
Apport des armatures transversales à la résistance à l'effort tranchant des poutres en béton à hautes performances

M. Hamrat¹, B. Boulekbache¹, M. Chemrouk², S. Amziane³

¹Université de Hassiba Benbouali-Chlef, Algérie, mhamrat@yahoo.fr

²Université des sciences & Technologie, USTHB, Algérie, mchemrouk@yahoo.fr

³Université de Blaise Pascal, France, Sofiane.Amziane@gmail.com

RÉSUMÉ. L'utilisation de plus en plus fréquente, de bétons à hautes performances (BHP) a poussé beaucoup de chercheurs à étudier le comportement des structures en BHP, en particulier la résistance à l'effort tranchant. Dans ce contexte, une étude expérimentale a été conçue pour étudier l'influence des armatures transversales sur la capacité portante, la ductilité à travers la flèche et modes de rupture des 12 poutres en béton ordinaire (BO) et en BHP. Les résultats d'essais sont comparés avec les différentes prédictions théoriques des règlements universels pour la contribution des armatures transversales.

Les résultats d'essai ont montré que les charges ultimes des poutres avec armatures transversales contenant 1,2 % d'acier longitudinal sont supérieures à celles des poutres sans armatures transversales; une augmentation moyenne de 21 % a été enregistrée pour les poutres en BO et 25 % pour les poutres en BHP. Cependant, la contribution des armatures transversales (variant entre 15 % et 45 %) est amplement exagérée par les règlements qui donnent des contributions variant entre 70 % et 300 %.

ABSTRACT. The increasingly frequent use of high performance concrete (HPC) has led many researchers to study the behaviour of structures with HPC, particularly the shear strength. In this context; an experimental study was conceived to investigate the influence of transverse reinforcement on the shear capacity, ductility through the deflection and modes of failure of 12 reinforced concrete beams with ordinary concrete (OC) and HPC. The test results are compared with the different theoretical predictions for the contribution of the transverse reinforcement.

The test results showed that the ultimate loads of beams with transverse reinforcement having 1.2 % of longitudinal tensile steel were greater than those beams without transverse reinforcement; an average increase of 21 % was recorded for the beams with OC and 25 % for the beams in HPC. However, the contribution of transverse reinforcement (varying between 15 % and 45 %) is largely exaggerated by the codes that give contribution ranging between 70 % and 300 %.

MOTS-CLÉS: poutres, armature transversale, capacité portante, flèche, règlements.

KEYWORDS: beams, transverse reinforcement, strength capacity, deflection, codes.

1. Introduction

Dans une poutre en béton armé contenant des armatures transversales, la force de cisaillement agissant sur la poutre est reprise par le béton ($V_b = V_{cz} + V_a + V_d$) et par l'armature transversale (V_s) (figure 1). L'armature transversale est supposée entrer en action dès le début de l'apparition de la fissure diagonale (Pendyala and Mendis, 2000) (Prodromos, 2003). En réalité, les armatures transversales commencent à résister à quelques contraintes de cisaillement avant même l'apparition de la fissuration diagonale (Sarsam and Al-Musawi, 1992). Après la formation de la fissure diagonale, une grande part de la force de cisaillement est reprise par les armatures transversales (Chien-H and Wen-C, 2003).

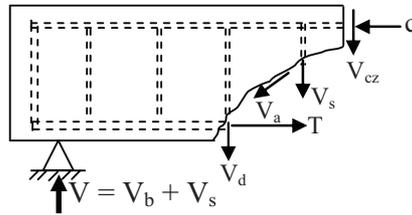


Figure 1. Forces internes dans une poutre avec armatures transversales

Les résultats d'essai sur des poutres en béton armé à haute résistance renforcées par un pourcentage minimal d'armatures transversales ont indiqué que ce renforcement est suffisant pour empêcher des ruptures fragiles de cisaillement. La fissuration transgranulaire due à la forte résistance de la pâte de ciment et donc à la meilleure adhérence granulats-pâte de ciment conduisant à une cassure des granulats et donc à une faible contribution de l'engrenage des agrégats (Roller and Russel, 1990). Ceci suggère que dans le cas du béton à hautes performance, les armatures transversales sont plus utiles en améliorant le comportement en post-fissuration des poutres, en particulier les caractéristiques post-pic en déformation et la capacité portante (Xie et al., 1994). Une telle amélioration serait due à la qualité de la liaison entre le béton et l'acier.

D'un point de vue réglementaire, plusieurs équations ont été proposées pour estimer la contribution du béton (V_b) et la contribution des armatures transversales (V_s) à la résistance à l'effort tranchant des poutres.

Le règlement Américain (ACI318, 2002) donne l'équation suivante:

$$V = \frac{1}{7} (\sqrt{f'_c} + 120\rho) \frac{d}{a} bd + \frac{A_v f_{ysv}}{s} \quad [1]$$

Où: f'_c , ρ , b , d sont la résistance à la compression du béton, le taux d'armatures longitudinales, la largeur de la section, et la hauteur utile, respectivement.

Le règlement Britannique (BS8110, 1997) propose deux équations:

$$V = \left[\left(2 \frac{d}{a} \right) \frac{0.79}{\gamma_m} (100\rho)^{1/3} \left(\frac{400}{d} \right)^{1/4} \left(\frac{f_{cu}}{25} \right)^{1/3} \right] bd + \frac{A_s f_{ysv}}{s} \cdot d \quad a/d < 2 \quad [2-b]$$

$$V = \left[\frac{0.79}{\gamma_m} (100\rho)^{1/3} \left(\frac{400}{d} \right)^{1/4} \left(\frac{f_{cu}}{25} \right)^{1/3} \right] bd + \frac{A_s f_{ysv}}{s} \cdot d \quad a/d \geq 2 \quad [2-a]$$

avec: f_{cu} , A_s , A_v , s , f_{ysv} : sont la résistance de béton à base de cubes, l'aire de l'armature longitudinale, la section d'une armature transversale, distance entre 2 armatures transversales consécutives et la limite élastique des armatures transversales, respectivement.

Le règlement Européen (Eurocode 2, 1992) considère les équations suivantes:

$$V = \left[2.5 \cdot \frac{d}{a} \cdot \frac{0.0525}{\gamma_c} \cdot (f'_c)^{2/3} (1.6-d)(1.2+40\rho) \right] bd + \frac{A_s f_{ysv}}{s} \cdot 0.9d \quad a/d < 2.5 \quad [3-a]$$

$$V = \left[\frac{0.0525}{\gamma_c} \cdot (f'_c)^{2/3} (1.6-d)(1.2+40\rho) \right] bd + \frac{A_s f_{ysv}}{s} \cdot 0.9d \quad a/d \geq 2.5 \quad [3-b]$$

Le règlement français (BAEL, 1999) recommande deux équations:

$$V = 0.3 f_t \cdot bd + \frac{A_s f_{ysv}}{d} \cdot 0.9d \quad f'_c < 60 MPa \quad [4-a]$$

$$V = 0.14 \sqrt{f'_c} \cdot bd + \frac{A_s f_{ysv}}{d} \cdot 0.9d \quad f'_c \geq 60 MPa \quad [4-b]$$

Avec f_t : résistance à la traction du béton

2. Programme d'essai

Le programme expérimental est basé sur les tests de deux séries de corps d'épreuve selon la résistance du béton. Chaque série de spécimens d'épreuve est

confectionnée avec et sans armatures transversales.

- Série C40, fabriquée avec un béton de 44 MPa de résistance en compression ($f_t = 3.4$ MPa),
- Série C80, fabriquée avec un béton de 86 MPa de résistance en compression ($f_t = 4.5$ MPa)

La première partie de chaque notation (C40 et C80) représente le béton ordinaire et béton à hautes performances. La deuxième lettre donne la configuration des spécimens (A : poutre sans armatures transversales, B : poutre avec armatures transversales), suivie du rapport portée de cisaillement / hauteur utile (a/d). Enfin, le chiffre 1 correspond au pourcentage arrondi du taux d'armatures longitudinales ($\rho = A_s/bd$). La figure 2 montre la dispositions des armatures longitudinales et transversales.

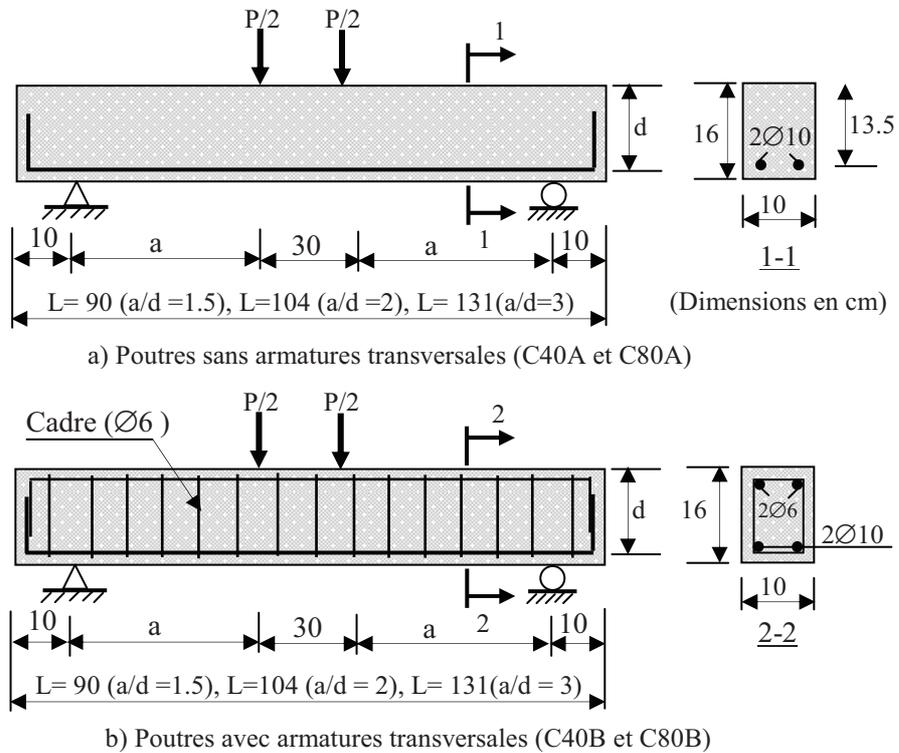


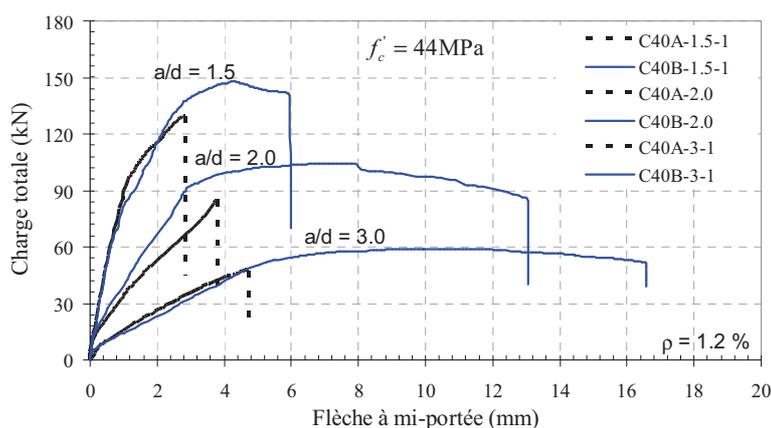
Figure 2. Caractéristiques géométriques et armatures des poutres

2. Résultats et Interprétation

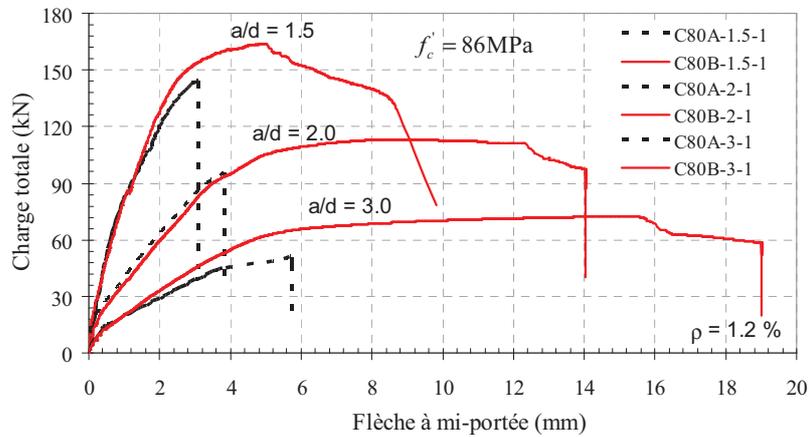
2.1. Capacité portante ultime

La figure 3 montre les courbes charge-flèche à mi-portée des 12 poutres. La charge ultime des poutres avec armatures transversales ayant $\rho = 1.2 \%$ est nettement supérieure à celle obtenue sans armatures transversales, avec une moyenne de 21 % pour les poutres en C40B et 25 % pour les poutres en C80B.

Le rapport de la charge ultime P_{u-B}/P_{u-A} (charge ultime des poutres avec armatures transversales/charge ultime des poutres sans armatures transversales) pour les deux types de béton augmente quand le rapport a/d croît (figure 3). Par exemple, les rapports P_{u-B}/P_{u-A} des poutres C80B - 1.5-1, C80B - 2-1 et C80B - 3 - 1 sont 1.14, 1.19 et 1.43, respectivement, tandis que pour les poutres C40B - 1.5 - 1. C40B - 2 - 1 et C40B - 3 - 1 sont 1.15, 1.23 et 1.25, respectivement. Par conséquent, l'efficacité de l'armature transversale semble être meilleure pour les portées de cisaillement relatives (a/d) élevées. Ceci s'explique par le fait que quand a/d est élevée, la fissure diagonale est moins inclinée par rapport à l'horizontal et donc les armatures transversales sont presque perpendiculaire à ces fissures. Pour des valeurs faibles de a/d , les fissures diagonales sont presque parallèles aux armatures transversales d'où leur inefficacité relative par comparaison aux poutres ayant des valeurs de a/d élevées. En outre, pour des petites valeurs de a/d , les armatures transversales ne semblent pas atteindre leur capacité ultime, comme suggéré par Zsutty, 1971. Selon Haddadin et al., 1971, l'efficacité de l'armature transversale dans l'augmentation de la résistance à l'effort tranchant est plus grande dans le cas de la rupture flexion-cisaillement que dans le cas d'une rupture cisaillement-compression. Ceci s'explique par le fait que les fissures diagonales dans le cas d'une rupture flexion-cisaillement sont mieux couturées par les cadres transversaux et moins inclinées par rapport à l'horizontal.



a). Poutres en Béton ordinaire (C40)



b). Poutres en Béton à hautes performances (C80)

Figure 3. Courbes charge-flèche des poutres sans et avec armatures transversales

2.2. Ductilité à travers la flèche des spécimens

La figure 3 montre l'effet de la présence d'armatures transversales sur les courbes charge-flèche des poutres en C40 et C80. L'analyse de cette figure montre que le comportement post-pic est fortement lié à la présence des armatures transversales pour les deux types de bétons.

La flèche maximale à mi-portée pour la poutre C80B - 3 - 1 est 40 % supérieure à celle de la poutre C40B - 3 - 1. L'augmentation moyenne est de l'ordre 24 %. Ceci est principalement dû à la meilleure qualité de l'adhérence entre le béton et l'acier dans le cas des poutres en C80, évitant ainsi tout glissement entre les deux matériaux et conférant au matériau composé une meilleure ductilité.

Le rapport de la flèche $\delta_{u-B}/\delta_{u-A}$ (Flèche correspondant à la charge ultime des poutres avec armatures transversales/Flèche correspondant à la charge ultime des poutres sans armatures transversales) augmente lorsque le rapport a/d augmente (figure 4 - a). Les rapports $\delta_{u-B}/\delta_{u-A}$ des poutres C80B - 1.5-1, C80B - 2 - 1 et C80B - 3 - 1 sont 1.60, 2.21 et 2.43 respectivement. De même pour des poutres en C40: les rapports des poutres C40B - 1.5 - 1, C40B - 2 - 1 et C40B - 3 - 1 sont 1.42, 1.95 et 2.11, respectivement.

En outre, la figure 4-b montre que le rapport $\delta_{u-B}/\delta_{u-A}$ augmente au fur et à mesure que la résistance à la compression du béton augmente. Les rapports $\delta_{u-B}/\delta_{u-A}$ des poutres C40B - 2 - 1 et C80B - 2 - 1 sont 1.95 et 2.21, respectivement.

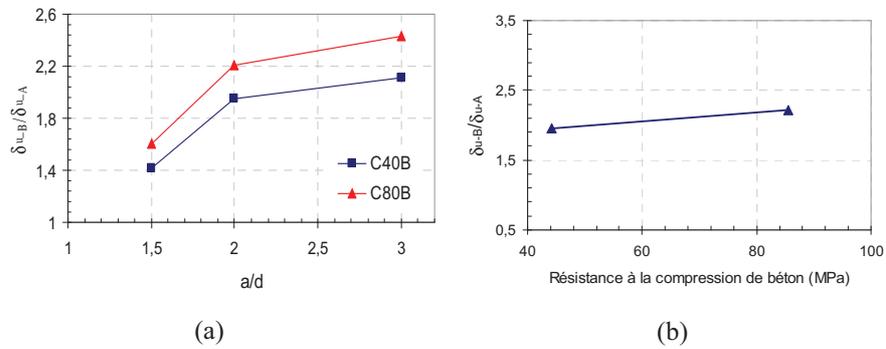
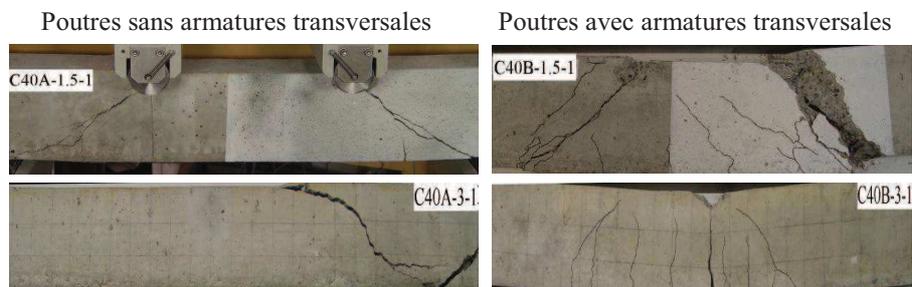


Figure 4. (a) Effet du rapport a/d sur $\delta_{u-B}/\delta_{u-A}$; (b) Effet de la résistance à la compression de béton sur $\delta_{u-B}/\delta_{u-A}$

2.3. Modes de rupture

La figure 5 révèle l'influence des armatures transversales sur le mode de rupture qui évolue d'une rupture brutale par cisaillement dans la série A où il n'y a pas d'armatures transversales en une rupture plus ductile de flexion quand les armatures transversales ont été utilisées. Donc la présence des armatures transversales a changé la nature de la rupture par cisaillement en une rupture par cisaillement-flexion; pour les poutres: C40A - 2 - 1 et C40B - 2 - 1; C40A - 3 - 1 et C40B - 3 - 1; C80 - 2 - 1 et C80B - 2 - 1; C80A - 3 - 1 et C80B - 3 - 1. Les modes de rupture pour les poutres sans armatures transversales sont cisaillement-compression et flexion-cisaillement donc à dominance cisaillement. Pour les poutres avec armatures transversales, le mode de rupture a changé de cisaillement à cisaillement-flexion (à dominance flexion), à l'exception des poutres ayant une courte portée de cisaillement ($a/d = 1.5$) et ce quel que soit le type de béton.



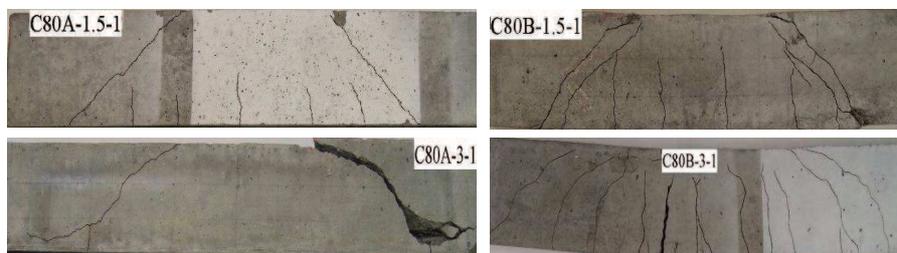
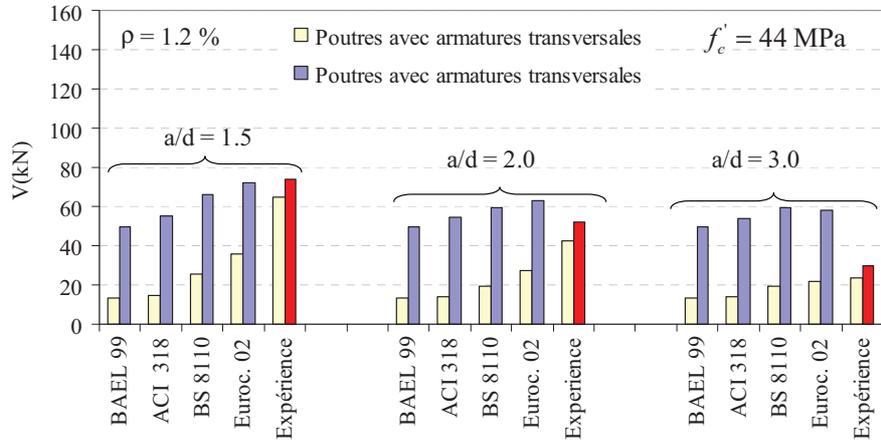


Figure 5. *Faciès de fissures des poutres avec et sans armatures transversales*

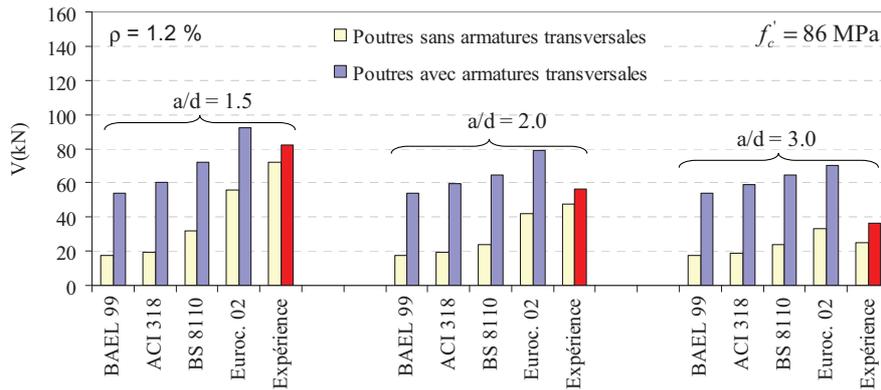
3. Comparaison des résultats expérimentaux avec les différents règlements

Une comparaison entre les prédictions obtenues à partir des différents règlements (ACI318, BS8110, BAEL et Eurocode 2) et les résultats expérimentaux concernant la résistance à l'effort tranchant pour les poutres avec et sans armatures transversales est donnée par la figure 6. Pour faciliter la comparaison, tous les facteurs de sécurité ont été pris égaux à 1.0

En général, on remarque que la capacité portante en effort tranchant n'est que faiblement améliorée et ce pour les deux types de béton (C40B et C80B). En revanche les quatre modèles prédisent une augmentation considérable quand les armatures transversales sont utilisées, allons jusqu'à l'insécurité (figure 6). Donc, la contribution des armatures transversales (variant entre 15 % et 45 %) est amplement exagérée par les règlements qui donnent des contributions variant entre 70 % et 300 %. Ceci est probablement dû au fait que les modèles considérés se basant sur l'analogie du treillis de Mörsh dans la détermination de la contribution des armatures transversales à l'effort tranchant, lequel est jugé comme conservateur. Il est basé sur l'épuisement des armatures transversales au moment où dans beaucoup de cas, c'est l'écrasement du béton qui initie la rupture le long de la fissure diagonale, comme c'est le cas des poutres à courtes portées de cisaillement.



a). Poutres en Béton ordinaire (C40)



b). Poutres en Béton à hautes performances (C80)

Figure 6. Courbes charge-flèche des poutres sans et avec armatures transversales

4. Conclusion

1. La présence des armatures transversales augmente la capacité portante, le rapport P_{u-B}/P_{u-A} des poutres varie de 1.14 à 1.43 pour le cas des poutres en C80, tandis que pour les poutres en C40, ce rapport varie de 1.15 à 1.25.

2. Le rapport de la flèche $\delta_{u-B}/\delta_{u-A}$ augmente lorsque le rapport a/d augmente. Les rapports $\delta_{u-B}/\delta_{u-A}$ des poutres C80B - 1.5 - 1, C80B - 2 - 1 et C80B - 3 - 1 sont 1.60, 2.21 et 2.43, respectivement. De même pour des poutres en C40: les rapports

des poutres C40B - 1.5 - 1, C40B - 2 - 1 et C40B - 3 - 1 sont 1.42, 1.95 et 2.11, respectivement.

3. les poutres avec armatures transversales (à l'exception des poutres ayant $a/d = 1.5$) se sont bien ruinées par flexion à mi-portée, quel que soit le type de béton.

4. La capacité portante en effort tranchant n'est pas considérablement améliorée (de 15 à 45 %) par la présence des armatures transversales, contrairement à ce que prédisent les règlements de calcul en utilisation à travers le monde; des améliorations pouvant atteindre 300 % sont prédites par les règlements considérés dans ce travail.

5. Bibliographie

- ACI Committee 318., *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary 318R-05*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2005, 430 p, 2005.
- BAEL ., *Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états-limites*, Editions EYROLLES, France, 330 p, 1999.
- BS8110., *Structural Use of Concrete, Part1, Code of Practice for Design and Construction*, British Standards Institution, London, 173 p, 1997.
- Chien-H L, and Wen-C L., « Shear Behavior of High Workability Concrete Beams », *ACI Structural Journal*, vol. 100, n° 5, 2003, p. 599-608.
- Eurocode 2., *Design of Concrete Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*, ENV 1992-1-1, 100 p, 1992.
- Haddadin M., Hong S., Mattock A., « Stirrups effectiveness in reinforced concrete beams with axial force », *Proceedings, ASCE*, vol. 97, 1971, p. 2277-2297.
- Pendyala, R.S., Mendis, P., « Experimental study on shear strength of high-strength concrete beams », *ACI Structural Journal*, vol. 97, n° 4, 2000, p. 564-571.
- Prodromos, Z.D., « Shear strength and minimum shear reinforcement of reinforced concrete slender beams », *ACI Structural Journal*, vol. 100, n° 2, 2003, p. 203-214.
- Roller J., Russel H., « Shear Strength of High Strength Concrete Beams with Web reinforcement », *ACI Structural Journal*, vol. 87, n° 2, 1990, p. 191-198.
- Sarsam, K.F., Al-Musawi, J.M.S., « Shear design of high- and normal strength concrete beams with web reinforcement », *ACI Structural Journal*, vol. 89, n° 6, 1992, p. 658-664.
- Xie Y., Ahmad S., Yu T., Hion S., Chung W., « Shear ductility of reinforced concrete beams of normal and high strength concrete », *ACI Structural Journal*, vol. 91, n° 2, 1994, p. 140-149.
- Zsutty T., « Shear strength prediction for separate categories of simple beam tests », *ACI journal, Proceedings*, vol. 68, n° 2, 1971, p. 138-143.