
Nouvelle approche par recombinaison modale pour l'estimation de la réponse sismique des voiles porteurs en béton armé

Miloud Hemsas^{1,2*}, Sidi Mohammed Elachachi¹, Denys Breyse¹

¹ Université Bordeaux 1, I2M-GCE
Bâtiment B18, Av des Facultés, 33405 Talence, France

² LSTE, Université de Mascara,
BP 763, Route de Mamounia, 29000, Mascara, Algérie

* m.hemsas@ghymac.u-bordeaux1.fr

RÉSUMÉ. Suite au progrès des méthodologies dans le génie parasismique, le calcul statique non-linéaire en poussée progressive (ou pushover) représente une alternative très intéressante. Dans cet article, une nouvelle approche améliorée qui tient compte implicitement de la contribution des modes supérieurs est proposée, en utilisant une forme de recombinaison factorielle des charges latérales donnée par une analyse modale. La variation spatiale des forces appliquées est calculée à partir de la combinaison des différents modes en utilisant un facteur de couplage. Nous montrons dans ce travail comment cette nouvelle procédure d'analyse parasismique peut être particularisée pour l'analyse sismique des voiles porteurs en béton armé modélisées par macro-éléments. Par comparaison aux résultats de référence obtenus à partir de la méthode d'Analyse Temporelle, il apparaît que cette nouvelle méthode de recombinaison modale, donne des résultats satisfaisants en termes de déplacements inter-étages, et conduit donc au sens de la sécurité à une meilleure estimation de la réponse globale de l'édifice.

ABSTRACT. Following the current advances in earthquake engineering methodologies, nonlinear static pushover analysis is an interesting way in the field of performance based seismic design. A new improved method based on modal combination schemes is proposed in this paper to implicitly account for higher mode effects, using invariant force distributions obtained from a factored combination of independent modal contributions. The spatial variation of the applied forces is computed from the combination of different modes through the use of a coupling factor. The proposed procedure is applied to typical RC structural wall, discretized by macro-elements, to assess the effectiveness of the methodology. Compared to reference results obtained from Nonlinear Time History Analysis, It is shown that the envelope of demands obtained from a series of nonlinear static analysis using the proposed modal-combination-based lateral load patterns results in better estimation of inter-story drift.

MOTS-CLÉS: Mur voile, Macro-élément, (Pushover), Forces latérales, Combinaisons Modales.

KEYWORDS: Structural walls, Macroelement, Pushover, Lateral load, Modal Combinations.

1. Introduction

Il est clairement admis par la nouvelle génération des codes et règlements parasismiques que le dimensionnement des structures et/ou la vérification des constructions existantes vis-à-vis d'une action sismique doit s'appuyer nécessairement sur des analyses non-linéaires (dimensionnement en capacité et comportement dissipatif des structures).

Les codes de calcul antérieurs (RPA99, PS92,...) valorisaient les structures dissipatives en réduisant par un facteur de comportement l'action de calcul dimensionnante à partir d'une analyse élastique. Cette approche est cependant inadéquate pour la réévaluation de structures existantes et la conception de structures irrégulières dont le comportement dynamique est trop complexe pour être traité par une méthode simplifiée. La méthode la plus rigoureuse et la plus complète d'analyse des structures dont le comportement est non-linéaire sous une action sismique est évidemment le calcul dynamique temporel non-linéaire qui permet de reproduire fidèlement le comportement de la structure et de connaître ses états de performance à différents instants du séisme. Ce type d'études se révèle cependant très coûteux en temps de calcul (taille des modèles et du nombre de calculs à réaliser, plusieurs accélérogrammes sont nécessaires). Il est donc difficilement envisageable pour des structures courantes.

Le calcul statique non-linéaire en poussée progressive (ou pushover) représente une alternative très intéressante (Fajfar, 2000). C'est une méthode pas à pas pour laquelle les données matérielles (lois de comportement des matériaux, des sections) sont similaires à celles de l'analyse dynamique élasto-plastique, mais où les difficultés du calcul pas à pas temporel sont évitées. Elle permet d'évaluer les mécanismes potentiels d'effondrement attendus et la distribution des dommages dans la construction. La démarche proposée du point de performance est valable aussi bien pour le dimensionnement des constructions nouvelles (pour un niveau de protection parasismique donné) que pour l'évaluation de bâtiments existants, comme cela apparaît dans l'ATC-40 (ATC, 1996) et dans le FEMA-274 (en vue d'une requalification ou mise en conformité sismique, FEMA, 1997).

Plusieurs procédures ont été proposées dans la littérature. La Méthode N2 (Fajfar, 2000), est basée sur l'hypothèse que la réponse est fondamentalement contrôlée par le premier mode de vibration et que la forme de ce mode demeure constante durant toute la durée de l'excitation sismique. Il est évident que cette hypothèse peut parfois être insuffisante, notamment après plastification de la structure. La méthode d'Analyse Modale Pushover (Chopra, 2002) tient compte quant à elle de l'effet des modes les plus élevés. En évaluant la potentialité de cette méthode, on doit noter que le problème majeur relatif à la réponse, obtenue à partir des analyses modales pushover indépendantes, est le besoin de développer une procédure pour leur combinaison.

Une nouvelle approche proposée par Kunnath (Kunnath, 2004) et pour laquelle nous apportons des améliorations consiste à identifier la contribution des différents modes critiques à la réponse, en utilisant une forme de combinaison factorielle des forces latérales appliquées. Elle consiste à calculer la réponse due à différentes combinaisons de charges latérales pour différents modes à partir d'une simple expression dans laquelle la combinaison est effectuée numériquement en additionnant et/ou en soustrayant la contribution des différents modes en utilisant un facteur de couplage, pour contrôler les effets relatifs de chaque mode introduit dans la combinaison. Cette nouvelle procédure d'analyse parasismique est qualifiée dans la présente étude pour l'analyse des ouvrages à voiles porteurs en béton armé. Une stratégie de modélisation simplifiée basée sur la notion de macro-élément a été élaborée et validée sur la base des résultats expérimentaux (Hemsas et al., 2009). La Figure 1a montre la discrétisation du mur voile en une série de N macro-éléments. Chaque macro-élément est composé de n sous-éléments uniaxiaux de rigidité k_i ($i = 1, \dots, n$) assemblés en parallèle au niveau des planchers supposés infiniment rigides. Les propriétés de rigidité et les relations " force-déplacement " des sous-éléments uniaxiaux sont définies à partir des lois de comportement des matériaux et du ferrailage spécifique assigné à chaque sous-élément uni-axial donné à la Figure 1d. L'effet du cisaillement du mur voile est traduit par la présence d'un ressort horizontal non-linéaire de rigidité k_H et de comportement élasto-plastique écrouissable tel que la rotation relative du macro-élément se produit autour d'un point défini sur l'axe central à une hauteur $c.h$, où c est un paramètre qui dépend de la distribution spécifique de la courbure (Figure 1b). Les lois de comportement utilisées pour le béton et l'acier sont basées sur la théorie de l'endommagement et de la plasticité respectivement. Par comparaison aux résultats de référence obtenus à partir de la méthode d'Analyse Temporelle, il semble que la nouvelle méthode de recombinaison modale donne des valeurs relativement proches en termes de déplacements inter-étages, et conduit donc au sens de la sécurité à une meilleure estimation de la réponse globale de l'édifice.

2. Présentation de la structure étudiée

La structure envisagée dans cette étude a été réalisée par Wallace (Wallace, 1994), Il s'agit d'un bâtiment de $30,5 \times 23 \text{m}^2$ (en plan) et de 5 étages, contreventé par un seul mur voile en béton armé de section $(6,1 \times 0,61 \text{m}^2)$ et de hauteur totale 18.3m. La hauteur h de chaque niveau est de 3,66m. Seules les charges dans la direction nord-sud sont considérées. L'élancement du mur est égal à 3 et le rapport de l'aire de la section du mur à la section total en plan du plancher est de 0,0053. La vue en plan du bâtiment, la discrétisation du voile en macro-éléments et le ferrailage assigné à la section droite du mur sont montrés à la Figure 1.

Les principales caractéristiques définissant le comportement du béton et de l'acier sont récapitulés dans le Tableau 1 (voir détail dans Hemsas, 2007).

Matériau	Paramètre		
Béton	f_{bc} (MPa)	Résist. à la compression	38
	E_c (MPa)	Module de Young béton	30000
	f_{bt} (MPa)	Résist. à la traction	2.1
	ϵ_t	Déform. limite en traction	2.5×10^{-4}
Acier	E_o (MPa)	Module de Young acier	200000
	f_{stl} (MPa)	Résist. limite acier	434
	α	Ecrouissage acier	0.02

Tableau 1. Caractéristiques principales du béton et de l'acier

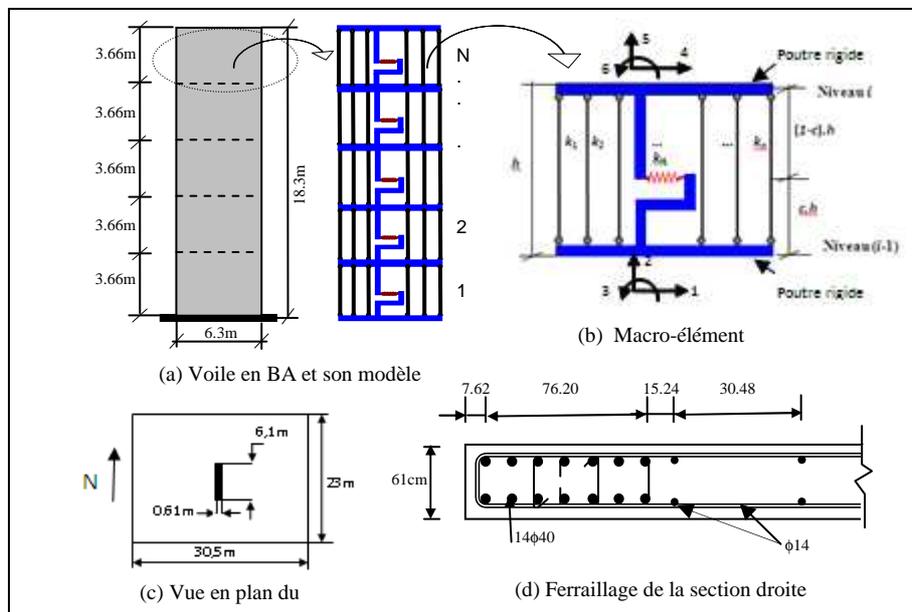


Figure 1. Discretisation du voile et ferrailage de la section droite

3. Analyse dynamique solution de référence

La solution de référence choisie pour l'étude comparative est la méthode d'Analyse Modale Temporelle Découplée (AMTD) dérivée de celle de l'analyse temporelle non-linéaire complète. Il s'agit d'une méthode d'analyse dynamique non-linéaire simplifiée (système équivalent à un seul degré de liberté et loi de comportement globale équivalente). Un jeu de six accélérogrammes synthétiques représentant le spectre du RPA99 est utilisé. Les premiers résultats présentés ici, et en particulier les déplacements inter-étages calculés (Tableau 2), constituent les

éléments préliminaires de la solution de référence. La Figure 2 illustre les déplacements inter-étages temporels $d_i(t)$ à chaque niveau de la structure dont les valeurs maximums sont récapitulés dans le Tableau 2.

Niveau	1	2	3	4	5
Déplacement inter-étage max (cm)	0,7262	1,1579	1,5274	1,7548	1,7919

Tableau 2. Déplacements inter-étages maximums à chaque niveau

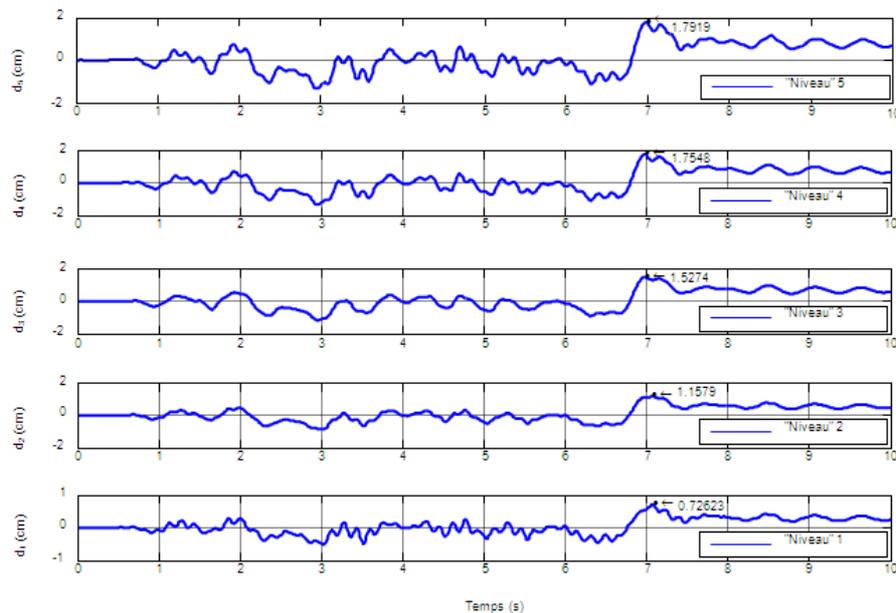


Figure 2. Déplacements inter-étages temporels à chaque niveau de la structure

4. Méthode des Combinaisons Modales proposée

Le principe de la méthode des combinaisons modales est basé sur la méthode d'analyse modale spectrale, la plus fréquemment utilisée pour l'analyse sismique des structures. La méthode présentée ici est basée sur la procédure donnée par Chopra (Chopra, 2001). La distribution spatiale des forces latérales pouvant être utilisée conjointement avec une analyse pushover, est exprimée en termes de contributions modales maximales comme suit (Chopra, 2001) :

$$f_n = \Gamma_n m \phi_n S_a(\zeta_n, T_n) \quad [1]$$

où Γ_n est le facteur de participation modale lié au mode n , S_a est l'accélération spectrale du chargement sismique donné, pour une fréquence naturelle de vibration ω_n correspondant à une période T_n et un coefficient d'amortissement ζ_n .

Le principe de base de cette méthode consiste à calculer la réponse due à différentes combinaisons de charges latérales pour différents modes. La distribution des forces appliquées sera calculée à partir de l'expression suivante :

$$F_j = \sum_{n=1}^m \alpha_n \Gamma_n m \phi_{nm} S_a(\zeta_n, T_n) \quad [2]$$

où F_j est la force latérale appliquée au niveau j ; ϕ_n est le vecteur propre relatif au $n^{\text{ième}}$ "mode"; S_a est l'accélération spectrale pour la période correspondante au $n^{\text{ième}}$ mode ; et α_n est un facteur de couplage pour contrôler les effets relatifs de chaque mode introduit dans la combinaison. Il a été suggéré par plusieurs auteurs (Chopra et al., 2004 ; Kunnath, 2004), que le mode fondamental est privilégié, et sa contribution est d'un effet prépondérant, la combinaison devrait alors exclure le premier mode, ou sa contribution devrait être réduite par utilisation de ce facteur de modification. Une valeur unité de signe positif ou négatif peut être assignée à ce facteur, cependant, la réponse peut être sensible à ce paramètre si la participation modale est faible mais l'accélération spectrale pour les modes supérieurs significative (Kunnath, 2004). La sommation dans l'équation [2] peut inclure autant de modes que nécessaire pour représenter adéquatement les modes critiques et leur contribution à la réponse. Si les trois premiers modes sont considérés, la combinaison suivante sera utilisée :

$$F_j = \alpha_1 \Gamma_1 m \phi_1 S_a(\zeta_1, T_1) \pm \alpha_2 \Gamma_2 m \phi_2 S_a(\zeta_2, T_2) \pm \alpha_3 \Gamma_3 m \phi_3 S_a(\zeta_3, T_3) \quad [3]$$

La procédure, par conséquent, requiert plusieurs analyses en poussée progressive, où une série de modèles de charges modales sont appliqués. Afin d'effectuer une bonne estimation des déplacements et des forces internes, il est nécessaire de considérer les réponses maximales en terme de déplacement à chaque niveau d'étage et ensuite d'établir une enveloppe (pouvant constituer ultérieurement une base de données) de valeurs maximales de déplacements inter-étages, valable pour une analyse performantielle.

Pour illustrer ce concept, plusieurs analyses pushover ont été effectuées en utilisant les combinaisons suivantes :

- Mode 1 \pm mode 2 → 2 simulations
- Mode 2 \pm mode 3 → 2 simulations
- $\alpha_1 \times$ Mode 1 \pm mode 2 (\pm mode 3) → 4 simulations
- $\alpha_1 \times$ Mode 1 $\pm \alpha_2 \times$ mode 2 $\pm \alpha_3 \times$ mode 3 → 4 simulations

Les facteurs de couplage α_i sont obtenus en rapportant à l'état élastique initial du système, l'accélération spectrale correspondant à chaque période modale par la somme des accélérations spectrales des modes considérés (équ. [4]) :

$$\alpha_i = \frac{S_a(T_i)}{\sum_{i=1}^n S_a(T_i)} \quad [4]$$

où n est le nombre de modes considérés. Les facteurs de modification obtenus valent respectivement $\alpha_i = 0,36$; $0,37$ et $0,28$ ($i=1$ à 3). La Figure 3 présente les différentes combinaisons modales utilisées pour effectuer des analyses en poussée progressive (pushover). Les résultats des analyses sont montrés à la Figure 4. La numérotation utilisée (de 1 à 12) sur la Figure 4 correspond au même ordre que la combinaison modale montrée à la Figure 3.

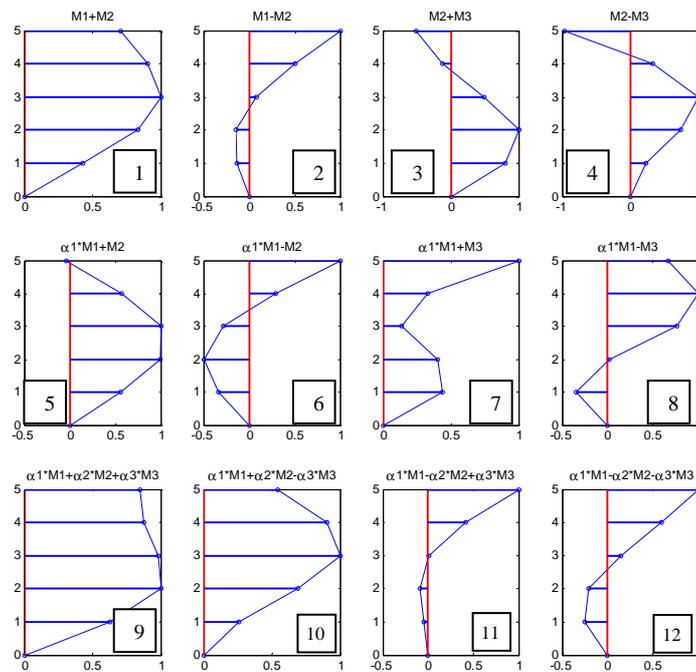


Figure 3. Combinaisons modales utilisées pour évaluer l'enveloppe des déplacements inter-étages

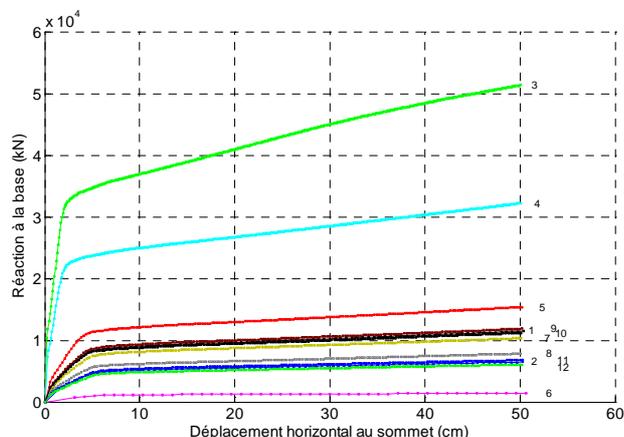


Figure 4. Courbes (pushover) de différentes combinaisons modales

Au Tableau 3 sont fournies les combinaisons retenues et qui reproduisent le déplacement inter-étage maximal pour un niveau d'étage donné.

Niveau d'étage	Déplacements inter-étages (AMTD)	Valeurs de l'enveloppe modale	Combinaison modale retenue
5	1.7919	1.4894	$\alpha_1 M1 + M2$
4	1.7548	1.4916	$\alpha_1 M1 - M2$
3	1.5274	1.4756	$\alpha_1 M1 + \alpha_2 M2 + \alpha_3 M3$
2	1.1579	1.4087	$M1 - M2$
1	0.7262	0.8182	$\alpha_1 M1 - M3$

Tableau 3. Combinaisons modales utilisées pour évaluer l'enveloppe des déplacements inter-étages

5. Comparaison des différentes approches

Les déplacements inter-étages présentés à la Figure 5, correspondent à une comparaison entre les méthodes N2 (Fajfar, 2000), AMP (Chopra, 2002), celle proposée dans cet article et la méthode de référence "AMTD". L'on peut observer d'une part, qu'aussi bien la méthode N2 que la méthode AMP conduisent à une sous-estimation des déplacements relatifs inter-étages, du fait que le premier mode est privilégié. D'autre part, la méthode AMP, montre une surestimation des déplacements inter-étages par rapport à la méthode N2. Cela peut s'expliquer par les

effets négligeables des modes supérieurs. Les résultats montrent aussi qu'à partir d'une simple combinaison modale (considération de la contribution des modes élevés tenant compte du facteur de couplage), la méthode proposée, donne une meilleure évaluation des déplacements inter-étages (écart plus faible à la solution de référence analyse dynamique temporelle).

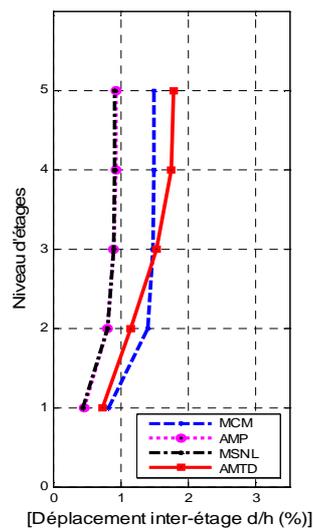


Figure 5. Comparaison des déplacements maximums inter-étages

6. Conclusion

La procédure décrite dans ce travail est basée sur l'étude de la validité et la fiabilité des procédures statiques non-linéaires pour reproduire les aspects de la réponse dynamique. L'examen des principaux résultats obtenus montre que la méthode de combinaison modale proposée, permet une meilleure estimation des déplacements inter-étages que les méthodes usuelles (N2 et AMP). Les résultats suggèrent également que les modes ne devraient pas être considérés indépendamment mais combinés. L'approche proposée contribue aux efforts entrepris pour améliorer l'analyse pushover pour une évaluation performante et fiable de la réponse des structures sous action sismique.

Une extension de cette modélisation pour étudier une plus large variété de structures (contreventement mixte portique-voile,...) est envisagée.

7. Références bibliographiques:

- ATC-40, Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Redwood City: Applied Technology Council, 1996.
- Chopra A. K., *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 2001.
- Chopra A., Goel R., « A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings », *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, 2002, p. 561-582.
- EC8-1. « Eurocode 8 : Design of Structures for Earthquake Resistance-Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings », *European Committee for Standardization, prEN 1998-1:2003*.
- Fajfar, P., « A nonlinear analysis method for performancebased seismic design », *Earthquake Spectra*, vol. 16, n° 3, 2000, p. 573-592.
- FEMA-273, NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings, FEMA 273, and NEHRP Commentary on the guidelines for the seismic rehabilitation of buildings, Washington, D.C.: Federal Emergency Management Agency, 1997.
- Hemsas M., Elachachi S.M., Breysse D., « Analyse performantielle des murs voiles soumis a une action sismique », *7ème Colloque National AFPS-2007*, 4-6 Juillet 2007, Paris, France.
- Hemsas M., Elachachi S.M., Breysse D., « Modélisation par macro-éléments du comportement non-linéaire des murs voiles en béton armé », *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, n°05, 2009, p. 613-638.
- Kunnath, S.K. and Kalkan, E., « Evaluation of seismic deformation demands using nonlinear procedures in multistory steel and concrete moment frames ». *ISET Journal of Earthquake Technology*, vol. 41, n°1, 2004.
- PS92, « Règles de construction parasismique - Règles PS applicables aux bâtiments - PS92 », Paris, Eyrolles, 1998.
- RPA99, « Règles Parasismiques Algériennes, Version 2003 », Document technique réglementaire, DTR B C248, Centre national de recherche appliquée en génie parasismique, Alger, 2003.
- Wallace, J.W., « Seismic Design of Reinforced Concrete Structural Walls: Part 1: A Displacement-Based Code Format », *Journal of Structural Engineering*, ASCE, vol. 121, n° 1, 1995.