permet de rétablir les propriétés mécaniques optimales de l'acier tout en assurant un comportement plastique initial. Par ailleurs, la géométrie des coupleurs influence de manière significative non seulement sur les mécanismes de fissuration et de déformations, mais également

sur le comportement local et global des éléments en béton armé. Cependant, l'effet combiné de la normalisation des armatures et des variations géométriques des coupleurs restent peu exploré, notamment dans des éléments de structures en béton armé.

L'analyse des comportements mécaniques, à la fois à l'échelle locale et globale, repose sur l'utilisation d'outils expérimentaux avancés tels que la corrélation d'images numériques (DIC) (Fayyad and Lees, 2017) et les capteurs à fibres optiques distribués (DFOS) (Berrocal-et-al, 2021). Ces techniques permettent une étude précise de la distribution, de la propagation et de l'ouverture des fissures, ainsi que des déformations locales dans les barres d'acier et le béton. Elles offrent une compréhension approfondie des phénomènes complexes associés à l'utilisation des coupleurs dans les structures en béton armé.

Cette étude vise à analyser l'impact de la géométrie des coupleurs mécaniques et des procédés de filetage des barres d'acier sur les mécanismes de fissuration et de déformation des poutres et tirants en béton armé. Des essais expérimentaux ont été menés, incluant des tests de flexion quatre points monotones sur des poutres et des essais de traction directe sur des tirants, afin de caractériser leur comportement non linéaire. Les résultats obtenus apportent une meilleure compréhension du rôle de la « normalisation » et de la géométrie des coupleurs dans l'amélioration des performances mécaniques et de la durabilité des structures en béton armé.

II. PROGRAMME EXPERIMENTAL

A. Description des échantillons

1. Les tirants

Les tirants sont de dimensions $150 \times 150 \times 750$ mm³, conformément aux dimensions fréquemment utilisées dans la littérature pour ce type d'essais, afin d'étudier leur comportement en fissuration (Chrysanidis and Panoskaltis, 2022). Ce choix est également justifié par les limitations dimensionnelles de la machine d'essai en traction disponible au laboratoire. Une armature en acier de 20 mm de diamètre, représentant 1,3 % du volume total du tirant, est positionnée de manière continue sur toute la longueur de l'échantillon. Un béton de classe de résistance de $F_{ck} = 50$ MPa mesurée au laboratoire a été utilisé, avec une $f_{ctm} = 4,1$ MPa, déterminée suivant la norme de l'Eurocode 2 (EN 1992-1-1).

Pour une vue d'ensemble, les caractéristiques géométriques des liaisons et des échantillons en béton sont synthétisées dans la FIGURE 1 et TABLEAU 1.

TABLEAU 1. Types de liaisons d'armatures testées lors des essais de traction directe

Échantillons	Notation	Nombre
Tirants de référence	T-REF	3
Tirants avec Liaisons Haute Adhérence Normalisées Centrées	T-LHNC	3
Tirants avec Liaisons Haute Adhérence Non-Normalisées Centrées	T-LHNNC	3
Tirants avec Liaisons Olive Normalisées Centrées	T-LONC	3
Tirants avec Liaisons Olive Non-Normalisées Centrées	T-LONNC	3
Tirants avec Liaisons Lisse Normalisées Centrées	T-LLNC	3
Tirants avec gros coupleurs et courts centrés	T-GCC	3
Tirants avec coupleurs longs centrés	T-CLC	3

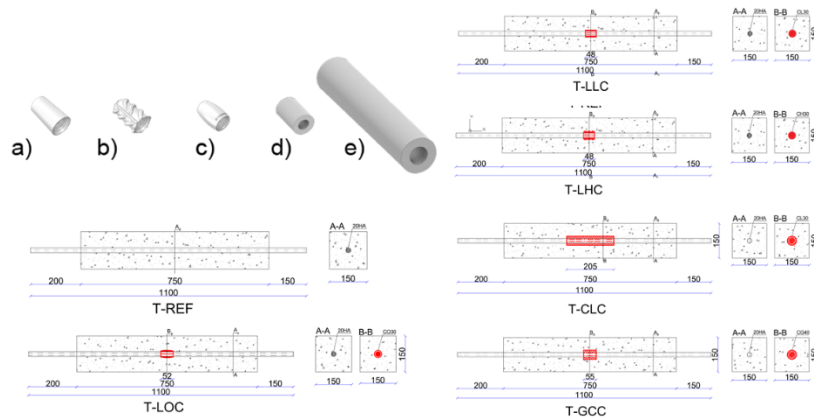


FIGURE 1. Dimensions des tirants en [mm] et position des coupleurs centrée dans le bloc de béton a) coupleur lisse, b) coupleur à haute adhérence, c) coupleur Olive, d) gros coupleur, e) coupleur long

2. Les poutres

Les poutres soumises aux essais sont de dimensions 0,23 x 0,30 x 3,50 m3. Les aciers utilisés sont de nuance S500B conformément au plan de ferrailage illustré en Figure 2. 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 expérimental inclut 6 séries distinctes, de trois poutres. Les configurations spécifiques de chaque série, incluant la géométrie des coupleurs, et les détails du ferrailage, sont résumées dans la FIGURE 2. Les cadres d’effort tranchant et les armatures montage sont uniformes pour toutes les séries et utilisent des barres de 8 mm de diamètre.

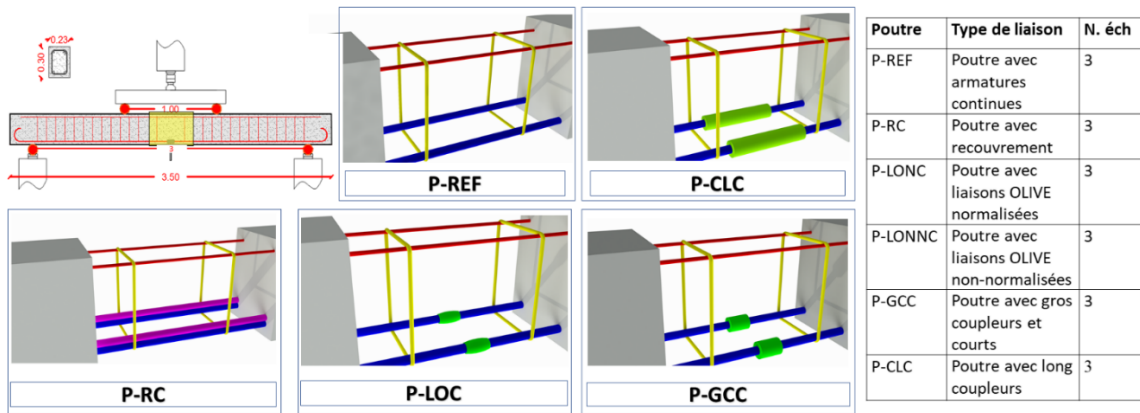


FIGURE 2. Géométrie et position des coupleurs dans la poutre

B. Procédé de normalisation

L'influence des modifications apportées par le processus standard de formage à froid liées au processus de filetage utilisé pour la connexion des barres d'armature (normalisation) a été étudiée. Le processus classique de filetage des liaisons d'armatures comporte deux étapes. Tout d'abord, l'extrémité de la barre d'armature est forgée à froid pour augmenter son diamètre. Ensuite, un filetage cylindrique est appliqué à l'extrémité forgée. Des essais cycliques sur les connexions de barres d'armature conformes à la norme ISO15835-2009 ont été réalisés pour évaluer le processus de formation de la connexion sur le comportement élastique de la barre d'acier. Les résultats ont

montré que les déformations plastiques causées par les contraintes résiduelles dans l'acier étaient présentes après le déchargement et qu'elles sont liées au processus standard de formage à froid, comme le montre la FIGURE 3.a. Dans un assemblage normalisé, les contraintes internes associées au processus de fabrication des filets par pression de l'extrémité de la barre sont éliminées par une contrainte de traction après étirement, ce qui entraîne le comportement d'un acier conventionnel avec les mêmes limites d'élasticité (FIGURE 3.b).

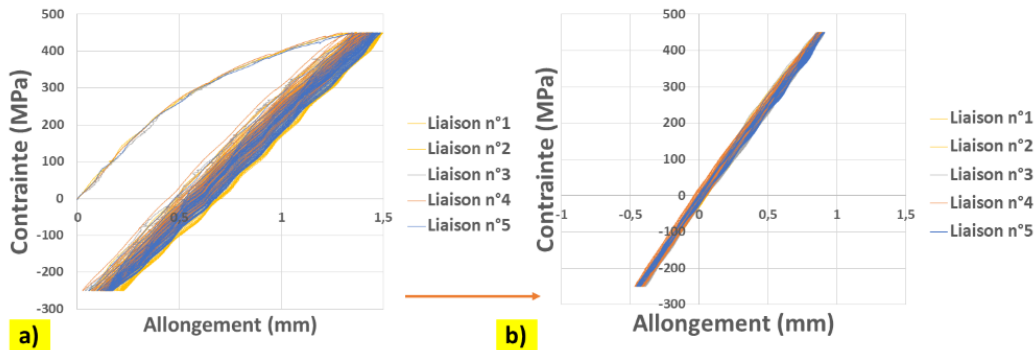


FIGURE 3. Courbes contrainte-allongement : a) liaisons non normalisées, b) liaisons normalisées

C. Protocole de l'essai

Un béton de type C35/40 a été utilisé pour les essais. Le protocole d'essai de flexion en quatre points avec un chargement monotone appliqué sur la partie centrale a été adopté pour les poutres (FIGURE 5.a). Les tirants ont été testés avec une machine de traction d'une capacité de 700 kN. Le chargement a été appliqué jusqu'à ce que les armatures atteignent leur plastification. Le chargement a été contrôlé en déplacement à une vitesse de 2 mm/min à l'aide d'un vérin hydraulique (FIGURE 4). Pour les poutres, un capteur d'effort de 500 kN (précision $\pm 0,1$ %) est placé entre le vérin hydraulique et le chevêtre d'appui, ainsi qu'un capteur à fil à mi-travée pour mesurer la flèche. Des jauges de déformation ont été collées au milieu des barres de traction, au niveau des coupleurs et aux extrémités des recouvrements. Toutes les jauges avaient une résistance de 120 Ω et une longueur de grille de 10 mm.

L'instrumentation a été complétée par les techniques de corrélation d'images (DIC) et de fibre optique, afin d'analyser les mécanismes de fissuration ainsi que les profils de déformation des barres dans les poutres (FIGURE 4 et FIGURE 5.b).

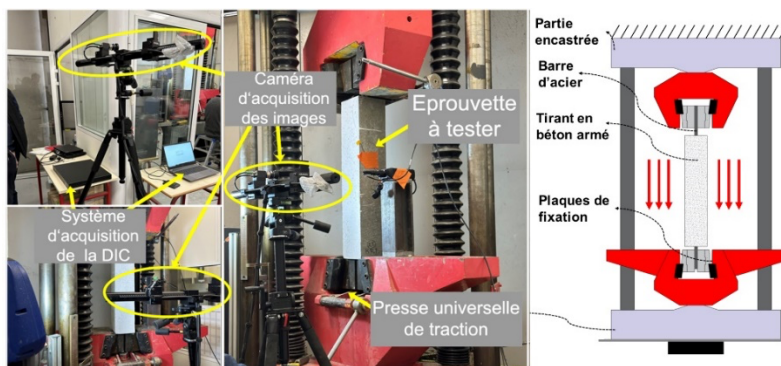


FIGURE 4. Dispositif d'essai pour les essais de traction directe, et de la corrélation d'images (DIC)

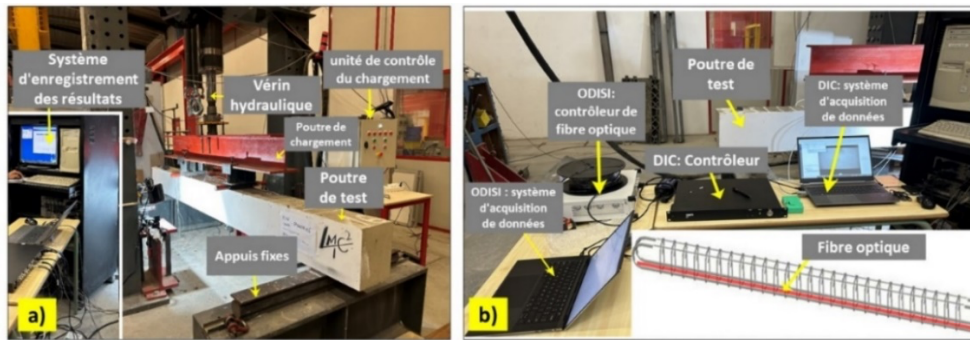


FIGURE 5. a) dispositif d’essai pour les essais de flexion 4 points. b) dispositif de la corrélation d’images (DIC) et de la fibre optique (DOFS).

III. RESULTATS ET DISCUSSION

A. Essai de flexion sur les poutres

- **Comportement global : courbes charge-flèche**

Les résultats expérimentaux montrent que le procédé de normalisation des filetages des barres influence le comportement global des poutres.

La force limite élastique, la charge maximale et leurs déplacements équivalents ont été déterminés selon la méthode définie par Park (Park, 1988), qui permet d’identifier les différentes phases du comportement structural à partir de la courbe charge-déplacement.

Les poutres P-LONC présentent une force limite élastique $F_{elas} = 143,67$ kN et une force maximale F_{max} de $158,33$ kN. Tandis que les poutres P-LONNC, avec des barres non normalisées présentent des valeurs inférieures, avec $F_{elas} = 137$ kN et $F_{max} = 151,52$ kN. Le procédé de normalisation améliore ainsi la charge limite élastique de **5%** et la charge maximale de **4,5%** par rapport au procédé classique de réalisation de filetage (FIGURE 6 et TABLEAU 2).

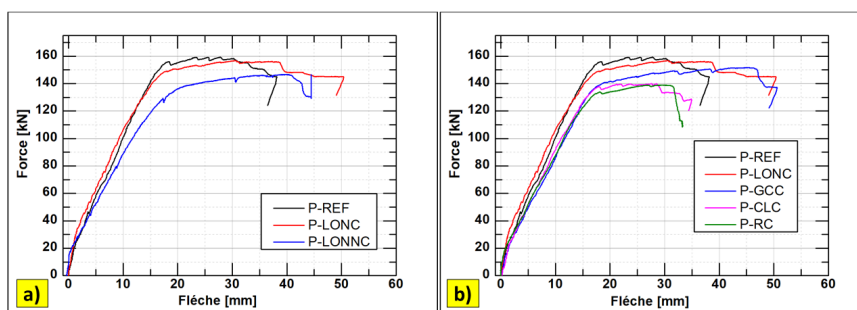


FIGURE 6. Courbes charges flèche des poutres : a) effet de la normalisation, b) effet de la géométrie

TABLEAU 2. Valeurs de l’effort 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-ONNC	137,00 ±3,61	-6,0	18,40 ±1,54	151,52 ±5,80	-5,0	39,80 ±0,82

P-GCC	135,50 ±3,53	93,6	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 résultats présentés dans la FIGURE 6.b et le TABLEAU 2 montrent que les poutres de référence (P-REF), présentent les performances les plus élevées, en termes de force limite élastique F_{elas} =145 kN) et de force maximale F_{max} =158kN. Les résultats montrent également que la variation de la géométrie des liaisons des armatures influence ces deux efforts ; des variations similaires à celles des poutres de référence dans la phase élastique. Les poutres P-LONC présentent une variation similaire à celle des poutres P-REF dans la phase élastique, avec une force élastique F_{elas} inférieure de seulement 1,4%. L'augmentation des dimensions des liaisons conduit à la réduction des charges élastiques, maximales et de ductilité comme montré dans la FIGURE 6 et le TABLEAU 2. Les poutres P-CLC ont présenté la force de limite d'élasticité et force maximale les plus faibles, mesurées respectivement à 131 kN et 139kN.

- **Comportement local : Mécanismes de fissuration**

Les courbes de la figure FIGURE 7.a représentant la charge en fonction de l'ouverture de fissure maximale, mesurée par DIC permettent de visualiser le champ de déplacement sur une surface de 300 mm x650 mm située au niveau de la zone du moment constant. La caméra est placée perpendiculairement à la surface à une distance de 550mm, les données sont ensuite traitées avec le logiciel GOM Correlate. Les résultats montrent que l'élimination des contraintes résiduelles liées au procédé classique de filetage des barres permet une redistribution uniforme des déformations dans les armatures. Ce comportement est similaire à celui observé dans les poutres de référence (P-REF) avec une distribution et ouvertures des fissures similaires. En revanche, les poutres P-LONNC, avec des barres non-normalisées, présentent des ouvertures de fissures plus importantes par rapport aux configurations P-LONC, P-REF et P-RC, ce qui reflète une répartition moins homogène des déformations dans la barre. La FIGURE 7.b, qui présente la charge en fonction de l'ouverture de la fissure la plus large pour les configurations P-REF, P-LONC, P-GCC et P-CLC, indique que la géométrie du coupleur n'a pas d'effet significatif sur le comportement local des poutres. En effet, les courbes montrent des pentes similaires, traduisant des ouvertures de fissures comparables entre les différentes configurations.

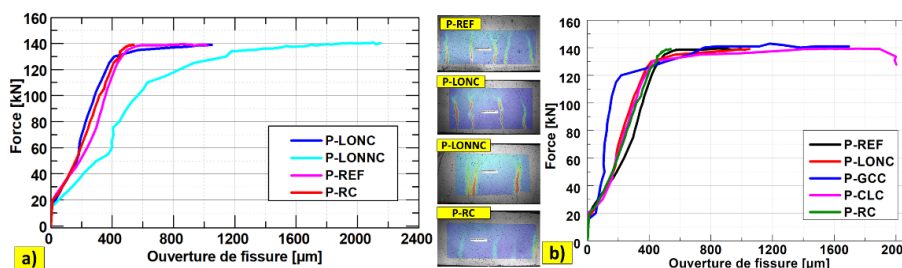


FIGURE 7. Courbes Force-Ouverture de fissure obtenues par la DIC : a) effet de normalisation, b) effet de la géométrie

- **Comportement local : déformation dans les armatures par fibre optique**

Les résultats obtenus grâce aux mesures par fibres optiques offrent des conclusions intéressantes sur le comportement local des poutres avec liaisons d'armatures. Ils révèlent que les points de

concentration des déformations observés dans le profil de déformation le long des fibres optiques correspondent précisément à la position des fissures dans les poutres, permettant ainsi de détecter efficacement les microfissures (FIGURE 8).

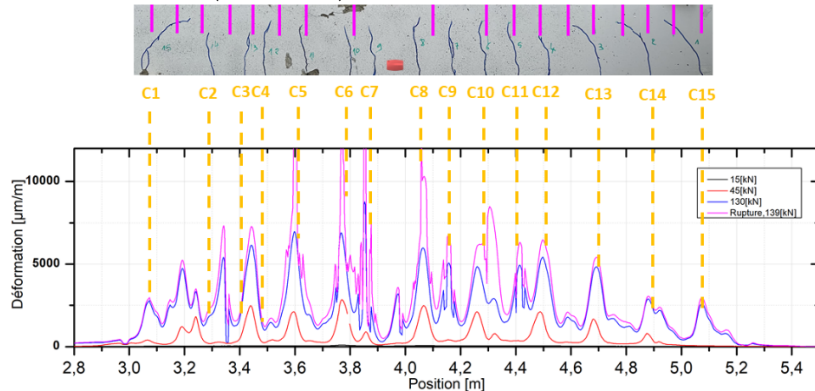


FIGURE 8. Corrélation entre la distribution des fissures et les profils de déformations mesurés par fibre optique dans la poutre P-ONC.

Pour un même niveau de charge de 5kN, proche de 5% F_{elas} des poutres P-REF, des différences notables de déformation entre les configurations ont été observées. La poutre P-REF montre une distribution de déformation homogène dans la barre, avec point de concentration de déformation au centre de la poutre, associé à l'apparition de microfissures (FIGURE 9).

La poutre P-RC montre plus de déformation aux extrémités des recouvrements, liées à la variation de section de l'acier à ces endroits. L'effet de la normalisation des barres est clairement mis en évidence. La suppression des déformations résiduelles, obtenue par traction préalable des barres, favorise une redistribution homogène des déformations le long des barres, réduisant ainsi les concentrations de déformations et limitant l'apparition de microfissures dans la poutre, comme illustré dans la FIGURE 9.

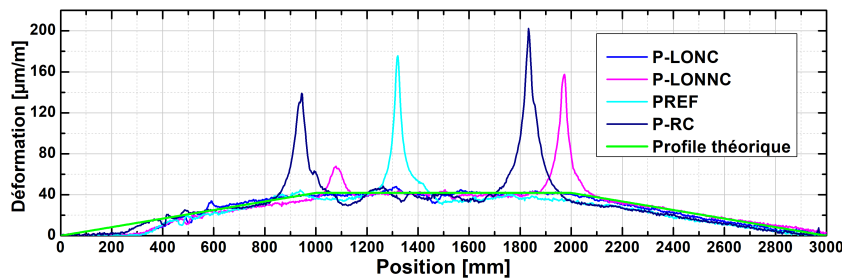


FIGURE 9. Profils de déformations pour les poutres avec toutes les configurations, pour un niveau de chargement de 5[kN].

B. Essai de traction directe sur les tirants

- **Comportement global : schéma de fissuration**

La FIGURE 10 illustre l'état de fissuration des tirants à la rupture. Les tirants avec des liaisons normalisées T-LONC et T-LHNC (FIGURE 10.b et c) présentent une distribution de déformations plus uniforme, ce qui conduit à la formation d'une seule fissure principale au centre des tirants. En revanche, les configurations avec des liaisons non normalisées T-LONNC et T-LHNNC montrent une rupture plus rapide, localisée au centre, avec la formation de fissures transversales secondaires supplémentaires dans cette zone (FIGURE 10.d et e). Ces résultats indiquent que l'utilisation de liaisons centrées avec filetages de barres normalisés permet d'obtenir des caractéristiques de fissuration similaires à celles des tirants de référence.

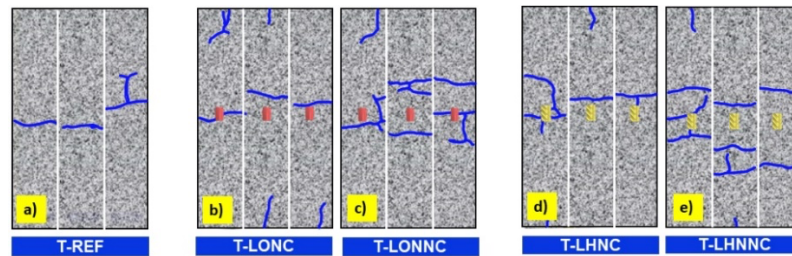


FIGURE 10. État de fissuration à la rupture des tirants : effet de la normalisation

Pour les tirants avec liaisons courtes (T-REF, T-LLNC, T-LONC, T-LHNC, T-GCC), une fissure principale perpendiculaire à l'axe de chargement se développe à mi-hauteur de l'éprouvette qui pourrait être attribuée au fait que le béton a atteint sa limite de traction en raison de la tension axiale dans l'armature. Elle est accompagnée de fissures parallèles à cet axe entraînant des fissures normales à l'axe de la barre. Cette observation correspond étroitement aux résultats d'études antérieures (Nawaz et al., 2020) qui font état d'orientations de fissures similaires dans des conditions de chargement comparables. La distribution des fissures est similaire à celle des échantillons de référence (Bompa and Elghazouli, 2018b). Cependant, la configuration T-CLC (FIGURE 11.f) présente des fissures secondaires transversales concentrées au milieu des tirants qui impliquent une perte excessive d'adhérence entre le béton et la barre d'acier. Lorsque la surface du coupleur augmente (comme c'est le cas pour les coupleurs longs et larges), l'apparition d'autres fissures dans les zones situées au-dessus et au-dessous du coupleur peut être due soit à un glissement causé par une capacité d'adhérence plus faible au niveau du coupleur (Bompa and Elghazouli, 2018b) soit à une réduction de la surface de béton autour de l'acier. Ce facteur doit être pris en compte lors de l'analyse du comportement des fissures.

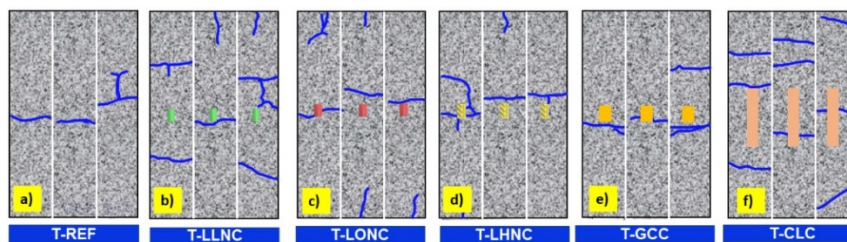


FIGURE 11. état de fissuration à la rupture des tirants: effet de la géométrie de la liaison

- **Comportement global : charge d'ouverture de fissure**

Une analyse détaillée de la force nécessaire à l'apparition de la première fissure dans les éprouvettes a révélé qu'à l'exception des tirants T-GCC, la présence de coupleurs, quel que soit leur type, n'a pas réduit la charge nécessaire à l'apparition de la première fissure. La FIGURE 12 présente les histogrammes moyens des charges d'ouverture de la première fissure pour les différentes configurations. Les tirants T-GCC ont montré une réduction de 70 % de la charge requise pour initier la première fissure, indiquant que ces configurations peuvent affaiblir la résistance initiale à la fissuration. Ces résultats mettent en évidence que la géométrie des coupleurs influence le comportement de fissuration des éléments en béton armé, en modifiant la charge nécessaire pour amorcer la première fissure. Dans le cas des tirants T-GCC, des zones de faiblesse structurelle et des concentrations de contraintes dues à des défauts géométriques peuvent se former, réduisant ainsi la charge critique pour initier la fissure, comme l'ont montré des recherches antérieures (Dabiri et al., 2022).

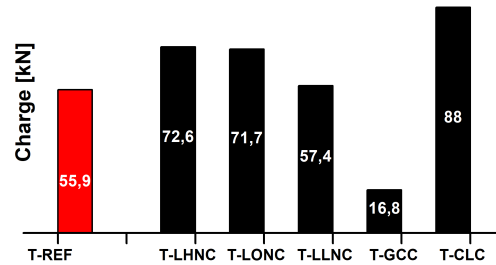


FIGURE 12. Histogrammes des charges d'ouverture de la première fissure pour tous les types d'échantillons.

- **Comportement local : Ouverture de fissure**

Pour évaluer l'influence des différents types de liaisons sur le comportement en fissuration des tirants en béton armé, l'ouverture maximale des fissures mesurée expérimentalement a été comparée à l'ouverture théorique calculée selon l'Eurocode 2, pour un niveau de charge correspondant à $0,8F_{yk}$ de l'acier.

$$w_k = S_{r,max}(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (1)$$

Où ε_{sm} est la déformation de l'acier en traction et ε_{cm} la déformation du béton en traction avant fissuration, avec

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{(\sigma_s - k_t \left(\frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \right) \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff}))}{E_s} \quad (2)$$

Où σ_s est la contrainte de l'acier, k_t facteur de charge à court terme $k_t = 0.6$ (lié au calendrier des essais), E_s est le module d'élasticité de l'acier, et $f_{ct,eff}$ est le module d'élasticité du béton. α_e est le rapport du module de Young (coefficient d'équivalence) $= E_s / E_{cm}$. $\rho_{p,eff}$ est le pourcentage de la section de traction autour de l'acier, calculé comme $\rho_{p,eff} = \frac{A_s}{A_{c,eff}}$, où A_s est la surface de la section transversale de l'acier de traction (3.14 cm^2) et $A_{c,eff}$ est la section transversale du béton en traction autour de la barre d'armature calculée selon l'équation (3) :

$$A_{c,eff} = b \cdot \text{Min} \left[2,5 (h - d); \frac{h - x}{3}; 0,5 h \right] \quad (3)$$

Où h est la hauteur du tirant, d est la hauteur utile et x est la hauteur du béton comprimé ($=0$).

L'espacement des fissures $S_{r,max}$ est calculé suivant l'équation (4) :

$$S_{r,max} = 3,4 c + \left(\frac{0,425 k_1 \cdot k_2 \cdot \emptyset}{\rho_{p,eff}} \right) \quad (4)$$

Où c est l'enrobage de l'armature (égal à 65 mm), $k_1 = 0,8$ pour l'acier à haute adhérence, et $k_2 = 0,6$ pour la traction.

TABLEAU 3. Comparaison des valeurs d'ouverture des fissures à $0,8 F_{yk}$ avec les valeurs théoriques pour différentes configurations de traverses

Tirant	Ouverture de fissure [μm]	Ouverture théorique [μm]	%
T-REF	830	776	6
T-LONC	525		-2
T-HNC	670		-15
T-LONNC	700		-10
T-HNNC	759		-3

Les tirants de référence T-REF montrent des ouvertures de fissures conformes aux prévisions théoriques. Les résultats de cette analyse confirment les observations faites lors des essais de flexion. La normalisation des barres favorise une redistribution homogène des déformations réduisant ainsi les ouvertures de fissures. En effet, les tirants avec liaisons normalisées T-LONC et

T-LHNC présentent des ouvertures de fissures plus faibles par rapport à ceux avec liaisons non normalisées T-LONNC et T-LHNC (TABLEAU 3).

IV. CONCLUSIONS

- La normalisation des liaisons modifie la répartition des déformations dans la barre, réduisant les concentrations de contraintes et limitant les microfissures. Les poutres et les tirants ayant des liaisons normalisées montrent des ouvertures de fissures plus faibles, confirmant une performance locale et globale améliorée du procédé de normalisation.
- La géométrie des coupleurs influence la résistance, la fissuration et la répartition des fissures dans les éléments en béton armé. Les tirants avec des liaisons compactes de petit diamètre, présentent un comportement de fissuration proche de celui des tirants de référence, tandis qu'avec des liaisons de diamètre plus grand, comme T-GCC, les coupleurs réduisent la charge d'apparition de la première fissure.
- Dans la continuité de ce travail, plusieurs perspectives peuvent être envisagées. Une modélisation numérique fine des zones de liaison pourrait permettre de mieux comprendre les mécanismes de concentration des contraintes et d'initiation des fissures, et ainsi d'optimiser la conception des coupleurs.

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.
- Bompa, D.V., Elghazouli, A.Y., 2018a. Monotonic and cyclic performance of threaded reinforcement splices, in: *Structures*. Elsevier, pp. 358–372.
- Bompa, D.V., Elghazouli, A.Y., 2018b. Ductility of reinforced concrete members incorporating mechanical splices, in: *Proceedings of the 16th European Conference on Earthquake Engineering (16ECEE)*, Thessaloniki, Greece. pp. 18–21.
- 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. <https://doi.org/10.1002/suco.201700083>
- Chrysanidis, T.A., Panoskaltsis, V.P., 2022. Experimental investigation on cracking behavior of reinforced concrete tension ties. *Case Studies in Construction Materials* 16, e00810.
- Dabiri, H., Kheyroddin, A., Dall'Asta, A., 2022. Splice methods used for reinforcement steel bars: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials* 320, 126198.
- 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.
- Nawaz, W., Yehia, S., Elchalakani, M., 2020. Lap splices in confined self-compacting lightweight concrete. *Construction and Building Materials* 263, 120619.
- 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.
- Rimkus, A., Gribniak, V., 2017. Experimental investigation of cracking and deformations of concrete ties reinforced with multiple bars. *Construction and Building Materials* 148, 49–61.