
Evaluation de la performance et analyse du comportement non linéaire des murs voiles en B.A soumis à une action sismique

M. HEMSAS^{1,2,3}, S.M. ELACHACHI¹

¹CDGA, Université Bordeaux 1, Av des Facultés, 33405 Talence, France.

²Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, BP 1505, El M'naouar, 31000, Oran, Algérie.

³Université de Mascara, BP 763, Route de Mamounia, 29000, Mascara, Algérie.

m.hemsas@cdga.u-bordeaux1.fr, sm.elachachi@cdga.u-bordeaux1.fr

RÉSUMÉ. Le besoin d'améliorer la méthodologie de calcul des structures soumises à une action sismique a été largement constaté dans les différents codes réglementaires. L'insuffisance des méthodes simplifiées (analyse linéaire équivalente corrigée pour prendre en compte les aspects d'un comportement non-linéaire) et la complexité des méthodes d'intégration temporelles ont poussé à l'émergence d'une troisième voie, celle des méthodes d'analyses statiques non-linéaires. Ces approches non itératives combinent une analyse statique non-linéaire et une analyse par spectre de réponse. Le travail présenté consiste à appliquer ces nouvelles approches aux murs voiles en B.A. Un macro-élément a été élaboré afin de décrire le comportement du mur voile et d'obtenir ainsi sa capacité résistante (vis-à-vis des forces latérales) et d'évaluer ses déplacements relatifs (inter-étages). Une étude comparative entre les déplacements obtenus à partir de deux modèles (N2 et AMP) et la méthode d'analyse temporelle non-linéaire simplifiée a été conduite.

MOTS-CLÉS: Séisme, Macro-élément, Analyse statique non-linéaire, « Pushover », déplacement inter-étage, Combinaison modale, Spectre inélastique, Ductilité.

SUMMARY. The need to improve the analysis of structures subjected to seismic action was largely noted in the various regulatory codes. The insufficiency of the simplified methods (corrected linear equivalent analysis to take into account non-linear behaviour aspects) and complexity of the temporal methods led to the emergence of a third way, those of the methods of non-linear static analyses. These no iterative approaches combine a non-linear static analysis and a response spectrum analysis. Presented work consists in applying these new approaches to reinforced concrete shear walls. A macroelement was elaborated in order to describe the shear wall behaviour and thus to obtain its resistant capacity (with respect to the lateral forces) and to evaluate its relative displacements (drift story). A comparative study between the displacements obtained starting from two models (N2 and MPA) and the method of simplified non-linear temporal analysis was led.

KEY WORDS: earthquake, macro-element, non-linear static analysis, "Pushover", drift story displacement, modal Combination, inelastic Spectra, Ductility.

1. Introduction

Le principe de base du calcul parasismique consiste essentiellement à assurer un degré de sécurité acceptable permettant de réduire les risques relatifs aux défaillances, aux catastrophes et aux pertes de vie. Dans les codes et règlements parasismiques, l'étude de la réponse des structures sous l'action sismique est conduite en faisant appel à des méthodes simplifiées selon la nature de l'ouvrage et sa destination. Les techniques d'analyse de ces structures consistent essentiellement à comparer un paramètre "d'exigence" à un paramètre de "capacité". L'effort tranchant à la base d'une structure est un paramètre utilisé traditionnellement pour la conception parasismique des structures. L'ingénieur calcule la sollicitation (l'effort) provoquée par un séisme donné à la base de l'édifice, et la compare à la résistance du bâtiment. Des séismes survenus récemment (Izmit, 1999 ; Boumerdes, 2003 ; Bam, 2003) ont révélé l'insuffisance de ces méthodes simplifiées (méthode statique équivalente ou méthode modale spectrale), qui déterminent d'abord l'effort sismique susceptible d'être appliqué, puis procèdent à une vérification des déplacements de la structure.

Une structure soumise à un violent séisme est sollicitée au-delà du domaine élastique et se comporte de manière fortement non-linéaire. Du fait du caractère élasto-plastique du béton armé, la dégradation apparaît soit progressivement soit brutalement, en diverses parties de la structure, provoquant ainsi la plastification (ou l'endommagement), d'où s'ensuit une redistribution des efforts. La rigidité globale est modifiée pendant la réponse dynamique et la capacité résistante dépend du comportement de chaque composant de la structure. La dégradation est plus sensible au "déplacement" qu'à "l'effort", car la ruine est plus liée à une atteinte de la limite en déformation qu'au dépassement d'une limite en effort. Par conséquent, l'utilisation de l'analyse linéaire devient insuffisante (voire non économique). Cependant, le recours à une analyse temporelle non-linéaire (complexe à l'échelle d'un bureau d'ingénierie), même si elle semble être la démarche la plus appropriée pour obtenir une réponse suffisamment fine, souffre d'une faiblesse majeure, à savoir la non disponibilité d'un ensemble d'accélérogrammes représentatifs pour le site donné. Afin de répondre à ces limites, plusieurs approches ont été développées selon Chopra&Goel, 2002, telles que la méthode des coefficients de déplacement (FEMA-273, 1997), ou la méthode du spectre de capacité (ATC-40, 1996; Priestley, 2000).

En s'inspirant de ces différentes méthodes, une nouvelle méthode basée sur les concepts de capacité et de performance a émergé (Fajfar, 1999). Elle consiste à utiliser une procédure de dimensionnement directe par la méthode des déplacements en définissant dès le départ le déplacement cible (limite) de la structure au lieu de la dimensionner sur la base de la méthode des forces (habituellement adoptée par les règlements parasismiques). Cette procédure combine l'analyse statique non-linéaire ("Pushover") d'un système à plusieurs degrés de liberté, et l'analyse par spectre de réponse d'un système à un seul degré de liberté dans un nouveau format "d'accélération-déplacements" (Fajfar, 1999 ; Chopra&Goel, 2002). C'est une méthode d'analyse pseudo-statique non-linéaire

Evaluation de la performance et analyse du comportement non linéaire des murs voiles en B.A soumis à une action sismique simplifiée et non temporelle. Dans cette contribution, cette méthode a été particularisée à l'analyse des structures porteuses constituées de murs voiles. Un macro-élément a été défini afin de décrire leur comportement et d'obtenir ainsi leur capacité résistante (aux forces latérales), et d'évaluer les déplacements relatifs inter-étages. Le critère limite est que le déplacement maximum de la structure (l'exigence) doit être inférieur à un déplacement de référence (la capacité). La sollicitation est déterminée à travers la représentation du spectre de réponse, dérivé du format traditionnel "période–accélération" vers un format "déplacement–accélération". La méthode proposée consiste à effectuer une analyse "pushover" pour détecter les modes de rupture ductiles et non ductiles d'un mur voile, puis à calculer les déplacements maximaux en tenant compte (lorsque cela est possible) de l'effet des modes les plus élevés.

2. Modélisation du mur voile :

Les murs voiles sont couramment utilisés dans les édifices élancés en béton armé, compte tenu de leur comportement, considéré comme satisfaisant vis-à-vis de l'action sismique. Leur grande rigidité en plan contribue à contrôler les déplacements globaux et à minimiser les déplacements inter-étages excessifs. La figure 1 montre la discrétisation du mur voile en une série de N macro-éléments. Chaque macro-élément est composé de n sous-éléments uniaxiaux assemblés en parallèle et d'un ressort horizontal non linéaire traduisant le cisaillement.

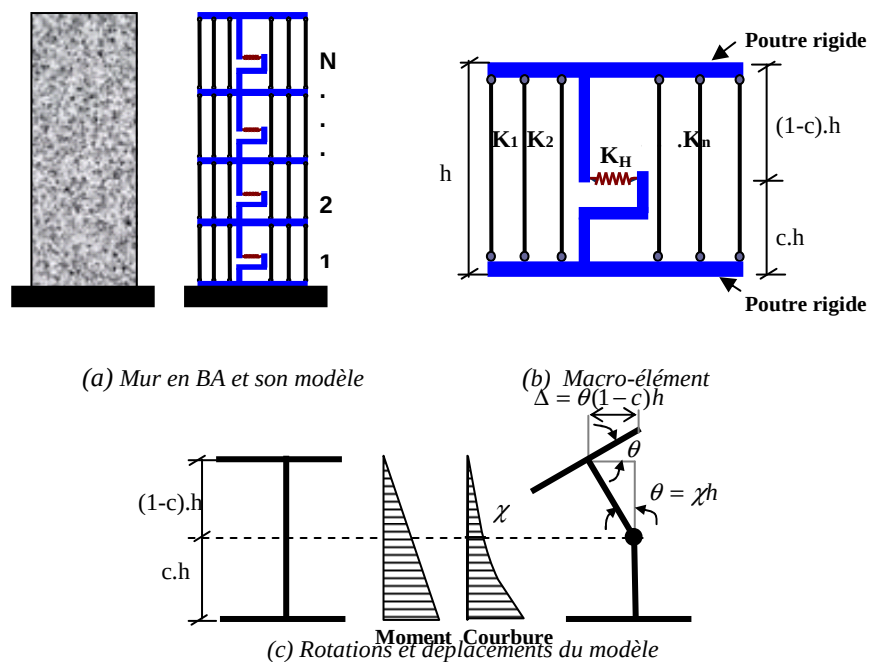


Figure 1. Modélisation du mur voile

3. Analyse pushover et détermination de la courbe de capacité:

L'analyse "pushover" est une procédure statique non-linéaire. La figure (2.a) montre graphiquement la procédure (Chopra&Goel, 2002). Le déplacement du sommet est représenté en fonction de la force sismique (effort tranchant à la base). Plusieurs niveaux d'endommagement peuvent être distingués à travers cette représentation graphique.

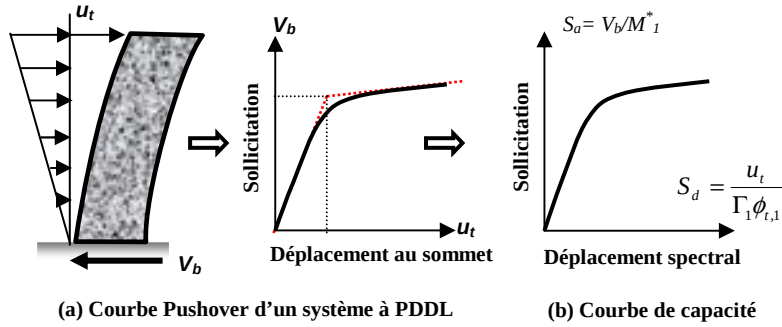


Figure 2. Signification physique de la courbe Pushover

L'obtention de la courbe de capacité est composée de deux transformations :

- La force sismique (l'effort tranchant à la base V_b) est transformée en accélération spectrale S_a , et le déplacement réel au niveau du toit u_t est transformé en déplacement spectral S_d (équation (1)):

$$S_a = \frac{V_b}{M_1^*} \quad S_d = \frac{u_t}{\Gamma_1 \phi_{t,1}} \quad (1)$$

M_1^* est la masse effective de la construction, liée à l'amplitude du premier mode de vibration et aux masses m_j des différents niveaux (équation 2), $\phi_{t,1}$ est l'amplitude du premier mode de vibration au sommet et Γ_1 est le facteur de participation modale correspondant au premier mode de vibration (équation 2).

$$M_1^* = \frac{\left(\sum_{j=1}^N m_j \phi_{j,1} \right)^2}{\sum_{j=1}^N m_j \phi_{j,1}^2} \quad \Gamma_1 = \frac{\sum_{j=1}^N m_j \phi_{j,1}}{\sum_{j=1}^N m_j \phi_{j,1}^2} \quad (2)$$

Nous obtenons, par ces transformations, une courbe de capacité dont les composantes sont le spectre du déplacement (S_d) en abscisse et le spectre d'accélération (S_a) en ordonnée (figure 3.a). Le point de croisement entre l'exigence (conversion du spectre de réponse conventionnel du format S_a-T au format S_a-S_d) et

Evaluation de la performance et analyse du comportement non linéaire des murs voiles en B.A soumis à une action sismique. la résistance (représentée donc par la courbe de capacité) fournit le point de fonctionnement et décrit donc l'état d'endommagement de l'édifice (figure 3.b).

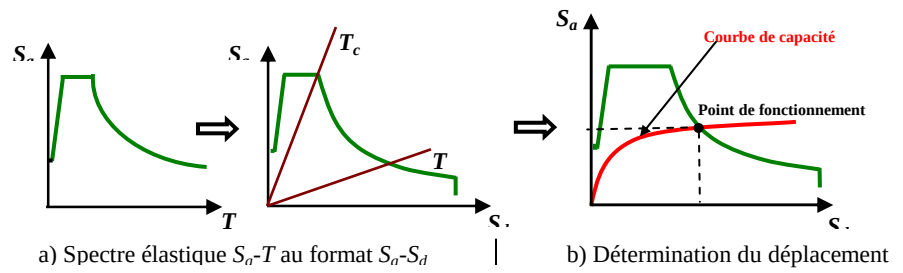


Figure 3. Détermination du point de fonctionnement

Deux méthodes ont été considérées : la méthode N2 de Fajfar (Fajfar, 1999) et la méthode d'Analyse Modale Pushover (AMP) de Chopra&Goel (Chopra&Goel, 2002).

4. Application:

L'on étudie une structure (m^2), réalisée par Wallace (Wallace, 1994), de 5 étages contreventée par un seul mur voile en béton armé de section ($6,25 \times 0,61 m^2$) et de hauteur 18.3m. La hauteur h de chaque niveau est de 3.66m. La masse m_j de chaque niveau est estimée à 530 t. La discrétisation du voile en macro-éléments et le ferrailage assigné à la section droite du mur sont montrés à la figure 4. Les lois de comportement du béton et de l'acier sont présentées à la figure 5.

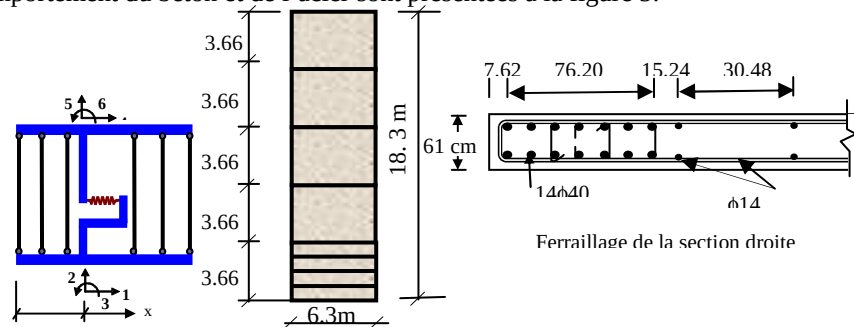


Figure 4. Discrétisation du voile et ferrailage de la section droite

4.1. Point de fonctionnement:

En utilisant la méthode N2, l'on détermine le point de fonctionnement. La courbe Pushover est liée au premier mode. La période fondamentale T_1 vaut 0.38s. La distribution des forces latérales dépend de la forme du mode $\phi_{j,1}$ ($P_j = M_j \cdot \phi_{j,1}$). Elle est idéalisée par une courbe bilinéaire en utilisant une équivalence basée sur l'égalité des aires (figure 6.a). Elle est ensuite transformée en une courbe de capacité d'un

oscillateur simple équivalent (Fajfar, 1999). Sachant que le déplacement maximal du système équivalent à un seul degré de liberté est de 18.5cm (figure 6.b), le point de fonctionnement correspondant au déplacement maximal u_t du mur voile est quant lui estimé à 27.75cm ($u_t = \Gamma_1 \cdot S_{d, \text{fonct.}} \cdot \phi_{t,1} = 1.5 \times 18.5 \times 1$).

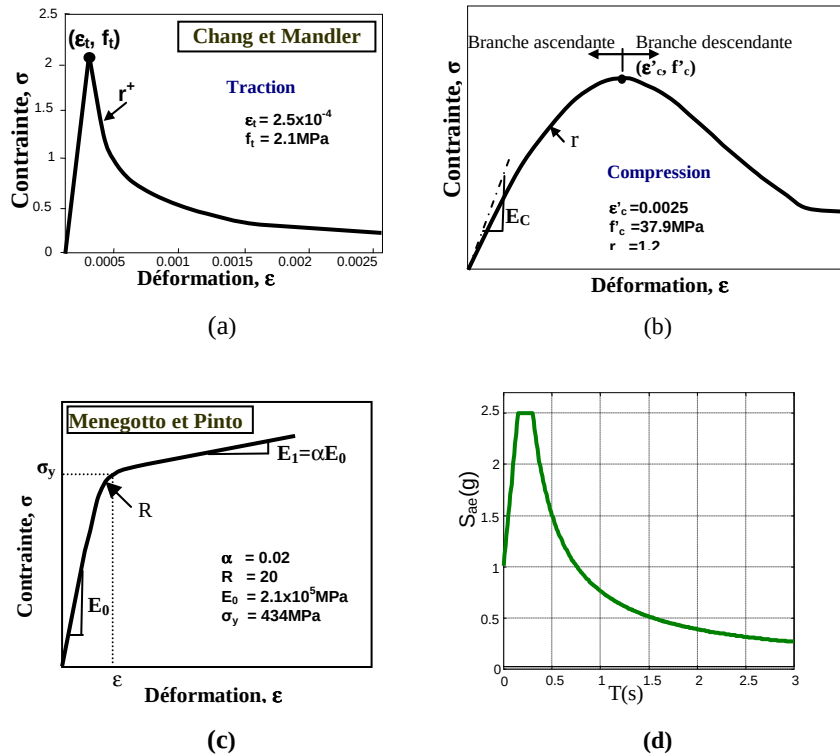


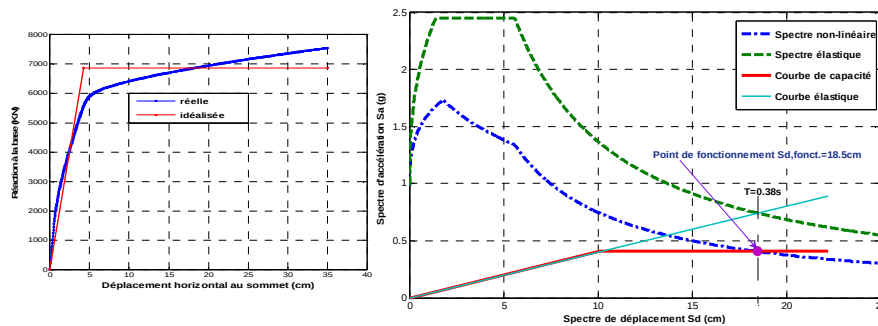
Figure 5. lois de comportement et spectre élastique

4.2. Déplacements inter-étages:

La contribution des trois premiers modes est présentée à la figure 7.a. Une comparaison entre les méthodes N2, AMP et la méthode temporelle non linéaire simplifiée a été menée (figure 7.b). L'on peut observer que de la méthode N2 conduit à une surestimation des déplacements relatifs inter-étages de la partie "supérieure", et à une sous-estimation de ceux de la partie "inférieure" par rapport à l'AMP. Cela est dû au fait que seul le premier mode est considéré dans la première méthode. La méthode AMP, donne une

Evaluation de la performance et analyse du comportement non linéaire des murs voiles en B.A soumis à une action sismique. 7
meilleure évaluation des déplacements inter-étages aux niveaux supérieurs et l'enveloppe des valeurs estimées est conservative.

Les déplacements relatifs du mur voile issus des deux méthodes demeurent supérieurs à ceux obtenus par l'analyse temporelle non linéaire simplifiée (système équivalent à un seul degré de liberté et loi de comportement globale équivalente). Cela peut s'expliquer par les effets conjugués des modes supérieurs et de la configuration géométrique du mur voile. Par ailleurs, le spectre de calcul correspondant à l'analyse temporelle non linéaire simplifiée est basé sur un seul accélérogramme et diffère des spectres de calcul utilisés pour les deux méthodes statiques non-linéaires (spectre représentatif d'un ensemble d'accélérogrammes).



(a) Courbe Pushover (Premier) (b) Point de fonctionnement

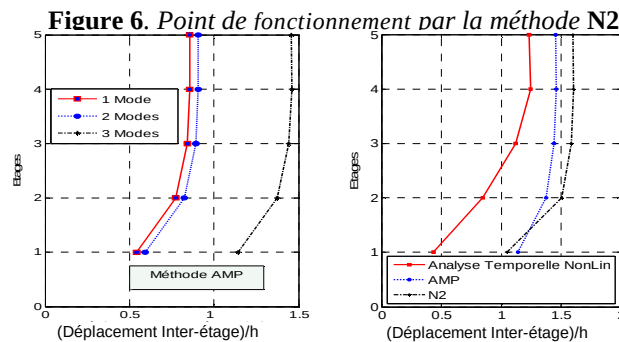


Figure 6. Point de fonctionnement par la méthode N2
Figure 7. Comparaison des déplacements maximums inter-étages obtenus par les trois méthodes (N2, AMP et temporelle).

5. Conclusions :

Afin de mieux comprendre le comportement sismique des structures avec murs voiles, une analyse basée sur les notions de performance et de capacité est effectuée. Ce type d'analyse permet de ramener l'étude du comportement dynamique d'ensemble d'un ouvrage souvent complexe (le voile) à l'étude, en prenant en compte les non linéarités des matériaux, d'un simple oscillateur élasto-plastique à un degré de liberté.

Les sorties obtenues (déplacements inter-étages) par deux méthodes statiques non linéaires (N2 et AMP) semblent satisfaisant en comparaison aux méthodes temporelles non linéaires (très coûteuses en temps de calcul).

Références bibliographiques

Chopra A.K., Goel R.K. A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2002; 31:561–582.

Chopra A.K. "Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering". Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ, 2001.

Clarke, M. J., and Hancock, G. J., "A Study of Incremental-Iterative Strategies for Non-Linear Analyses," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, V. 29, 1990, pp. 1365-1391.

Fajfar P., A Nonlinear Analysis Method for Performance Based Seismic Design *Earthquake Spectra*, Vol.16, No.3, pp.573-592, August 2000.

Goel, R. K., and Chopra, A. K. (2002). "Evaluation of MPA procedure using SAC buildings," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, submitted for publication.

Hemsas M., Elachachi S.M., Analyse performantielle et fiabiliste des structures irrégulières en B.A sous action sismique, Rapport interne CDGA-LM2SC, 2007.

Kunnath, S. K. (2004). "Identification of modal combinations for nonlinear static analysis of building structures." *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 19: 282-295.

Kunnath, S.K. and Kalkan, E. (2004). "Evaluation of seismic deformation demands using nonlinear procedures in multistory steel and concrete moment frames." *ISET Journal of Earthquake Technology*. 41(1).

Kutay Orakcal, John W. Wallace, and Joel P. Conte "Flexural Modeling of Reinforced Concrete Walls- Model Attributes" no. 101-S68, *ACI Structural Journal*(October 2004).

Vulcano, A., V. V. Bertero, and V. Colotti (1988). Analytical Modeling of RC Structural Walls, *Proceedings, 9th World Conference on Earthquake Engineering* 6, Tokyo-Kyoto.

Wallace, J. W., .Displacement-Based Design of RC Structural Walls,. *Proceedings, Fifth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Chicago, Illinois, Vol. II: 191-200 (July 1994b).