
Effet d'échelle sur le comportement en cisaillement des poutres en béton armé : Analyse avec corrélation d'images

A. BELBACHIR^{1,2}, S.Y. ALAM¹, M. MATALLAH², A. LOUKILI¹

¹ University LUNAM Ecole Centrale de Nantes, Nantes, France

² RISAM, University Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algeria

E-mail : ahmed.belbachir@ec-nantes.fr

RÉSUMÉ. La résistance au cisaillement d'une poutre en béton armé demeure un enjeu de grand intérêt dans le domaine de la construction. L'effet d'échelle n'est pas sans influence sur le comportement des structures et ouvrages en béton armé et doit être pris en compte au stade de la conception. Un travail expérimental a été conduit pour étudier l'effet de taille et le comportement de la fissure critique de cisaillement dans des poutres en béton armé sans renforcement transversal. Des essais de flexion trois points ont été effectués sur des spécimens géométriquement similaires (largeur identique de la section transversale et une hauteur utile variable). Le pourcentage des armatures de flexion a été considéré constant. La technique de corrélation d'images a été utilisée pour contrôler la largeur, le profil et la propagation de la fissure diagonale de cisaillement pendant le processus de fissuration.

ABSTRACT. The shear strength of a reinforced concrete beam remains an issue of great interest in structural engineering. In addition, it is well known that the mechanical performance of real structure needs to take into account the phenomenon of "size effect". In this research, an experimental work was conducted to study the size effect and behavior of the critical shear crack in reinforced concrete beams without transverses reinforcement. In order to get these objectives, three points bending tests were performed on geometrically similar beams, with identical width of the cross section and varying effective depth. The percentage of flexural reinforcement was set constant. DIC technique was used to monitor the crack width of diagonal shear crack, the crack profile and propagation during the failure process.

MOTS-CLÉS : cisaillement, effet d'échelle, corrélation d'image.

KEY WORDS: shear, size effect, digital image correlation.

1. Introduction

Le comportement des éléments en béton armé sous chargement de cisaillement est caractérisé par une rupture plus ou moins brutale. Plusieurs tests ont été conduits pour clarifier et comprendre les mécanismes principaux associés à une rupture par cisaillement [1,2]. Les principaux mécanismes identifiés sont les suivants :

- *Engrènement des granulats* : ce mécanisme est généré par le frottement entre les lèvres de la fissure [3,4]. La capacité de transmission de l'effort tranchant par ce mécanisme est influencé par la taille et le type des granulats (normaux, légers, ...), la forme de la fissure et le type de béton (béton normale, béton à haute performance ...).
- *L'effet Goujon* : les armatures de flexion jouent un rôle dans la transmission de la charge de cisaillement grâce à leur rigidité de cisaillement [5]. Cet effet est influencé par le diamètre des armatures et leur enrobage.
- *Les contraintes résiduelles de traction* : la capacité de transmission est principalement liée aux taux d'ouverture de fissures [6].
- *Zone de compression* : caractérisé par la formation de la bielle de compression au-delà de la zone de fissuration pour transmettre la force de cisaillement aux appuis [7].

Plusieurs études ont été menées pour comprendre les paramètres influençant la capacité de cisaillement des structures en béton armé [8-9]. Le changement de rapport, entre la distance de l'appui et le point d'application de la charge (a) et la hauteur effective de la poutre (d) provoque des modes de rupture différents [8]; le taux et la disposition des armatures longitudinales affectent la charge de rupture en cisaillement [8]. La capacité de cisaillement augmente avec la résistance à la compression du béton [8, 9]. En ce qui concerne l'effet d'échelle sur la contrainte nominale de cisaillement, les études montrent une dépendance non-linéaire vis-à-vis de la hauteur effective [11].

Ce travail est une contribution à l'identification et la compréhension du mécanisme de fissuration dans des poutres en béton armé sous chargement de cisaillement avec un rapport a/d constant ($a/d=2.5$). En plus des informations liées au comportement global des poutres, la technique de corrélation d'image a été utilisée pour étudier la cinématique de la fissure critique.

2. Programme Expérimental

2.1. Caractéristiques géométriques des spécimens

Pour étudier le comportement des fissures dans les poutres en béton armé sans armatures transversales, un travail expérimental a été réalisé à l'Ecole Centrale de Nantes. Les poutres sont géométriquement similaires avec une largeur constante ($b = 200$ mm), et une hauteur utile variable de 200 mm à 600 mm comme indiqué dans le tableau 1 et la figure 1. Le rapport entre la travée de cisaillement et la hauteur effective est gardé constant ($a / d = 2.5$)

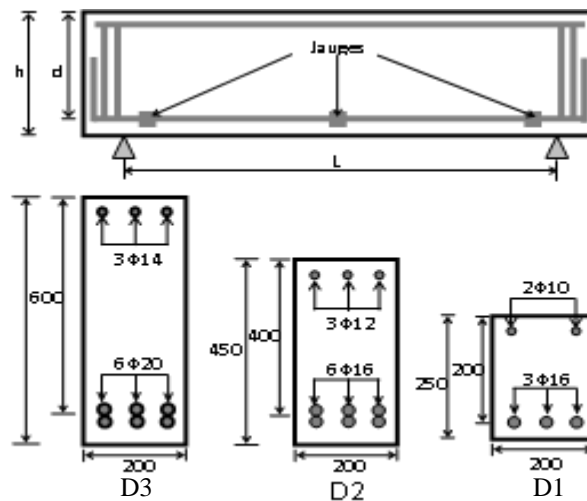


Figure 1. Détails de ferrailage des poutres testées (Dimensions en mm).

Le taux d'armatures longitudinales est constant dans toutes les poutres ($\rho_s = 1,5\%$). Dans les extrémités des armatures, des ancrages droits sont réalisés. Des armatures ont été installées dans la partie supérieure de la poutre ($\rho_c = 0,5\%$) pour prévenir une rupture prématurée par compression. Les détails et la configuration de ce ferrailage sont représentés sur la figure 1.

Deux poutres de chaque taille ont été testées pour voir la rentabilité entre eux, où dans ce papier seulement une poutre de chaque taille qui sera présentée.

Tableau 1. Détails des spécimens.

Poutres	b (mm)	h (mm)	d (mm)	L (mm)	ρ_s (%)	ρ_c (%)
D1	200	250	200	1000	1,50	0,50
D2	200	450	400	2000	1,50	0,50
D3	200	650	600	3000	1,50	0,50

2.2. Propriétés matérielles

Les poutres ont été coulées en utilisant un béton ordinaire fabriqué à partir de la conception d'un mélange illustré dans le tableau 2, où la taille maximale des granulats est $d_a = 16$ mm. Afin de connaître la moyenne de la résistance à la compression et à la traction, des essais de compression et de fendage ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques ($\Phi 110$ mm, $h 220$ mm) telles que résumé dans le tableau 3. Les caractéristiques de l'acier utilisé sont également données dans le tableau 3, où les valeurs sont pris de la fiche technique des produits.

Tableau 2. Formulation du béton.

Cément (Portland 52.5)	347 Kg/m ³
Sable	790 Kg/m ³
Granulats (6-10 mm)	245 Kg/m ³
Granulats (10-16 mm)	815 Kg/m ³
Eau	185 Kg/m ³

Tableau 3. Propriétés Mécanique du béton et Acier.

Béton	
Résistance de Compression, f_c	28,35 MPa
Résistance de Traction, f_t	3,31 MPa
Module de Young du béton, E_c	30,00 GPa
Armatures	
Résistance élastique, f_y	500 MPa
Module de Young, E_s	200 GPa

2.3. Configuration du test et instrumentation

Les essais de flexion trois points (Figure 1 et Figure 2) sont effectués afin d'obtenir la réponse globale des poutres. Les spécimens D1, D2 et D3 ont été testés à l'aide d'un vérin hydraulique. Un système a été adapté pour mesurer le déplacement de chaque poutre à mi-travée à l'aide d'un capteur laser. Au niveau du ferrailage longitudinal, des jauges de déformation ont été placées dans différents endroits pour l'acquisition des déformations longitudinales pendant l'essai (voir le Figure 1).



Figure 2. Dispositif d'essai flexion trois points.

La technique DIC est une technique innovante sans contact [12-13]. Cette technique a été utilisée dans ce programme expérimental sur une face de chaque poutre en utilisant deux caméras. Les deux caméras sont placées à une distance de la surface de la poutre et perpendiculairement au centre de la zone intéressée afin d'enregistrer des images continuellement (chaque seconde). Cette méthode consiste à mesurer le champ de déplacement sur la surface entre l'image de référence et une série d'images déformées enregistrées lors de l'essai.

3. Résultats et discussions

3.1. Comportement global

Toutes les poutres ont été testées en utilisant la même vitesse de chargement (0,02 mm/s). Les réponses globales Force-déplacement sont illustrées à la Figure 3. Comme on peut le constater sur cette figure, les réponses des trois spécimens présentent à peu près la même pente au début de chargement (comportement élastique). Puis, le changement de pente est dû à la présence de fissures de flexion au milieu de l'élément en raison de la présence des sollicitations de flexion. Dans les réponses des deux spécimens D2 et D3 un seul pic a été observé. Dans le cas de la poutre D1, la réponse donne un deuxième pic avec une propagation stable de la fissure.

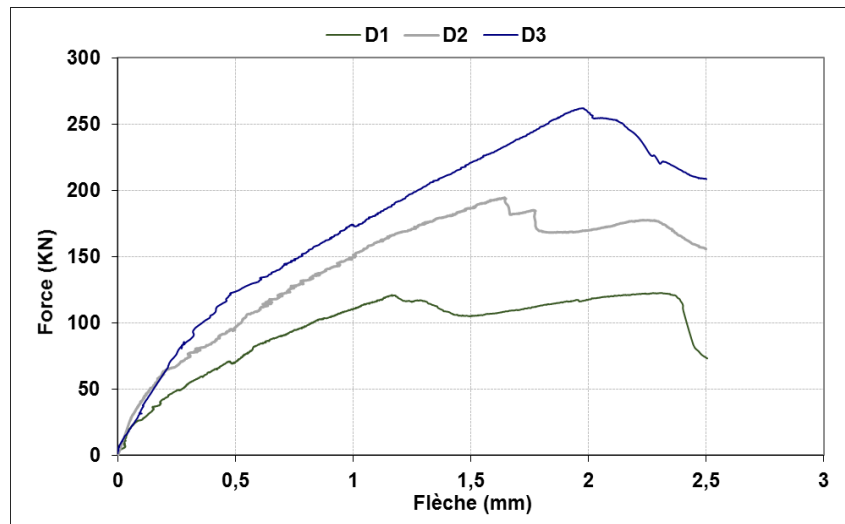


Figure 3. Réponse Force-Flèche des trois tailles.

Au cours de ce travail, un seul mode de rupture a été observé pour les trois poutres (voir la figure 4). En analysant les résultats de la DIC, on observe que la fissure diagonale critique est la continuité de la propagation de la fissure de flexion la plus proche de l'appui. Dans la partie post-pic, la fissure se propage le long des armatures, causant ainsi un déchaussement de l'armature.

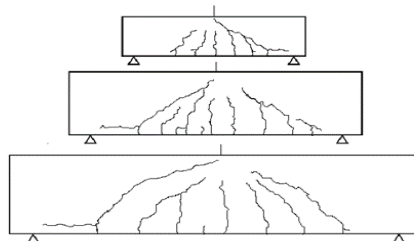


Figure 4. Profils de fissurations pour les trois poutres.

La figure 5 montre les valeurs des déformations dans les armatures de flexion sous différents taux de chargement. Pour toutes les poutres, la plastification des aciers n'a pas été observée lors des essais. Pour la charge au pic, les trois spécimens ne présentent pas le même taux de déformation. Cependant, la plus petite poutre D1 donne une valeur supérieure à la valeur de la plus grande poutre D3. Cette variation est due à une influence prononcée de l'effet de Goujon dans le spécimen D1 par rapport aux autres poutres. Comme illustré dans la figure 5, les déformations mesurées par la jauge 3 de la poutre D1 augmentent avant que la charge maximale ne soit atteinte conduisant ainsi à la présence de la première fissure diagonale. Puis les déformations mesurées par la jauge 1 augmentent après la charge de pic en raison de la formation de la deuxième fissure diagonale de l'autre travée de la poutre. Le même procédé est observé avec la jauge 3 et la jauge 1 dans l'élément D3. Tandis que, pour la poutre D2, la variation des valeurs des déformations a été observée uniquement par une seule jauge (Jauge 1) après avoir atteint la charge maximale à cause de la formation de la fissure diagonale critique.

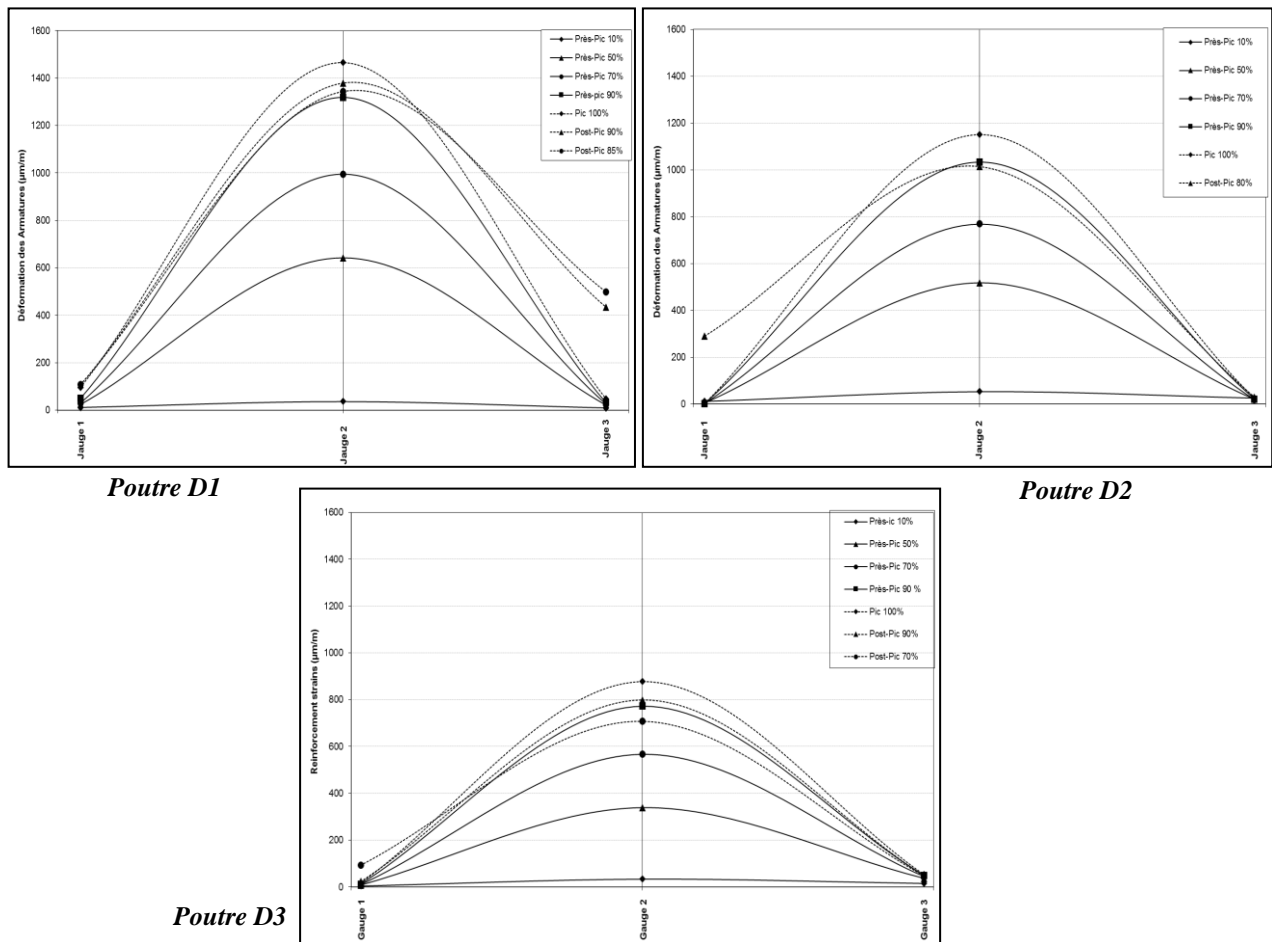


Figure 5. Déformations longitudinales des armatures à différentes charges.

3.2. Ouverture de la fissure Diagonale

En utilisant la corrélation d'image, le champ de déplacements est obtenu. A partir de ce dernier, le champ de déformations continu ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{xy}$) peut être calculé. La figure 6 montre les champs de localisation de déformation (composante ε_1). Les déformations se localisent à une bande près de la fissure. En se basant sur le champ de déformations montré dans la figure 6, on peut expliquer le processus de l'évolution de la fissure critique diagonale. La fissure de flexion la plus proche de l'appui commence à s'incliner au niveau des armatures de flexion et conduit à l'initiation de la fissure diagonale critique. La fissure continue à se propager diagonalement jusqu'au point d'application de la charge. Pendant cette propagation, une fissure horizontale commence à évoluer causant ainsi le déchaussement de l'armature. Le même mode et processus de rupture a été remarqué pour les trois poutres.

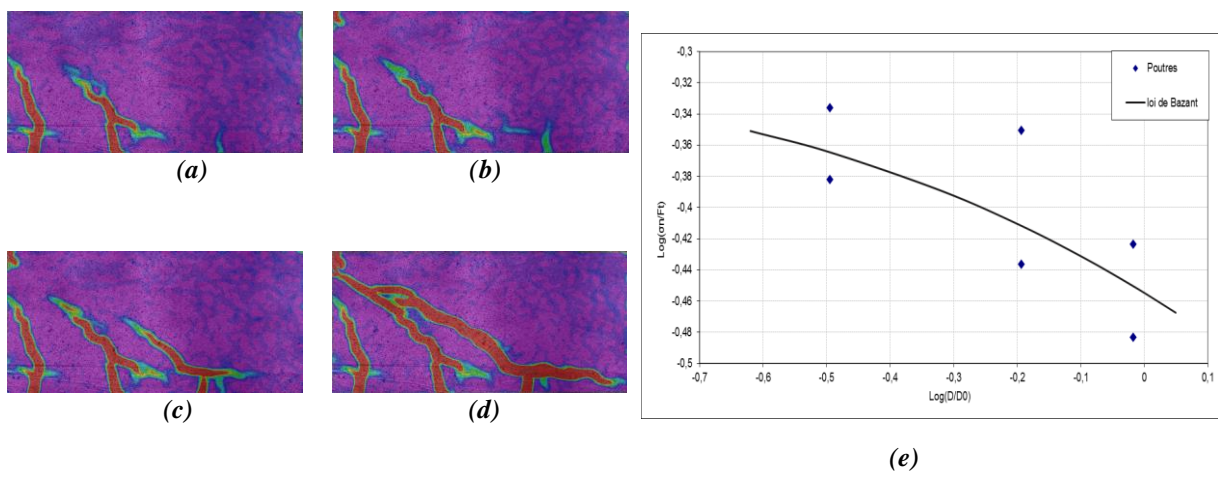


Figure 6. *Processus de Formation de la fissure critique diagonale pour la poutre D1: (a) à 95% Près-Pic, (b) à 100% Pic, (c) à 90% post-Pic, et (d) à 87% Post-Pic, et (e) effet d'échelle et la loi de Bazant.*

Sur la base du traitement des résultats de DIC, les ouvertures de la fissure critique de cisaillement ont été extraites au niveau de l'armature longitudinale (début d'inclinaison). Pour la fissure critique et pour chaque poutre, les évolutions des ouvertures le long de la fissure et à différents taux de chargement sont illustrées (Figure 7). Pour les trois poutres, pour de faible pourcentage de chargement, une faible propagation de la fissure est enregistrée. Cependant, à l'approche de la charge maximale et durant la phase post-pic, les ouvertures deviennent très significatives.

La figure 6(e) représente une comparaison entre la résistance nominale des poutres et la loi de Bazant [voir l'équation à la réf. 11]. La résistance nominale de cisaillement diminue par l'augmentation de la hauteur utile des poutres en béton armé sans des armatures transversales (phénomène d'effet d'échelle).

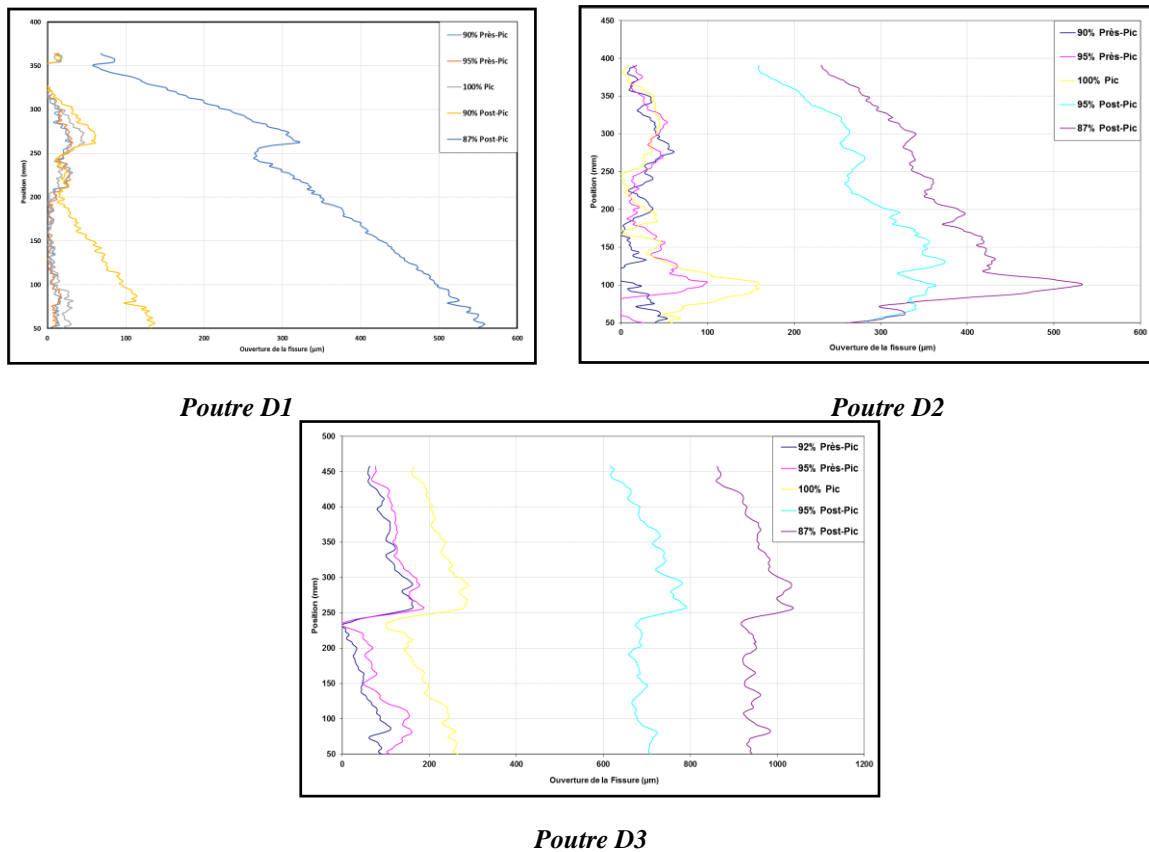


Figure 7. *L'ouverture de la fissure diagonale par rapport à la position.*

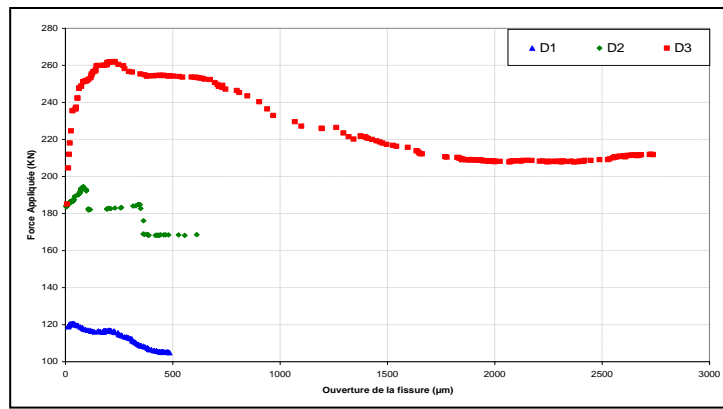


Figure 8. Charge - Ouverture de la fissure diagonale.

Les réponses Force-Ouverture maximale (C_w) de la fissure critique de cisaillement pour les trois poutres sont représentées sur la figure 8. L'ouverture maximale a été mesurée au niveau des armatures de flexion au début de l'inclinaison de la fissure. Il est observé une augmentation rapide et significative de l'ouverture pour les trois poutres. L'ouverture maximale au pic augmente avec l'augmentation de la hauteur de la poutre $d=200mm$ ($C_w=38,52\mu m$) à $d=600mm$ ($C_w=229,52\mu m$). Un effet d'échelle est observé sur la cinématique d'ouverture de fissure. Une poutre de hauteur importante développe de fissures de grandes ouvertures. Cet effet est principalement lié au mécanisme d'engrènement des granulats ce qu'est vérifié par plusieurs chercheurs [4, 14].

Le tableau suivant illustre la force, déformations des aciers longitudinaux (ϵ_s) et l'ouverture de la fissure diagonale (C_w) à deux états de chargement 100% Pic et 87% Post-Pic de la charge appliquée.

Tableau 4. Résultats expérimentales de chaque poutre.

Poutres	100% Pic de la charge appliquée			87% Post-Pic de la charge appliquée		
	F (Kn)	ϵ_s ($\mu m/m$)	C_w (μm)	F (Kn)	ϵ_s ($\mu m/m$)	C_w (μm)
D1	120,939	1464,816	38,522	104,888	1341,216	485,126
D2	194,571	1151,023	83,557	169,277	1061,743	555,976
D3	262,023	878,032	229,523	227,690	785,152	1098,940

4. Conclusions

Dans le présent travail, des essais sur des poutres sans armatures transversales sous chargement de cisaillement ont été réalisés. Le comportement à la rupture de ces poutres est similaire. Une fissure critique de cisaillement est développée près de l'appui en se propageant vers le point d'application de charge. La technique de corrélation d'image a été utilisée pour analyser le comportement local des différentes poutres. Près de la charge maximale, l'ouverture de la fissure critique présentent un saut conduisant ainsi à un comportement instable. Un effet d'échelle très prononcé sur la cinématique d'ouverture de fissure est observé. Cet effet est principalement lié au mécanisme d'engrènement des granulats. Ces informations locales obtenues grâce à la corrélation d'image pourront servir à identifier les mécanismes responsables de l'effet d'échelle en cisaillement.

5. Références

[1] Fernández Ruiz, M., Muttoni, A., Segaseta, J. 2015. Shear Strength of Concrete members without transverse reinforcement : A mechanical approach to consistently account for size and strain effects. *Engineering Structures*, 99: 360-372.

[2] Campana, S., Fernández Ruiz, M., Anastasi, A., Muttoni, A. 2012. Analysis of shear transfer actions on one-way RC members based on measured cracking pattern and failure kinematics. *Magazine Concrete Research*. 56(6): 386:404.

[3] Walraven, J. 1980. *Aggregate Interlock: a theoretical and experimental analysis*. Ph.D. thesis, Delft university of technology, Delft, the Netherlands; 196.

[4] Walraven, J. C. 1981. *Fundamental Analysis of Aggregate Interlock*. *ASCE J Struct. Div.*, 107(11): 2245-2270.

[5] Zararis, P.D. 1961. *Shear strength and minimum shear reinforcement of reinforced concrete slender beams*. *Journal of the American Concrete Institute* 2:203–214.

[6] Evans, R. H. & M. S. Marathe. 1968. *Micro cracking and stress-strain curves for concrete in tension*. *Matériaux et Constructions* 1(1): 61-64.

[7] Sherwood, E. G., E. C. Bentz & M. P Collins. 2007. *Effect of aggregate size on beam-shear strength of Thick slabs*. *Journal of the American Concrete Institute* 104 (2): 180-190.

[8] Kani, G. N. J. 1966. *Basics Facts concerning shear Failure*. *Journal of the American Concrete Institute*, 63(6): 128-147.

[9] Taylor, H. P. J. 1974. *The fundamental behavior of reinforced concrete beams in bending and shear*. *American Concrete Institute Special Publication* 42: 43-77.

[10] Kani, G. N. J. 1964. *The Riddle of Shear Failure and Its Solution*. *Journal of the American Concrete Institute*, 61(28): 441-467.

[11] Bazant, Z. P., Kazemi, T. 1991. *Size effect on diagonal shear failure of beams without stirrups*. *Journal of the American Concrete Institute* 89(3): 268-276.

[12] Alam, S. Y., Loukili, A., Grondin, F., Rozière, E. 2015. *Use of the digital image correlation and acoustic emission technique to study the effect of structural size on cracking of reinforced concrete*. *Engineering Fracture mechanics*, 143: 17-31.

[13] Alam, S. Y., Loukili, A. 2010. *Application of digital image correlation to size effect tests of concrete*. 7th *International Conference on fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, pp: 191-197.

[14] Lantsoght, Eva O. L., Van der Veen, C., Walraven, J. C., and De Boer, A. 2016. *Case study on Aggregate Interlock capacity for the shear Assessment of Cracked Reinforced-Concrete Bridge Cross Sections*. *Journal of Bridge Engineering*, ASCE. 0401.