
Techniques de renforcement des bâtiments en béton armé vis-à-vis du séisme

Rafik Madi⁽¹⁾, Mohamed Guenfoud⁽¹⁾

⁽¹⁾Laboratoire LGCH, Université 8 mai 45, B.P. 401, Guelma, Algérie.

*madirafik2000@yahoo.fr

RÉSUMÉ. La sollicitation sismique est le révélateur de défauts, d'insuffisances, de vices de conception, de calculs et d'exécution qui, sans séisme pourraient rester à jamais cachés. Après séisme les constructions subissent des dégâts qui peuvent aller jusqu'à l'effondrement complet, ensevelissant corps et biens, ce qui nécessite des renforcements ou des réparations. Chaque opération de renforcement ou de réparation requiert une réflexion particulière et nécessite l'utilisation de méthodes, d'instruments et de techniques adaptées à la situation et aux problèmes spécifiques de chacune des constructions. Le but de cet article est d'étudier la pathologie des bâtiments d'habitations en béton armé ainsi que quelques techniques de renforcement vis-à-vis au séisme ainsi que l'évaluation de la vulnérabilité en utilisant l'analyse Pushover. Cette méthode permet de tracer les courbes de fragilité, de déterminer les zones plastiques, le sens le plus vulnérable, d'évaluer le degré d'endommagement et par conséquent de connaître les éléments à renforcer. Les résultats obtenus montrent que la pathologie diffère selon la conception de la structure des bâtiments, des matériaux utilisés, la nature du sol, l'intensité du séisme, etc. Le renforcement à adopter est fonction de la pathologie de la construction. Le renforcement par ajout de voiles de contreventement en béton armé augmente considérablement la capacité de la structure renforcée en augmentant la résistance à l'effort tranchant avec réduction des déplacements.

ABSTRACT. The solicitation is the developer of seismic faults, shortcomings, defects in design, calculations and enforcement, without earthquake might remain hidden forever. After the earthquake buildings suffer damage that can lead to complete collapse, burying the body and property, which requires strengthening or repairs. Each operation to strengthen or repair requires special consideration and requires the use of methods, tools and techniques appropriate to the situation and specific problems of each of the constructs. The aim of this paper is to study the pathology of apartment buildings of reinforced concrete and some reinforcement techniques towards the earthquake and the vulnerability assessment using analysis Pushover. This method allows to trace the fragility curves, to determine the plastic hinges, the most vulnerable direction, assess the degree of damage and therefore to know what to reinforce. The results obtained show that the disease differs depending on the design of building structures, materials, soil type, the intensity of the earthquake, etc. The building is to be adopted depending on the condition of the building. Strengthening by the addition of walls reinforced concrete greatly increases the ability of the reinforced structure by increasing the resistance to shear and reduction of displacements.

MOTS- CLES: séisme, dégâts, pathologie, bâtiment d'habitation, renforcement.

KEYWORDS: earthquake, damage, pathology, residential building, strengthening

1. Introduction

Le risque sismique est lié à l'aléa sismique et à la vulnérabilité de la construction, raison pour laquelle une démarche globale de conception parasismique dans la construction doit être mise en place. Elle doit s'appuyer sur le respect de la réglementation parasismique, la conception architecturale parasismique et la mise en œuvre soignée de la construction. Le dimensionnement d'une structure contre les actions d'un séisme dépend du comportement ductile ou non ductile. Dans le cas d'un comportement non ductile, la structure devra être très rigide et résistante, générant ainsi des coûts élevés. L'ouvrage ne subira que peu de dégâts même pour un séisme d'une certaine importance. Toutefois si les valeurs admises pour le dimensionnement sont dépassées, la structure pourrait s'écrouler de façon fragile. Le comportement ductile permet une dissipation d'énergie considérable dans certaines sections choisies sans provoquer l'écroulement de la structure globale. Le dimensionnement permet d'adopter des sections plus faibles et conduites à des structures plus économiques. Cependant, il est à noter que la structure peut subir, déjà pour des séismes de faible magnitude, des déformations plastiques qui nécessitent une réparation ou un renforcement de certaines sections. Actuellement il existe plusieurs méthodes pour le renforcement des structures vis-à-vis au séisme dans le but d'augmenter la capacité des structures.

2. Pathologie des bâtiments vis-à-vis au séisme

En génie civil, la pathologie détermine les causes de symptômes et de maladies des constructions. L'objectif réside dans la recherche des remèdes pour ces signes de fatigue.

Les causes principales de la pathologie sismique des bâtiments sont :

a. erreurs de conception

maçonnerie non chaînée (Figure 1), bâtiments avec vide sanitaire sur poteaux courts, salles de classes ou autres locaux avec ouvertures en vasistas: formations des poteaux courts (Figure 2), l'effet P- Δ (Figure 3) et dispositions constructives non adaptés (Figure: 4, 5 et 6).

b. erreurs de calcul

Absence de calcul parasismique. En Algérie ceci est valable pour l'écrasante majorité des constructions étudiées et réalisées avant 1981, et pour les constructions individuelles après 1981.

c. qualité de réalisation

La qualité doit répondre à un minimum de règle de l'art aussi bien au niveau des matériaux et composants de gros œuvres (et particulièrement de structure) eux-mêmes, qu'au niveau également de la mise en œuvre (Bertero V., 1982).



Figure 1. *Maçonnerie non chaînée*



Figure 2. *La formation des poteaux courts*



Figure 3. *Poteaux de géométrie élancée a subi une flexion globale*



Figure 4. *Disposition incorrecte des cadres*

d. Les causes techniques

- Mauvaise conception architecturale : Lorsque la forme en plan des bâtiments est irrégulière (Figure 7: a, b et c), dissymétrique (Dowrick D. J., 1977), ou présente des décrochements notables (Forme en L, T et U), la conception structurale est souvent complexe et entraîne, en l'absence de joint des efforts de torsion nuisibles qui modifient le comportement dynamique des bâtiments (Figure 7 et 8).

- Mauvaise conception structurale : dans certains cas le contreventement est insuffisant : sous dimensionnement, contreventement dans un seul sens, plancher

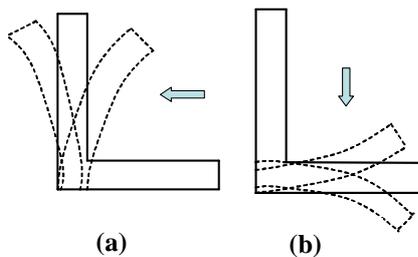
assez rigide dans leur plan et ne pouvant faire fonctionner ensemble les éléments de contreventement, l'ignorance de l'interaction maçonnerie-structure (V. Davidovici, 2003), (Figures: 9 et 10), la mauvaise conception des nœuds, etc.



Figure 5. Eclatement du nœud par manque de frettage

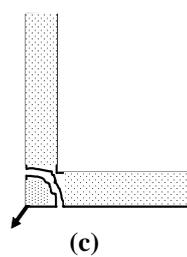


Figure 6. Effondrement par manque de ductilité



(a)

(b)



(c)



Figure 7. Cas de bâtiments en L

Figure 8. Changement brusque des rigidités en élévation

- Mauvaise mise en œuvre : Une cause importante des désordres est la mise en œuvre due soit à la qualité des matériaux ou le non respect des plans et règles de l'art.
- insuffisances diverses : insuffisance de contrôle de la qualité des matériaux et suivi des travaux pendant la phase de réalisation.
- Manque des études de reconnaissance géotechnique du sol qui permettent d'éviter les grands mouvements de sol induits par le séisme.

3. RENFORCEMENT

Le renforcement est une opération qui consiste à augmenter le niveau de service et en particulier l'augmentation de la ductilité et de la résistance d'un élément de structure pour en permettre l'utilisation dans des conditions non prévues à l'avance pendant la phase de conception et de calcul. Parmi les nombreuses techniques de

renforcement, les plus courantes: incorporation de profils en acier, collage d'éléments préfabriqués, addition d'armatures en aciers sans augmentation de la

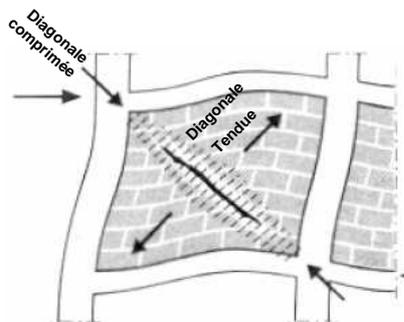


Figure 9. Interaction
Maçonnerie-portique

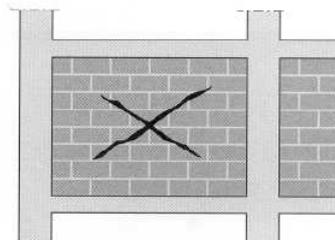


Figure 10. Formation de fissures
en X après séisme

de la section en béton avec ou sans addition d'armature en acier (Abowtaha R. S. et al., 1999), adjonction de platines en acier (Azizinamini A. et al., 1992), adjonction de lamelles ou bandes de matériaux composites (Khalifa A. et al., 2001), renforcement par la technique NSMR : cette méthode consiste à sceller les joncs ou bandes de polymères renforcées de fibres de carbone (CFRP) dans des engravures déjà préparées sur la surface de la poutre à renforcer, etc.

4. Renforcement d'une structure en béton armé par voiles de contreventement

Il s'agit d'une structure en béton armé R+4 (figures : 11 et 12), Planchers en corps creux de 20 cm d'épaisseur. Les dimensions sont (30x45) cm pour les poutres, (30x35) pour les chaînages, (30x40) pour les poteaux et 15 cm d'épaisseur pour les voiles de contreventement. La hauteur d'étage est de 3,06 m. L'ouvrage est implanté dans une zone sismique de classe II (RPA 99, version 2003), avec un sol de type meuble. On utilise l'analyse "Pushover" pour déterminer la capacité de la structure. Pour les rotules plastiques, le choix s'est porté sur les rotules définies selon le FEMA 356 (FEMA 356) intégré dans SAP2000. Pour le calcul des rotations plastiques on utilise M_3 pour les poutres et $(P - M_2 - M_3)$ pour les poteaux. Les caractéristiques des sont les suivantes (Règle BAEL 91) :

Béton: $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$, $E_c = 32164 \text{ MPa}$.

Aciers : FeE400 pour armature longitudinale, $E_s = 2,110^5 \text{ MPa}$, $f_y = 400 \text{ MPa}$;
FeE235 pour armature transversale, $E_s = 2,110^5 \text{ MPa}$, $f_y = 235 \text{ MPa}$.

5.1 Détermination de la courbe "Pushover"

Nous avons utilisés le logiciel SAP2000 non linéaires version 11 (SAP 2000), (Habibullah A. et al., 1998). En premier lieu les résultats sont donnés sous forme de courbe qui relie l'effort tranchant à la base et le déplacement au sommet de la structure et ce pour déterminer le sens le plus vulnérable. Pour les coefficients sismiques on prendra $C_a = 0,28$ et $C_v = 0,40$.

5.1.1 Structure poteaux-poutres

a. Sens x-x et y-y

La courbe de fragilité est donnée par les figures 13 et 14. En ajoutant le spectre de réponse, la courbe de fragilité prendra la forme mentionnée sur les figures 15 et 16. La formation des rotules plastiques et leurs positionnements au niveau de la structure sont, mentionnés sur les figures 17 et 18. Dans le sens x-x, on remarque l'apparition des rotules plastiques de type **C** dans les poutres et les poteaux et de type **D** uniquement dans les poutres. Dans ce cas l'ouvrage devient instable et nécessite un renforcement dans ce sens. Dans le sens y-y, y à la formation de rotules plastiques type **C** uniquement dans les poteaux, ce qui nécessite un renforcement. D'après l'analyse Pushover nous pouvons conclure que l'apparition des rotules plastiques correspond à un effort tranchant $V=145.381$ tf et un déplacement

$D= 0.144$ m pour le sens x-x et $V= 216.225$ tf et $D=0.115$ m pour le sens y-y. La structure est plus vulnérable dans le sens x-x. Pour augmenter la résistance il faut renforcer la structure dans le sens le plus vulnérable, mais le code parasismique algérien exige le renforcement dans les deux directions.

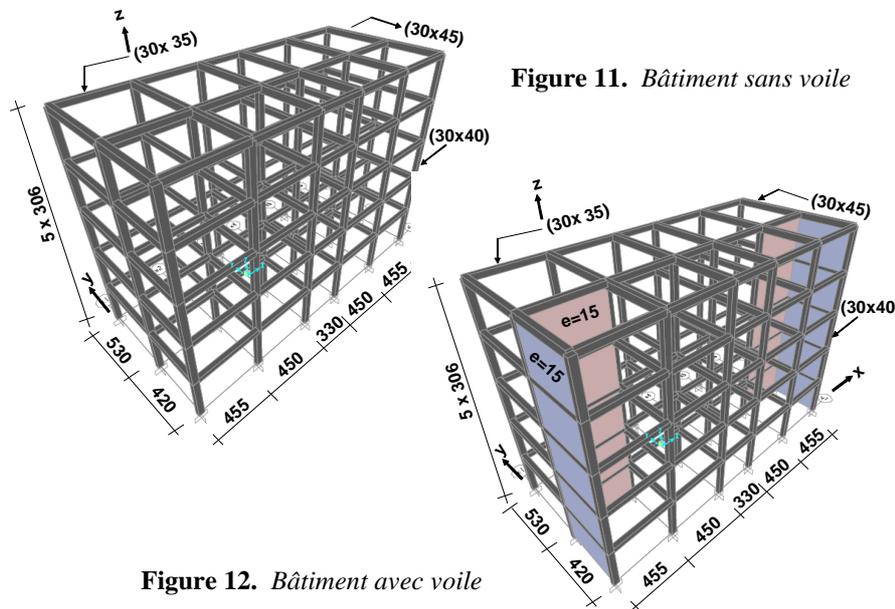


Figure 11. Bâtiment sans voile

Figure 12. Bâtiment avec voile

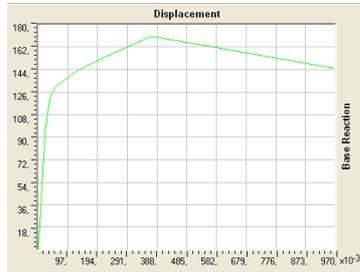


Figure 13. Déplacement en fonction de l'effort tranchant à la base, sens x-x

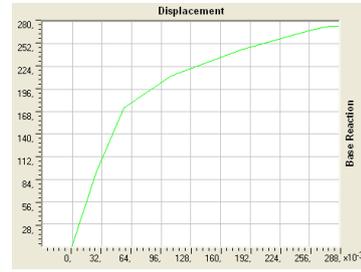


Figure 14. Déplacement en fonction de l'effort tranchant à la base, sens y-y

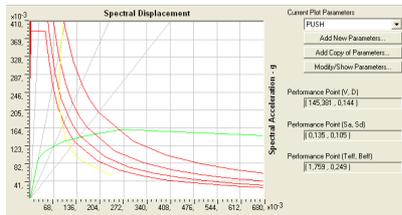


Figure 15. Courbe de fragilité sens x-x

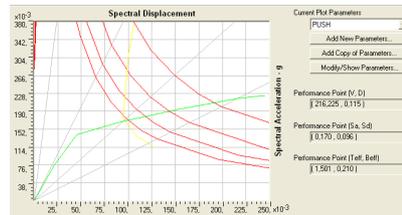


Figure 16. Courbe de fragilité sens y-y

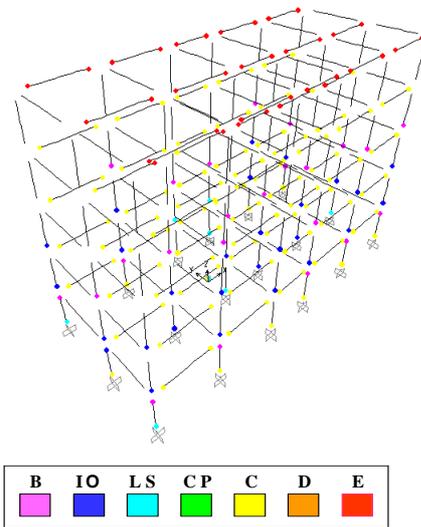


Figure 17. Formation des rotules plastiques, sens x-x

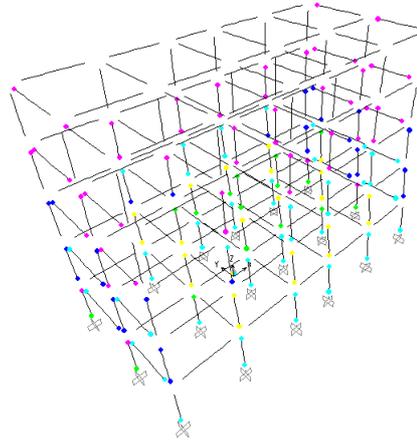


Figure 18. Formation des rotules plastiques, Sens y-y

5.1.2 Structure poteaux-poutres et voiles de contreventement

a. Sens x-x et y-y

La formation des rotules plastiques et leurs positionnements au niveau de la structure sont, mentionnés sur les figures 19 et 20.

Dans le sens x-x, la formation des rotules plastique est de type **B**. Y à aucun risque pour la stabilité de l'ouvrage. Dans le sens y-y, le comportement de la structure est pratiquement linéaire, ce qui explique l'absence de dommages à part l'apparition de rotules plastiques type **C** dans deux poteau liés aux voiles dans le RDC et 1^{ère} étage. Après l'introduction des voiles dans la structure, la capacité de la structure est $V=712.212$ tf et un déplacement $D= 0.024$ m pour le sens x-x et $V=731.569$ tf et $D=0.024$ m pour le sens y-y. La structure est devenue plus rigide par rapport à la structure en poteaux-poutres uniquement. Le comportement de la structure est pratiquement élastique.

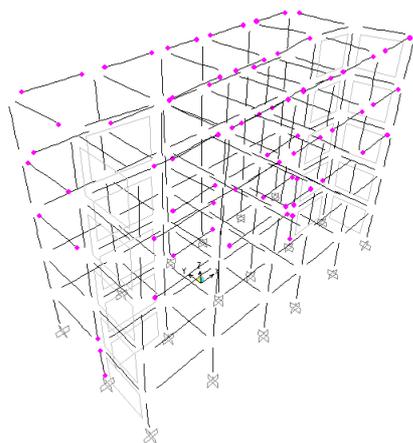


Figure 19. Formation des rotules plastiques, sens x-x

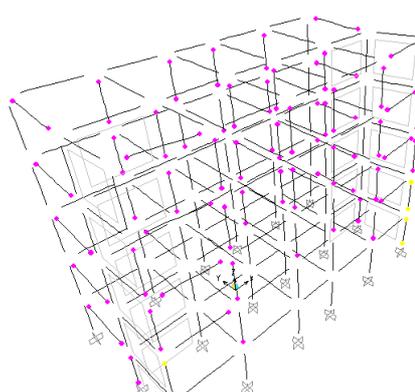


Figure 20. Formation des rotules plastiques, sens y-y

7.1.3 Comparaison des résultats

a. Sens x-x

Structure	Période T (s)	Effort tranchant V (kN)	Déplacement D_p (m)	Amortissement fictif (β_{eff})
Poteaux-poutres	1.759	145.381	0.144	0.249
Poteaux-poutres + voiles e dcontr.	0.305	712.212	0.024	0.052

Tableau 1. Comparaison des résultats sens x-x

a. Sens y-y

Structure	Période $T (s)$	Effort tranchant $V (kN)$	Déplacement $D_p (m)$	Amortissement fictif (β_{eff})
Poteaux-poutres	1.501	216.225	0.115	0.201
Poteaux-poutres + voiles de contr.	0.309	731.569	0.024	0.052

Tableau 2. Comparaison des résultats sens y-y

D'après les résultats mentionnés dans les tableaux ci-dessus, on peut conclure que l'ajout des voiles de contreventement augmente considérablement la rigidité et par conséquent la capacité de la structure.

Conclusion

La pathologie des bâtiments vis-à-vis au séisme dépend de plusieurs facteurs : le type de la structure, le nombre de niveaux, le système de contreventement, les matériaux utilisés, la nature du sol des fondations, etc. Avant le renforcement l'étude de la vulnérabilité est nécessaire. Elle permet de connaître les sens et les éléments les plus vulnérables et par conséquent le choix du type de renforcement adéquat. Actuellement il existe plusieurs méthodes de renforcement en fonction du but recherché: augmentation de la capacité portante, de la ductilité ou les deux simultanément. On peut renforcer la stabilité générale des ouvrages par ajout de certains éléments de contreventement intérieurs comme les voiles, ou bien la stabilité de certains éléments structuraux : poteaux, poutres et voiles par chemisage en béton, confinement en acier ou tissus en matériaux composites ou renforcement en flexion par plaques en aciers ou en FRP. Mais il faut être toujours prudent concernant le comportement de la structure après le renforcement et surtout les endroits de formation des rotules plastique et qui peuvent provoquer la ruine de l'ouvrage après le passage d'un séisme. Pour minimiser les dégâts en cas de séisme et aussi les difficultés de l'opération de réalisation ainsi que les prix élevés des renforcements, il faut bien dimensionner les éléments de la structure dans la phase de conception. Les résultats obtenus montrent qu'une structure en poteaux-poutres est moins stable que la même structure renforcée par voiles de contreventement et une construction rigide (renforcée) déplace moins qu'une construction plus faible et plus flexible pour le même niveau d'une demande spectrale, et moins de dommages sont prévus au système structural et aux composants non structuraux sensibles au déplacement.

Bibliographie

- Aboutaha, R.S., Engelhardt, M.D., Jirsa, J.O., and Kreger, M.E. "Rehabilitation of shear critical concrete columns by use of rectangular steel jackets." *ACI Structural J.*, 96(1), 1999.
- Azizinamini, A., Corley, G. W., and Johal, P.L.S. "Effects of transverse reinforcement on seismic performance of columns." *ACI Structural J.*, 89(4), 442-450, 1992.
- Bertero, V., "State of the art in seismic resistant construction of structures", *Proceedings of the third international earthquake microzonation conference*, University of Washington, Seattle, Washington, June 1982, Volume II, pp 767-805.
- CSI. SAP2000 V-11, "Integrated finite element analysis and design of structures basic analysis reference manual". Berkeley (CA, USA): Computers and Structures Inc, 2007.
- Dowrick, D. J., "Earthquake resistant design", John Wiley & Sons, New York, 1977.
- FEMA 273. Federal Emergency Management Agency. "NEHRP recommended provisions for seismic regulation for new buildings and other structures". Chapter 3, Washington, D. C.
- Habibullah, A., Pyle, S., 1998, "Practical three dimensional non linear static pushover analysis", *Structure magazine*, Winter, 1988.
- Khalifa, A., Nanni, A. and De Lorenzis, L. "Shear performance of RC beams strengthened with FRP". *The International Workshop on Structural Composites for Infrastructure Applications*, Cairo, Egypt, May, 217-230, 2001.
- Règle B.A.E.L.91 modifiées 99, Edition EYROLLES, Troisième tirage 2002.
- SAP2000, analysis reference manual. Berkeley (CA, USA): Computers and Structures Inc, 2007.
- Règles parasismiques algériennes, RPA 99, Version 2003.
- V. Davidovici, "Rapport préliminaire séisme de Boumerdes 21 mai 2003", Alger, Juin 2003.