

# IMPACT DES MURS DE REMPLISSAGE EN MAÇONNERIE SUR LE COMPORTEMENT SISMIQUE DES BATIMENTS EN PORTIQUES EN BETON ARME

## IMPACT OF MASONRY INFILL WALLS ON THE SEISMIC BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE FRAMES BUILDINGS

A. BOUBAYA, R. CHEBILI

Laboratoire de Recherche en Génie Civil, Université de Biskra, BP145 Biskra, 07000, Algérie

### RESUME

L'étude actuelle compare les réponses sismiques des structures en portiques en béton armé, issues de la modélisation des murs de remplissage en maçonnerie par une bielle diagonale équivalente unique et celles obtenues par l'application des recommandations du règlement parasismique algérien actuel (RPA99/version 2003) qui prend en compte la rigidité du remplissage uniquement à travers le coefficient de comportement global R sans aucune bielle. En utilisant le logiciel SAP2000, des analyses modales du spectre de réponse algérien ont été effectuées dans le sens longitudinal sur différents modèles de bâtiments tridimensionnels Rdc+6 étages tels que (1) cadre nu, (2) cadre avec des panneaux de remplissage sur toute la hauteur et (3) modèles de portiques munis de panneaux de remplissage avec un étage souple situé à différents niveaux de la structure. Les grandeurs de réponse sélectionnées en termes de périodes naturelles fondamentales, de déplacements des étages, de déplacements-inter-étages, d'effet P- $\Delta$ , de cisaillement et moments de renversement des étages sont obtenues pour toutes les configurations considérées et présentées de manière comparative. Les résultats obtenus à partir de l'analyse des bâtiments modélisés avec bielle équivalente tendent à s'écarter fortement des résultats de ceux analysés selon le règlement parasismique algérien actuel. Ce dernier donne des résultats ne reflétant pas correctement l'influence du remplissage sur le comportement global de la structure lorsqu'elle est soumise à des forces latérales. Ces constats confirment l'utilité et la nécessité d'incorporer la modélisation de l'action de la présence des murs de remplissage par une bielle diagonale équivalente dans le règlement parasismique algérien actuel.

**MOTS CLES:** Murs de remplissage en maçonnerie, méthode de la bielle diagonale équivalente, RPA99/version 2003, étage souple, transparence, méthode modale spectrale.

### ABSTRACT

The present study compares the seismic responses of reinforced concrete frames buildings, from the modeling of masonry filling walls with a single equivalent diagonal strut and those obtained by applying the recommendations of the current Algerian seismic code (RPA99 / version 2003) which takes into account the rigidity of the filling only through the response reduction factor R without any strut. Using the SAP2000 software, modal analyzes of the Algerian response spectrum were carried out in the longitudinal direction on different models of three-dimensional buildings G + 6 floors such as (1) bare frame, (2) frame with full-height fill panels and (3) frame models with panels of filling with a soft story located at different levels of the structure. The selected response quantities in terms of fundamental natural periods, story displacements, interstory drift ratio, P- $\Delta$  effect, storey shear forces and overturning moments are obtained for all the configurations considered and presented in a way comparative. The results obtained from the analysis of the buildings modeled with equivalent strut tend to deviate strongly from the results of those analyzed according to the current Algerian seismic code. The latter gives results that do not correctly reflect the influence of filling on the overall behavior of the structure when subjected to lateral forces. These findings confirm the utility and necessity of incorporating the modeling of the action of the presence of filling walls by an equivalent diagonal strut in the current Algerian seismic code.

**KEYWORDS:** Infill walls, equivalent diagonal strut method, RPA99/version 2003, soft story, transparency, spectral modal method.

## 1 INTRODUCTION

Les structures en portiques en béton armé avec remplissage entier ou partiel en maçonnerie sont largement utilisées dans les zones urbaines et rurales de l'Algérie. La maçonnerie en briques avec du mortier de ciment, est le matériau de remplissage le plus répandu, en raison de son abondance, de son faible coût, de ses bonnes propriétés acoustiques et thermiques et de la disponibilité de main-d'œuvre qualifiée dans cette technique de construction. Bien que les bâtiments en béton armé à plusieurs étages avec des espaces ouverts ayant des usages sociaux et fonctionnels divers tels que les garages de stationnement et les halls d'accueil, soient très vulnérables à l'effondrement sous l'effet des charges latérales de tremblement de terre, ils sont devenus une caractéristique inévitable pour la plupart des bâtiments nouvellement construits. Cela peut être dû aux besoins essentiels de tels espaces ouverts, en particulier dans les grandes villes, avec des limites dans la disponibilité des terres [7]. La contribution des murs de remplissage en maçonnerie dans le comportement sismique est souvent ignorée dans les normes de conception structurelle car ils sont traités comme des composants non structurels [10]. Cependant, ils interagissent avec les portiques qui les encadrent lors d'un séisme et participent de la sorte à la résistance aux efforts latéraux provoqués par un séisme. La différence entre les caractéristiques mécaniques des portiques et celles des murs de remplissage en maçonnerie notamment en terme de rigidité provoque un comportement complexe lors de l'excitation sismique. En effet, ces murs créent un contact serré avec les poutres et poteaux du cadre environnant, et en raison de leur rigidité élevée dans leurs plans, ces murs de remplissage peuvent influencer d'une manière significative le comportement dynamique de la structure tel que sa résistance, sa rigidité et

sa ductilité durant un évènement sismique [1].

Le but de cet article est de mettre en évidence par une analyse modale spectrale, la carence du règlement parasismique algérien actuel (RPA99/version2003) [12] à bien représenter l'influence des murs de remplissage en maçonnerie sur le comportement sismique d'une structure en portique en béton armé soumise à l'action sismique, en comparant les réponses sismiques issues de la modélisation de la présence du remplissage par une bielle diagonale équivalente unique selon la formulation de Mainstone largement utilisée en prenant un coefficient de comportement global  $R=5$  pour tous les modèles développés, et celles obtenues par l'application des recommandations du règlement parasismique algérien en vigueur, à savoir la modélisation sans bielle du remplissage rigide en prenant un coefficient de comportement global  $R=3.5$  lorsque celui-ci est disposé sur toute la hauteur de la structure,  $R=2$  pour modéliser les structures ayant une transparence ou un étage souple et enfin  $R=5$  pour les structures sans remplissage rigide (voir tableau 4.3 catégories 1a,1b et D17 du RPA99/version 2003.).

## 2 MODÉLISATION DES MURS DE REMPLISSAGE EN MAÇONNERIE

Pendant Les tests expérimentaux réalisés par Mainstone [8], Klingner et Bertero [6] sur les cadres remplis de maçonnerie soumis à des charges latérales, des fissures diagonales se développent au centre du panneau de remplissage, et des espacements se forment entre le cadre et le panneau le long de la diagonale non chargée, alors qu'un contact complet est observé dans les deux coins de la diagonale chargée (figure 1) [1].

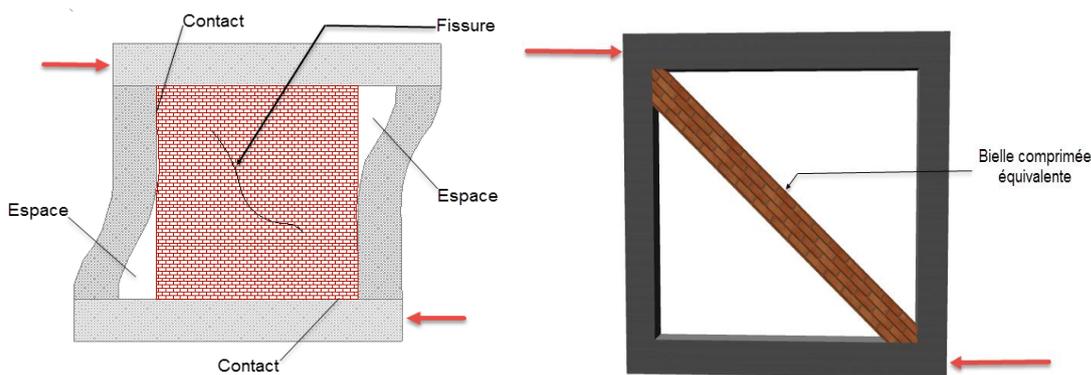


Figure 1: Cadre avec remplissage en maçonnerie sous force latérale Figure 2: Bielle diagonale équivalente

Polyakov [11] en 1966, a introduit la méthode du macro-modèle, également appelée la méthode de la bielle diagonale équivalente, en remplaçant le remplissage en maçonnerie par une bielle comprimée équivalente en maçonnerie pour étudier la réponse globale des bâtiments en portiques avec remplissage en maçonnerie (figure 2). Le principal inconvénient de cette méthode est la carence dans la modélisation précise des ouvertures [8].

Cependant, certains progrès ont été réalisés en ce qui concerne les ouvertures de murs de remplissage où un certain nombre de bielles peuvent être utilisées pour tenir compte de l'effet des ouvertures [3]. Dans la présente étude, seuls les murs extérieurs de remplissage sont modélisés comme des éléments de panneau de remplissage sans aucune ouverture.

## 2.1 Caractéristiques géométriques et mécaniques de la bielle équivalente

Différentes formulations pour la détermination de la largeur de la barre diagonale et la résistance du panneau ont été développées. Certaines des recommandations ont été adoptées dans les codes nationaux, sans toutefois être une approche unitaire de la question [3]. Dans cette recherche, les recommandations de la FEMA 356 [4] qui adoptent la formulation de Mainstone seront suivies pour modéliser les murs de remplissage en maçonnerie.

### 2.1.1 Largeur de la bielle équivalente

Selon la FEMA 356, les murs de remplissage en maçonnerie avant fissuration sont modélisés avec une barre de compression diagonale équivalente de largeur,  $a$ . L'épaisseur et le module d'élasticité de la bielle sont identiques à ceux du panneau de remplissage représenté (figure 3). L'expression mathématique de la largeur de la bielle équivalente,  $a$ , selon Mainstone [9] peut être écrite en termes de hauteur de poteau entre les axes des poutres  $h_{col}$  et la longueur de la diagonale du panneau de remplissage  $r_{inf}$  et le coefficient  $\lambda_1$  comme suit:

$$a = 0.175 (\lambda_1 h_{col})^{-0.4} r_{inf} \quad (1)$$

Où  $r_{inf}$  est exprimée conformément à l'équation (2)

$$r_{inf} = \sqrt{(L_{inf})^2 + (h_{inf})^2} \quad (2)$$

Le coefficient  $\lambda_1$  est calculé en fonction de la hauteur du panneau de remplissage  $h_{inf}$ , des modules d'élasticité des deux matériaux de portique  $E_{fc}$  et du matériau du panneau de remplissage  $E_{me}$ , du moment d'inertie des poteaux  $I_{col}$ , de la longueur  $h_{inf}$  du panneau de remplissage, de l'épaisseur du panneau de remplissage  $t_{inf}$  et l'angle  $\Phi$  formé par la bielle et l'horizontale, selon l'équation (3) ci-dessous:

$$\lambda_1 = \left[ \frac{E_{me} t_{inf} \sin 2\Phi}{4 E_{fc} I_{col} h_{inf}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

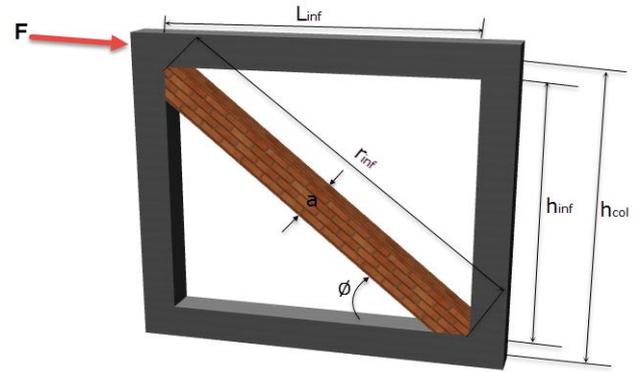


Figure 3: Caractéristiques de la bielle comprimée équivalente.

### 2.1.2 Résistance de la bielle

Les équations suivantes décrivent le comportement de ce type de structure à l'action sismique et déterminent la capacité de résistance des remplissages à chaque mode de rupture. Les formules se rapportent uniquement aux modes de rupture en plan. Les équations dans cette sous-section sont principalement tirées de [1] et [5]. La résistance de la bielle est déterminée en calculant la force nécessaire pour atteindre la résistance de la maçonnerie à l'écrasement et la force nécessaire pour atteindre sa résistance au cisaillement. Les composantes de ces forces, projetées dans la direction de la bielle, sont utilisées pour attribuer à la bielle une résistance en compression,  $R_{bielle}$ .

$$R_{bielle} = \min \left\{ R_{\text{écrasement}} \cdot \frac{R_{\text{cisaillement}}}{\cos \Phi} \right\} \quad (4)$$

### 2.1.3 Rupture par compression

La résistance de la maçonnerie à l'écrasement,  $R_{\text{écrasement}}$ , correspond à l'effort de compression que la bielle équivalente en maçonnerie peut supporter avant que la maçonnerie ne se rompe par excès de compression. Elle est déterminée comme suit [6] :

$$R_{\text{écrasement}} = a t f'_m \quad (5)$$

Où :  $a$  est la largeur de la bielle équivalente,  $t$  est l'épaisseur du panneau de remplissage et  $f'_m$  est la résistance de la maçonnerie en compression déterminée comme suit :

$$f'_m = \frac{f'_{cb} (f'_{tb} + \alpha f'_j)}{U_u (f'_{tb} + \alpha f'_{cb})} \quad (6)$$

Où:

$$\alpha = \frac{j}{4.1 h_b} \quad (7)$$

$j$  : épaisseur du joint du mortier, pris égal à 1.5 cm ;  $h_b$  : hauteur d'un bloc de maçonnerie (brique) prise égale à 20cm ;  $f'_{cb}$  : résistance en compression d'un bloc de maçonnerie, égale 10 Mpa ;  $f'_{tb}$  : résistance en traction d'un bloc de maçonnerie, prise égale à 0.1  $f'_{cb}$  ;  $U_u$  : coefficient de non uniformité de contrainte, prise égal à 1.5 ;  $f_j$  : résistance en compression du mortier, prise égal à 8MPa.

**2.1.4 Rupture par cisaillement**

La capacité de la maçonnerie à résister au cisaillement dépend de la résistance du joint du mortier entre les blocs de maçonnerie et du frottement entre la maçonnerie et le mortier. On applique le critère de Mohr-Coulomb pour calculer la résistance maximum au cisaillement,  $R_{cisaillement}$ , pour ce type de ruine. Ainsi, on a :

$$R_{cisaillement} = \frac{\tau_o t l}{(1 - \mu \tan \Phi)} \quad (8)$$

Où :  $\tau_o$  est la cohésion du lit de mortier définit comme suit :

$$\tau_o = 0.05 f'_m \quad (9)$$

$t$  est l'épaisseur du mur de remplissage prise égale à 30 cm,  $l$ , est la longueur du mur.  $\mu$  (Coefficient de friction le long du lit de mortier), est déterminé par la relation suivante :

$$\mu = 0.654 + 0.0000515 f_j \quad (10)$$

**3 DESCRIPTION DES STRUCTURES ÉTUDIÉES**

La structure du bâtiment considérée dans cette étude de recherche pour générer tous les modèles avec et sans bielle, est un bâtiment typique en portiques en béton armé (BA) composé d'un rez-de-chaussée plus 6 étages (R+6) conçu selon le code de calcul de béton armé aux états limites BAEL91 [2] et le règlement parasismique algérien RPA99 / version 2003.

**3.1 Géométrie et configuration structurale**

Les modèles de structures étudiées sont à usage de bureaux, à plancher en corps creux de type (16+4), et présentant une même vue en plan (figure6). Le plan type des modèles de construction considérés comporte respectivement quatre travées de 5m chacune dans la direction X et 3 travées de 4m chacune dans la direction Y. La hauteur de l'étage du RDC est de 4m, les autres étages ont tous une hauteur de 3m (voir figure 7).

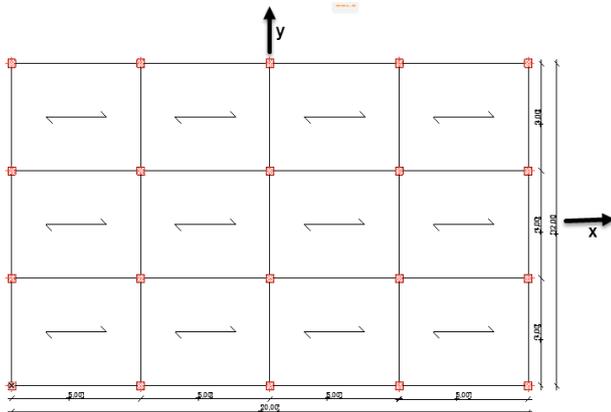


Figure 6 : Vue en plan de structures étudiées

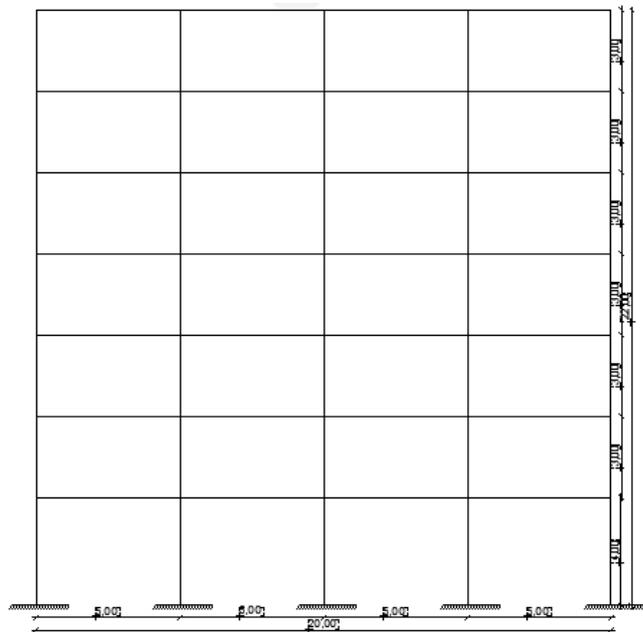


Figure7 : Vue en élévation des structures étudiées

### 3.2 Données de calcul des structures étudiées

Dans le but de définir les charges latérales, on suppose que les 6 modèles de bâtiments considérés, sont localisés en zone de forte sismicité (zone III selon le RPA99/version 2003), et sont de groupe d'usage 2 et reposent sur un sol de type S3 (sol meuble). On considère un facteur de qualité  $Q=1$ . Les propriétés des matériaux de construction utilisés en termes de module d'élasticité, de poids unitaire et de coefficient de poisson pour le béton et la maçonnerie sont respectivement de 32164 Mpa, 25,0 KN / m<sup>3</sup>, 0,20 et 3550 Mpa, 15,0 KN / m<sup>3</sup>, 0,15. La limite élastique de l'acier utilisé pour les armatures longitudinales et transversales est égale à 400 Mpa. L'épaisseur des murs de remplissage extérieurs est prise égale à 30 cm et la Résistance en compression d'un bloc de maçonnerie est prise égale à

10Mpa. Les charges permanentes (G) du plancher terrasse sont évaluées à 6,2 KN/m<sup>2</sup> et celles du plancher courant à 5,6 KN/m<sup>2</sup>. Les charges d'exploitation (Q) du plancher terrasse sont de 1 KN/m<sup>2</sup> et celles du plancher courant de 1,5 KN/m<sup>2</sup>. Conformément au RPA99/version 2003, les valeurs du facteur de comportement global R de dimensionnement ainsi que celles du coefficient d'amortissement  $\xi$  pour les modèles étudiés sont résumés dans le tableau1 ci-dessous. Notons que la valeur de  $R=5$  adoptée pour tous les modèles avec remplissage selon Mainstone modélisés avec des bielles diagonales est justifiée par le fait que le choix des autres valeurs de R valant 3.5 et 2 aurait amplifié la rigidité de ces modèles en plus de celle qui est apportée par la bielle équivalente modélisée autant qu'élément barre travaillant uniaxialement dans la direction de la diagonale.

Tableau 01 : Valeurs de R et  $\xi$  des modèles étudiés dans les deux configurations

	Recommandations RPA		Mainstone	
	R	$\xi$	R	$\xi$
<b>Modèle 1 (SRR)</b>	5	6	5	6
<b>Modèle 2 (ARR)</b>	3.5	7	5	6
<b>Modèle 3 (S1)</b>	2	7	5	6
<b>Modèle 4 (S3)</b>	2	7	5	6
<b>Modèle 5 (S5)</b>	2	7	5	6
<b>Modèle 6 (S7)</b>	2	7	5	6

### 3.3 Coffrage et ferrailage des poutres et poteaux des structures étudiées

Le dimensionnement des poutres et des poteaux (section de béton et celle d'acier) est effectué en considérant la structure dans sa configuration nue : les murs de maçonnerie ne sont pris en compte que comme charge

verticale agissant sur la structure, leur apport dans la raideur et la résistance du portique étant négligé. Le dimensionnement de la structure est effectué selon le code de calcul de béton armé aux états limites BAEL91 et le règlement parasismique algérien RPA99 / version 2003(tableau2).

Tableau 02: Coffrage et ferrailage des poteaux et des poutres des structures étudiées

Niveau	Section béton b <sub>x</sub> h (cmxcm)	Poutres		Poteaux	
		section acier		Section béton axa (cmxcm)	section acier
		Nappe supérieure	Nappe inférieure		
<b>7</b>	30x40	3 $\phi$ 16+3 $\phi$ 14 10.64 cm <sup>2</sup>	4 $\phi$ 12 4.52cm <sup>2</sup>	45x45	10 $\phi$ 16
<b>6</b>	30x40	3 $\phi$ 20+3 $\phi$ 12 12.81cm <sup>2</sup>	4 $\phi$ 14 6.16cm <sup>2</sup>	50x50	8 $\phi$ 20
<b>5</b>	30x40	3 $\phi$ 20+3 $\phi$ 12 12.81cm <sup>2</sup>	4 $\phi$ 14 6.16cm <sup>2</sup>	50x50	8 $\phi$ 20
<b>4</b>	30x40	3 $\phi$ 20+3 $\phi$ 12 12.81cm <sup>2</sup>	4 $\phi$ 14 6.16cm <sup>2</sup>	55x55	10 $\phi$ 20
<b>3</b>	30x40	3 $\phi$ 20+3 $\phi$ 14 14.04cm <sup>2</sup>	3 $\phi$ 14+3 $\phi$ 12 8.01cm <sup>2</sup>	55x55	10 $\phi$ 20
<b>2</b>	30x40	3 $\phi$ 20+3 $\phi$ 14 14.04cm <sup>2</sup>	3 $\phi$ 14+3 $\phi$ 12 8.01cm <sup>2</sup>	60x60	12 $\phi$ 20
<b>1</b>	30x40	3 $\phi$ 20+3 $\phi$ 14 14.04cm <sup>2</sup>	3 $\phi$ 14+3 $\phi$ 12 8.01cm <sup>2</sup>	60x60	12 $\phi$ 20

#### 4 MODELES CONSIDÉRÉS POUR L'ANALYSE

Les modèles développés sont :(1) cadre sans remplissage rigide avec les masses incluses des murs de remplissage (SRR) ;(2) modèle de bâtiment avec remplissage rigide intégral en maçonnerie (ARR) ; (3) modèle de bâtiment avec remplissage rigide intégral en maçonnerie sauf l'étage du RDC (S1) ; (4) modèle de bâtiment intégralement remplis en maçonnerie rigide avec un étage ouvert au 3ème étage (S3) ; (5) modèle de bâtiment intégralement remplis en maçonnerie rigide avec un étage ouvert au 5ème étage (S5) et (6) modèle de bâtiment intégralement remplis en maçonnerie rigide avec un étage ouvert au 7ème étage

(S7).Les modèles développés en utilisant la bielle diagonale équivalente sont représentés à la figure4, ceux développés sans bielle selon le RPA 99/version2003 sont représentés à la figure 5. Notons que pour tous les modèles de bâtiments développés, bien que le RPA99/version 2003 limite en pratique La hauteur des bâtiments en portiques avec ou sans murs de remplissage en maçonnerie à 3 niveaux en zone de forte sismicité, on a délibérément ignoré cette limitation de la hauteur pour ces structures afin de pouvoir réaliser cette recherche.

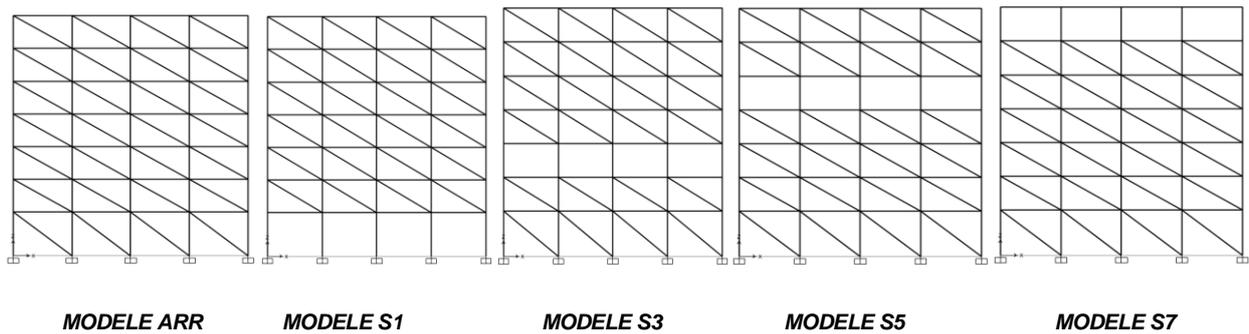


Figure 04 : Les différents modèles développés avec bielles (Mainstone)

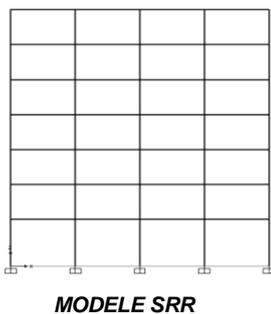


Figure 05 : le modèle typique développé pour toutes les structures selon le règlement parasismique algérien RPA (sans bielles)

discute les résultats des analyses modales spectrales effectuées, dans la direction longitudinale X, sur les six modèles présentés précédemment, traités tantôt avec bielles tantôt sans bielles selon le RPA99/2003. L'évaluation de l'effet du remplissage et des étages souples et de leurs emplacements en hauteur sur les réponses dynamiques des bâtiments en portiques en béton armé est examinée et comparée dans cette section.

#### 5 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

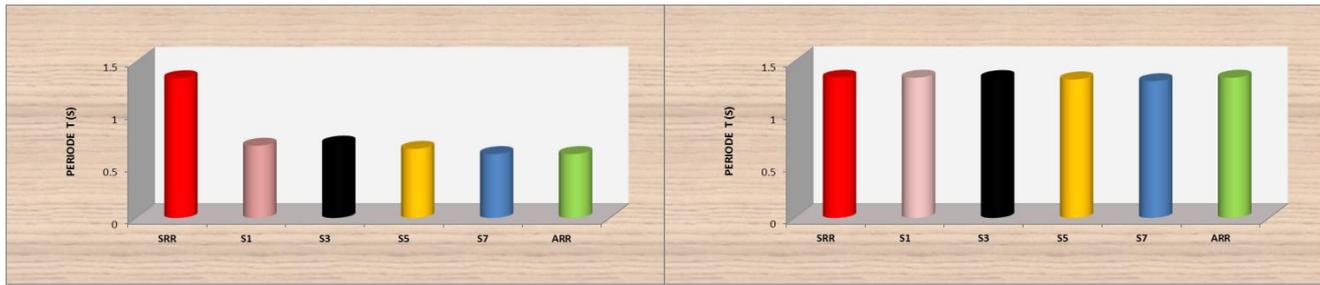
En considérant douze modes de vibration , on présente et on

##### 5.1 Réponse en termes de période naturelle fondamentale

Les valeurs des périodes et pulsations naturelles ainsi que le pourcentage de la masse modale excitée sous le premier mode dans la direction longitudinale sont présentées dans le tableau3 ci-dessous :

Tableau 03: Propriétés modales des structures étudiées dans les deux configurations

Modele	Mainston			Recommandations RPA		
	T (s)	W(rad/s)	$\alpha$ (%)	T (s)	W(rad/s)	$\alpha$ (%)
<b>SRR</b>	1.34	4.70	77.82	1.34	4.70	77.82
<b>S1</b>	0.69	9.10	88.32	1.34	4.70	77.82
<b>S3</b>	0.71	8.82	81.36	1.33	4.71	78.12
<b>S5</b>	0.66	9.50	76.75	1.32	4.76	77.16
<b>S7</b>	0.61	10.35	76.75	1.30	4.82	77.59
<b>ARR</b>	0.61	10.28	83.08	1.34	4.70	77.82



a- structures macro-modélisées selon Mainstone

b- structures modélisées selon le RPA

Figure 08 : Comparaison des périodes fondamentales longitudinales des modèles étudiés avec et sans remplissage rigide

On peut observer à partir de la figure 8.a, que le modèle SRR qui représente le modèle sans remplissage rigide (sans bielle) donne une période plus longue par rapport aux autres modèles considérés dans l'analyse. Les résultats indiquent que l'introduction du remplissage réduit radicalement la période de vibration dans tous les modèles de construction d'environ 50% en moyenne par rapport au modèle SRR. Ceci est dû à l'ajout de la rigidité latérale apporté par la bielle à celle assurée par les poteaux.

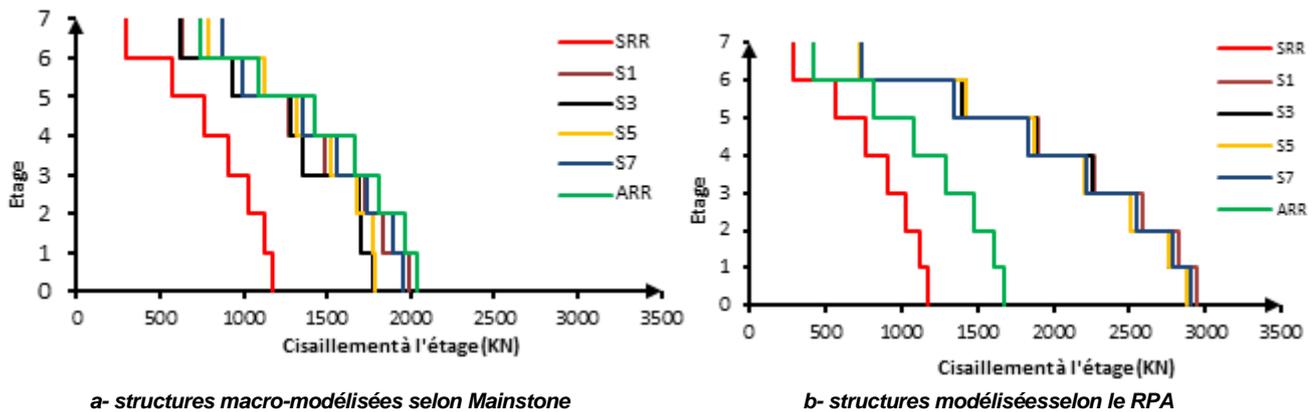
effet, d'une part, tous les modèles ont la même rigidité assurée par les poteaux et approximativement la même masse, d'autre part (la très petite différence des masses des modèles ayant un étage souple (S1, S3, S5, S7) est de l'ordre de 20 tonnes soit moins de 0.1% de la masse totale du modèle ARR et SRR). Ceci indique que la présence des murs de remplissage n'a aucun effet sur la valeur de la période principale des structures conçues selon le règlement parasismique algérien actuel (RPA99/version2003).

On peut observer à partir de la figure 8.b, que le modèle sans remplissage rigide SRR, fournit pratiquement la même période de vibration naturelle que tous les autres modèles qui prennent la rigidité du remplissage en considération. Ceci est expliqué par le fait que la valeur de R n'a aucune influence sur l'estimation de la période propre qui dépend principalement de la rigidité et de la masse de la structure quand le pourcentage du coefficient d'amortissement  $\xi$  est faible

En comparant les deux histogrammes tracés sur les figures 8.a et 8.b, on remarque que la valeur de la période fondamentale pour le modèle ARR et pour les modèles contenant un étage souple analysés avec bielles équivalentes sont environ deux fois inférieures à celle obtenue pour les mêmes modèles analysés selon le règlement parasismique algérien actuel (sans bielles).

$$T \approx T_D = \frac{2\pi}{w_D} \text{ avec } w_D = w\sqrt{1 - \xi^2} \approx w = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ ).En}$$

## 5.2 Réponse en termes de cisaillement d'étages



a- structures macro-modélisées selon Mainstone

b- structures modélisées selon le RPA

Figure 09: Comparaison des forces de cisaillement à l'étage le long de la hauteur des modèles étudiés avec et sans remplissage rigide

Comme le montre la figure 9.a, la réponse en termes de forces de cisaillement aux étages pour le modèle sans remplissage rigide SRR montre une transmission des forces de cisaillement, approximativement deux fois en moyenne, plus petite à la base et à la superstructure que celles transmises aux modèles de construction avec remplissage

en maçonnerie rigide. La présence d'étages souples à la base ou à tout autre niveau diminue généralement, d'environ 8% en moyenne, les forces de cisaillement transmises aux étages des modèles de construction par rapport au modèle avec remplissage intégral ARR. Du point de vue de la conception parasismique, ignorer l'action de

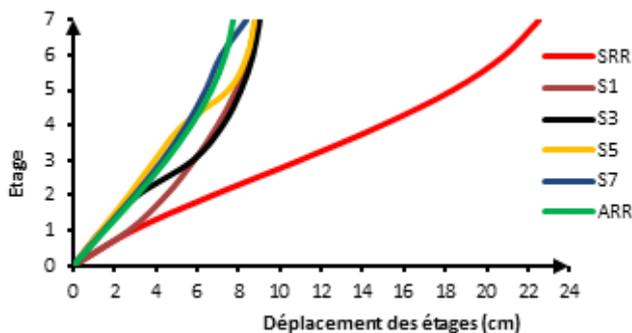
mur de remplissage de maçonnerie sous-estime considérablement la force de cisaillement à la base, qui est considéré comme l'un des principaux paramètres pendant les étapes de conception, et peut donc conduire à une conception excessivement sécuritaire mais très coûteuse. On constate aussi que les valeurs des forces de cisaillement des étages des modèles ayant un étage souple sont légèrement distantes aux niveaux des étages inférieurs et proches aux étages supérieurs.

On peut observer à partir de la figure 9.b, que la réponse en termes de forces de cisaillement aux étages pour le modèle sans remplissage rigide SRR montre une transmission de forces de cisaillement plus petites à la base et à la superstructure de 42% en moyenne que celles transmises aux modèles de construction avec remplissage en maçonnerie intégral ARR et de 150% pour les modèles ayant un étage souple (S1,S3 ,S5et S7). La présence d'étages souples à la base ou à tout autre niveau, contrairement au cas des modèles avec bielles, augmentede 75% en moyenne les forces de cisaillement transmises aux étages des modèles de construction par rapport au modèle avec remplissage intégral ARR, ce qui prouve que ce

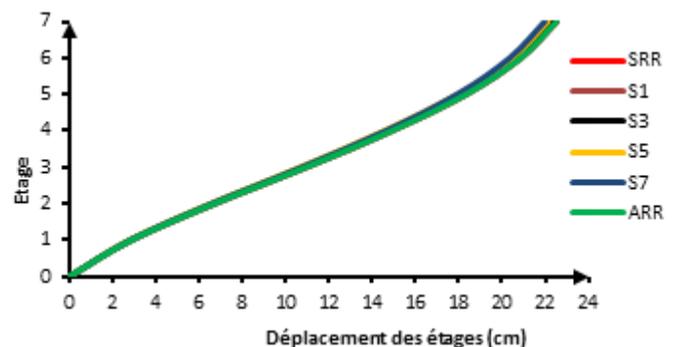
comportement, qui défie le sens logique de raisonnement, ne traduit pas la réalité physique de l'effet de la présence intégrale des murs de remplissage sur la réponse en termes de forces de cisaillement des structures en portiques. On constate également que les valeurs des forces de cisaillement des étages des modèles ayant un étage souple sont très proches le long de toute la hauteur.

En comparant les deux courbes tracées sur les figures 9.a et 9.b, on remarque que les valeurs des forces de cisaillements des étages pour le modèle ARR analysé avec bielles équivalentes sont supérieures de 60% en moyenne à celles obtenues pour le même modèle analysé selon le règlement parasismique algérien actuel (sans bielles). En revanche, les forces de cisaillements des étages pour les modèles ayant un étage souple à différents niveaux analysés avec bielles équivalentes sont inférieures en moyenne de presque 46% à celles obtenues pour les mêmes modèles analysés selon le règlement parasismique algérien actuel.

### 5.3 Réponse en termes de déplacements



a- structures macro-modélisées selon Mainstone



b- structures modélisées selon le RPA

Figure 10: Comparaison des déplacements des étages le long de la hauteur des modèles étudiés avec et sans remplissage rigide

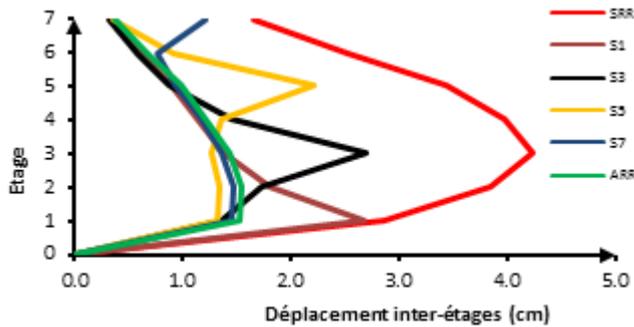
On peut observer à partir de la figure 10.a, que les déplacements obtenus à chaque niveau d'étage sont significativement supérieures pour le modèle sans remplissage rigide SRR par rapport aux autres modèles avec remplissage en maçonnerie rigide, notamment au niveau des étages supérieurs du bâtiment. Cela est peut être dû à l'augmentation de la rigidité du bâtiment avec la considération de l'action du mur de remplissage en maçonnerie. La comparaison de la courbe tracée pour le modèle avec remplissage rigide ARR avec les courbes tracées pour les modèles à étages souples à différents niveaux (S1,S3,S5 et S7) montre que ces dernières coïncident avec la courbe du modèle ARR et commencent à diverger en hauteur avec une augmentation légèrement significative des déplacements de ces étages. Cette augmentation soudaine des déplacements est due à l'absence d'action du remplissage en maçonnerie aux niveaux de l'étage souple. La tendance à l'augmentation des déplacements après avoir franchi l'étage souple s'est révélée

semblable pour tous les endroits considérés comme des étages souples. Il est intéressant de noter que l'étage souple n'affecte pas les valeurs de déplacement obtenues des étages situées en dessous. Cependant, on a trouvé une tendance à l'augmentation des valeurs de déplacement des étages situés au-dessus.

On peut observer à partir de la figure 10.b, que la réponse en termes de déplacements des étages pour le modèle sans remplissage rigide SRR affiche des valeurs identiques à la base et à la superstructure que celles obtenues pour les modèles de construction avec remplissage en maçonnerie rigide, ce qui prouve que ce comportement, qui dépasse l'entendement, ne traduit pas la réalité physique de l'effet de la présence des murs de remplissage rigide sur la réponse en termes de déplacement des structures en portiques. La présence d'étages souples à la base ou à tout autre niveau n'affecte absolument pas les déplacements des étages des modèles de construction par rapport au modèle avec

remplissage intégral ARR. On constate également que les valeurs des déplacements des étages des modèles ayant un étage souple sont très proches le long de toute la hauteur de la structure.

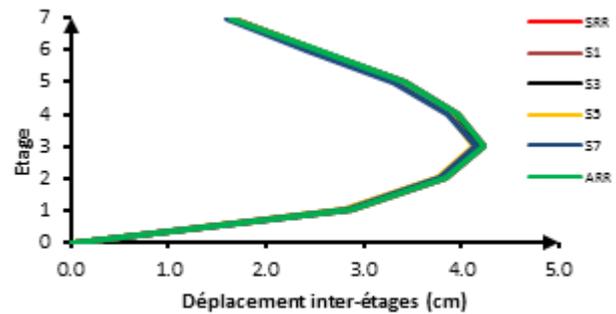
En comparant les deux courbes tracées sur les figures 10.a et 10.b, on remarque que les valeurs des déplacements des étages pour le modèle ARR et les modèles ayant un étage souple à différents niveaux analysés avec bielles



a- structures macro-modélisées selon Mainstone

équivalentes sont nettement inférieures en moyenne respectivement de 2.3 fois et 2 fois à celles obtenues pour les mêmes modèles analysés selon le règlement parasismique algérien actuel (sans bielles).

#### 5.4 Réponse en termes de déplacements inter-étages



b- structures modélisées selon le RPA

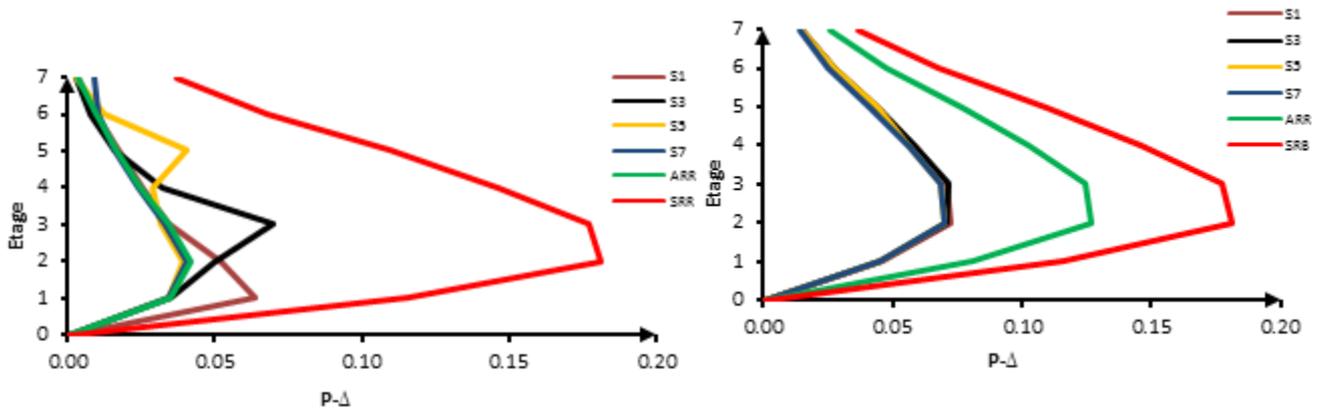
Figure 11: Comparaison des déplacements inter-étages le long de la hauteur des modèles étudiés avec et sans remplissage rigide

On peut observer à partir de la figure 11.a, que les déplacements inter-étages obtenus à chaque niveau d'étage pour le modèle sans remplissage rigide SRR sont importants et dépassent à certains niveaux, notamment au 3<sup>ème</sup> étage du bâtiment, la limite permise suggérée par le RPA à savoir 1% de la hauteur d'étage. On remarque aussi, que les déplacements inter-étages obtenus à chaque niveau d'étage pour le modèle sans remplissage rigide SRR, sont considérablement élevés, par rapport aux autres modèles avec remplissage en maçonnerie rigide, particulièrement pour le modèle avec remplissage intégral ARR. Cela est probablement dû à l'augmentation de la rigidité du bâtiment avec la considération de l'action du mur de remplissage en maçonnerie. On remarque aussi d'après la figure, que les valeurs de déplacements inter-étages pour tous les modèles de bâtiment à étage souple affichent presque des valeurs semblables à ceux obtenus pour le modèle ARR qui considère l'action du remplissage intégral en maçonnerie, sauf à l'emplacement d'étage souple où une augmentation significative du déplacement inter-étages peut être observée. En considérant l'action de la paroi de remplissage en maçonnerie dans la modélisation des bâtiments, elle diminue les valeurs des déplacements inter-étages induits. Cependant, l'existence d'un étage souple à n'importe quel niveau augmente la valeur de déplacement inter-étages à cet étage et peut dépasser les limites permises suggérées par les codes de conception.

On peut remarquer à partir de la figure 11.b, que la réponse en termes de déplacements inter-étages des étages pour le modèle sans remplissage rigide SRR affiche des valeurs identiques à la base et à la superstructure que celles obtenues pour les modèles de construction avec remplissage en maçonnerie rigide, ce qui prouve que ce comportement irréaliste ne traduit pas la réalité physique de l'effet de la présence des murs de remplissage rigide sur la réponse en termes de déplacements inter-étages des structures en portiques. La présence d'étages souples à la base ou à tout autre niveau n'affecte absolument pas les déplacements inter-étages des étages des modèles de construction par rapport au modèle avec remplissage intégral ARR. On constate également que les valeurs des déplacements inter-étages des modèles ayant un étage souple sont très proches le long de toute la hauteur de la structure.

En comparant les deux courbes tracées sur les figures 11.a et 11.b, on remarque que les valeurs des déplacements inter-étages des étages pour le modèle ARR et les modèles ayant un étage souple à différents niveaux analysés avec bielles équivalentes sont nettement inférieures en moyenne (environ 3 fois) à celles obtenues pour les mêmes modèles analysés selon le règlement parasismique algérien actuel (sans bielles). On constate également, que les valeurs des déplacements inter-étages des étages des modèles ayant un étage souple, analysés sans bielles sont très proches le long de toute la hauteur de la structure, alors que ceux modélisés sans bielles sont proches sauf à l'endroit de l'étage souple où on constate une divergence soudaine (un pic).

### 5.5 Réponse en termes d'effet P- $\Delta$



a- structures macro-modélisées selon Mainstone

b- structures modélisées selon le RPA

Figure 12: Comparaison des effets P- $\Delta$  à l'étage le long de la hauteur des modèles étudiés avec et sans remplissage rigide

On peut observer à partir de la figure 12.a, que les effets p- $\Delta$  obtenus à chaque niveau d'étage pour le modèle sans remplissage rigide SRR sont importants et dépassent à certains niveaux, notamment au 2<sup>ème</sup> étage du bâtiment, la limite permise suggérée par le RPA à savoir 0,1. On remarque aussi, que les effets p- $\Delta$  obtenus à chaque niveau d'étage pour le modèle sans remplissage rigide SRR, sont considérablement élevés, par rapport aux autres modèles avec remplissage en maçonnerie rigide, particulièrement pour le modèle avec remplissage intégral ARR. Cela est probablement dû à l'augmentation de la rigidité du bâtiment avec la considération de l'action du mur de remplissage en maçonnerie. On remarque aussi d'après la figure, que les valeurs des effets P- $\Delta$  pour tous les modèles de bâtiment à étage souple affichent presque des valeurs semblables à ceux obtenus pour le modèle ARR qui considère l'action du remplissage intégral en maçonnerie, sauf à l'emplacement d'étage souple où une augmentation significative de l'effet P- $\Delta$  u des étages peut être observée. En considérant l'action de la paroi de remplissage en maçonnerie dans la modélisation des bâtiments, elle diminue les valeurs des effets p- $\Delta$  induits. Cependant, l'existence d'un étage souple à n'importe quel niveau augmente la valeur des effets P- $\Delta$  à cet étage et peut dépasser les limites permises suggérées par le RPA actuel.

On peut observer à partir de la figure 12.b, que les effets p- $\Delta$  obtenus à chaque niveau d'étage pour le modèle sans remplissage rigide SRR et le modèle ARR sont importants et dépassent à certains niveaux, notamment au 2<sup>ème</sup> étage du bâtiment, la limite permise suggérée par le RPA à savoir 0,1. On peut constater aussi, que la réponse en termes d'effet P- $\Delta$  des étages pour le modèle sans remplissage rigide SRR affiche des valeurs supérieures à la base et à la superstructure que celles obtenues pour les modèles de construction avec remplissage en maçonnerie rigide, notamment pour les modèles à étage souple.

On remarque aussi, que les valeurs de l'effet P- $\Delta$  des étages pour le modèle avec remplissage rigide ARR sont considérablement inférieures à celles pour les modèles à étage souple, ce qui prouve que ce comportement, qui défie le sens logique de raisonnement, ne traduit pas la réalité physique de l'effet de la présence des murs de remplissage rigide sur la réponse en termes d'effet P- $\Delta$  des étages des structures en portiques. On constate également que les valeurs des d'effet P- $\Delta$  des étages des modèles ayant un étage souple sont très proches le long de toute la hauteur de la structure.

En comparant les deux courbes tracées sur les figures 12.a et 12.b, on remarque que les valeurs des effets P- $\Delta$  des étages pour le modèle ARR analysé selon le RPA (sans bielle) sont plus importantes (environ 3fois) que celles du même modèle analysé avec bielle. Les modèles ayant un étage souple à différents niveaux analysés avec bielles équivalentes, ont des valeurs des effets P- $\Delta$  des étages nettement inférieures en moyenne à celles obtenues pour les mêmes modèles analysés selon le règlement parasismique algérien actuel (sans bielles). On constate également, que les valeurs des effets P- $\Delta$  des modèles ayant un étage souple, analysés sans bielles sont très proches le long de toute la hauteur de la structure, alors que ceux modélisés sans bielles sont proches sauf à l'endroit de l'étage souple où on constate une divergence soudaine (un pic).

## 5.6 Réponse en termes de moment de renversement d'étages

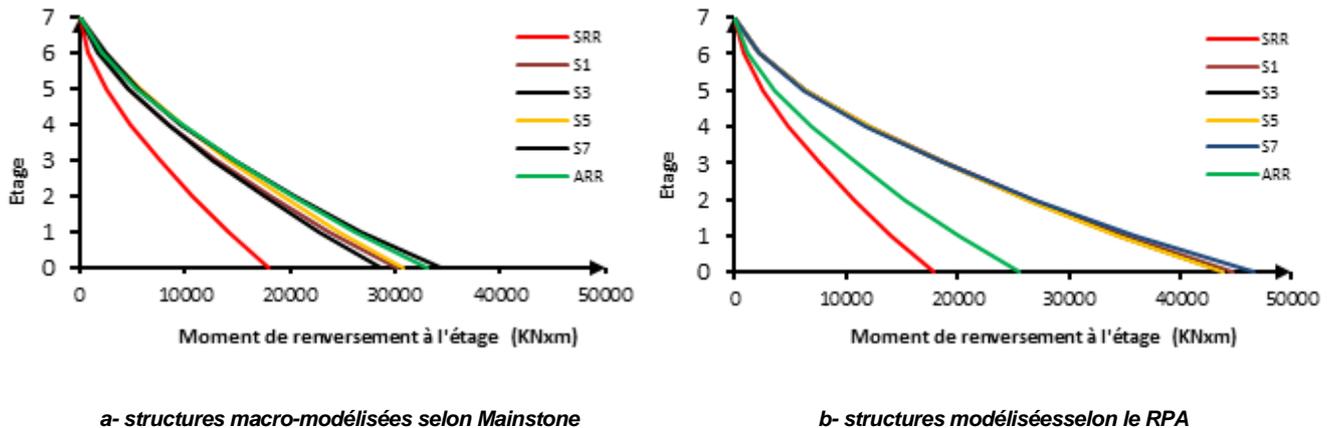


Figure 13: Comparaison du moment de renversement à l'étage le long de la hauteur des modèles étudiés avec et sans remplissage rigide

Comme on peut le voir dans la figure 13.a, le modèle SRR qui ignore l'action de mur de remplissage de maçonnerie sous-estime considérablement les moments de renversement par rapport aux autres modèles qui prennent l'action du remplissage en considération. Les moments de renversement induits pour le modèle de bâtiment en portique avec des murs entièrement remplis en maçonnerie ARR et ceux ayant des étages souples à différents endroits montrent des changements insignifiants dans les valeurs obtenues aux étages supérieurs. Cependant, le changement des moments est légèrement prononcé aux étages inférieurs.

Comme on peut le voir dans la figure 13.b, le modèle SRR sous-estime les moments de renversement par rapport aux autres modèles qui prennent l'action du remplissage en considération. Les moments de renversement des étages induits par le modèle de bâtiment en portique avec des murs entièrement remplis en maçonnerie ARR affichent des valeurs nettement inférieures à celles obtenues par ceux ayant des étages souples à différents endroits et ceci pour tous les étages, ce qui ne traduit pas le comportement physique réel attendu. On constate aussi, que les moments de renversement induits par les modèles de bâtiment en portique ayant des étages souples à différents endroits montrent des changements insignifiants dans les valeurs obtenues aux niveaux de tous les étages.

En comparant les deux courbes tracées sur les figures 13.a et 13.b, on remarque que les valeurs des moments de renversement des étages pour le modèle ARR analysé avec bielles équivalentes sont environ 40% plus importantes que celles du même modèle analysé sans bielles. Les modèles à étages souples modélisés sans bielles fournissent des valeurs des moments de renversements 30% plus importantes que celles des mêmes modèles analysés sans bielles. On constate également, que les valeurs des moments de renversement des étages des modèles ayant un étage souple, analysés sans bielles sont très proches le long de toute la hauteur de la structure, alors que ceux modélisés avec bielles sont proches aux étages supérieures et

divergent aux niveaux des étages inférieures.

## 6 CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Dans ce travail, une étude comparative est effectuée sur l'impact des murs de remplissage en maçonnerie sur le comportement sismique d'un bâtiment en portiques en béton armé RDC+6 étages, en modélisant, d'une part, la présence des murs de remplissage en maçonnerie par une bielle diagonale équivalente unique et en appliquant les recommandations du règlement parasismique algérien actuel (RPA99/version 2003), d'autre part. A cet effet, une analyse dynamique modale spectrale de différents modèles de bâtiments tridimensionnels Rdc+6 étages tels que (1) cadre nu, (2) cadre avec des panneaux de remplissage sur toute la hauteur et (3) modèles de portiques avec panneaux de remplissage avec un étage souple situé à différents niveaux de la structure a été réalisée. Les résultats d'analyse obtenus dans ce travail indiquent que la réponse sismique des modèles de construction en béton armé analysés avec la modélisation de l'action des murs de remplissage en maçonnerie avec une bielle diagonale équivalente est nettement plus réaliste et plus représentative de l'interaction portique-remplissage que celle des constructions modélisées selon le règlement parasismique algérien actuel (RPA99/version 2003). En conclusion, on peut dire le règlement parasismique algérien actuel (RPA99/version 2003) :

- ✓ surestime considérablement de plus de 200% en moyenne la valeur de la période fondamentale pour toutes les constructions avec remplissage rigide intégrale ou ayant une transparence. Il fournit une valeur identique de la période pour tous les modèles, ce qui ne reflète pas l'action mécanique de la présence ou de l'absence du remplissage.

- ✓ sous-estime relativement les efforts de cisaillement des étages d'environ 60% pour les constructions avec remplissage rigide intégrale, conceptuellement inadmissible, et surestime considérablement les efforts de cisaillement des étages d'environ 42% pour les constructions avec remplissage rigide ayant une transparence ou un étage souple, économiquement intolérable.
- ✓ surévalue considérablement de plus de 200% en moyenne les valeurs des déplacements des étages aussi bien pour les constructions avec remplissage rigide intégrale ARR que pour les constructions ayant une transparence ou un étage souple. Il fournit des déplacements des étages identiques pour tous les modèles ce qui indique son insensibilité à la présence du remplissage intégral ou à l'existence d'un étage souple.
- ✓ surévalue considérablement d'environ 300% en moyenne les déplacements inter-étages aussi bien pour les structures avec remplissage intégral sur toute la hauteur que pour les structures ayant un étage souple à différents niveaux. Il ne met pas en évidence l'amplification des valeurs de déplacements inter-étages au niveau des emplacements géométrique des étages souples. Il fournit des valeurs identiques des déplacements inter-étages pour le modèle sans remplissage rigide et pour les modèles de construction avec remplissage en maçonnerie rigide, ce qui ne traduit pas la réalité physique de l'interaction portique-remplissage.
- ✓ surestime considérablement d'environ 300% les effets P- $\Delta$  des étages aussi bien pour les structures avec remplissage rigide intégral que pour les structures ayant un étage souple à différents niveaux. Il ne met pas en évidence l'amplification des valeurs des effets P- $\Delta$  au niveau des emplacements géométrique des étages souples. Ce règlement donne des valeurs des effets P- $\Delta$  des étages pour les structures avec remplissage rigide nettement plus important que celles fournies pour les structures ayant une transparence, chose qui reflète contradictoirement l'action attendue de la présence intégrale des murs de remplissage.
- ✓ Sous-estime d'environ 40% en moyenne les valeurs du moment de renversement pour les structures avec remplissage intégral sur toute la hauteur et de plus de 30% en moyenne pour les structures à étages souples. Ce règlement donne des valeurs des moments de renversements des étages pour les structures avec remplissage rigide nettement moins important de presque 200% que celles fournies pour les structures ayant une transparence, chose qui va à l'encontre de l'action attendue de la présence intégrale des murs de remplissage.

## REFERENCES

- [1] A. Abed and A. Louzai, "Comportement sismique des structures en portiques en béton armé avec remplissage en maçonnerie". *Annales du bâtiment et des travaux publics*, pp. 34-42, 2014
- [2] BAEL 91, 1992, Règles Techniques de Conception et de Calcul des Ouvrages et Constructions en Béton Armé suivant la Méthode des Etats Limites, Edition Eyrolles.
- [3] D. Samoilă, "Masonry infill panels - analytical modeling and seismic behavior". *IOSRJEN*, Vol. 3, pp. 30-39, 2013
- [4] Fédéral Emergency Management Agency (FEMA), 1997, NEHRP the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA- 273.
- [5] Hossein Mostafaei and Toshimi Kabeyasawa, "Effect of Infill Masonry Walls on the Seismic Response of Reinforced Concrete Buildings Subjected to the to the 2003 Bam Earthquake Strong Motion : A Case Study of Bam Telephone Center". *Earthquake Research Institute, The University of Tokyo*, Vol. 79 (2004) pp. 133-156
- [6] Klinger R.E. and Bertero V.V., 1978, Earthquake Resistance of Reinforced Infilled Frames, *Journal of structural Engineering*, ASCE, vol. 104, no. st6, pp.973- 989.
- [7] M. Genidy, N. Hanna, H. Tahooun and S. Mahmoud, "Seismic Response Evaluation of Moment- Resisting-Frame Multi-Story Buildings with Soft Story". *IJCSE*, Vol. 3, pp. 118-127, 2015
- [8] M. Papadrakakis, M. Fragiadakis, V. Plevris, "Masonry Infilled Reinforced concrete Frames With Openings". *Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Corfu, Greece, 26-28 May 2011
- [9] Mainstone R.J., 1971, On the Stiffness and Strength of Infilled Frames, *Proceedings of the institution of Civil Engineers*

- [10] Paulay t. and Priestly, 1992, Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, Edition John Wiley and sons, inc.
- [11] Polyakov,S.V, "On the interaction between masonry filler walls and enclosing frame when loaded in the plane of the wall", EERI, San Francisco, pp. 36–42 ,1960.
- [12] Règles Parasismiques Algériennes (RPA) 1999/version 2003, Centre national de recherche Appliquée en Génie Parasismique, Algérie