



Analyse du comportement d'une structure à ossature en bois avec remplissage sous chargement sismique basée sur une approche multi-échelles

F. Vieux-Champagne, S. Grange, Y. Sieffert, L. Daudeville

► To cite this version:

F. Vieux-Champagne, S. Grange, Y. Sieffert, L. Daudeville. Analyse du comportement d'une structure à ossature en bois avec remplissage sous chargement sismique basée sur une approche multi-échelles. AFPS - 2015 - 9ème Colloque National de l'Association Française du génie Parasismique, Nov 2015, Marne-La-Vallee, France. hal-02445714

HAL Id: hal-02445714

<https://cea.hal.science/hal-02445714>

Submitted on 20 Jan 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Analyse du comportement d'une structure à ossature en bois avec remplissage sous chargement sismique basée sur une approche multi-échelles

Analysis of the behavior of a timber frame structure with infill under seismic loading using a multiscale approach

Florent Vieux-Champagne*,**,***,**** — Stéphane Grange**,*** — Yannick Sieffert**,*** — Laurent Daudeville**,***

* CEA, DEN, DANS, DM2S, SEMT, Laboratoire d'Etudes de Mécanique Sismique. F-91191 Gif-sur-Yvette

florent.vieux.champagne@gmail.com

** CRATERre, Unité de recherche AE&CC, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble, France

*** Univ. Grenoble Alpes, 3SR, F-38000 Grenoble

**** CNRS, 3SR, F-38000 Grenoble

RÉSUMÉ : Les structures à ossature en bois avec remplissage en maçonnerie de pierres et terre ont un bon comportement parasismique. Pourtant, aucun code de construction et peu d'études scientifiques sont disponibles pour la conception de ce type de bâtiment. Ces travaux ont pour but de prédire le comportement des structures à ossature en bois avec remplissage sous chargement sismique. Quatre échelles sont définies : l'assemblage, la cellule élémentaire, le mur de contreventement et la structure dans sa globalité. A chaque échelle, une analyse basée sur l'expérimentation et la modélisation est réalisée afin d'améliorer les connaissances relatives au comportement de ce type de structure sous chargement dynamique et de valider un outil numérique capable de prédire leur réponse. Cet article présente synthétiquement les résultats de cette étude.

ABSTRACT: Timber frame with infill have proved to be efficient structures when submitted to seismic hazard. No building code and very few scientific studies are available to design this kind of structures. Therefore, the present work aims at predicting the behavior of timber-frame structure with stones and earth infill under seismic loading. Four scales are defined: the joint, the elementary cell, the shear wall and the entire house. At each scale, both an experimental and a numerical analysis are carried out in order to bring extensive knowledge with regard to the behavior of these structures under seismic loading and to validate a numerical tool able to predict their response. This paper synthetically presents the results of this study.

MOTS-CLÉS : Structure à ossature en bois ; remplissage ; maçonnerie de pierres et terre ; analyse aux éléments finis ; chargement cyclique et sismique ; modèle constitutif ; approche multi-échelles.

KEYWORDS: Timber-frame structures; infill; earth and stone masonry; finite element analysis; dynamic and seismic loading; constitutive model; multi-scale approach.

1. Introduction

Les structures à ossature en bois avec remplissage représentent une part non négligeable de l'environnement traditionnel construit à travers le monde, notamment dans les zones où l'aléa sismique est important ((Dutu, 2012), (Öztank, 2010), (Vieux-Champagne et al., 2014)) Leur construction est respectueuse de l'environnement puisqu'elle utilise les ressources disponibles sur place et cohérentes avec les cultures locales. Suite à plusieurs sollicitations sismiques (Turquie 1999, Grèce 2003, Inde 2005 ou Haïti 2010), ces structures ont souvent montré

une meilleure résistance par rapport aux constructions en béton armé souvent mal réalisées ((Audefroy, 2011), (Langenbach, 2008)). Cependant, peu d'études (e.g. (Ahmad et al., 201) ou (Vasconcelos, 2013)) et aucun code de construction ne permettent de correctement comprendre et dimensionner ce type de bâtiment. Le présent travail a ainsi pour objectif d'améliorer ces connaissances à partir d'un modèle simplifié permettant de prédire le comportement des structures à ossature en bois avec remplissage sous chargement sismique. Cette étude est appliquée au contexte post-sismique d'Haïti (12 janvier 2010) à un type d'habitation utilisée traditionnellement dans ce pays et dans différents projets de reconstruction (cf. Figure 1).

Elle se base sur plusieurs échelles d'analyse, du connecteur métallique à la structure, comme cela a été proposé par Boudaud et al. (2014), Humbert et al. (2014) ou Xu et Dolan (2009) pour des structures à ossature en bois contreventée par panneaux (OSB, particules, etc.). Dans le cas de cette étude, quatre échelles sont définies (cf. Figure 2) : le connecteur métallique, la cellule élémentaire, le mur de contreventement et la structure dans sa globalité. Pour chacune d'entre elles, une analyse expérimentale et numérique est réalisée.



Figure 1. Habitation rurale Haïtienne : (a) Maison traditionnelle « Kay peyi ». (b) Projet de reconstruction (MISEREOR).

2. Description de la structure

L'ossature en bois est contreventée par des croix de Saint-André et remplie par une maçonnerie de pierres naturelles liées par un mortier de terre fibrée. Les poteaux sont liés aux lisses par des feuillards métalliques ceinturant ces dernières et fixés par huit clous lisses (Figure 3a). Les lisses hautes sont liées à la structure de la toiture par le même type de clous ainsi que par des fils à ligature torsadés (Figure 3c). Le reste des connexions est réalisé uniquement par le même type de clous lisses (Figure 3b et Figure 3d). Les dimensions principales de ces différents composants sont synthétisées dans le

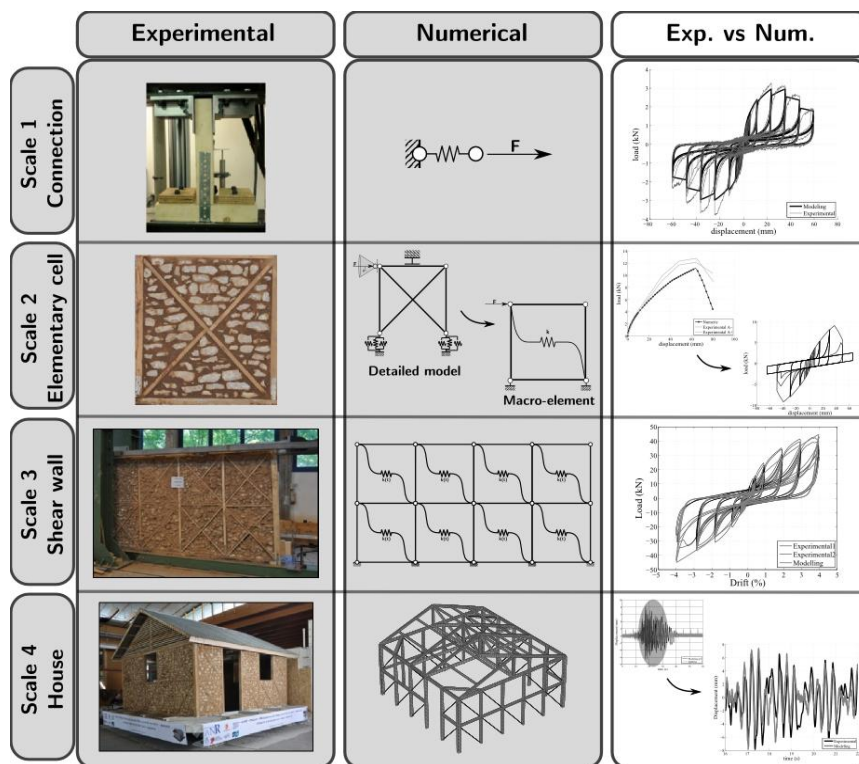
Tableau 1. La composition du mortier de terre a été définie pour avoir une consistance proche de ce qu'une terre d'Haïti permet d'obtenir. Les fibres de sisal permettent de limiter l'apparition de fissuration dans le mortier. Des clous ont également été plantés au niveau des liaisons mortier/ossature afin d'en améliorer l'adhérence.

3. Analyse des résultats expérimentaux et numériques

Cette partie présente brièvement à chaque échelle le calage ou la comparaison du modèle ou de la modélisation par rapport aux résultats des campagnes expérimentales correspondantes. Le modèle de Humbert (Figure 4), utilisé pour cette étude, est hystérétique anisotrope avec endommagement cumulatif (voir Humbert (2014) pour plus de détails). Il a été implémenté sur la plate-forme **ATLAS** (A Tool and Language for Simplified Structural Solution Strategy) développée sous Matlab® au laboratoire 3SR. Davantage de détails sont disponibles dans Vieux-Champagne (2014).

Tableau 1. Dimensions principales des composants de la structure

Désignation	Dimensions
Ossature bois C18 (EN 338, 2009)	
Poteaux, lisses haute et basse	Hauteur : 50 mm, largeur : 100 mm
Diagonales	Hauteur : 25 mm, largeur : 100 mm
Feuillard Simpson Strong Tie® FP30/1,5/50	Largeur : 30 mm, ép. : 1,5 mm
Clou lisse (EN-10230-1, 2000)	Diamètre : 3 mm, longueur : 70 mm
Mortier de terre :	
1 volume de mélange argileux-calcaire	D < 135 μ m
2 volumes de sable	D < 2 mm
0,5 volume d'eau	
1 volume de fibre de sisal	

**Figure 2.** Approche multi-échelles

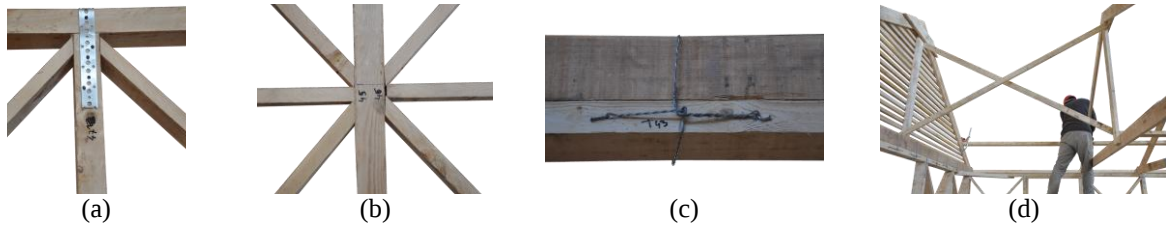


Figure 3. Les différents types de connexions utilisés dans la structure. (a) Poteau/poutre, feuillard métallique cloué. (b) Croix de Saint-André/poteaux-poutres, clouée. (c) Lisse haute/toiture, fils à ligaturer cloués. (d) Toiture, clouée.

3.1. Echelle 1 : assemblage par feuillard métallique

Plus de 30 essais ont été réalisés sur des assemblages poteau/poutre (Figure 3a) afin de d'analyser l'influence de différents paramètres (non traité dans cet article) et de fournir une base de données permettant de calibrer le modèle de Humbert (Figure 5) décrivant le comportement en traction et en cisaillement des connexions. La campagne expérimentale est composée d'essais monotones et cycliques définis sur la base de la norme EN-12512 (EN-12512, 2002). Deux étapes de calages sont nécessaires : la première consiste à caler les paramètres permettant de reproduire la courbe moyenne des essais monotones alors que la seconde consiste à caler les paramètres permettant de reproduire les cycles de chargement/déchargement à partir d'un essai oligo-cyclique. Une fois le modèle calé dans les deux directions (traction et cisaillement), il est utilisé à l'échelle 2 de la cellule élémentaire (modélisation « détaillée ») afin de reproduire le comportement des assemblages.

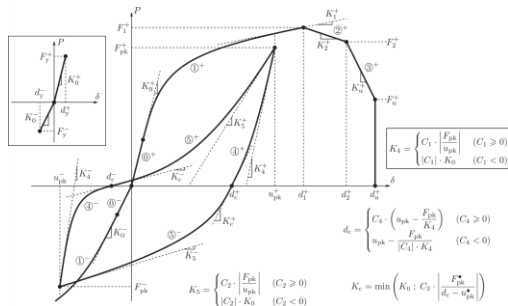


Figure 4. Modèle de Humbert (Humbert (2014)).

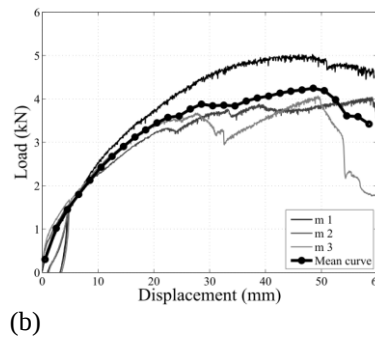
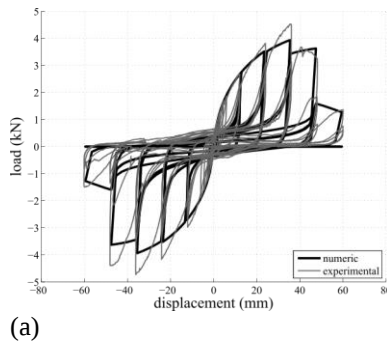


Figure 5. Essais de cisaillement réalisés sur un assemblage poteau/poutre ; calage des paramètres du modèle de Humbert à partir des résultats expérimentaux (a) Essai oligo-cyclique. (b) Essais monotones.

3.2. Echelle 2 : cellule élémentaire

Cet élément de structure est une partie intégrante de chaque pan de mur. Le choix de cette échelle a été motivé par :

- Le manque de connaissance relatif au comportement des structures à ossature en bois avec remplissage. Différents paramètres (la présence de remplissage, type de remplissage, capacité de contreventement du remplissage) ont pu être pris en compte grâce l'échelle réduite de la cellule rendant plus aisé la réalisation d'essais.
- La nécessité de valider l'approche numérique.

Un modèle détaillé (par opposition au macroélément représentant uniquement le comportement global de la cellule) de la cellule a été développé (Figure 6a), basé sur l'utilisation d'éléments poutre pour décrire le comportement des montants de bois horizontaux et verticaux, d'éléments barre (résistance en traction négligeable) pour les diagonales en bois et de ressorts à deux nœuds non-linéaires (modèle de Humbert, patin frottant) décrivant le comportement des assemblages et des phénomènes de frottements existants dans la chaîne cinématique du banc d'essai. La Figure 6b présente les résultats de la comparaison entre la prédiction de la modélisation et les essais expérimentaux. Les courbes A- et A+ représentent respectivement les courbes enveloppes des essais oligo-cycliques du côté négatif et positif du déplacement. La prédiction du modèle est acceptable et est utilisée pour caler les paramètres du modèle de Humbert décrivant le comportement de l'élément 5 d'une modélisation simplifiée (macroélément, Figure 7). Le comportement du macroélément ainsi obtenu par prédiction est utilisé pour les modélisations aux échelles 3 et 4.

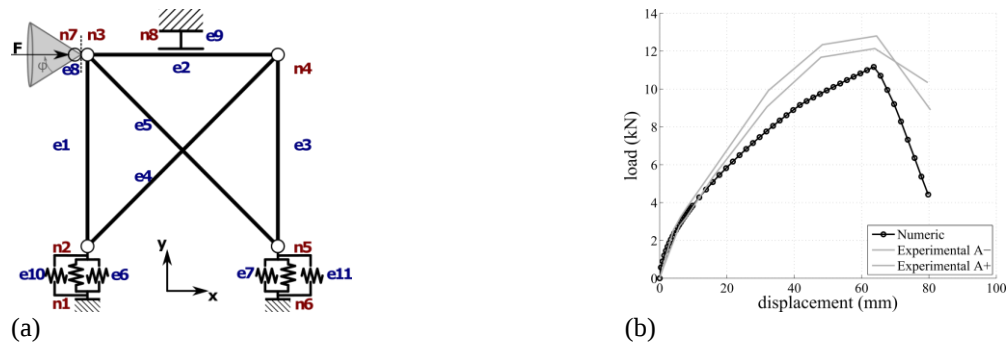


Figure 6. Echelle 2 : modélisation « détaillée » de cellule élémentaire (a) Maillage. (b) Comparaison des résultats du modèle par rapport à ceux des essais expérimentaux.

3.3. Echelle 3 : mur de contreventement

La campagne expérimentale a été réalisée au sein du CNR-Ivalsa (Trento, Italie) où trois murs avec remplissage (deux essais oligo-cycliques et un essai monotone) et deux murs sans remplissage (un essai oligo-cyclique et un monotone) ont été testés. A cette échelle, les objectifs étaient :

- D'appréhender l'influence du remplissage sur le comportement global du mur de contreventement (Vieux-Champagne (2014)).
- De valider la prédiction du comportement du mur de contreventement du modèle simplifié (assemblage de macroéléments) et donc valider le passage de l'échelle 2 à l'échelle 3 de l'approche numérique.

Le modèle simplifié est représenté sur la Figure 8a. Les poteaux sont modélisés par des éléments poutres continus dont les extrémités sont rotulées. Les membres horizontaux sont modélisés par des éléments barres. La Figure 8b présente les résultats obtenus, confrontés aux données expérimentales. La comparaison est relativement bonne et valide l'approche numérique pour un chargement quasi-statique de l'échelle 2 à 3.

3.1. Echelle 4 : le bâtiment

Des essais sismiques ont été réalisés sur une maison à ossature en bois avec remplissage en maçonnerie de pierre avec mortier en terre. L'objectif était de prouver le bon comportement parasismique de ce type de structure et de valider l'approche multiéchelles numérique dans son ensemble pour un chargement dynamique.

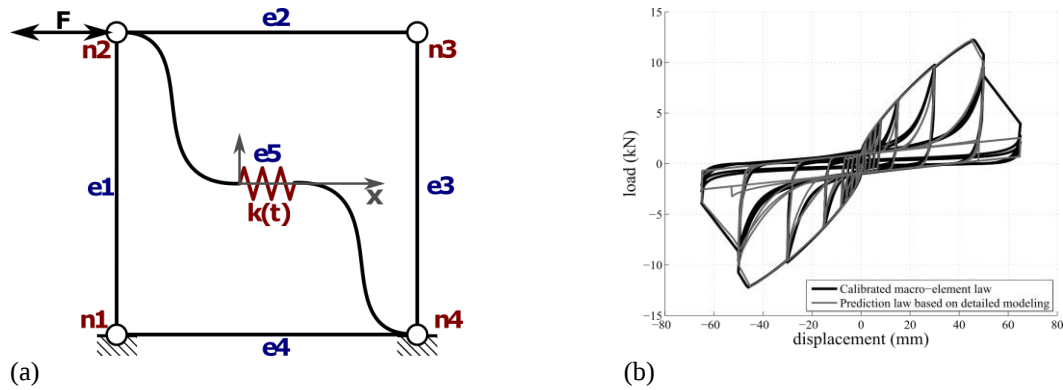


Figure 7. Echelle 2 : modèle simplifié de cellule élémentaire : le macro-élément (a) Maillage. (b) Calage des paramètres du modèle de Humbert à partir des résultats du modèle détaillé.

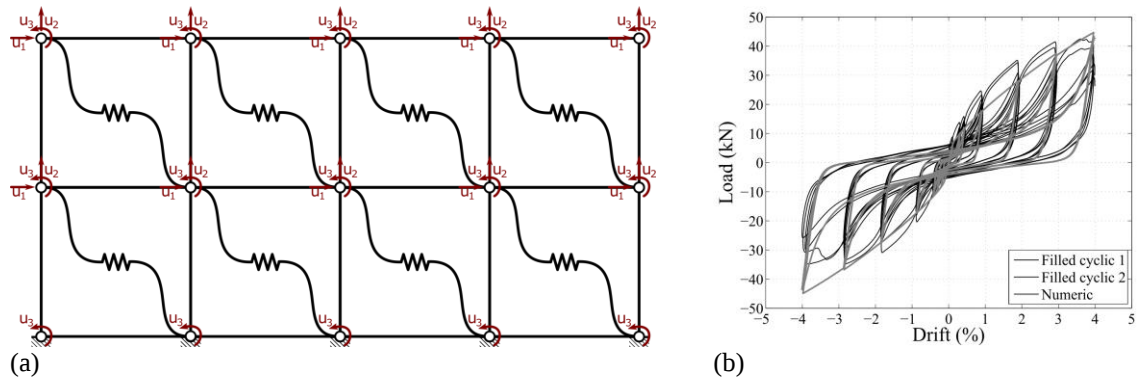


Figure 8. Echelle 3 : mur de contreventement. (a) modélisation simplifiée du mur de contreventement par assemblage des macroéléments. (b) comparaison des résultats expérimentaux et numériques.

3.1.1. Description de la campagne expérimentale

Les paragraphes suivants décrivent brièvement la campagne expérimentale. Davantage d'informations seront disponibles dans Vieux-Champagne (2015).

Table vibrante.

Les essais ont été réalisés sur la table vibrante uniaxiale du FCBA de Bordeaux. Ce dispositif est composé d'une plateforme en aluminium mesurant 6m x 6m mise en mouvement par un vérin servo-hydraulique de 250kN.

Signaux sismiques, Figure 9.

Pour le contexte particulier de cette étude (contexte du séisme du 12 janvier 2010 en Haïti), puisqu'aucun enregistrement local n'existe, un signal (noté HTI par la suite) de magnitude 6,8 a été simulé (à 34km de Port-au-Prince par la méthode des fonctions de Green empirique), déterministe et représentatif de ce séisme. Un second signal (noté GUA (pour Guadeloupe)) a été utilisé afin d'appliquer à la structure un contenu fréquentiel différent et car ce dernier était calé sur un spectre de réponse caractéristique de l'activité sismique dans les Antilles françaises (aléa sismique le plus important selon zonage sismique de la France).

Corps d'épreuve, Figure 11a.

La maison, dont les plans sont basés sur des modèles reconstruit en Haïti, est symétrique par rapport à l'axe Nord-Sud (Figure 11) mesurant 4,65m x 4,65m par 3,20m de haut. Les murs de contreventement ont six poteaux verticaux avec une fenêtre et une porte respectivement entre les poteaux 2-3 et 4-5 dans le sens N-S. Les murs transversaux sont identiques avec également six poteaux verticaux et ont une fenêtre entre les poteaux 3-4. Selon une étude numérique préliminaire, le corps d'épreuve a été placé sur la table de façon à solliciter sa direction plus vulnérable par rapport au contenu fréquentiel des signaux sismiques (Figure 9). Il était ancré dans des poutres en acier au moyen de quarante boulons (deux entre chacun des montants verticaux) qui étaient elles-mêmes boulonnées sur la table.

Procédure expérimentale, Tableau 2.

Le test vise à démontrer le comportement sécuritaire de cette structure sous chargement sismique. Pour cela, le signal HTI 100% a été conçu selon la méthode des fonctions de Green-Empirique pour être représentatif du tremblement de terre de 2010 en Haïti. Puis, afin d'analyser le comportement non-linéaire de la structure, la maison a été soumise au signal à 200% et 300%. Enfin, la structure, suite à des réparations mineures, a été soumise au signal GUA 100% puis 390%. Afin d'évaluer l'évolution des fréquences propres, la structure a été soumise à un bruit blanc de faible niveau (0,03g et 0,5 mm RMS (Root Mean Square)) avant le début des essais et entre chaque chargement sismique. La phase de pré-test mise en place consistait à mesurer la réponse de la structure sous un signal aléatoire de faible amplitude et accélération au moyen de trois accéléromètres triaxiaux déplacés successivement à chaque nœud de la structure (environ 24 RUN de 30 secondes ont été nécessaires). Ensuite entre chaque essai, les données de 8 accéléromètres uniaxiaux ont été utilisées.

3.1.1. Résultats

Analyse modale

La phase de pré-test a permis l'obtention des trois premiers pôles de la maison et des coefficients d'amortissement correspondants (voir Tableau 3). Les deux premiers modes sont similaires et correspondent aux mouvements hors-plan des parois transversales. La petite différence de fréquence est due aux différentes positions des murs (un près des portes (plus flexibles), l'un près de la fenêtre) et en raison des différences intrinsèques de fabrication (poids, dimensions géométriques, etc.) des deux parois. Le deuxième mode est le mode principal des murs de contreventement.

Puis, suite à chaque essai sismique, la structure a été soumise au même type de bruit blanc de faible niveau. Une analyse de la modification des caractéristiques modales de la structure résultant des essais sismiques successifs a été réalisée en calculant la fonction de réponse en fréquence (FRF) entre les accélérations en tête de mur transversal et au niveau de la table obtenu au cours de chaque bruit blanc (Figure 9). Les paramètres observés sont la variation de la valeur des fréquences propres, la forme et l'amplitude. Les FRFs sont présentées dans la Figure 10. Sur ce graphique, nous pouvons remarquer que progressivement après chaque essai : la fréquence propre, directement liée à la rigidité de la structure, diminue ; la largeur de la courbe autour du pic de la fréquence propre, assimilé à l'amortissement de la structure, augmente ; l'amplitude diminue.

Comparaison des résultats expérimentaux et numériques

A partir d'un modèle aux éléments finis simplifié de la structure basé sur l'utilisation de macroéléments (Figure 11b), le comportement de la maison est prédit et comparé aux résultats expérimentaux obtenus à la suite de la série HTI (la série GUA n'est pas traitée ici). La Figure 12a montre la comparaison du déplacement en tête du mur de contreventement (Figure 11) pendant toute la durée du signal de HTI 200% et pour l'intervalle de temps de ce signal au cours duquel l'accélération est maximale (Figure 12b). Ces résultats valident l'approche multiéchelles et valident l'utilisation de cet outil numérique permettant la prédiction du comportement de la structure à ossature de bois avec remplissage sous chargement sismique.

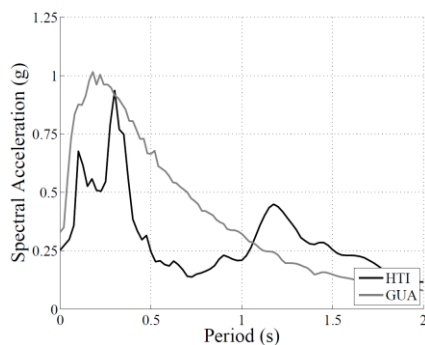


Figure 9. Spectre de réponse d'oscillateur des signaux sismiques joués

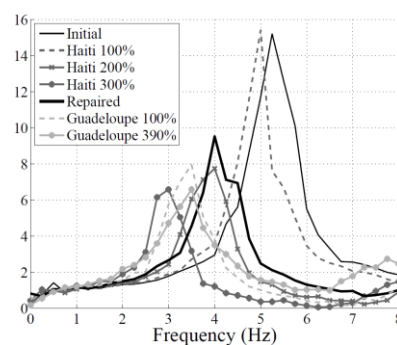


Figure 10. FRF de la réponse en tête de mur transversal/table vibrante.

Tableau 2. Procédure expérimentale

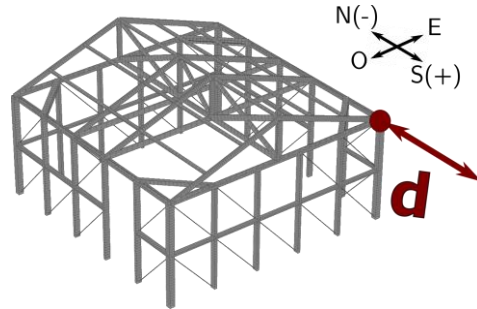
RUN (essai)	Description de la sollicitation	Niveau	Accélération maximale (g)	Commentaires
1 (~ x 24)	Sollicitation aléatoire		0,03g	Phase de pré-test – 3 accéléro. triaxiaux déplacés sur env. 24 RUNs de 30 sec.
2	HTI	100 %	0,27	
3	Sollicitation aléatoire		0,03	8 accéléromètres. uniaxiaux
4	HTI	200 %	0,54	
5	Sollicitation aléatoire		0,03	8 accéléromètres. uniaxiaux
6	HTI	300 %	0,77	
7	Sollicitation aléatoire		0,03	8 accéléromètres. uniaxiaux
Réparation de la structure				
8	Sollicitation aléatoire		0,03	8 accéléromètres. uniaxiaux
9	GUA	100 %	0,32	
10	Sollicitation aléatoire		0,03	8 accéléromètres. uniaxiaux
11	GUA	390 %	1,26	
12	Sollicitation aléatoire		0,03	8 accéléromètres. uniaxiaux

4. Conclusion

Cette étude présente les résultats expérimentaux et numériques à différentes échelles d'analyse du comportement des structures à ossature de bois avec remplissage sous chargement sismique. La première échelle fournit des informations sur les phénomènes non linéaires dissipatifs gouvernant le comportement de la structure. La seconde échelle fournit un modèle non linéaire « détaillé » prédictif de la cellule élémentaire et de son comportement permettant le calage des paramètres du macroélément. Aux échelles 3 et 4, le modèle simplifié (assemblage de macroéléments) fournit un outil efficace de calcul permettant de prédire de façon acceptable le comportement de ce type de structures sous chargement quasi-statique et dynamique.



(a)

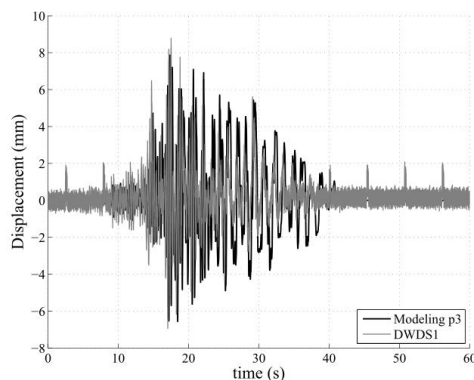


(b)

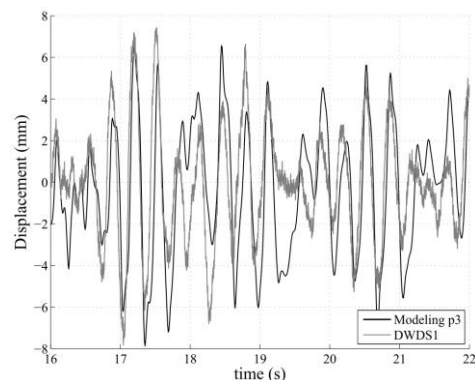
Figure 11. (a) Structure testée sur la table vibrante – Déplacement mesuré par capteur à fil (Draw Wire Displacement Sensor : DWDS) en tête du mur de contreventement. (b) Modélisation simplifiée (assemblage de macroéléments) de la maison

Tableau 3. Pôles et amortissements obtenus par l'analyse modale(pré-test)

Pôle	Element	Fréquence propre (Hz)	Amortissement (%)
1a	Mur transversal Sud	5,2	5,2
1b	Mur transversal Nord	5,9	5,7
2	Mur de contreventement	10,9	5,3



(a)



(b)

Figure 12. Comparaison des résultats expérimentaux et numériques du déplacement en tête du mur de contreventement. (a) Temporel complet. (b) Intervalle 16-22 secondes (contenant le déplacement max.).

5. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier et à souligner le soutien de l'Agence nationale française de recherche (ANR) pour le projet ReparH sous le code de référence ANR-10-HAIT-003 (coordonné par CRAterre en collaboration avec l'UJF-3SR, et l'unité de recherche AE&CC de l'ENSAG et l'ONG haïtienne GADRU), les associations participantes de la plate-forme PADED et tous les partenaires locaux pour leur implication et leur contribution à ce projet de recherche. Ce travail est soutenu par une subvention publique supervisée par l'Agence nationale française dans le cadre du programme «Investissements d'Avenir» (référence: ANR-10-LabX-0083). Le 3SR de laboratoire fait partie du LabEx Tec 21 (Investissements d'Avenir - référence: ANR-11-LabX-0030).

6. Bibliographie

Ahmad, N., Qaisar, A., Umar, M., « Simplified engineering tools for seismic analysis and design of traditional Dhajji-Dewari structures », *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 10, no 5, 2012, p. 1503-1534.

Audefroy, J.F., « Haiti : post-earthquake lessons learned from traditional construction », *Environment and Urbanization*, vol. 23, no 2, 2011, p. 447-462.

Boudaud, C., Humbert, J., Baroth, J., Hameury, S., Daudeville, L., *Joints and wood shear walls modelling II: Experimental tests and FE models under seismic loading*, *Engineering Structures*, Available online 29 November 2014, ISSN 0141-0296, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.10.053>.

Dutu, A., Ferreira, J.G., Guerreiro L., Branco, F., Goncalves, A.M., « Timbered masonry for earthquake resistance in Europe », *Materiales de construccion*, vol. 62, no 308, 2012, p. 615-628.

EN 338 – Structural timber ?strength classes », 2009.

EN 10230-1 – Steel Wire Nails - Part 1 : Loose Nails For General Applications », 2000.

EN 12512 – Timber structures - Test methods - Cyclic testing of joints made with mechanical fasteners, 2002.

Humbert, J., Boudaud, C., Baroth, J., Hameury, S., Daudeville, L., « Joints and wood shear walls modelling I: Constitutive law, experimental tests and FE model under quasi-static loading », *Engineering Structures*, vol. 65, 2014, p. 52-61.

Langenbach, R., « Learning from the past to protect the future : Armature Crosswalls », *Engineering Structures*, vol. 30, no 8, 2008, p. 2096-2100.

Öztank, N., « An Investigation of Traditional Turkish Wooden Houses », *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, vol. 9, no 2, 2010, p. 267-274.

Vasconcelos, P., Poletti, E., Salavessa S., Jesus, A.M.P., Lourenço, P.B., Pilaon, P., « In-plane shear behavior of traditional timber walls », *Engineering Structures*, vol. 56, no 0, 2013, p. 1028-1048.

Vieux-Champagne, F., Sieffert, Y., Grange S., Polastri, A., Ceccotti, A., Daudeville, L., « Experimental analysis of seismic resistance of timber-framed structures with stones and earth infill », *Engineering Structures*, Volume 69, 15 June 2014, Pages 102-115, ISSN 0141-0296, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.02.020>.

Vieux-Champagne, F., Sieffert, Y., Grange S., Belinga Nko'o, C., Bertrand, E., Duccini, J.C., Faye, C., Daudeville, L., « Experimental analysis of a shake table test of a timber-framed structures with stones and earth infill », *Engineering Structures* (en cours de soumission, may 2015).

Xu, J., Dolan, J.D., « Development of a wood-frame shear wall in Abaqus », *Journal of Structural Engineering*, vol. 135, no 8, 2009, p. 968-976.