



Appréciation de la sécurité parasismique d'une structure à voile élancé faiblement armé par la méthode push over

BOURADA Sofiane¹, BRANCI Taïeb¹

¹Laboratoire de Mécanique et Energétique,
Université Hassiba Benbouali, Hai Es Salam, Route de Senjas,
BP. 151, 02000, Ech Chlef, Algérie

Résumé : Par le passé, il a été constaté que de nombreux bâtiments à voiles en béton armé ont bien résisté sans endommagement exagéré à des séismes de fortes intensités. Mis-à-part leur rôle d'éléments porteurs vis-à-vis des charges verticales, les voiles en béton armé correctement dimensionnés peuvent être particulièrement efficaces pour assurer la résistance aux forces horizontales et permettent ainsi de réduire le risque sismique. Le mode de fonctionnement de ce type de bâtiment dépend donc du comportement de chaque élément de voile, mais le comportement de ce dernier est complexe puisqu'il dépend à la fois de son élancement, de l'importance des charges verticales, de la forme de sa section et de son ferrailage. L'objectif de cette communication est d'apprécier la sécurité parasismique d'une structure de bâtiment à voile élancé faiblement armé, dimensionnée selon les dispositions du code parasismique Algérien (RPA99/2003), en utilisant la méthode statique non-linéaire basée sur la méthode du spectre de capacité fournie par le code Américain ATC-40, sous une demande sismique inspirée du règlement Algérien. Une modélisation numérique tridimensionnelle est effectuée à l'aide du logiciel SAP2000 en simulant le voile par l'analogie "poteau-poutre" équivalent. A la lumière de cette évaluation, il s'est avéré que la structure de ce bâtiment développe une résistance suffisante aux actions sismiques imposées.

Mots-Clés : Structure, voile, pushover, performance, séisme.

1. Introduction

Le récent séisme à Boumerdès (Algérie) en 2003 a montré que même les constructions contreventées par des portiques autostables en béton armé conformes aux codes parasismiques en vigueur ne sont pas à l'abri des catastrophes naturelles. Donc l'utilisation des murs voiles en béton armés pour la construction des structures dans ces régions de forte sismicité devient de plus en plus fréquente. La raison est que les voiles, outre leur rôle porteur vis-à-vis des charges gravitaires sont particulièrement efficaces pour assurer la résistance aux forces horizontales reprenant la plus grande partie de l'effort sismique.

Ces voiles sont influés par plusieurs paramètres tels que le rapport entre la hauteur totale H et la largeur du mur voile l_w , il y a lieu de distinguer des voiles élancés (élancement H/l_w supérieur à 1.5) et des voiles courts (élancement H/l_w inférieur à 1.5). Pour les **voiles élancés**, les principaux modes de rupture sont (a) la rupture en flexion par plastification en traction des armatures verticales est le mode de rupture normale lorsque la flexion est prépondérante et que l'effort normal est faible. (b) La rupture en flexion par écrasement du béton. (c) Le mode de rupture des armatures tendues concerne des voiles **faiblement armés** en flexion, surtout si les armatures verticales sont essentiellement réparties et non pas concentrées aux bords. (d) Le mode de rupture en flexion/effort tranchant par plastification des armatures verticales de flexion et des armatures transversales. (e) Enfin le mode de rupture par écrasement dans le béton de l'âme [1].

L'objectif essentiel de ce travail est d'apprécier la sécurité parasismique d'une structure de bâtiment à voile élancé faiblement armé, dimensionnée selon les dispositions du code parasismique Algérien (RPA99/2003) [2], en utilisant la méthode du spectre de capacité, sous une demande sismique inspirée du même règlement.

2. Description de la structure étudiée

Une structure de bâtiment d'habitation en béton armé est étudiée, elle est composée respectivement de cinq niveaux dont la hauteur de chaque étage est de 3m et présente une superficie en plan de (14.55x14.55) m², le système de contreventement est composé de quatre portiques dans chaque direction avec des voiles en béton armé. Les dimensions et la géométrie de la structure sont indiquées sur la figure 1.a. Elle est considérée implantée en zone de sismicité moyenne (IIB) sur un sol meuble (S3)

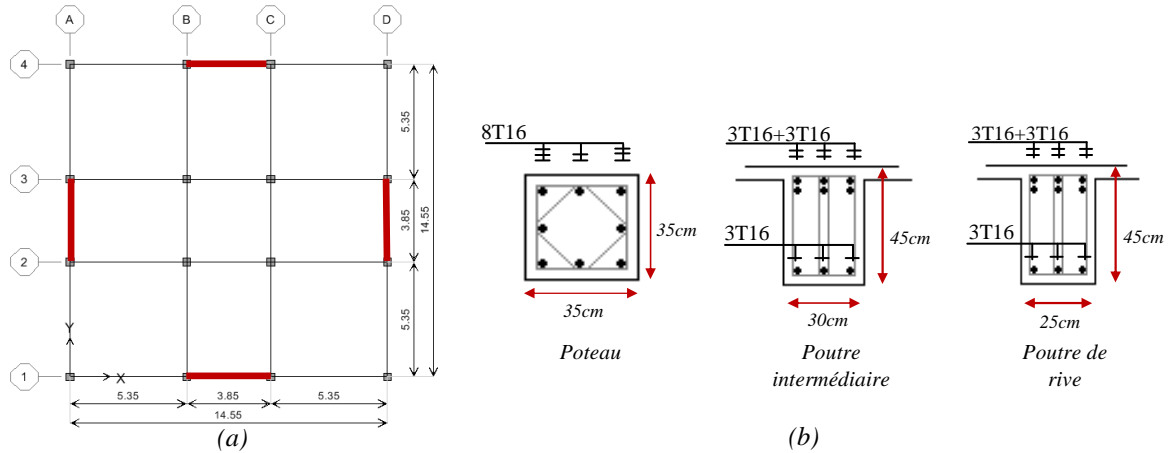


Figure 1 : Structure analysée ; (a) vue en plan (b) ferrailage des poteaux et poutres

Les éléments porteurs (poteaux et poutres) sont dimensionnés selon les prescriptions du règlement parasismique Algérien RPA99/ 2003 et les règles de l'Eurocode 2 [3] (voir figure 1.b).

Les murs voiles à sections rectangulaires d'épaisseur $b_w = 25cm$ et longueur $l_w = 435cm$, présentent un rapport d'élanement $H / l_w = 3.44$, ils sont conçus suivant les principes du dimensionnement en capacité selon le règlement européen Eurocode 8 [4 ; 5], en imposant une rotule plastique à la base du premier niveau en assurant une grande possibilité de ductilité dans cette zone (zone de la hauteur critique) et un comportement élastique dans les niveaux supérieurs [6], sous l'effet d'un effort tranchant à la base du bâtiment donné par l'équation (1)

$$V_b = S_a(T).W / g \quad (1)$$

où $S_a(T) / g$ est l'ordonnée du spectre de dimensionnement, donné par le code RPA99/ 2003, correspond à la période fondamentale T calculée par le programme SAP2000 [7], W est le poids de la structure.

Le ferrailage des murs voiles est présenté dans le tableau 1

Tableau 1 : Ferrailage des murs voiles

	1 ^{er} étage	2 ^{eme} et 3 ^{eme} étage	4 ^{eme} et 5 ^{eme} étage
En extrémité du mur	2x7 T16 esp 10cm	2x7 T14 esp 10cm	2x7 T12 esp 10cm
Ferrailage central	2x7 T12 esp 40cm	2x7 T10 esp 40cm	2x7 T10 esp 40cm

3. Méthode de spectre de capacité

Cette méthode, développée par Freeman en 1975 [8], est introduite dans le code Américain ATC40 [9], elle est utilisable pour des structures monomodales en première analyse, permet de définir un point de fonctionnement sur le palier de ductilité, et d'évaluer les dommages potentiels pour une action sismique donnée. Elle suit les pas suivants :

- Construction du spectre de capacité à partir de la courbe de pushover de la structure.

L'analyse pushover est effectuée en appliquant sur la structure une distribution de forces latérales croissantes de façon progressives et incrémentées jusqu'à ce que le déplacement de la structure atteigne son maximum. Dans ce but on utilise une approche de modélisation macroscopique simplifiée du mur voile (Fig. 2) par l'adoption d'un élément « poteau-poutre » équivalent situé sur l'axe central du mur [10 ; 11]

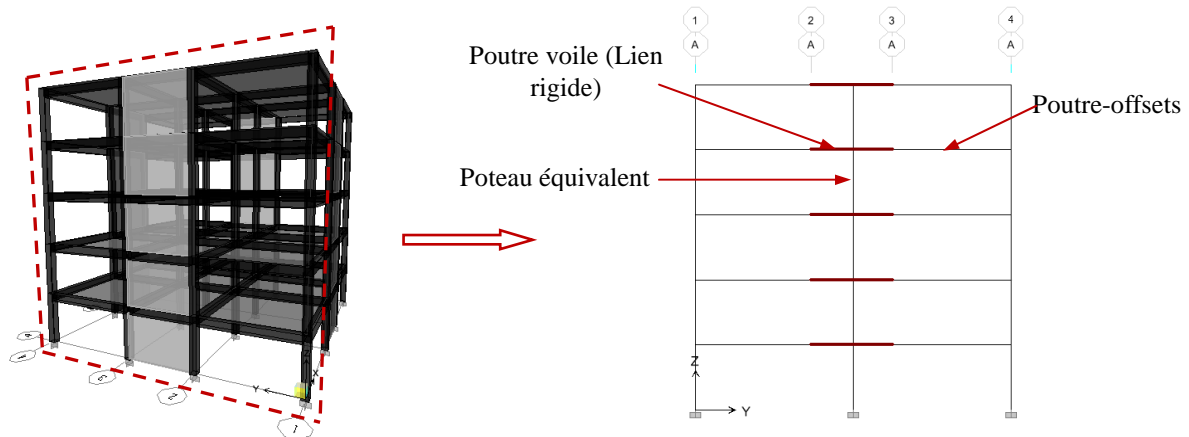


Figure 2 : Modélisation du mur voile par le programme SAP2000

Ce modèle se compose d'un seul élément flexionnel inélastique avec des mécanismes d'endommagement spécifiés (Hinges) localisés à chaque extrémité pour tenir compte du comportement non-linéaire des zones critiques (extrémités extérieures des poutres voiles et extrémités des poteaux).

Ensuite la courbe pushover (Fig.3) est transformée du format traditionnel $(V_b - d_t)$ au format accélération-déplacement spectral $(S_a - S_d)$.

- Conversion du spectre de réponse élastique $(S_a - T)$ au spectre de demande $(S_a - S_d)$.

Le spectre de réponse élastique est inspiré du règlement Algérien RPA99/ 2003 [2, 12]

$$\frac{S_a(T)}{g} = \begin{cases} 1.25A(1+1.5T/T_1) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5(1.25A) & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5(1.25A)(T_2/T)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3.0s \\ 2.5(1.5A)(3/T)^{3/2}(T/T_2)^{2/3} & T \geq 3.0s \end{cases} \quad (2)$$

où A , T_1 et T_2 sont respectivement le coefficient d'accélération de zone, les périodes caractéristiques associées à la catégorie du site.

- Détermination du point de performance de la structure.

Est faite par la superposition du spectre de demande avec le spectre de capacité et le déplacement cible (déplacement max. du système à 1SDDL) est facilement obtenu en utilisant la procédure graphique A ou B décrite dans le règlement ATC40 (Fig. 4)

- Conversion du point de performance à la demande de ductilité sur chaque élément de la structure.

Une fois le déplacement du système à 1SDDL est déterminé, il est transformé en déplacement global du système à PDDL.

4. Résultats et analyses

A la suite des résultats obtenus par l'étude menée sur cette structure, sur la base d'une analyse statique non-linéaire, il en découle les constatations suivantes :

4.1 Courbe push over du bâtiment analysé

Ayant d'utiliser la forme de distribution triangulaire des chargements latéraux selon la hauteur par la formule décrite dans le code Algérien (équation 3)

$$F_i = \frac{w_i \cdot h_i}{\sum w_i \cdot h_i} \cdot (V - F_t) \quad (3)$$

F_i , w_i , h_i , F_i et V sont respectivement, la force latérale, poids, hauteur de niveau i , effort concentré au sommet de la structure tient en compte des modes supérieurs, effort tranchant à la base calculer avec la relation suivante

$$V = \frac{A.D.Q}{R}.W \quad (4)$$

A , D , Q et R sont respectivement , accélération de zone, facteur d'amplification dynamique, facteur de qualité et facteur de comportement.

L'analyse pushover est effectuée, à l'aide du programme SAP2000, afin de déterminer les courbes de capacité représentant la variation de l'effort tranchant à la base en fonction du déplacement au sommet de la structure (figure 3) en se basant sur le mécanisme de ruine établie selon la courbe moment-rotation du code FEMA356 [13].

La loi moment-rotation du FEMA356 regroupe plusieurs niveaux de plastification définis par :
 A : Point d'origine B : Limite élastique C : Capacité ultime D : Résistance résiduelle. E : Rupture totale.
 D'autres points additionnels qui n'ont aucun effet sur le comportement de la structure, et qui sont adoptées par les codes de calcul, pour l'appréciation de l'analyse non-linéaire statique, et qui sont :
 IO : Occupation immédiate. LS : Sécurité sur la vie. CP : Prévention d'effondrement.

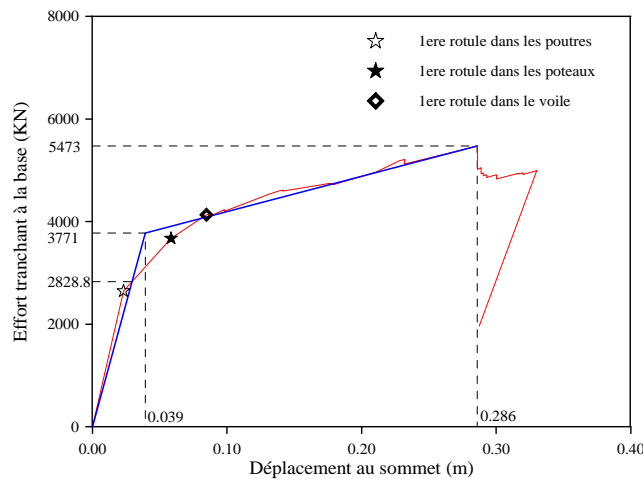


Figure 3 : Courbe de capacité (pushover)

La première rotule de type B est sensée d'apparaître, aux niveaux des extrémités des poutres, lorsque la structure est soumise à un effort tranchant à la base de $V_b = 2644KN$ supérieur à celui sélectionné pour le dimensionnement.

Aux niveaux des extrémités des poteaux, la première rotule de type B est apparue sous une demande sismique de $V_b = 3670KN$ correspondre à un déplacement de $d_t = 0.023m$ au sommet.

La première rotule de type B est apparue, aux niveaux des extrémités inférieures des murs voiles du premier niveau (au dessous de la hauteur critique), lorsque la structure est soumise à un effort tranchant à la base de $V_b = 4130KN$, le même voile atteint sa capacité ultime (plastification de type C) lorsque la structure est soumise à une effort de cisaillement maximale de $V_b = 5473KN$.

D'après la figure 3, le facteur de ductilité globale μ égale à 7.33 lorsque le déplacement ultime de la structure atteint $0.286m$ et déplacement à la limite élastique égale à $0.039m$, en utilisant une équivalence de telle sorte que l'aire de la courbe réelle et la courbe idéalisée soient égales et se croisent à une force égale à $0.75V_y$, d'après Paulay et Priestley [14]. Ce facteur reste bien supérieur à ceux adoptés par le règlement Algérien et de l'Eurocode 8 pour la conception de ce type de bâtiment.

4.2 Performance sismique de la structure étudiée

La méthode du spectre de capacité offre la possibilité de la représentation graphique des résultats obtenus, la figure 4 résume ces résultats

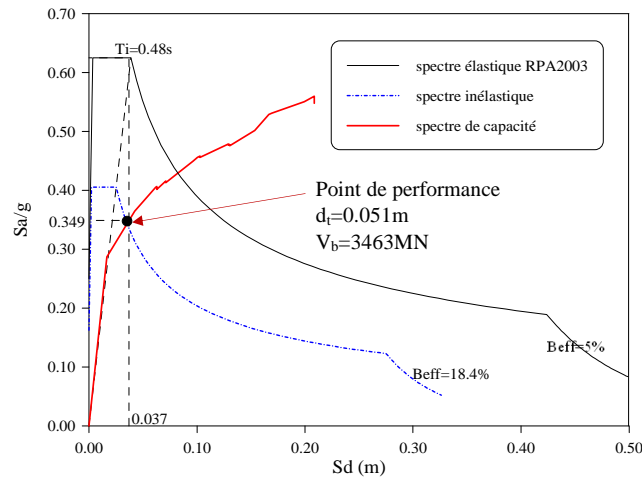


Figure 4 : Détermination du point de performance

Sachant que le déplacement maximal du système à 1SDDL (représenté graphiquement par l'intersection de la courbe de capacité et le spectre réduit pour un amortissement effectif $\beta_{eff} = 18.4\%$) est de 0.037 m , le point de performance correspond au déplacement maximal d_t est quant à lui estimé à 0.051 m . L'effort tranchant à la base requis du bâtiment est quant à lui égale $V_b = 3463\text{ KN}$

4.3 Formation des rotules plastiques

La figure suivante (figure 5) illustre la séquence obtenue de formation des rotules plastiques dans la structure étudiée lorsque le déplacement au sommet est correspond au déplacement cible (point de performance).

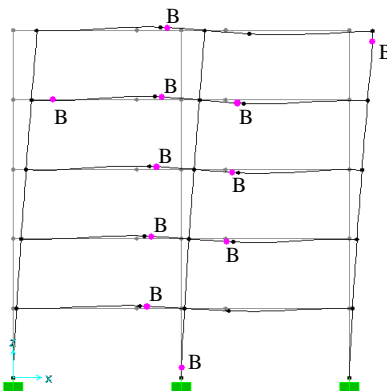


Figure 5 : Localisation des rotules plastiques

Les plastifications de type B sont apparues sur le long de la structure étudiée, où la majorité sont concentrées aux niveaux des extrémités des poutres voiles ainsi que les plastifications de type B sont concentrées à la base de chaque mur voile.

Absence des rotules de type LS signifie que la structure présente une performance sismique acceptable et développe une résistance suffisante (LS : la limite exigée par le règlement Algérien).

5. Conclusion

Une analyse basée sur les notions de performance et capacité a été menée selon des règles de combinaison appropriées entre la demande et la capacité pour apprécier la sécurité parasismique de la structure étudiée, a permis de dégager les points suivants :

1. La méthode du spectre de capacité a permis de cerner le comportement sismique des structures d'une manière plus réaliste, pour des bâtiments neufs et existants, elle mène en générale à une appréciation de la sécurité parasismique plus favorable.

2. La modélisation macroscopique "simplifiée" (par poteaux-poutres équivalents) a permis d'approcher au mieux et facilement les aspects dynamiques au niveau global pour la vérification de la sécurité parasismique des structures.

3. Sous des demandes sismiques modérées (spectre du RPA99/2003), la méthode du spectre de capacité montre que les structures en béton armé à voile élancé faiblement armé, bien conçues, développent des résistances suffisantes et présentent des dommages limités.

4. Le dimensionnement des structures en béton armé à mur voile élancé faiblement armé selon les règlements en vigueur a permis certainement d'éviter la formation des rotules plastiques de type non réparable (LS : sécurité sur les vies).

Bibliographie

[1] KOTRONIS P. 2000. Cisaillement dynamique de murs en béton armé, modèles simplifiés 2D et 3D. Thèse doctorat, école normale supérieure de Cachan.

[2] DTR B C 2 48. 2003. Règles Parasismiques Algériennes RPA99/Version 2003. Centre de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, Alger.

[3] EN 1992-1-1, Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, Brussels, 2004.

[4] EN 1998-1, Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, Brussels, 2003.

[5] Plumier A & DEGEE H. 2009. "Conception parasismique dans le contexte de l'Eurocode8". Université de Liège- Eddition.

[6] Nicolae ILE. 2000. Contribution à la compréhension du fonctionnement des voiles en béton armé sous sollicitation sismique: apport de l'expérimentation et de la modélisation à la conception. Thèse doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon.

[7] CSI (Computer and Structures Inc). 2008. SAP2000 v10 integrated Finite Element Analysis and Design of Structures. CSI, Berkeley.

[8] Freeman, S.A. 1998. The capacity spectrum method as a tool for seismic design. 11th European Conference on Earthquake Engineering. Paris, A.A.Balkema, Rotterdam.

[9] ATC 40. 1996. Seismic evaluation and retrofit of buildings, Redwood city: Applied Technologies Council.

[10] HEMSAS M. 2010. Modélisation par macro-éléments du comportement non-linéaire des ouvrages à voiles porteurs en béton armé sous action sismique. Thèse doctorat, université BORDEAUX 1.

[11] RANA Rahul, JIN Limin & ZEKIOGLU Atila. 2004. Pushover analysis of a 19 story concrete shear wall building. 13th World Conference on Earthquake Engineering . Vancouver, B.C. Canada.

[12] BOURADA Sofiane. 2012. Evaluation de la capacité de résistance d'un bâtiment contreventé par portiques autostables en béton armé soumis à une action sismique. Mémoire de magister, université de Chlef.

[13] FEMA 356. 2000. Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. Washington, D.C.; Federal Emergency Management Agency.

[14] PAULAY T., PRIESTLEY M.J.N. 1992. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings. John Wiley & Sons. New York.