

Comportement d'un mur à ossature bois sous sollicitations dynamiques

Y. VERDRET^{1,2}, S. M. ELACHACHI¹, C. FAYE², P. GARCIA², L. LE MAGOROU²

¹Université Bordeaux 1, I2M, département GCE, Bât. B18, Avenue des facultés, 33405 Talence (e-mail : yassine.verdret@etu.u-bordeaux1.fr).

²Institut Technologique FCBA (Forêt, Cellulose, bois et Ameublement), Allée Boutaut, BP227, 33028 Bordeaux cedex.

Résumé :

Cette communication vise à présenter les résultats obtenus suite à l'application d'une méthode spectrale non-linéaire à l'analyse du comportement d'un élément de mur à ossature bois sous une action sismique connue afin de prédire son déplacement en tête. La loi de comportement de cet élément est obtenue par idéalisation bilinéaire de la courbe enveloppe des essais cycliques qui diffère d'une courbe obtenue à partir d'un chargement monotone. L'influence de la ductilité sur la détermination du déplacement a été étudiée.

Abstract :

In this paper we proposed the application of a non linear spectral method on wood shear wall subjected to seismic action in order to predict its displacement. The behavior law is obtained by a bilinear idealization of the envelope curve of the cyclic test which differs on one obtained from monotonic loading. Ductility effects on displacement are examined.

Mots clés : méthode spectrale non-linéaire, mur à ossature bois, essais cycliques, essais dynamiques, performance structurelle et parasismique

1 Introduction

Dans un contexte où le nouveau zonage sismique implique une augmentation des territoires concernés, améliorer la connaissance du comportement des maisons à ossature bois sous action sismique dans le but d'optimiser leur dimensionnement avec un niveau de fiabilité conforme aux codes normatifs (Eurocode 5 [4], Eurocode 8 [5]), est un enjeu important. A l'échelle des bureaux d'ingénierie, des modèles alliant rapidité de mise en œuvre et réduction en temps de calcul machine, sont requis. Une voie possible de dimensionnement répondant à ces exigences est une méthode dite capacitive ou Méthode Spectrale Non-Linéaire inspirée des travaux de Fajfar [2] dont les avantages en termes de temps de calcul sont manifestes comparativement à une analyse temporelle, tout en restant suffisamment "riche" pour reproduire les mécanismes potentiels majeurs de dissipation d'énergie activés lors d'un séisme.

On se propose dans cette communication de présenter les résultats obtenus suite à l'application de la Méthode Spectrale Non-Linéaire à l'analyse du comportement d'un élément de mur à ossature bois constitués de deux panneaux de contreventements en OSB (Oriented Strain Board) sous une action sismique connue afin de prédire son déplacement en tête. La loi de comportement de cet élément est obtenue par idéalisation bilinéaire de la courbe enveloppe des essais cycliques. Le spectre de réponse inélastique est construit pour différentes valeurs de ductilité du mur. Les résultats obtenus par la modélisation sont ensuite comparés aux déplacements relevés durant une campagne d'essais sur table vibrante effectuée à l'Institut Technologique FCBA.

2 Essais sur murs à ossature bois

2.1 Description des échantillons

Les murs sur lesquels ont été effectuées les campagnes d'essais cyclique et dynamique présentent les caractéristiques suivantes (voir figure 1 ci-dessous) :

- Les dimensions globales des murs sont de 2400x2400 mm² ;
- L'ossature en sapin / épicéa et de section de 45x145 mm² est en qualité C24. Les montants sont espacés de 600 mm et les assemblages montants / traverses sont réalisés par 4 pointes annelées avec $\varnothing=3,2$ mm et $l=90$ mm ;
- Les pointes réalisant les assemblages panneaux / montants sont de types bichromate annelées avec $\varnothing=2,5$ mm et $l=50$ mm, espacées de 150 mm pour les rives et de 300 mm au centre ;
- Chaque élément de mur est constitué de 2 panneaux de dimensions 1200x2400 mm² ;
- Le mur est ancré par 2 équerres rigides aux droits des 2 montants d'extrémité.

Les résultats présentés ici concernent uniquement les voiles travaillant en panneaux OSB de 12 mm d'épaisseur (OSB12). Les échantillons ont une masse de 120 kg environ et le système tel que décrit peut être assimilé à un système à un degré de liberté (SDOF).

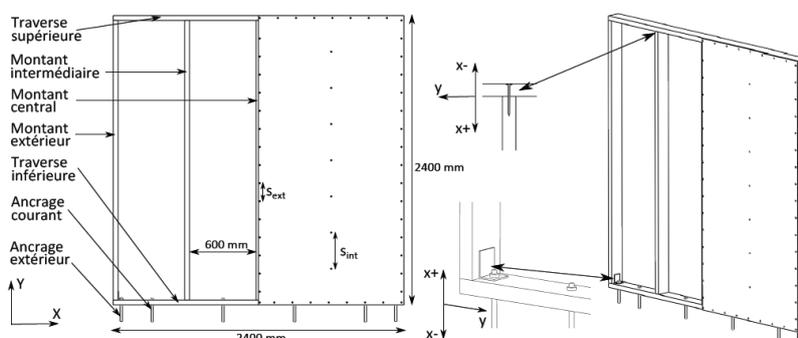


FIG. 1 - Détails des murs d'essais.

2.2 Caractérisation des murs à ossature bois

Afin de qualifier expérimentalement le comportement parasismique des murs à ossature bois, l'Institut Technologique FCBA a procédé à des campagnes d'essais cycliques et dynamiques [7].

Les essais cycliques consistent à déterminer les propriétés de ductilité, d'affaiblissement de résistance et d'amortissement des murs de contreventement à ossature bois. Ils ont été menés selon la norme d'essais cyclique ISO/DIS 21 581. Chaque cycle consiste en l'application d'un déplacement fonction du déplacement ultime V_u constaté durant un essai statique jusqu'à rupture (NF EN 594 [6]).

Les essais cycliques (nommés MC dans la suite) et dynamiques, sont réalisés avec un chargement vertical de 625 kg/ml. Ce chargement représente la descente de charge et permet de tenir compte des conditions réelles de sollicitation des murs.

Afin d'appliquer la méthode Spectrale Non-linéaire sur les éléments de murs tel que décrit, nous faisons l'hypothèse que la courbe de poussée progressive, permettant d'établir une relation entre l'effort tranchant à la base de la structure et le déplacement en tête, correspond à la courbe enveloppe de l'essai cyclique.

La configuration de murs présentée précédemment a également fait l'objet d'une campagne d'essais dynamiques sur table vibrante. Un protocole d'essai, basé sur différents séismes, a été développé permettant d'appréhender le comportement dynamique linéaire et non-linéaire de murs et d'identifier les paramètres modaux (fréquences propres, amortissements, déformées modales) et le seuil de non-linéarité.

Les signaux d'entrée utilisés pour mener les essais sur table vibrante sont :

- un séisme représentatif de l'aléa sismique fort en France, le séisme dit *Lointain* correspondant au séisme de Miyagi (Japon en 2003, PGA = 0,33 g) ;

– et le séisme européen de l'Aquila (Italie en 2009, PGA = 0,56 g).

Les résultats du tableau 1 sont obtenus pour des niveaux d'accélération de la table vibrante (PGA) sollicitant la structure dans son domaine plastique. On remarque que les déplacements engendrés par les séismes *Lointain* et d'Aquila sont semblables bien que le séisme d'Aquila a un PGA supérieur d'environ 20% à celui du séisme lointain. Il est à noter que, pour ces essais dynamiques, aucun endommagement n'a été relevé, ni au niveau des ancrages (dimensionnées en sur-capacité), ni au niveau des pointes de fixation des panneaux OSB sur les montants. La comparaison avec les valeurs simulées se fera avec la valeur du plus grand déplacement en valeur absolue. Il est également à noter que les raideurs obtenues par analyse modale expérimentale (cf. tableau 1) sont nettement supérieures à celles obtenues par à partir de la courbe idéalisée de la courbe enveloppe des essais cycliques. Cette constatation est à intégrer lors de l'analyse des résultats de la simulation numérique.

Numéro mur	Panneaux	Signal	Niveau de PGA (g)	Déplacement (mm)	Période propre (s)	Raideur (kN.m ⁻¹)
12	OSB12	<i>Lointain</i>	1,06	36/-38	0,14	3,1310 ³
16		<i>Aquila</i>	1,3g	40/ -35	0,17	2,22. 10 ³

TAB. 1 - Résultats expérimentaux pour les essais dynamiques.

3 Méthode Spectrale Non-Linéaire

3.1 Application de la méthode

La méthode spectrale non-linéaire proposée est inspirée pour partie de la méthode N2 de Fajfar [2] combine une analyse en poussée progressive (ou *pushover*) d'un système à plusieurs degrés de liberté (MDOF) et une analyse en spectre de réponse inélastique d'un système à un seul degré de liberté équivalent (SDOF). L'originalité et l'intérêt de cette procédure repose sur cette combinaison permettant d'analyser un phénomène dynamique en faisant appel à une méthode statique non-linéaire ainsi que sur la projection des variables dans un plan de représentation spectral : spectre d'accélération - spectre de déplacement ($S_a=f(S_d)$). La demande en déplacement et accélération est obtenue par la superposition d'un diagramme de capacité construit sur la courbe de poussée progressive et le spectre de réponse inélastique. Le point ainsi déterminé est appelé Point de Performance (PP).

Une première approche consiste à construire le spectre de réponse élastique, défini dans le plan Accélération-Période ($S_{ae} = f(T)$), des accélérogrammes sélectionnés. Puis, grâce à la relation (1) valable pour un SDOF élastique, on projette le spectre de réponse élastique dans le plan spectrale Accélération-Déplacement.

$$S_{de} = \frac{T^2}{4\pi^2} S_{ae} \quad (1)$$

Enfin pour un système SDOF inélastique dont la loi de comportement en force-déformation est bilinéaire et dont la période propre est supérieure à T_c , borne supérieure du palier d'accélération constante dans le cas d'un spectre de réponse Eurocode 8 [5], pour un sol de classe A (sol rocheux) $T_c = 0,2$ s, le spectre de réponse inélastique est lié au spectre élastique grâce aux relations (2) et (3) :

$$S_d = S_{de} \quad (2)$$

$$S_a = \frac{S_{ae}}{\mu} \quad (3)$$

Où μ représente la ductilité demandée au point de performance (figure 2).

Ainsi, le spectre inélastique de calcul, $S_a=f(S_d)$, est construit dans le plan spectral Accélération-Déplacement par réduction du spectre de réponse élastique par utilisation de la ductilité qui permet de prendre en compte la dissipation d'énergie des structures ductiles dans le cas d'une sollicitation amenant la structure à une incursion dans sa zone plastique.

Une seconde approche sera de déterminer, par une procédure d'optimisation, la ductilité μ_{opt} pour laquelle l'abscisse du point de performance est égal au déplacement obtenu expérimentalement.

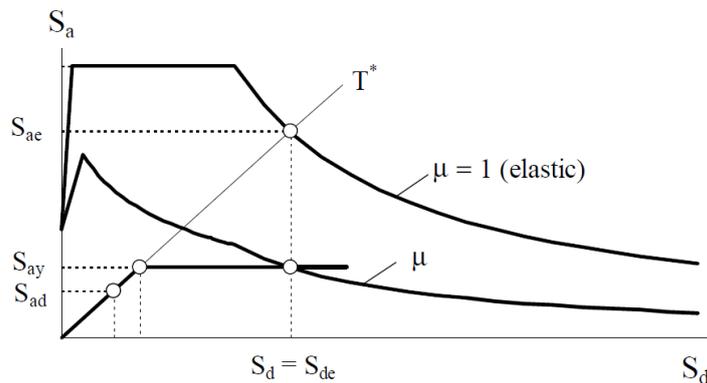


FIG. 2 - Détermination du point de performance par superposition des spectres de demande inélastique et élastique et du diagramme de capacité dans le cas où $T \geq T_c$.

Dans un second temps, on construit le diagramme de capacité des murs. Pour cette étude, le diagramme est établi à partir de la courbe enveloppe d'un essai cyclique réalisé sur les murs à ossature bois la relation entre l'effort tranchant à la base et le déplacement en tête. Afin de distinguer le comportement élastique du comportement inélastique, la courbe enveloppe est idéalisée par une relation Force-Déformation bilinéaire. Pour ce faire, on détermine une raideur initiale puis le palier plastique est ajusté de telle sorte que les zones situées sous les courbes Force-Déformation réelle et idéalisée soient égales. On garde ainsi une équivalence énergétique entre les deux systèmes. La raideur post-pic est prise nulle. Puisque nous sommes dans le cas d'un système SDOF, le diagramme de capacité est obtenu en divisant la résistance par la masse du système. On choisit d'utiliser l'ASTM E 2126 [1] pour le calcul de la rigidité initiale est définie par la relation (4) :

$$K_{ASTM} = \frac{0,4F_m}{V_{0,4F_m}} \quad (4)$$

A titre d'exemple, la figure 3.a montre la construction du diagramme de capacité. Les figures 3.b et 3.c présentent, respectivement pour les séismes lointain et de l'Aquila, la superposition du diagramme de capacité (en pointillés) associée au spectre de réponse élastique avec $\zeta = 15\%$ (en noir) et le spectre de réponse inélastique (en gris). Dans le cas où le spectre de réponse inélastique intersecte à plusieurs reprises le diagramme de capacité, on choisit de prendre la valeur du déplacement la plus grande afin de se placer dans le cas le plus défavorable.

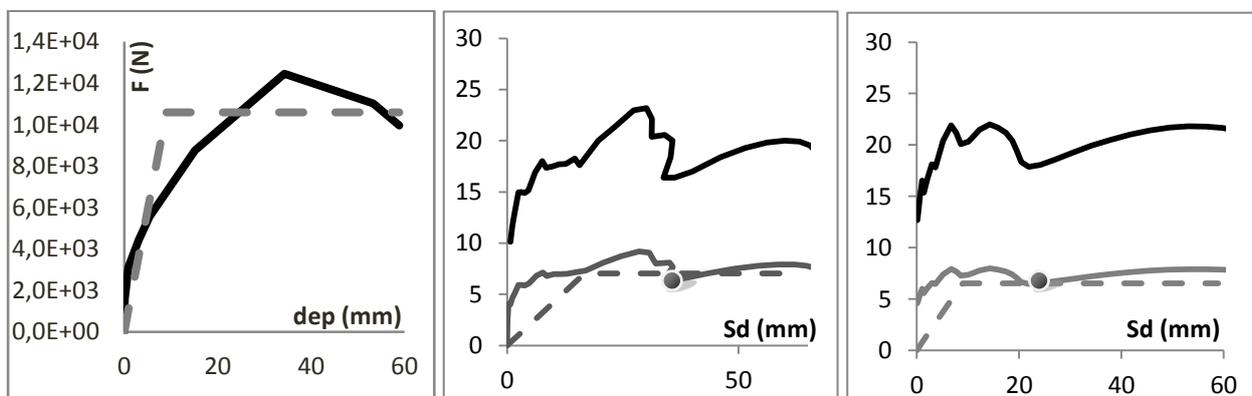


FIG. 3 - Application de la méthode Spectrale Non-Linéaire sur le mur référencé MC1. a) : construction du diagramme de capacité, b) et c) : obtention du point de performance pour les deux séismes.

3.2 Résultats et discussions

La valeur de la ductilité μ a fait l'objet d'une procédure d'optimisation afin de pouvoir retrouver les déplacements expérimentaux. Pour cela, un algorithme permettant de minimiser la différence entre le déplacement expérimental et le déplacement au point de performance est développé. Les valeurs suivantes ont été obtenues : $\mu_{opt} = 3$ et 3,2 pour les séismes lointain et de l'Aquila, respectivement.

Suite à l'application de la méthode Spectrale Non-Linéaire, nous obtenons pour chacun des accélérogrammes et des systèmes définis précédemment, les points de performance, ainsi que les valeurs de ductilité, cf. tableau 2 pour les deux approches :

- Approche A : la ductilité est définie à partir de l'équation (3) par $\mu = \frac{S_{ae}}{S_{ay}}$;
- Approche B : la ductilité est optimisée afin de retrouver les déplacements expérimentaux.

. On donne également, la période propre et la raideur associée aux idéalizations bilinéaires. Ces résultats sont à comparer aux déplacements donnés au le tableau 1.

Référence mur	Période propre (s)	Raideur initiale (kN.m ⁻¹)	Méthode d'obtention du point de performance	Valeur de la ductilité		Déplacement au point de performance (mm)	
				<i>Lointain</i>	<i>Aquila</i>	<i>Lointain</i>	<i>Aquila</i>
MC	0,23	1,18.10 ³	Approche A	3,5	2,8	31	25
			Approche B	3	3,2	36	40

TAB. 2 - Résultats de l'application de la méthode Spectrale Non-Linéaire.

La valeur de période propre obtenue après idéalisation est significativement supérieure aux périodes propres du tableau 1. Les systèmes modélisés semblent donc beaucoup plus souples que les structures réelles. Nous pensons que cette différence peut en partie s'expliquer par le fait que, lors de la détermination de la raideur dynamique, le niveau de sollicitation était de très faible niveau.

On constate que, par l'utilisation de cette méthode spectrale non linéaire

- Les déplacements obtenus pour le séisme lointain sont plus grands que ceux pour l'Aquila. Ceci est en cohérence avec une ductilité plus élevée obtenue pour le séisme lointain ;
- Pour les deux séismes étudiés, les déplacements obtenus sous-estiment les déplacements expérimentaux. Ce résultat est relatif au choix de la méthode d'idéalisation du diagramme de capacité retenue. L'impact du choix de la méthode d'idéalisation reste un problème ouvert.

En ce qui concerne la méthode spectrale et la ductilité 'optimisée', on constate que cette approche permet :

- De déterminer des valeurs de déplacements proches des valeurs expérimentales ;
- D'obtenir des valeurs de ductilité proches pour les deux séismes.

Par ailleurs, compte tenu de la variabilité du matériau bois, il est envisagé de procéder à un plus grand nombre d'essais afin de confirmer ou infirmer ces résultats.

3 Conclusion

Afin de qualifier le comportement des murs à ossature bois sous sollicitation sismique une campagne d'essais cycliques et dynamiques ont été réalisées. Elle a permis d'étudier l'applicabilité d'une méthode Spectrale Non-Linéaire afin de prédire le déplacement en tête d'une structure sous une sollicitation sismique donnée. Les voiles travaillant examinés sont en OSB de 12 mm d'épaisseur.

Pour le cas étudié, il a été montré que le déplacement obtenu par la construction du diagramme de capacité à partir de l'ASTM E 2126 [1] et du spectre inélastique obtenu avec une ductilité 'optimisée' est proche du déplacement expérimental relatif à deux séismes.

En termes de perspectives, l'étude est à compléter par l'analyse l'influence des paramètres suivants :

- impact de la variabilité du système sur les essais cycliques et dynamiques ;
- impact du choix de la méthode d'idéalisation pour la construction du diagramme de capacité ;
- impact des séismes (nocivité, loi d'atténuation,..).

4 Remerciements

Nous tenons à remercier l'ANRT, le Conseil Régional d'Aquitaine, le CODIFAB et la DHUP pour leur soutien à ces travaux.

Bibliographie

- [1] ASTM E 2126. (2008). *Standard test methods for cyclic load test for shear resistance of vertical elements of the lateral resisting systems for buildings*. AFNOR.
- [2] Fajfar, P. (2000). A Nonlinear Analysis Method for Performance Based Seismic Design . *Earthquake Spectra*, Vol. 16, N°3, 573-592.
- [3] Karacabeyli, E., Yasumura, M., Foliente, G., & Ceccotti, A. (2005). Background information on ISO standard 16 670 for cycling testing of connections. *Proceedings of the International Council for Research and Innovation in building Construction, Working Commission W18, Timber structures*.
- [4] NF EN 1995-1-1. (2005). *Conception et calcul des structures en bois*. AFNOR.
- [5] NF EN 1998-1. (2005). *Calcul des structures pour leur résistance aux séismes*. AFNOR.
- [6] NF EN 594. (Février 1996). *Structures en bois - Méthodes d'essai - Essai de raideur et résistance au contreventement des murs à ossature en bois*.
- [7] FCBA, Rapport d'essais N°403/11/725/12/422, Essais sismiques de murs ossature bois, Projet SISMOB