

## ANALYSE EXPERIMENTALE DE L'EFFET DES ARMATURES TRANSVERSALES SUR LE COMPORTEMENT FLEXIONNEL DES POUTRES EN BETON ARME

F. MERIMECHE, H. CHABIL, R. LASSOUED, A. AMIRAOU

Département de Génie Civil, Faculté des Sciences de la Technologie  
Université des Frères Mentouri Constantine, Algérie

Reçu le 08 Juillet 2013 – Accepté le 15 Mai 2015

### Résumé

Une analyse expérimentale a été menée sur des poutres en béton armé soumises à un chargement monotone, en tenant compte de certains paramètres (ferraillage transversal avec plusieurs espacements) dans le but d'acquérir les différentes informations sur les phénomènes couplés dans le domaine de la mécanique de rupture. Les plus importants phénomènes engendrés par la sollicitation ont été suivis, telles que l'évolution des fissures en fonction des différents paliers de chargement, les courbes charges - déformations ont été réalisées pour les différents spécimens ainsi que les courbes moments – courbures. Différents mécanismes de rupture ont été observés et analysés selon les paramètres considérés.

**Mots clés :** Poutre en béton armé, pourcentage d'armatures transversales, section des armatures transversales, phénomènes de rupture.

### Abstract

An experimental analysis was conducted on full scale reinforced concrete beams subjected to a monotonic loading (4-point bending) in order to acquire information about the various phenomena of fracture mechanics. The study took into account some parameters: the effect of the section and transversal reinforcement with several stirrup spacing. The most important phenomena caused by the stress were studied, such as the evolution of the cracks at different loading levels. Various failure mechanisms were observed depending on the considered parameter.

**Key words:** Reinforced concrete beams ; percentage of reinforcement ; section of transversal reinforcement ; fracture phenomena.

### ملخص

اجري التحليل التجريبي على روافد من الخرسانة المسلحة يتعرضون لتحميل رتيب مع مراعاة معايير معينة (التسليح العرضي بتباعد مختلف) من اجل الحصول على معلومات عن مختلف الظواهر المترابطة في ميكانيكا الكسر. لقد تم متابعة أهم الظواهر الناتجة عن هذا التحميل مثل تطوّر التشقق بدلالة مختلف التحميل. لقد أجريت على مختلف العينات منحنيات الحمل-التشوه كذلك مختلف ميكانيزمات الكسر شهدت و حلّت حسب المعايير المعتمدة.

**كلمات مفتاحية :** رافدة الخرسانة المسلحة، نسبة التسليح العرضي، مقطع التسليح العرضي، ظواهر الكسر.

Dans le but de voir l'influence du ferrailage transversal sur le comportement de poutres en béton armé, nous avons réalisé des essais sur des poutres en béton armé sous chargement statique en faisant varier le taux d'armatures transversales ainsi que la section de ces armatures.

En tout, dix huit poutres ont été testées au sein du Laboratoire Mécanique des Sols et des Structures (LMSS) de l'Université des Frères Mentouri, Constantine1.

La présence des armatures transversales en quantité suffisante assure aux poutres en béton armé un degré de ductilité compatible avec les exigences de sécurité (prévision d'une rupture possible grâce à une fissuration excessive) [1].

### 1. TRAVAUX ANTERIEURS

Le cisaillement dans le béton armé est un problème qui a jusqu'à maintenant défié la prédiction purement analytique. En conséquence, les concepts qui guident la pratique de la conception actuelle reposent en partie sur une analyse rationnelle, en partie sur des preuves expérimentales, et en partie sur l'expérience à long terme de comportement de structure satisfaisant. [MAN, 86] [2].

La multiplicité des expériences prouve que le sujet est loin d'être cerné. Plusieurs investigations ont traité ces phénomènes.

Les études antérieures faites sur des poutres soumises à un chargement monotone en prenant en compte le pourcentage et l'espacement des armatures transversales ont fait ressortir ce qui suit :

KENT et PARK (1971) [3] ont proposé une courbe caractéristique du béton confiné avec des cadres rectangulaires, elle donne une représentation suffisamment exacte de la relation contrainte - déformation. La partie ascendante de cette courbe est représentée par l'équation d'une parabole. On admet dans cette partie que le confinement n'a aucun effet sur la courbe contrainte - déformation. La partie descendante est linéaire.

SOMES (1970) [4], SCOTT et al. (1982) [5] ont démontré expérimentalement qu'il n'y a pas une relation directe entre le volume des armatures transversales et le gain en résistance ou en ductilité pour les sections rectangulaires. Ils ont en revanche démontré que les espacements ont une influence considérable sur le confinement et sur la résistance.

KOTSOVOS (1986) [6] a montré qu'une poutre non armée transversalement qui cassait en « cisaillement - compression » de façon fragile avec une seule fissure très ouverte est passée au mode de rupture en « flexion pure » beaucoup plus ductile avec plusieurs fissures peu ouvertes, sa résistance étant également augmentée, lorsque celle - ci est armée avec des cadres.

### 2. PROTOCOLE EXPERIMENTAL ET ESSAIS EFFECTUES

Tous les essais ont été effectués par une machine équipée d'un vérin hydraulique pouvant fournir jusqu'à 3000 KN en compression. La machine de flexion que nous possédons dans notre laboratoire est conçue pour des poutres à échelle réduite de longueur de 1,10 mètre. Dans le but d'avoir des résultats réels ou proches de la réalité, nous avons conçu un dispositif métallique très rigide d'une longueur de 2200 mm et d'une hauteur de 500 mm, servant spécialement comme support pour les poutres (Figure 1).



Figure 1 : Machine d'essai avec le dispositif métallique

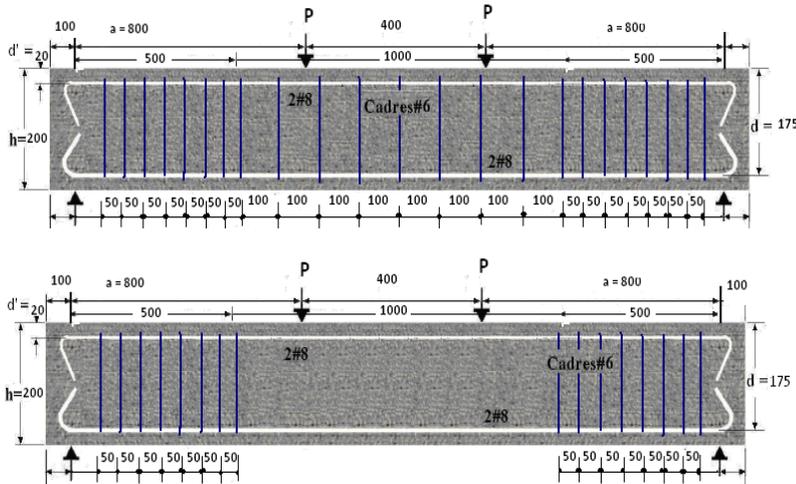
Douze poutres rectangulaires en béton armé à échelle réelle ont été soumises à un chargement monotone croissant jusqu'à la rupture.

Tableau 1 : Caractéristiques des spécimens étudiés

Série	Spécimen	b*h (mm²)	L mm	As	A's	Cadre Φt	Esp Zone nodale (mm)	Esp zone courante (mm)	Force de la première fissure	% d'acier transversal ρ%
1	Poutre 1	150*250	2200	2T8	2T8	2φ6	50	néant	10	0,85%
	Poutre 2	150*250	2200	2T8	2T8	2φ6	50	100	25	1,068%
	Poutre 3	150*250	2200	2T8	2T8	2φ6	70	néant	20	0,68%
	Poutre 4	150*250	2200	2T8	2T8	2φ6	70	140	22	0,94%
	Poutre 5	150*250	2200	2T8	2T8	2φ6	90	néant	5	0,47%
	Poutre 6	150*250	2200	2T8	2T8	2φ6	90	180	15	0,96%
2	Poutre 36	150*250	2200	2T8	2T8	2T8	50	Néant	20	2,36%P
	Poutre 37	150*250	2200	2T8	2T8	2T8	70	Néant	15	1,67%
	Poutre 38	150*250	2200	2T8	2T8	2T8	50	50	10	3%
	Poutre 39	150*250	2200	2T8	2T8	2T8	90	Néant	20	1,52%
	Poutre 40	150*250	2200	2T8	2T8	2T8	70	70	16	2%
	Poutre 42	150*250	2200	2T8	2T8	2T8	90	90	20	1,037%

Ces poutres représentent deux séries, chaque série est constituée de six poutres. Les poutres sont sollicitées en flexion quatre points.

La portée en cisaillement a été prise égale à 800 mm, correspondant à un rapport portée en cisaillement - profondeur  $a/d = 4,57$  (flexion - cisaillement). Leurs caractéristiques sont représentées au tableau 1. Un exemple des poutres P1 et P2 est donné sur la figure 2.



**Figure 2 :** Ferrailage des poutres P1 et P2 de la série O1 (dimensions en mm)

### 3.1. Résultats obtenus et commentaires

Après la réalisation de l'essai de flexion 4 points sur ces poutres, les mécanismes de rupture de ces dernières – avec des commentaires - sont représentés sur les figures 3 et 4 pour les poutres P1 et P6 de la série O1 et la figure 5 pour la poutre P36 de la série O2.



**Figure 3 :** Endommagement de la poutre P1

Le mécanisme de rupture observé pour la poutre P1 est une rupture par compression du béton due à la flexion associée à la plastification de l'armature tendue.

Cette rupture a commencé par l'apparition de fissures verticales au milieu de la poutre, ensuite ces fissures sont devenues plus larges avec l'augmentation de la charge, toujours au milieu de la poutre.

Par la suite, nous avons observé l'écrasement du béton suite à un niveau trop important de compression.

Le mécanisme de rupture observé pour la poutre P6 est une rupture due à la contrainte principale oblique. Nous avons remarqué d'abord le développement de quelques fissures fines verticales au centre de la poutre (de type flexion), suivies par une perte d'adhérence entre l'acier inférieur et le béton qui l'entoure. Dans la zone proche de l'appui, quelques fissures inclinées sont apparues vers le centre.

Ensuite, nous avons remarqué une fissure inclinée due à la contrainte principale oblique qui s'ouvre à partir du point de chargement (de la fibre la plus comprimée de la poutre) jusqu'à la partie la plus tendue de la poutre. Cela est sans doute dû au manque de cadres dans la zone courante (zone sans cadres) et l'espacement de 9cm dans la zone nodale.

Dans cette zone nous avons observé un endommagement fragile dû à la contrainte oblique, la poutre est cisailée mais le centre de la poutre reste peu déformé.



**Figure 4 :** Endommagement de la poutre P 6

Le mécanisme de rupture observé pour la poutre P36 est une rupture par flexion, rupture par la plastification de l'armature tendue. La majorité des fissures sont verticales, et ne sont que dans la partie centrale. Ces fissures se développent avec l'augmentation du chargement, s'ouvrent et s'étendent vers l'axe neutre et au-delà (figure 5). Ce mécanisme de rupture par flexion est ductile en raison de la plastification de l'armature tendue.



**Figure 5 :** Endommagement de la poutre P36

Le tableau 2 résume les mécanismes de rupture des douze (12) poutres testées.

rupture est survenue par écoulement de l'acier tendu. On remarque un plateau plastique.

**Tableau 2 :** Différents mécanismes observés dans les douze spécimens de la première et la deuxième série.

La courbe P42 est une section avec des cadres espacés de 9 cm tout le long de la poutre ( $\rho=1\%$ ). On observe que la

Série	Spécimen	Mécanisme de rupture	
1	Poutre 1	Flexion pure	- Apparition de fissures seulement en zone courante. - Rupture par écoulement de l'acier.
	Poutre 2	Flexion pure	- Propagation des fissures au milieu de la poutre, fissures larges de 1cm et 1,5 cm pour un chargement P=25KN. - Les fissures se sont élargies jusqu'à éclatement du béton et l'acier.
	Poutre 3	Flexion pure	Rupture par écrasement du béton avec une flèche de 11 cm.
	Poutre 4	Flexion pure	Rupture par écrasement du béton.
	Poutre 5	Flexion - Compression	- Une grande déformation et de larges fissures à un chargement de 20 KN. - Des fissures horizontales dans la partie supérieure de la section. - L'axe neutre est devenu plus haut.
	Poutre 6	Compression-Cisaillement	- Premières fissures fines au milieu de la poutre. - A 22 KN de chargement, les fissures sont devenues plus larges. - Une fissure oblique à 45° qui a traversé la poutre à 50cm de l'appui représente l'effondrement de sa résistance. - La poutre est cisailée.
2	Poutre 36	Flexion pure	Ecoulement de l'acier tendu, rupture à 25 KN
	Poutre 37	Flexion pure	Rupture à 30 KN
	Poutre 38	Flexion pure	Ecoulement de l'acier, rupture à 20 KN
	Poutre 39	Flexion - cisaillement	Fissure observée au milieu de la poutre puis un cisaillement à l'appui gauche
	Poutre 40	Flexion pure	Ecoulement de l'acier tendu, rupture à 30 K
	Poutre 42	Flexion - cisaillement	Large fissure à 58 cm de l'appui gauche.

Suite aux essais effectués, des courbes force – déplacement ont été tracées (figures 6, 7, 8 et 9). Chaque catégorie de poutre ayant trois espacements différents.

Pour les courbes de la figure 7 :

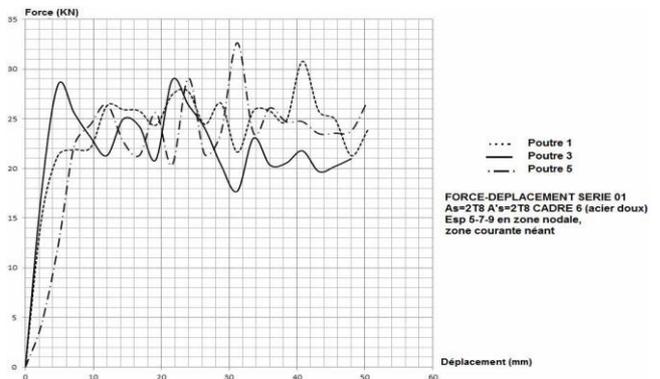
Les courbes de la poutre P2 et la poutre P4 représentent l'effet de la présence d'armatures transversales en quantité suffisante avec des espacements comme indiqué sur la figure. Une phase élastique suivie d'un palier plastique est observée pour les deux poutres. Ces espacements assurent un degré de ductilité (on ne remarque aucune rupture brusque). La courbe bleue de la poutre P6 montre une phase élastique suivie d'une phase de plasticité, puis un pic suivi d'une décroissance brusque. L'apparition de ce pic est due à un cisaillement important de la poutre, ce qui montre une rupture brutale.

Pour les courbes de la figure 9 :

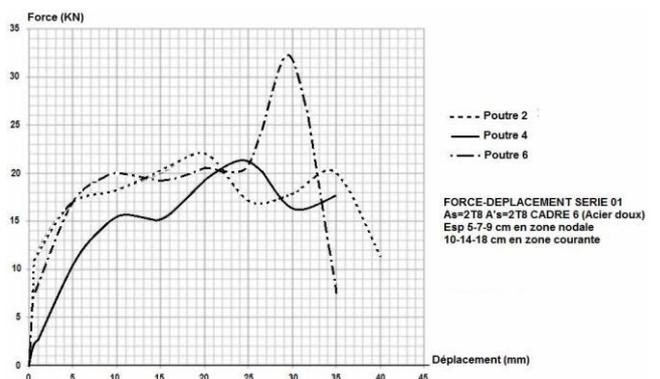
La courbe de la poutre P38 est une section sur armée, avec des cadres espacés de 5cm tout le long de la poutre ( $\rho=3\%$ ). On observe que la première fissure est à 10 KN, l'acier a un comportement élastique, et une résistance très élevée qui atteint les 100 KN. Au moment où la fibre la plus comprimée du béton atteint sa valeur limite  $\epsilon_{cu}$ , la rupture est brusque, survenue par écrasement du béton. La réponse est similaire à une rupture par cisaillement.

La courbe de la poutre P40 est une section avec des cadres espacés de 7cm tout le long de la poutre ( $\rho=2\%$ ). On observe que la première fissure est à 36 KN, l'acier a un comportement élastique, puis il quitte le domaine élastique au moment où la fibre extrême du béton atteint son raccourcissement limite  $\epsilon_{cu}$ . La rupture est lente, les armatures présentent une large déformation plastique, la

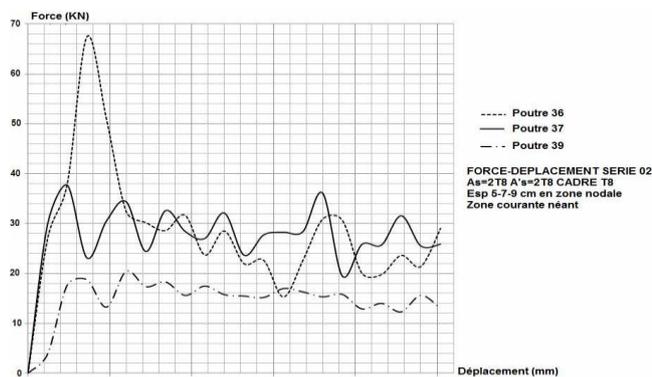
première fissure est à 26 KN, l'acier aussi a un comportement élastique, il quitte le domaine élastique au moment où la fibre extrême du béton atteint son raccourcissement limite  $\epsilon_{cu}$ . La rupture là aussi est brusque.



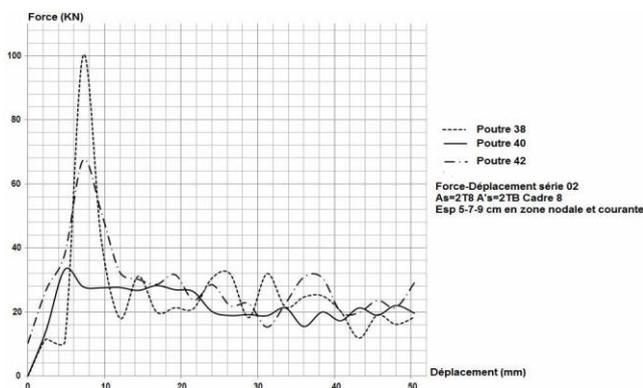
**Figure 6 :** Courbe enveloppe (force – déplacement) des poutres P1, P3 et P5



**Figure 7 :** Courbe enveloppe (force – déplacement) des poutres P2, P4 et P6



**Figure 8 :** Courbe enveloppe (force – déplacement) des poutres P36, P37 et P39



**Figure 9 :** Courbe enveloppe (force – déplacement) des poutres P38, P40 et P42

### CONCLUSION

Le taux de pourcentage d'acier transversal influe sur le comportement de la poutre.

L'influence des diamètres des cadres transversaux sur la réponse des poutres est représentée sur les (figures 6, 7, 8 et 9) différents diamètres d'armatures transversales. Nous constatons que plus le diamètre est grand, plus la résistance de l'élément en béton armé est grande et moins le comportement est fragile.

La diminution de la fragilité est observée dans les parties descendantes des courbes contraintes-déformations. Ces courbes mettent en évidence qu'il existe une contribution de l'armature transversale en fonction de son diamètre.

Les résultats des essais, les différents modes de rupture observés, ainsi que les courbes force-déplacement tracées, nous montrent aussi que les espacements des cadres ont une influence remarquable sur les poutres en béton armé. Grâce à l'utilisation d'un frettage par cadres en zone nodale et zone courante, nous avons observé un mode de rupture « flexion pure », mode plus ductile avec plusieurs fissures peu ouvertes ainsi qu'une résistance plus grande. Les courbes forces – déplacement ont montré également que les poutres frettées sur toute leur longueur, passent du palier élastique à une phase de plastification avant la rupture (figure 7), alors que le cas est contraire pour les poutres nos frettées en zone courante où la courbe nous montre un palier élastique puis une rupture brusque (chute de résistance).

### Références

- [1] Breyse D., Davenne L. (1992), « Analyse par macro – éléments de l'influence des armatures transversales dans le béton armé.
- [2] Mansur M. A., Ong K.C.G., Paramasivamp. « Shear strength of fibrous concrete beams without stirrup » journal of structural Engineering. Vol. 112. №.9, pp. 2066 – 2079, 1986.
- [3] Kent D.C., Park R. (1971), journal of the structural division, ASCE, V, 97, ST 7, pp.1969-1990
- [4] Somes N. F., “Compression tests on hoop reinforced concrete”, proc. ASCE, V. 96, ST 7, pp. 1495-1509, 1970.
- [5] Scott B. D., Park R. and Priestley, M.J.N., “Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates” ACI journal proceedings, V. 79, №1, pp. 13-27, 1982.
- [6] Kotsovos Michael D. “Behavior of beams with shear span – to Depth Ratios greater than 2,5” ACI Journal, proceeding, Vol. 83, №. 6, pp. 1026 – 1986.