

Chapitre 5

EFFET DU CONFINEMENT SUR LA DUCTILITE LOCALE

5.1 INTRODUCTION

L'objectif de cette étude paramétrique est de mettre en évidence l'effet des paramètres de confinement sur la ductilité locale des poutres en béton armé. Dans ce contexte, il est intéressant de rappeler les différents paramètres influant le confinement (pression latérale), à savoir :

- La limite élastique des armatures transversales (f_{yh}) ;
- Le diamètre des armatures transversales (D) ;
- L'espacement entre les armatures transversales (S) ;
- Le nombre des armatures longitudinales tendues et/ou comprimées ;
- La disposition (configuration) des armatures longitudinales ;
- L'ajout des épingles et/ou des étriers.

Dans ce chapitre, on décrit tout d'abord les détails et le type de la section étudiée. Ensuite, dans un premier lieu, l'effet des paramètres qui n'ont aucune influence sur la pression latérale (σ_2) sera discuté. Dans le second lieu, on examine l'incidence des paramètres du confinement sur la pression latérale (σ_2), la résistance du béton (f_{ck}), les déformations élastique et ultime du béton (ε_{oc} et ε_{cuc}), les profondeurs de l'axe neutre (X_y et X_u), les courbures neutre (φ_y et φ_u), et le facteur de la ductilité locale μ_φ dans le cas d'une section balancée ($\rho = 1\%$). L'analyse sera réalisée sur des sections avecun béton ordinaire et à haute résistance égalent aux 40 et 90 MPa, respectivement.

5.2. DESCRIPTION DES SECTIONS ÉTUDIÉES

La poutre sélectionnée dans cette étude est de longueur de 4m et une section transversale de (600 mm x 300 mm). La figure 5.1 présente le schéma détailléde cette poutre sélectionnée.

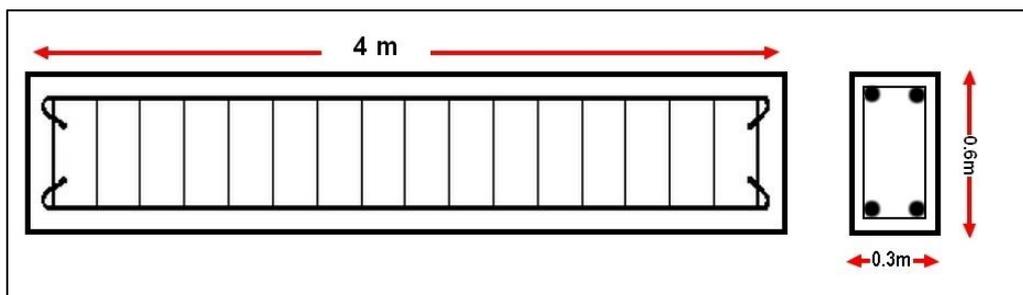


Figure 5.1 : Détails de la poutre étudiée.

Selon les différents règlements et codes de béton armé, il existe trois types de section à travers :

- ***Sections insuffisamment armées***

Les sections insuffisamment armées sont définies avec des pourcentages d'armatures longitudinales inférieurs ou égaux au pourcentage minimal (ρ_{min}) adopté par les codes réglementaires. Dans le cas du règlement parasismique Algérien (RPA 99/V-2003, 2003), pour les poutres $(\rho+\rho')_{min} = 0,5 \%$. Les sections insuffisamment armées sont déconseillées car elles ont une ductilité très élevée (excès de ductilité).

- ***Sections sous armées (balancée)***

Les sections sous-armées sont définies avec des pourcentages d'armatures longitudinales supérieurs au pourcentage minimal (ρ_{min}), et inférieurs au pourcentage de balancement (ρ_b) ou au pourcentage maximal (ρ_{max}), comme adopté dans certains règlements. Le règlement parasismique Algérien (RPA 99/V-2003, 2003) limite le pourcentage d'armatures longitudinales $(\rho+\rho')_{max}$ par 4 %, et le code ACI (ACI 318, 2014) limite le pourcentage d'armatures tendues ρ_{max} par 2,5 %.

Dans ce cas, la rupture est caractérisée par une déformation importante des aciers tendus, par une fissuration excessive et importante du béton tendu et par une grande flèche (Chemrouk, 2010).

- ***Sections armées par excès***

Les sections armées par excès, fortement armées ou sur armées sont définies avec des pourcentages supérieurs au pourcentage de balancement (ρ_b) ou au pourcentage maximal (ρ_{max}) limité par les codes réglementaires. Dans le cas des sections fortement armées, la rupture se produit dans la zone comprimée par l'écrasement du béton ; l'allongement de l'armature tendue n'entre pas en considération. Cette rupture est caractérisée par une petite flèche et par l'absence des fissurations importantes dans la zone tendue.

Dans la suite, la section étudiée est considérée comme une section balancée avec un pourcentage d'armatures tendues $\rho = 1 \%$.

Les paramètres considérés dans cette analyse sont :

1. La limite élastique des armatures transversales (f_{yh}) :

La limite élastique des armatures transversales sera variée de 300 à 600 MPa.

2. Le diamètre des armatures transversales (D) :

Le diamètre des cadres sera varié de 6 jusqu'à 12 mm.

3. L'espace entre les armatures transversales (S) :

L'espace entre les armatures transversales sera varié de 50 à 350 mm passant par l'espace maximal (S_{max}).

4. Le nombre des armatures longitudinales tendues et/ou comprimées :

Le nombre des armatures longitudinales sera varié de 2 à 5 barres dans les deux parties tendue et comprimée.

5. La disposition (configuration) des armatures longitudinales ;

Quatre types de configuration seront étudiés dans cette section.

6. L'ajout des épingles et/ou des étriers :

L'effet de l'ajout des cadres et des étriers dans la poutre sera étudié dans cette section.

5.3. EFFET DES PARAMETRES DE CONFINEMENT SUR LA DUCTILITE LOCALE

Avant de discuter l'effet des paramètres de confinement sur la ductilité locale, il faut passer par l'effet des paramètres suivants :

- La résistance du béton (f_{ck}) ;
- La limite élastique des aciers longitudinaux (f_{yk}) ;
- Les taux des armatures tendues et comprimées ρ et ρ' .

5.3.1. Effet de la résistance du béton

Le tableau 5.1 présente les résultats obtenus de l'analyse de l'effet de la résistance du béton f_{ck} sur la ductilité locale. D'après ce tableau, on observe que la résistance du béton n'a aucune influence sur la pression latérale σ_2 , mais elle a une grande incidence sur la ductilité locale, où le facteur de la ductilité locale μ_ϕ augmente avec l'augmentation de la résistance du béton jusqu'à une résistance égale à 50 MPa, après cette résistance le facteur de la ductilité locale se diminue

petit à petit est deviens presque stable jusqu'à une résistance égale à 60MPa. Au-delà de cette valeur, le facteur de la ductilité locale retourne à améliorer.

Tableau 5.1 : Effet de la résistance du béton ($f_{yk}= 400$ MPa, $\rho = 1$ % et $\rho' / \rho = 0.5$).

f_{ck} (MPa)	σ_2 (MPa)	μ_ϕ
30	0.15	11.63
40	0.15	15.94
50	0.15	20.38
60	0.15	19.94
70	0.15	21.05
80	0.15	23.24
90	0.15	25.81

La figure 5.2 qui présente la variation du facteur μ_ϕ en fonction de la résistance du béton f_{ck} prouve les remarques indiquées précédemment. La courbe de μ_ϕ en fonction de f_{ck} obtenue par Lee 2013b présenté dans la figure 5.3 confirme ces déductions retenues.

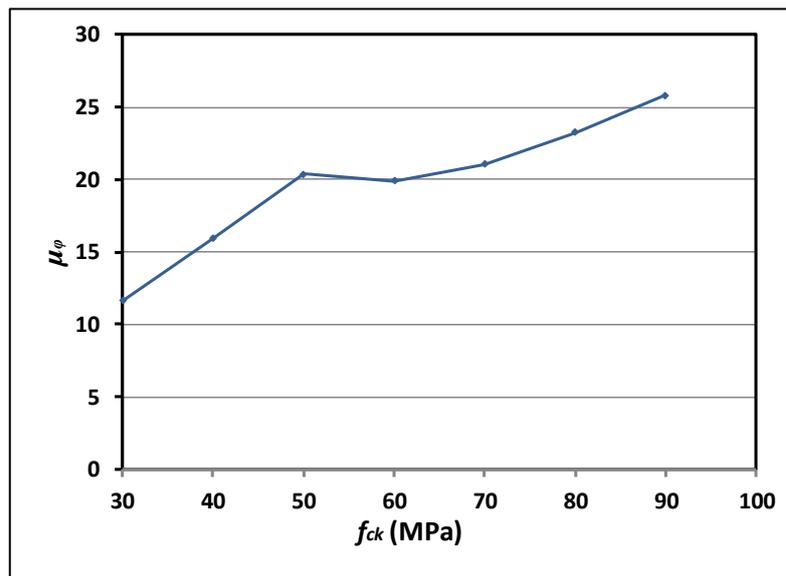


Figure 5.2 : Effet de la résistance du béton sur la ductilité locale.

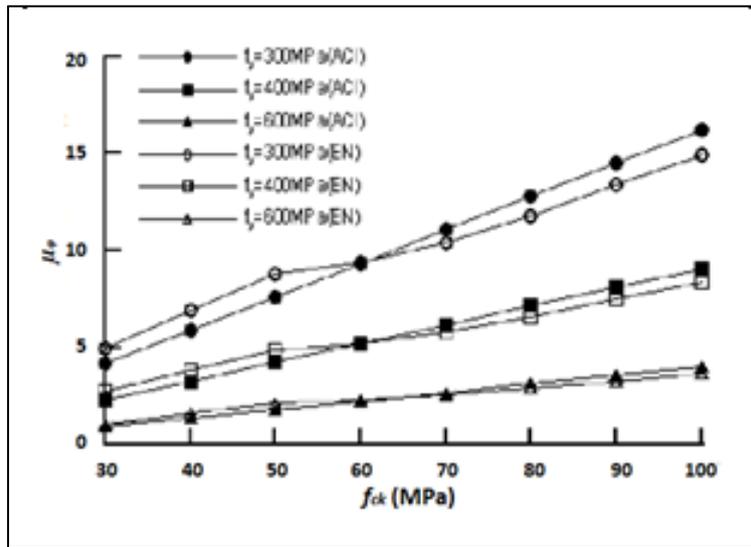


Figure 5.3 : Effet de la résistance du béton sur la ductilité locale (Lee 2013b).

Les résultats expérimentaux de Lin et Lee (2001) présentés dans le deuxième chapitre (Tableau 2.2) confirment que l'augmentation de la résistance du béton augmente la ductilité locale des poutres en béton armé (H1 ; H2) et (T1 ; T2). Dans le même contexte, les digrammes moment-courbure tracés par Pecce et Fabbrocino (1999) (Figure 2.1) confirme aussi l'effet positif de la résistance du béton, où les poutres avec un béton à haute résistance (BHR) ont une phase plastique plus longue comparativement aux poutres avec un béton normal (N), par conséquent ces poutres ont une ductilité plus.

5.3.2. Effet de la limite élastique des armatures longitudinales

Le deuxième paramètre qui influe la ductilité locale des poutres en béton armé est la limite élastique des armatures longitudinales f_{yk} . Le tableau 5.2 revue les résultats obtenus, d'après ce tableau, on remarque que la limite élastique des armatures longitudinales n'affecte pas la pression latérale σ_2 , par contre à un effet négatif sur la ductilité locale, où le facteur de la ductilité locale μ_φ diminue avec l'augmentation de la limite élastique des armatures longitudinales.

Tableau 5.2 : Effet de la limite élastique des armatures longitudinales ($f_{ck}= 40$ et 90 MPa, $\rho = 1\%$ et $\rho' / \rho = 0.5$).

f_{yk} (MPa)	σ_2 (MPa)	μ_ϕ	
		f_{ck} = 40 MPa	f_{ck} = 90 MPa
300	0.15	30.78	47.89
350	0.15	21.67	34.43
400	0.15	15.94	25.81
450	0.15	12.12	19.97
500	0.15	9.47	15.84
550	0.15	7.57	12.83
600	0.15	6.16	10.56

Les courbes de la figure 5.4 représentent la variation du facteur μ_ϕ en fonction de la limite élastique f_{yk} , on remarque que les deux courbes descendent complètement avec l'augmentation de la limite élastique f_{yk} . D'autres manière, on peut dire que la ductilité locale des poutres en béton armé est inversement proportionnelle avec la limite élastique des armatures longitudinales. Les résultats de Bouzid et Kassoul (2017), Arslan et Cihanli (2010) et Lee 2013b présentés dans les figures 5.5a, b, c et d, respectivement confirment cette déduction.

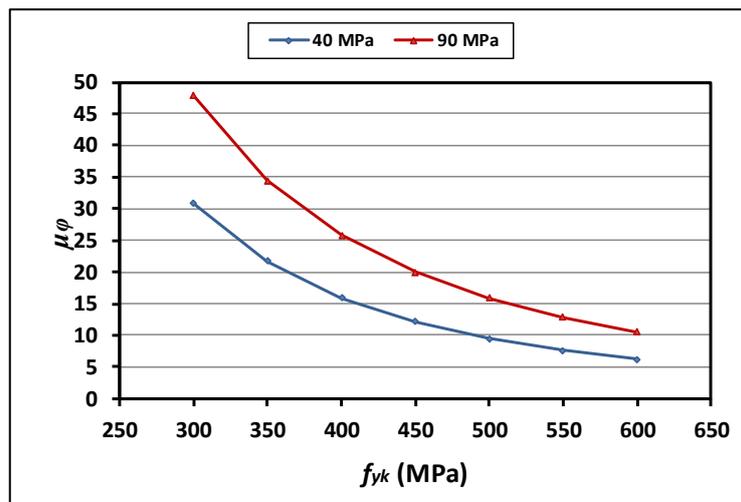


Figure 5.4 : Effet de la limite élastique des armatures longitudinales.

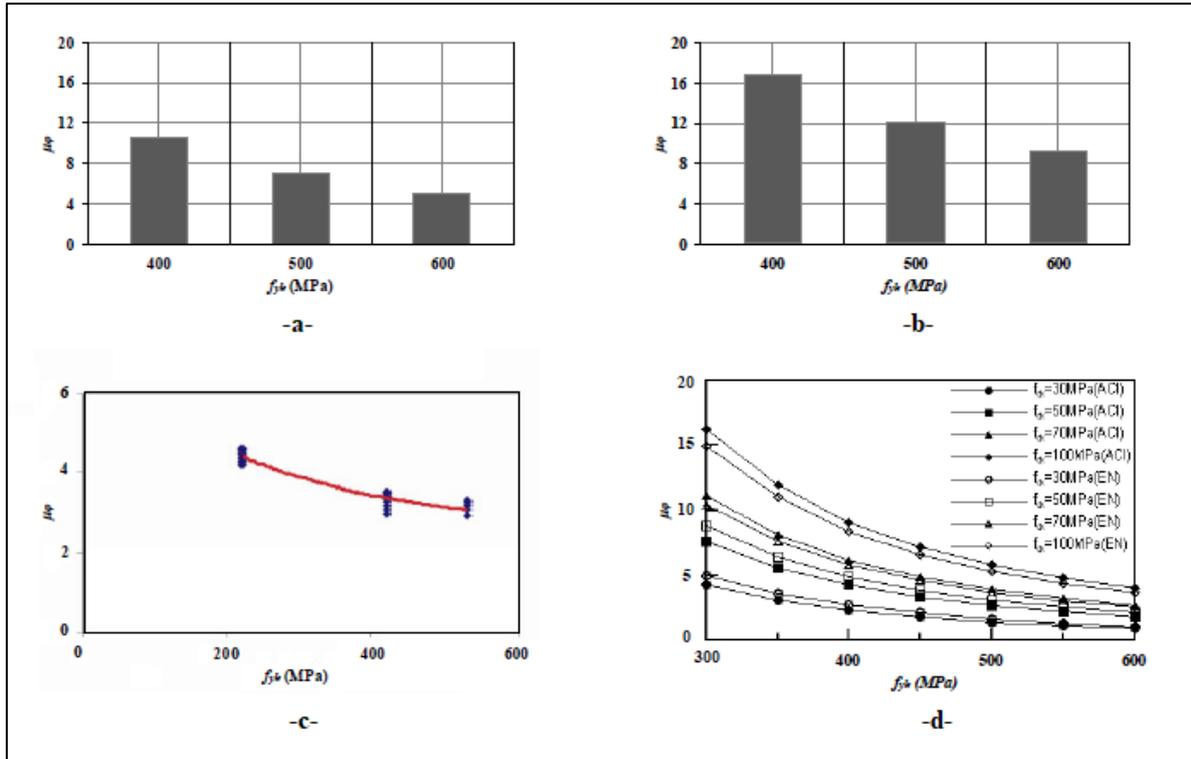


Figure 5.5 : Effet de la limite élastique des armatures longitudinales d'autres chercheurs.

5.3.3. Effet du taux d'armatures tendues

Comme il est mentionné dans le deuxième chapitre, les différents codes parasismiques ont donné une grande importance au taux d'armatures tendues, ceci par la limitation de ce paramètre afin de fournir un niveau de ductilité minimal aux poutres en béton armé. On rappelle que le règlement parasismique Algérien RPA (RPA99/V-2003, 2003) limite l'utilisation du taux d'armature longitudinales ($\rho + \rho'$) entre 0.5 et 4 % dans les zones courantes et jusqu'à 6 % dans les zones de recouvrement, dans ce contexte, la présente analyse aura respecté cet intervalle. Les résultats présentés dans le tableau 5.3 illustrent l'effet du taux d'armatures tendues sur la ductilité locale. La première remarque retenue du tableau indique que ce taux n'affecte pas la pression latérale σ_2 , la deuxième remarque indique que le taux ρ diminue agressivement la ductilité de la poutre, après la valeur maximale proposée par le RPA (RPA99/V-2003, 2003) la poutre n'est plus ductile surtout pour la résistance ordinaire f_{ck} égale à 40 MPa.

Tableau 5.3 : Effet du taux d'armatures tendues ($f_{ck}= 40, 90 \text{ MPa}$, $f_{yk}= 400 \text{ MPa}$ et $\rho' / \rho = 0.5$).

ρ (%)	$(\rho + \rho')$ (%)	σ_2 (MPa)	μ_ϕ	
			f_{ck} = 40 MPa	f_{ck} = 90 MPa
0,33	0.5	0.15	60.56	86.92
0.67	1	0.15	26.74	40.99
1.00	1.5	0.15	15.94	25.81
1.33	2	0.15	10.85	18.31
1.67	2.5	0.15	8.01	13.89
2.00	3	0.15	6.24	11.00
2.33	3.5	0.15	5.07	8.99
2.67	4	0.15	4.24	7.53
3.00	4.5	0.15	3.63	6.42
3.33	5	0.15	3.17	5.56
3.67	5.5	0.15	2.81	4.89
4.00	6	0.15	2.51	4.34

La figure 5.6 qui affiche les courbes du facteur μ_ϕ en fonction du taux ρ prouve que l'amélioration de ρ a un effet négatif sur la ductilité locale.

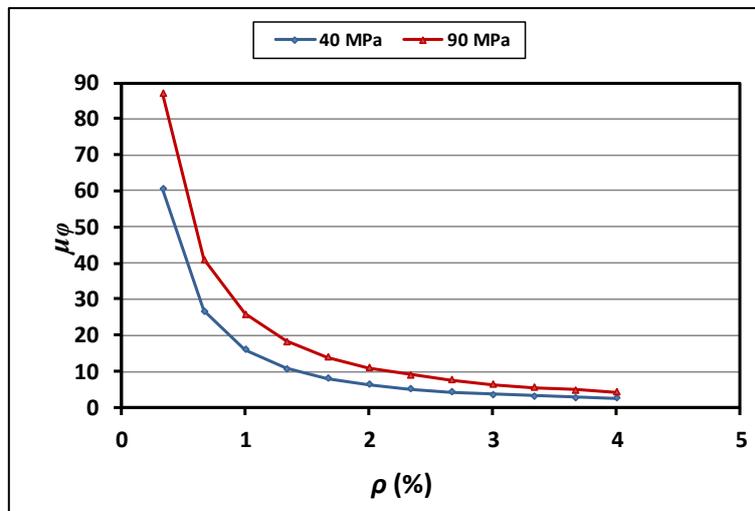


Figure 5.6 : Effet du taux d'armatures tendues.

Les résultats expérimentaux de Pam *et al.* (2001a) et Mohammad *et al.* (2013) illustrés dans le tableau 5.4 confirment cette l'influence négative du taux d'armatures tendues ρ sur la ductilité locale.

Tableau 5.4 : Résultats des essais (Pam *et al.* 2001a et Mohammad *et al.* 2013).

	Série	f_{cu} (MPa)	d (mm)	ρ (%)	μ_ϕ
Pam <i>et al.</i>, 2001a	1	37.4	264	0.76	5.99
		36.8	264	1.14	4.97
		36.4	260	1.89	3.61
	2	42.3	260	1.89	5.19
		43.2	260	2.83	3.46
	3	58.6	260	2.49	3.05
		58.6	256	3.53	2.73
	4	58.8	256	4.10	2.05
58.8		256	5.50	1.92	
Mohammad <i>et al.</i>, 2013		f_{ck} (MPa)			
	1	66.70	256	1.25	5.35
		66.20	258	2.03	4.20
	2	68.65	250	2.52	2.66
		68.65	250	3.05	1.20
f_{cu} : La résistance à la compression d'un cube de béton.					

D'autre part, les résultats théoriques de Bouzid et Kassoul (2016) et de Pam *et al.* (2001b) présentés dans la figure 5.7a et b, respectivement, confirment aussi notre remarque déduite, où les courbes des différents chercheurs montrent une relation inversement proportionnelle entre le facteur μ_ϕ et le taux ρ .

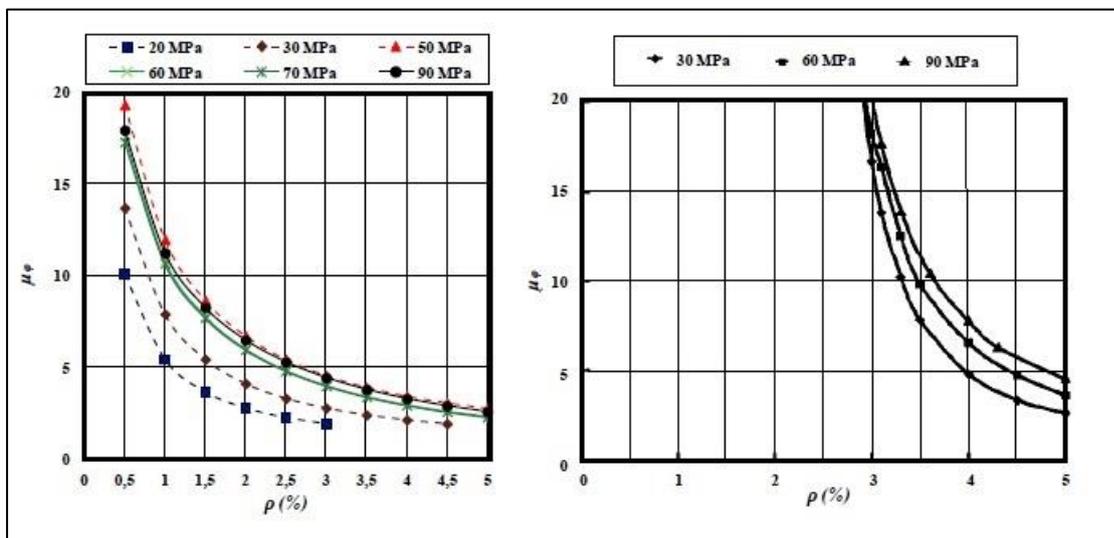


Figure 5.7 : Effet du taux d'armatures tendues d'autres chercheurs.

5.3.4. Effet du taux d'armatures comprimées

Le règlement parasismique Algérien RPA (RPA99/V-2003, 2003) exige que le rapport ρ'/ρ doive être au minimum égale à 0.5, c'est-à-dire, le taux d'armatures comprimées est supérieur ou égale à la moitié du taux d'armatures tendues. Dans ce cadre, le rapport ρ'/ρ sera varié de 0.5 jusqu'à 0.9. Les résultats affichés dans le tableau 5.5 illustrent l'effet du taux d'armatures comprimées sur la ductilité locale. Les remarques qui peuvent décelés du tableau indiquent que :

- Le taux d'armatures comprimées n'a aucune influence sur la pression latérale ;
- Le taux d'armatures comprimées affecte positivement le facteur de la ductilité locale ;
- Si le rapport ρ'/ρ dépasse 0.7, la poutre devient pratiquement plus ductile, où il y a un excès de ductilité, néanmoins ce type de poutre n'est pas utile.

Tableau 5.5 : Effet du taux d'armatures comprimées ($f_{ck}= 40$ et 90 MPa, $f_{yk}= 400$ MPa et $\rho = 1\%$).

ρ'/ρ	ρ' (%)	$(\rho + \rho')$ (%)	σ_2 (MPa)	μ_ϕ	
				40 MPa	90 MPa
0.5	0.5	1.5	0.15	15.94	25.81
0.6	0.6	1.6	0.15	20.26	32.37
0.7	0.7	1.7	0.15	27.42	43.31
0.8	0.8	1.8	0.15	41.70	65.17
0.9	0.9	1.9	0.15	84.43	130.74

La figure 5.8 présente les courbes du facteur μ_ϕ en fonction du taux ρ' . Cette figure montre que l'augmentation du taux ρ' a un effet positif sur la ductilité locale.

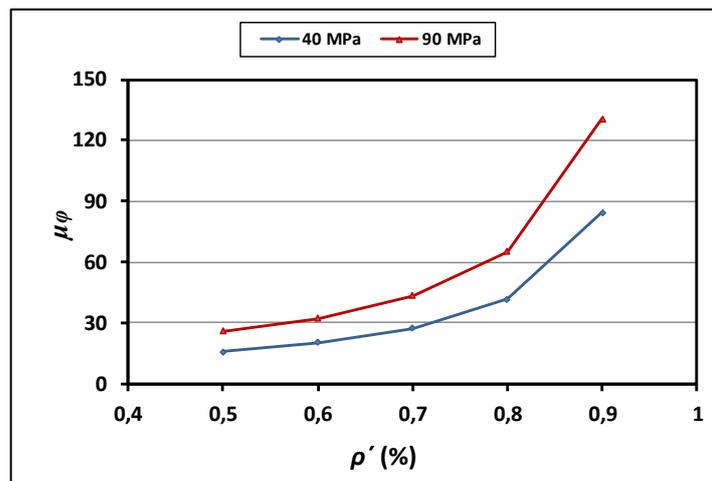


Figure 5.8 : Effet du taux d'armatures comprimées.

Par ailleurs, les résultats expérimentaux de Maghsoudi et Bengar (2006) et Maghsoudi et Sharifi (2009) affirment l'influence positive du taux d'armatures comprimées sur la ductilité locale, où l'ajout des armatures comprimées augmente le facteur de la ductilité locale deux fois plus.

Tableau 5.6 : Résultats des essais (Maghsoudi et Bengar 2006 et Maghsoudi et Sharifi 2009).

	f_{ck} (MPa)	f_{yk} (MPa)	d (mm)	d' (mm)	ρ (%)	ρ' (%)	μ_ϕ
Maghsoudi et Bengar 2006	72.80	401	250	47	2.51	-	2.82
	71.45	401	250	47	2.51	1.24	5.60
Maghsoudi et Sharifi 2009	71.00	400	256	40	4.80	-	1.40
	73.65	400	256	40	4.80	2.40	3.38

5.3.5. Effet de la limite élastique des armatures transversales

Le tableau 5.7 présente l'effet de la limite élastique des armatures transversales sur la ductilité locale. D'après les résultats de ce tableau, on remarque que la limite élastique (f_{yh}) a un effet positif sur la pression latérale (σ_2), où l'augmentation de f_{yh} de 300 à 600 MPa augmente parallèlement la pression latérale σ_2 de 0.11 jusqu'à 0.22 MPa. Par conséquent, l'amélioration de la pression latérale (confinement) :

- Augmente les propriétés du béton à savoir :
 - La résistance du béton f_{ck} , où on observe une amélioration de 1.1 MPa ;
 - Les déformations élastique et ultime ε_{0c} et ε_{cuc} , respectivement.
- Diminue les profondeurs de l'axe neutre X_y et X_u ;
- Augmente la courbure ultime ϕ_u par contre elle diminue la courbure élastique ϕ_y ;
- Augmente le facteur de la ductilité locale de 15.1 à 17.5 et de 24.8 à 27.8 pour f_{ck} égale à 40 et 90 MPa, respectivement.

La représentation des résultats du facteur μ_ϕ en fonction de la limite élastique f_{yh} dans la figure 5.9 confirme l'effet positif de cette limite élastique sur la ductilité locale, où, on remarque un développement linéaire de la forme suivante :

$$\mu_\phi = A_1 f_{yh} + B_1 \quad (5.1)$$

D'un point de vue structurale, la limite élastique des aciers transversaux augmente la pression latérale (confinement), cela rétrécit la zone comprimée, par conséquent elle rend la

poutre plus ductile. Les résultats expérimentaux de Lin et Lee (2001) affirme l'influence positive de la limite élastique des armatures transversales sur la ductilité locale, où la comparaison entre les deux poutres T5 et T6 montre que l'augmentation de la limite élastique f_{yh} de 362 vers 441 augmente le facteur de la ductilité locale μ_ϕ minimal et maximal de 4.71 jusqu'à 5.22 et de 61.61 jusqu'à 68.65, respectivement.

Tableau 5.7 : Effet de la limite élastique des armatures transversales ($f_{ck} = 40$ et 90MPa , $f_{yk} = 400\text{MPa}$, $\rho = 1\%$ et $\rho' / \rho = 0.5$).

f_{ck} (MPa)	f_{yh} (MPa)	σ_2 (MPa)	f_{ckc} (MPa)	ϵ_{oc} (‰)	ϵ_{cuc} (‰)	X_y (mm)	X_u (mm)	$\phi_y \cdot 10^{-5}$ (1/mm)	$\phi_u \cdot 10^{-5}$ (1/mm)	μ_ϕ
40	300	0.11	40.55	2.06	4.05	207.89	104.48	0.6022	9.10	15.12
	350	0.13	40.64	2.06	4.14	207.65	104.31	0.6018	9.34	15.53
	400	0.15	40.73	2.07	4.23	207.42	104.15	0.6014	9.58	15.94
	450	0.16	40.82	2.08	4.32	207.18	104.00	0.6009	9.82	16.35
	500	0.18	40.91	2.09	4.41	206.95	103.86	0.6005	10.06	16.76
	550	0.20	41.01	2.10	4.51	206.72	103.72	0.6001	10.30	17.17
	600	0.22	41.10	2.11	4.60	206.49	103.60	0.5997	10.54	17.58
90	300	0.11	90.55	2.63	2.84	137.05	83.12	0.4960	10.06	24.78
	350	0.13	90.64	2.64	2.88	136.98	82.98	0.4963	12.30	25.29
	400	0.15	90.73	2.64	2.93	136.91	82.84	0.4962	12.55	25.81
	450	0.16	90.82	2.65	2.97	136.84	82.71	0.4961	12.80	26.32
	500	0.18	90.91	2.65	3.01	136.77	82.59	0.4960	13.06	26.83
	550	0.20	91.01	2.66	3.05	136.71	82.47	0.4960	13.31	27.35
	600	0.22	91.10	2.66	3.09	136.64	82.35	0.4959	13.56	27.86

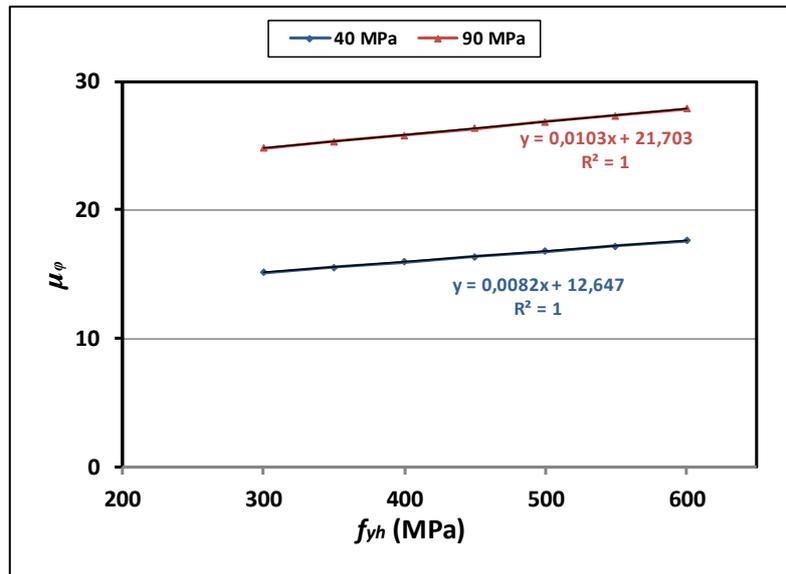


Figure 5.9 : Effet de la limite élastique des armatures transversales.

5.3.6. Effet du diamètre des armatures transversales

Le tableau 5.8 illustre l'effet du diamètre des armatures transversales sur la ductilité locale. Les résultats du tableau montrent que le diamètre (D) a un effet positif sur la pression latérale (σ_2), cet effet positif est clair, où l'accroissement du diamètre (Φ) de 0 à 12 mm augmente la pression latérale σ_2 de 0 jusqu'à 0.28 MPa. Les résultats du tableau 5.8 montrent aussi que :

- Le diamètre (D) augmente les propriétés du béton à savoir :
 - La résistance du béton f_{ck} ;
 - Les déformations élastique et ultime ε_{0c} et ε_{cuc} , respectivement.
- Augmente la profondeur de l'axe neutre et la courbure à la fin la phase élastique X_y et φ_u , respectivement ;
- Diminue la profondeur de l'axe neutre et la courbure ultime X_u et φ_u , respectivement ;
- Augmente le facteur de la ductilité locale de 11.5 à 18.7 et de 23.5 à 28.5 pour f_{ck} égale à 40 et 90 MPa, respectivement.

L'illustration des résultats du tableau 5.8 dans la figure 5.10 indique une relation linéaire positive entre le facteur de la ductilité locale μ_ϕ et le diamètre des armatures transversales Φ_t , cette progression linéaires s'écrit comme suit :

$$\mu_\phi = A_2 f_{yh} + B_2 \quad (5.2)$$

Les différentes études sur le comportement du béton confiné montrent que l'accroissement du diamètre des armatures transversales augmente la pression latérale (confinement), en

parallèle il augment les propriétés du béton, ça résulte une amélioration de la ductilité locale de la poutre.

Tableau 5.8 : Effet du diamètre des cadres ($f_{ck} = 40$ et 90 MPa, $f_{yk} = 400$ MPa, $\rho = 1\%$ et $\rho' = 0.5$).

f_{ck} (MPa)	Φ (mm)	σ_2 (MPa)	f_{ckc} (MPa)	ϵ_{oc} (‰)	ϵ_{cuc} (‰)	X_y (mm)	X_u (mm)	$\varphi_y \cdot 10^{-5}$ (1/mm)	$\varphi_u \cdot 10^{-5}$ (1/mm)	μ_φ
40	0	0.00	40	2.00	3.5	202,14	111,51	0,5920	6,80	11,48
	6	0.09	40.44	2.04	3.94	206.33	104.87	0.5994	8.77	14.64
	7	0.12	40.58	2.06	4.08	206.89	104.46	0.6004	9.17	15.27
	8	0.15	40.73	2.07	4.23	207.42	104.15	0.6014	9.58	15.94
	9	0.18	40.90	2.09	4.40	207.94	103.91	0.6023	10.01	16.62
	10	0.21	41.07	2.11	4.57	208.45	103.72	0.6032	10.45	17.32
	11	0.25	41.24	2.13	4.74	208.96	103.57	0.6042	10.88	18.01
	12	0.28	41.42	2.14	4.92	209.48	103.47	0.6051	11.31	18.69
90	0	0.00	90	2.60	2.60	132,84	82,50	0,4912	11,55	23,52
	6	0.09	90.44	2.63	2.79	135.93	82.90	0.4950	12.20	24.65
	7	0.12	90.58	2.63	2.86	136.42	82.88	0.4956	12.49	25.20
	8	0.15	90.73	2.64	2.93	136.91	82.84	0.4962	12.80	25.81
	9	0.18	90.90	2.65	3.00	137.40	82.81	0.4968	13.14	26.46
	10	0.21	91.07	2.66	3.07	137.90	82.77	0.4974	13.50	27.14
	11	0.25	91.24	2.67	3.15	138.40	82.75	0.4980	13.86	27.82
	12	0.28	91.42	2.68	3.23	138.90	82.73	0.4986	14.21	28.49

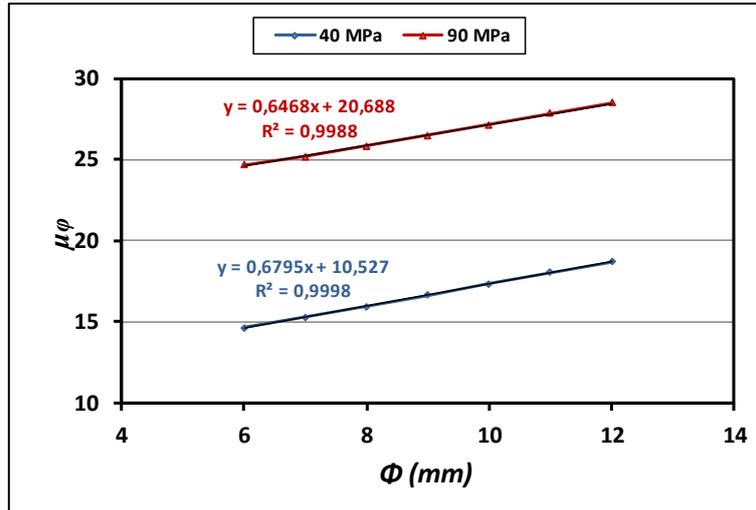


Figure 5.10 : Effet du diamètre des armatures transversales.

5.3.7. Effet de l'espacement entre les armatures transversales

Avant de discuter l'effet de l'espacement (S) sur la ductilité locale, il faut tout d'abord rappeler que selon le règlement parasismique algérien (RPA 99/V-2003, 2003) cet espacement doit respecter la condition suivante :

- Dans la zone nodale et en travée, si les armatures comprimées sont nécessaires :

$$S_{max} \leq \min\left(\frac{h}{4}; 12\Phi_l\right) \quad (5.3)$$

- En dehors de la zone nodale :

$$S_{max} \leq \frac{h}{2} \quad (5.4)$$

Avec : Φ_l est le diamètre longitudinal minimal.

Dans notre cas :

$$\begin{cases} S_{max} \leq \min\left(\frac{600}{4}; 12 * 22\right) \\ S_{max} \leq \min(150; 264) \\ S_{max} = 150 \text{ mm} \end{cases} \quad (5.5)$$

Les résultats obtenus d'après l'analyse sont présentés dans le tableau 5.9 Basant sur les résultats du tableau, on peut dire que l'augmentation de l'espacement S a diminuée fortement la pression latérale σ_2 . Après la valeur de S_{max} qui égale à 150 mm, on remarque que la pression σ_2 devient presque nulle. Les autres résultats de ce tableau indiquent :

- Un effet négatif d'espacement S sur la résistance f_{ck} , la déformation élastique ε_{0c} et la déformation ultime du béton ε_{cuc} .
- Un effet positif de l'espacement S sur les profondeurs de l'axe neutre X_u et X_y .
- Un effet positif de l'espacement S sur la courbure élastique φ_y , par contre un effet négatif sur la courbure ultime φ_u .
- Un effet négatif sur le facteur de la ductilité locale.

Tableau 5.9 : Effet de l'espacement ($f_{ck} = 40$ et 90 MPa, $f_{yk} = 400$ MPa, $\rho = 1\%$ et $\rho' / \rho = 0.5$).

f_{ck} (MPa)	S (mm)	σ_2 (MPa)	f_{ckc} (MPa)	ε_{0c} (‰)	ε_{cuc} (‰)	X_y (mm)	X_u (mm)	$\varphi_y \cdot 10^{-5}$ (1/mm)	$\varphi_u \cdot 10^{-5}$ (1/mm)	μ_φ
40	50	0.35	41.77	2.18	5.27	204.80	101.14	0.5967	12.81	21.47
	100	0.15	40.73	2.07	4.23	207.42	104.15	0.6014	9.58	15.94
	150	0.08	40.39	2.04	3.89	208.29	105.78	0.6029	8.50	14.11
	200	0.05	40.23	2.02	3.73	208.71	106.92	0.6037	7.95	13.17
	250	0.03	40.14	2.01	3.64	208.96	107.81	0.6042	7.61	12.59
	300	0.02	40.08	2.01	3.58	209.11	108.53	0.6044	7.38	12.20
	350	0.01	40.04	2.00	3.54	209.21	109.13	0.6046	7.21	11.92
90	50	0.35	91.77	2.70	3.39	136.14	81.52	0.4952	15.73	31.77
	100	0.15	90.73	2.64	2.93	136.91	82.84	0.4962	12.80	25.81
	150	0.08	90.39	2.62	2.77	137.17	83.38	0.4965	11.87	23.90
	200	0.05	90.23	2.61	2.70	137.29	83.67	0.4966	11.42	22.99
	250	0.03	90.14	2.61	2.66	137.36	83.84	0.4967	11.16	22.47
	300	0.02	90.08	2.61	2.64	137.41	83.95	0.4968	11.00	22.15
	350	0.01	90.04	2.60	2.62	137.43	84.03	0.4968	10.90	21.94

La dernière remarque retenue du tableau 5.9 est claire dans la figure 5.11, où l'espacement S est inversement proportionnel avec le facteur de la ductilité locale, on note aussi que l'intensité de l'influence d'espacement S sur la ductilité locale est diminuée après que l'espacement dépasse sa valeur maximale. La relation entre le facteur de la ductilité locale μ_ϕ et l'espacement S peut prendre la forme suivante :

$$\mu_\phi = A_3 S^{B_3} \quad (5.6)$$

La comparaison entre les résultats expérimentaux de Lin et Lee (2001) et de Rashid et Mansur (2005) prouve l'effet négatif de l'espacement S sur la ductilité locale, où :

- Les poutres N4 et N5 : l'augmentation de de l'espacement S de 100 vers 150 diminue le facteur de la ductilité locale maximal de 49.84 vers 38.05.
- Les poutres T7 et T8 : l'augmentation de de l'espacement S de 50 vers 150 diminue le facteur de la ductilité locale minimal et maximal de 6.35 vers 5.01 et de 66.43 vers 46.18, respectivement.
- Les poutres B311, B312 et B313 : la diminution de de l'espacement S de 200 vers 100 ensuite vers 66.7, respectivement augmente le facteur de la ductilité de déplacement maximal μ_Δ de 1.66 vers 2.95 ensuite vers 4.31, respectivement.

Il faut rappeler que la ductilité locale et la ductilité de déplacement sont proportionnelles.

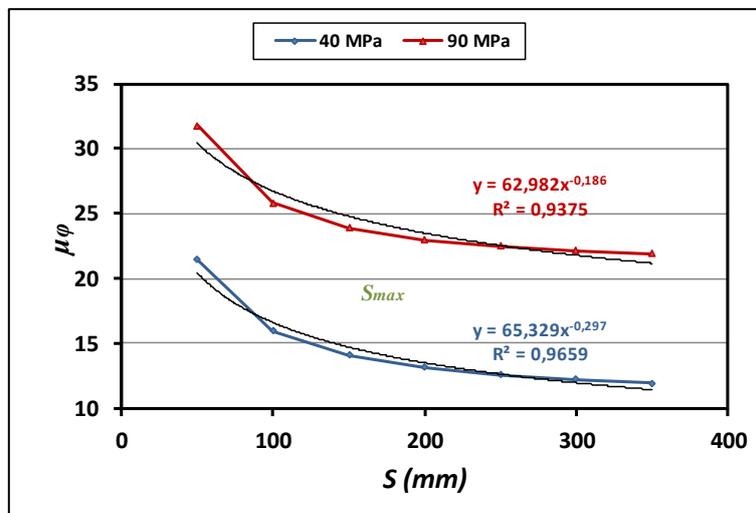


Figure 5.11 : Effet de l'espacement des armatures transversales.

D'après cette analyse, on peut déduire que l'accroissement d'espacement S entre les armatures transversales diminue la pression latérale (confinement), ça résulte une réduction dans la ductilité locale des poutres en béton armé (Figure 5.12).

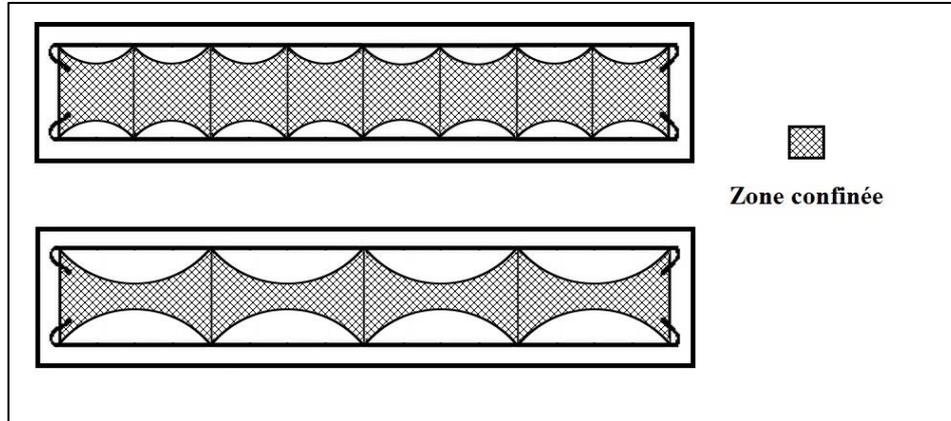


Figure 5.12 : Zone confinée sous l'effet de l'espacement des armatures transversales.

5.3.8. Effet du nombre des armatures

Le tableau 5.10 présente l'effet du nombre des armatures longitudinales tendues et comprimées sur la ductilité locale pour une résistance ordinaire f_{ck} égale à 40 MPa. Dans un premier lieu, le nombre des armatures comprimées est fixé par deux barres pour voir l'effet des nombres des armatures tendues individuellement. Les quatre premières lignes du tableau présentent les résultats obtenus, d'après ces résultats, on remarque que le nombre des armatures tendues a un impact positif sur la pression latérale σ_2 , où cette dernière augmente de 0.15 jusqu'à 0.28 MPa sous l'ajout des barres dans la zone tendue. Dans le second lieu, les trois dernières lignes présentent l'effet du nombre des armatures comprimées, où on remarque que ce nombre a aussi un effet positif sur la pression latérale. D'une façon générale, on peut noter les remarques suivantes :

- Nombre des armatures longitudinales tendues et comprimées :
 - Améliore la résistance du béton f_{ck} ;
 - Améliore les déformations élastique et ultime ε_{0c} et ε_{cuc} ;
 - Rétrécit la zone comprimée à l'état élastique et ultime ;
 - Diminue la courbure élastique φ_y ;
 - Augmente la courbure ultime φ_u ;

- Augmente le facteur de la ductilité locale de 16.0 jusqu'à 18.9.

Les mêmes remarques retenues du tableau 5.10 sont observées dans le tableau 5.11 lorsque la résistance du béton est égale à 90 MPa.

Les résultats du deux tableaux 5.10 et 5.11 sont présentés sous formes des histogrammes dans les figures 5.13 et 5.14. D'après voir les figures, on remarque que les barres des histogrammes s'élèvent petit à petit avec l'ajout des barres soit dans la zone tendue ou comprimée.

Tableau 5.10 : Effet de nombre des armatures ($f_{ck} = 40 \text{ MPa}$, $f_{yk} = 400 \text{ MPa}$, $\rho = 1 \%$ et $\rho' / \rho = 0.5$).

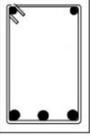
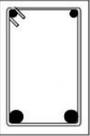
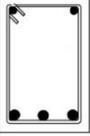
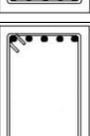
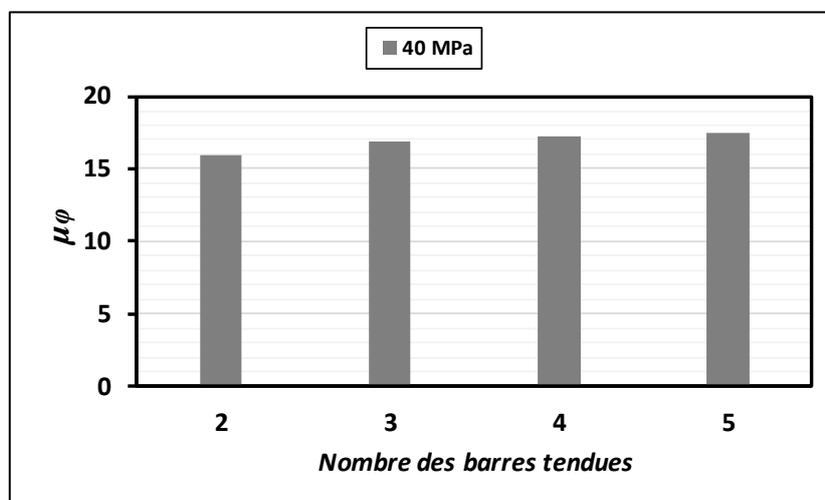
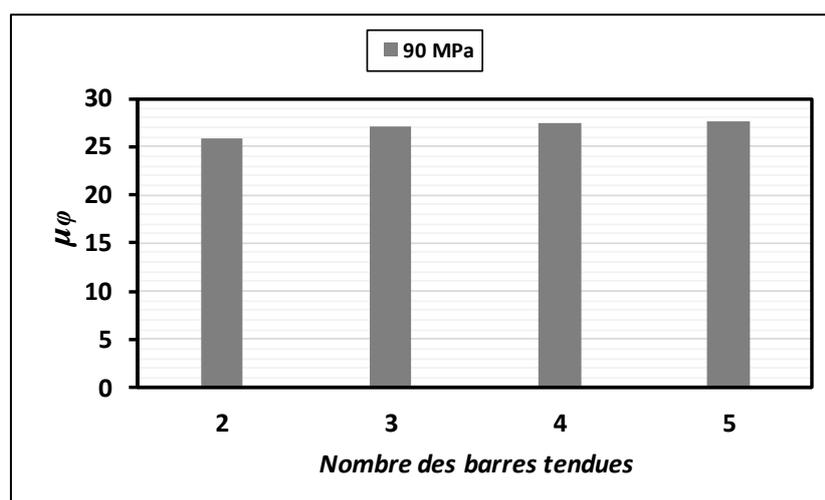
Section	σ_2 (MPa)	f_{ckc} (MPa)	ε_{0c} (‰)	ε_{cuc} (‰)	X_y (mm)	X_u (mm)	$\varphi_y \cdot 10^{-5}$ (1/mm)	$\varphi_u \cdot 10^{-5}$ (1/mm)	μ_φ
	0.15	40.73	2.07	4.23	207.42	104.15	0.6014	9.58	15.94
	0.19	40.95	2.10	4.45	206.86	103.80	0.6003	10.16	16.92
	0.20	41.02	2.10	4.52	206.68	103.70	0.6000	10.35	17.25
	0.21	41.06	2.11	4.56	206.58	103.65	0.5998	10.45	17.41
	0.26	41.28	2.13	4.78	206.03	103.36	0.5989	11.02	18.40
	0.27	41.35	2.14	4.85	205.85	103.28	0.5985	11.21	18.73
	0.28	41.39	2.14	4.89	205.75	103.24	0.5984	11.30	18.89

Tableau 5.11 : Effet de nombre des armatures ($f_{ck} = 90 \text{ MPa}$, $f_{yk} = 400 \text{ MPa}$, $\rho = 1 \%$ et $\rho' / \rho = 0.5$).

<i>Section</i>	σ_2 (MPa)	f_{ckc} (MPa)	ε_{0c} (‰)	ε_{cuc} (‰)	X_y (mm)	X_u (mm)	$\varphi_y \cdot 10^{-5}$ (1/mm)	$\varphi_u \cdot 10^{-5}$ (1/mm)	μ_φ
	0.15	90.73	2.64	2.93	136.91	82.84	0.4962	12.80	25.81
	0.19	90.95	2.66	3.02	136.75	82.54	0.4960	13.41	27.03
	0.20	91.02	2.66	3.05	136.69	82.45	0.4959	13.61	27.44
	0.21	91.06	2.66	3.07	136.67	82.40	0.4959	13.71	27.65
	0.26	91.28	2.67	3.17	136.50	82.13	0.4957	14.31	28.87
	0.27	91.35	2.68	3.20	136.45	82.05	0.4956	14.51	29.28
	0.28	91.39	2.68	3.22	136.42	82.01	0.4956	14.61	29.49

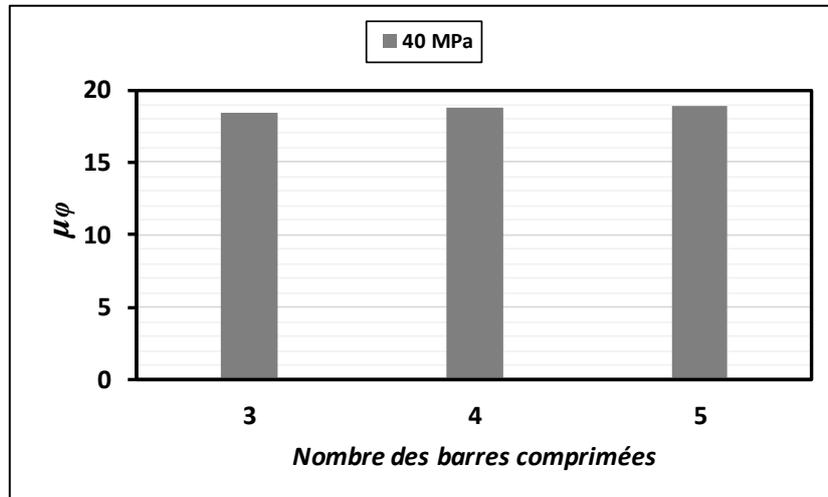


-a-

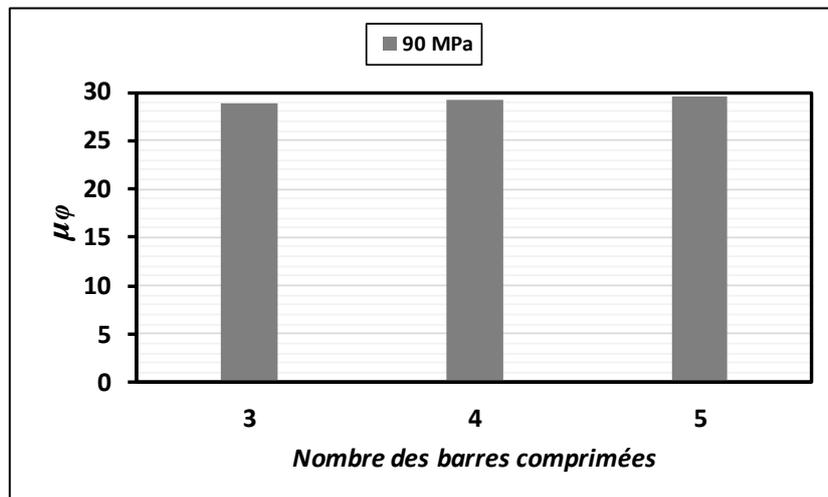


-b-

Figure 5.13 : Effet du nombre des armatures tendues.



-a-



-b-

Figure 5.14 : Effet du nombre des armatures comprimées.

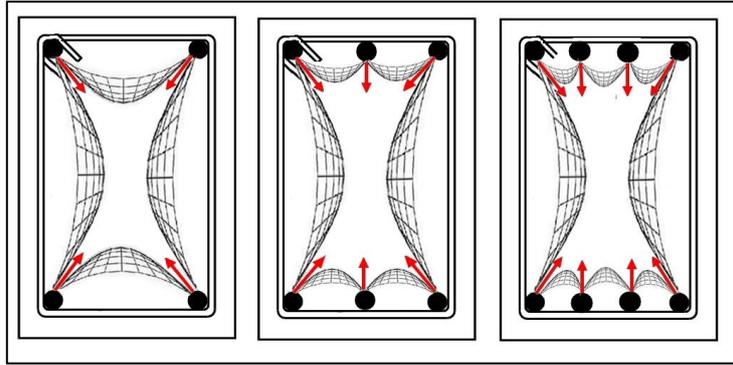


Figure 5.15 : Zone confinée sous l'effet du nombre des armatures longitudinales.

La figure 5.15 présente un schéma qui explique l'influence du nombre des barres longitudinales sur le comportement des poutres en béton armé avec armatures transversales. D'après ce schéma proposé, on peut dire que l'augmentation du nombre des barres augmente parallèlement les points de contact entre les cadres transversales et le béton, ceci provoque un plus de pression à l'intérieur des cadres. Cette augmentation de pression améliore la ductilité locale des poutres.

5.3.9. Effet de La disposition des armatures longitudinales

Le tableau 5.12 expose l'effet de La disposition des armatures longitudinales sur la ductilité locale. Pour une résistance ordinaire f_{ck} égale à 40, les résultats obtenus montrent que la disposition des armatures a une influence importante sur la pression latérale σ_2 (confinement). D'après ces résultats, il est clair que :

- L'espacement entre les armatures longitudinales augmente la pression latérale, alors :
 - Il améliore la résistance du béton f_{ck} et les déformations ε_{0c} et ε_{cuc} ;
 - Il rétrécit les hauteurs de la zone comprimée ;
 - Il diminue la courbure élastique φ_y , contrairement il augmente la courbure ultime φ_u ;
 - Il augmente le facteur de la ductilité locale μ_φ .
- L'ajout des armatures dans le sens vertical fournit une pression latérale plus que le sens horizontal, par conséquent il fournit un comportement plus ductile aux poutres.

Les remarques retenues du tableau 5.12 sont observées dans le tableau 5.13 lorsque la résistance du béton augmente jusqu'à 90 MPa. Les résultats du deux tableaux 5.12 et 5.13 sont présentés sous formes des histogrammes dans la figures 5.16, où les barres des histogrammes confirment les remarques retenues précédemment.

Tableau 5.12 : Effet de la disposition des armatures ($f_{ck} = 40 \text{ MPa}$, $f_{yk} = 400 \text{ MPa}$, $\rho = 1 \%$ et $\rho' / \rho = 0.5$).

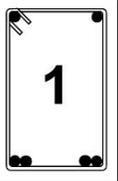
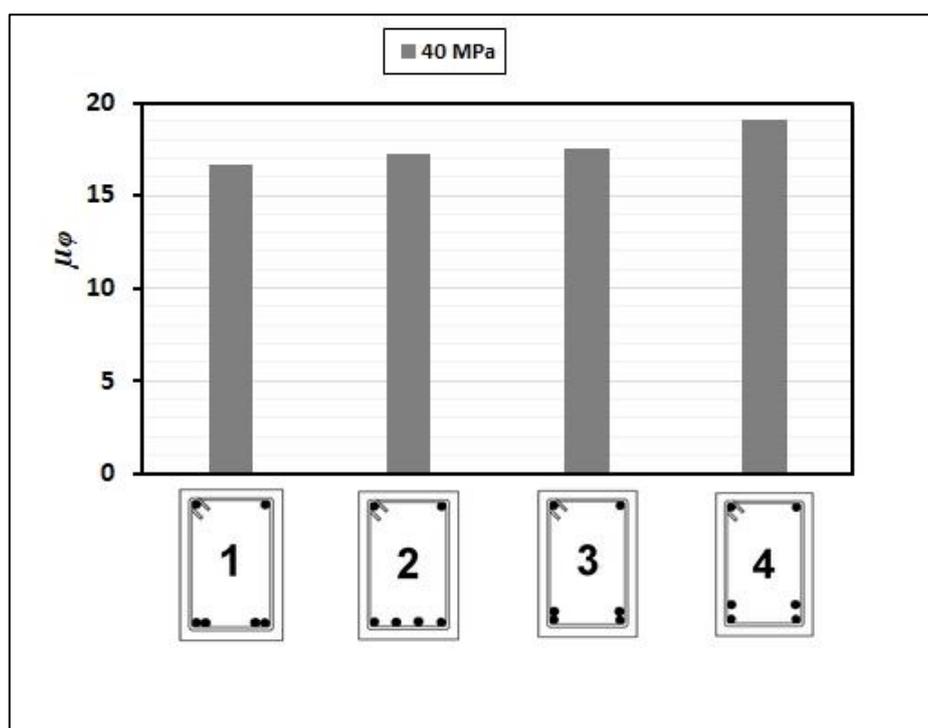
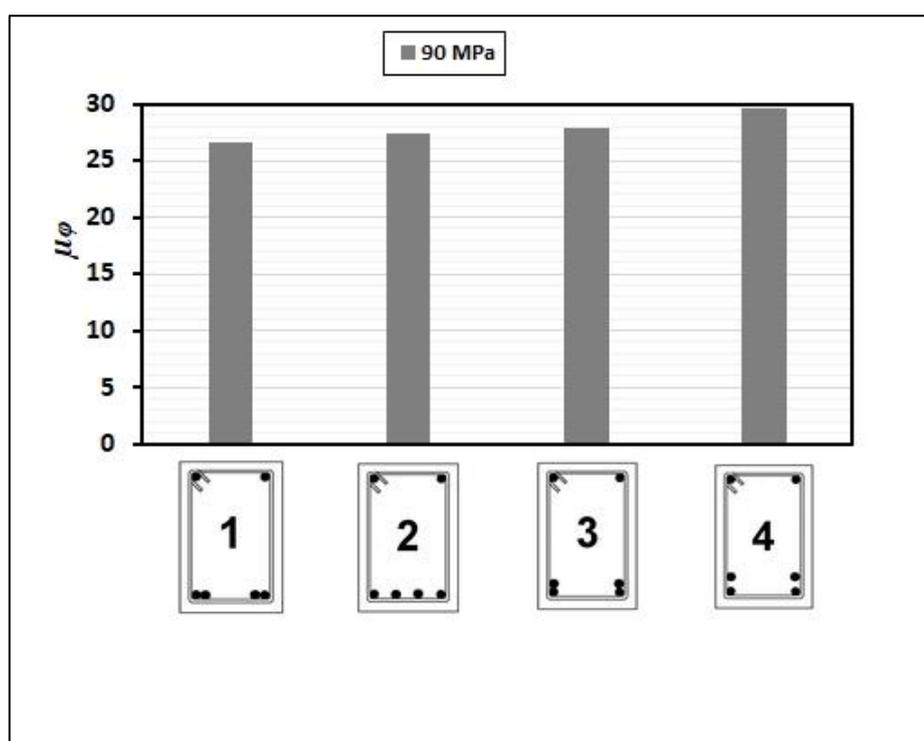
Section	σ_2 (MPa)	f_{ckc} (MPa)	ε_{0c} (‰)	ε_{cuc} (‰)	X_y (mm)	X_u (mm)	$\varphi_y \cdot 10^{-5}$ (1/mm)	$\varphi_u \cdot 10^{-5}$ (1/mm)	μ_φ
 1	0.18	40.88	2.09	4.38	207.03	103.91	0.6007	9.98	16.61
 2	0.20	41.02	2.10	4.52	206.68	103.70	0.6000	10.35	17.25
 3	0.22	41.09	2.11	4.59	206.50	103.60	0.5997	10.53	17.57
 4	0.28	41.42	2.14	4.92	205.67	103.20	0.5982	11.39	19.03

Tableau 5.13 : Effet de la disposition des armatures ($f_{ck} = 90 \text{ MPa}$, $f_{yk} = 400 \text{ MPa}$, $\rho = 1 \%$ et $\rho' / \rho = 0.5$).

Section	σ_2 (MPa)	f_{ckc} (MPa)	ϵ_{oc} (‰)	ϵ_{cuc} (‰)	X_y (mm)	X_u (mm)	$\phi_y \cdot 10^{-5}$ (1/mm)	$\phi_u \cdot 10^{-5}$ (1/mm)	μ_ϕ
 1	0.18	90.88	2.65	2.99	136.80	82.63	0.4960	13.22	26.65
 2	0.20	91.02	2.66	3.05	136.69	82.45	0.4959	13.61	27.44
 3	0.22	91.09	2.66	3.09	136.64	82.36	0.4958	13.80	27.84
 4	0.28	91.42	2.68	3.23	136.40	81.98	0.4955	14.70	29.67



-a-



-b-

Figure 5.16 : Effet de la disposition des armatures longitudinales.

La figure 5.17 présente un schéma proposé de la zone confinée pour les quatre types de configuration. Cette figure montre que la disposition des armatures a un grand effet sur la surface confinée, où, la quatrième configuration offre la surface la plus grande parmi les quatre, suivi par la troisième, la deuxième puis la première. Enfin, on conclut que la séparation des armatures augmente la zone confinée, ceci augmente la ductilité de la poutre.

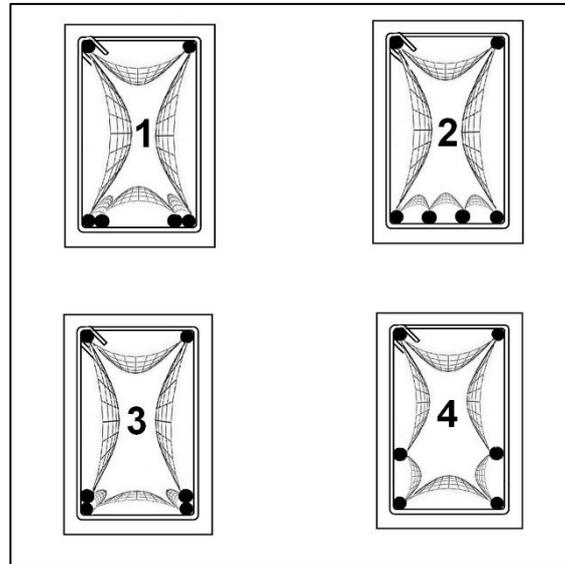


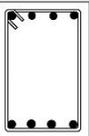
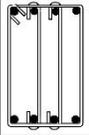
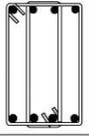
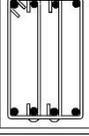
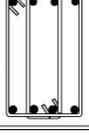
Figure 5.17 : Zone confinée sous l'effet de la disposition des armatures longitudinales.

5.3.10. Effet de L'ajout des épingles et des étriers

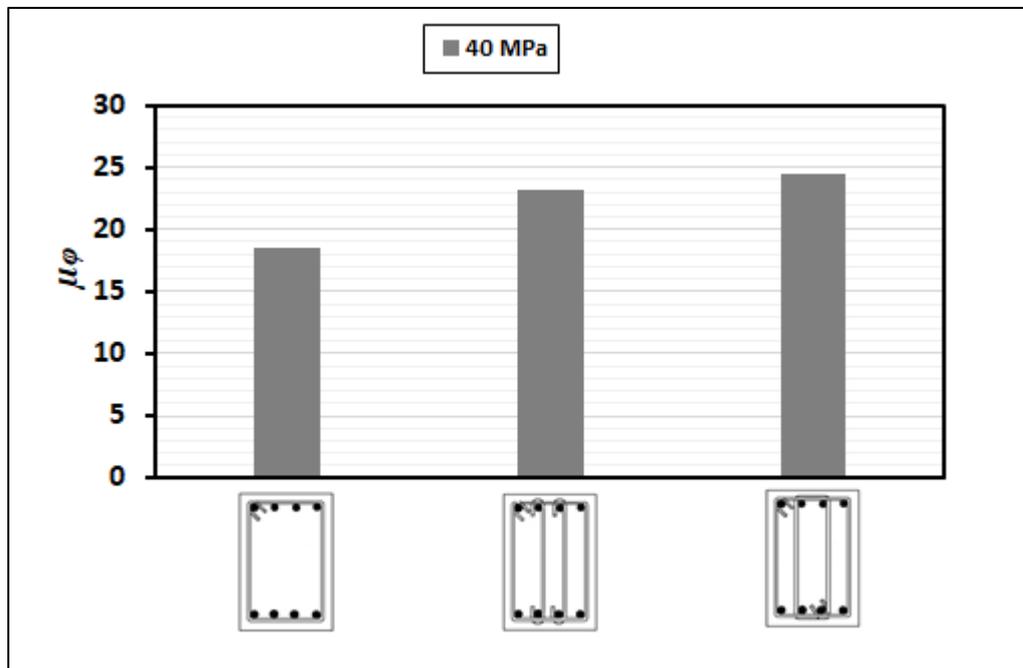
Le tableau 5.14 présente l'effet de l'ajout des épingles et des étriers sur la ductilité locale pour les deux cas de résistance du béton f_{kc} égale à 40 et 90 MPa. Les résultats du tableau montrent que l'ajout des épingles et des étriers a un effet positif sur la pression latérale σ_2 (confinement) et l'ajout d'un étrier fournit une pression plus qu'une épingle. Les autres résultats de ce tableau indiquent que l'ajout des épingles et des étriers a :

- Un effet positif sur la résistance f_{ck} , la déformation élastique ε_{0e} , et la déformation ultime du béton ε_{cuc} ;
- Un effet négatif sur les profondeurs de l'axe neutre X_y et X_u ;
- Un effet positif sur la courbure ultime φ_u , par contre un effet négatif sur la courbure élastique φ_y ;
- Un effet positif sur le facteur de la ductilité locale μ_φ .

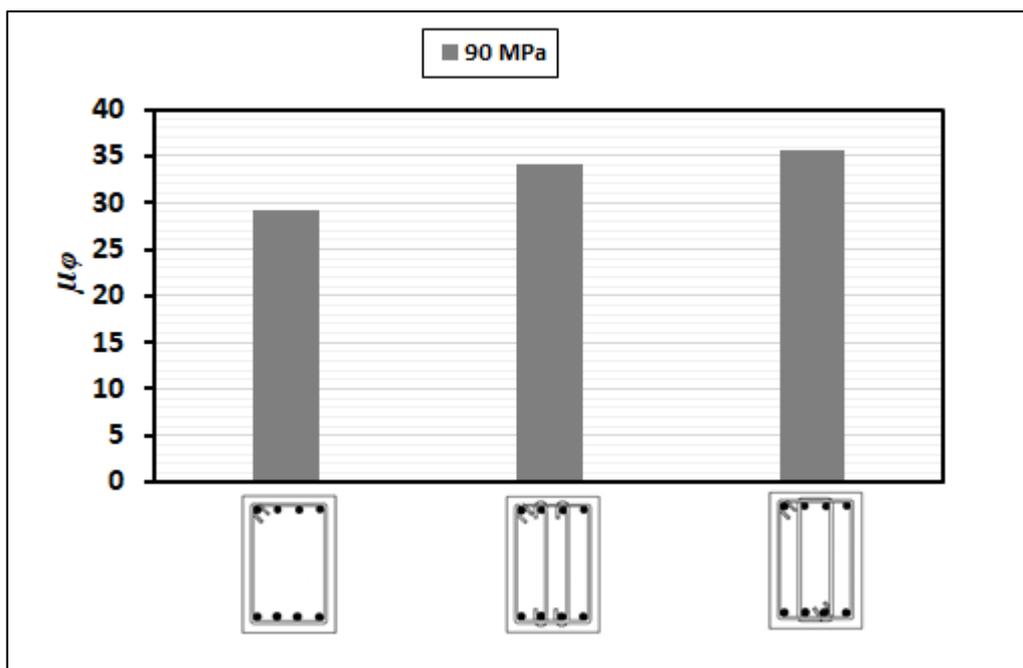
Tableau 5.14 : Effet de l'ajout des épingles et des étriers ($f_{ck} = 40$ et 90 MPa, $f_{yk} = 400$ MPa, $\rho = 1\%$ et $\rho' / \rho = 0.5$).

Section	σ_2 (MPa)	f_{ckc} (MPa)	ϵ_{0c} (‰)	ϵ_{cuc} (‰)	X_y (mm)	X_u (mm)	$\varphi_y \cdot 10^{-5}$ (1/mm)	$\varphi_u \cdot 10^{-5}$ (1/mm)	μ_φ
	0.26	41.31	2.13	4.81	205.94	103.32	0.5987	11.11	18.56
	0.44	42.19	2.23	5.69	203.76	101.29	0.5948	13.78	23.18
	0.49	42.44	2.25	5.94	203.15	100.81	0.5937	14.56	24.52
	0.26	91.31	2.68	3.18	136.48	82.09	0.4956	14.41	29.08
	0.44	92.19	2.73	3.57	135.83	81.16	0.4948	16.89	34.13
	0.49	92.44	2.74	3.68	135.65	80.93	0.4946	17.60	35.59

La figure 5.18 présente les résultats du facteur de la ductilité locale sous forme des histogrammes en fonction des trois types de cadrillage étudiés. Cette représentation confirme les remarques retenues du tableau 5.14, où les barres des histogrammes s'élèvent avec l'ajout d'une épingle et s'élèvent encore avec l'ajout d'un étrier.



-a-



-b-

Figure 5.18 : Effet de l'ajout des épingles et des étriers.

La figure 5.19 présente un schéma proposé de la zone confinée pour chaque type de cadrillage. Il est clair que l'ajout d'une épingle a créé un petit noyau confiné à l'intérieur de la zone confinée créée précédemment par le cadre transversal, par ailleurs, l'ajout d'un étrier a créé un grand noyau confiné à l'intérieur de la zone précédente. Enfin, on conclut que les noyaux confinés créés par les épingles et les étriers ont un effet positif sur la ductilité locale de la poutre et l'utilisation des étriers assure une ductilité plus que les épingles.

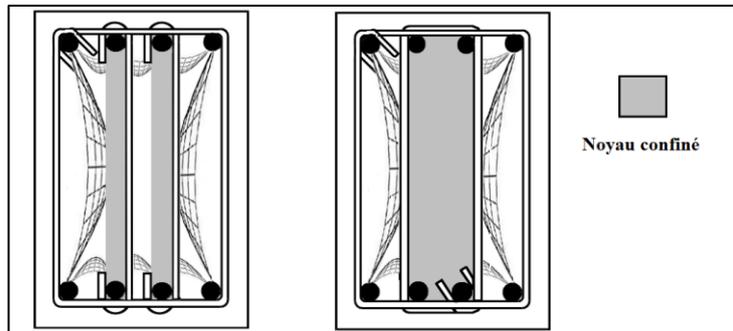


Figure 5.19 : Zone confinée sous l'effet de l'ajout des épingles et des étriers.

5.4. CONCLUSION

De ce qui précède, après une analyse profonde sur le comportement de poutres en béton armé, on peut dire que la pression latérale (confinement) a un effet positif sur la ductilité locale.

On peut aussi dégager les conclusions partielles suivantes :

- Concernant les paramètres qui n'ont aucune influence sur la pression latérale (confinement) :
 - La résistance du béton a un effet positif sur la ductilité locale ;
 - La limite élastique des armatures longitudinales a un effet négatif sur la ductilité locale ;
 - Le taux d'armatures tendues amoindrit la ductilité locale des poutres en béton armé ;
 - Le taux d'armatures comprimées améliore la ductilité locale.
- Concernant les paramètres influant la pression latérale :
 - La limite élastique des armatures transversales a un effet positif sur la ductilité locale ;

- Le diamètre des armatures transversales (cadres, étriers, épingles ...) a un effet positif sur la ductilité locale ;
- L'espacement entre les armatures transversales a un effet négatif sur la ductilité locale.
- Le nombre des armatures longitudinales et la séparation entre eux affecte positivement la ductilité locale ;
- L'ajout des étriers et des épingles améliore la ductilité locale des poutres en béton armé.