



INSTITUT TECHNOLOGIQUE

Comportement parasismique des murs ossature bois

SISMOB3 – Phase 2

Carole Faye

5 avril 2013

Avec le soutien de :



Siège social
10, avenue de Saint-Mandé
75012 Paris
Tél +33 (0)1 40 19 49 19
Fax +33 (0)1 43 40 85 65

IBC Recherche
Allée de Boutaut - BP 227
33028 Bordeaux Cedex
Tél +33 (0)5 56 43 63 00
Fax +33 (0)5 56 43 64 80

www.fcba.fr

Siret 775 680 903 00017
APE 731 Z
Code TVA CEE : FR 14 775 680 903

Partenaires :



Carole FAYE
Pôle Industrie Bois Construction
Service Etudes et Recherche

Institut Technologique FCBA

Allée de Boutaut – BP 227
33 028 Bordeaux Cedex

☎ : 05.56.43.63.03

@ : carole.faye@fcba.fr

🌐 : www.fcba.fr

Stéphane HAMEURY

Chef Adjoint de la Division Valorisation des Technologies Innovantes
Département Sécurité, Structure et Feu

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

84 avenue Jean Jaurès - Champs-sur-Marne
FR-77447 Marne-la-Vallée Cedex 2

☎ : 01.61.44.80.52

@ : stephane.hameury@cstb.fr

🌐 : www.cstb.fr

SOMMAIRE

1. Introduction.....	4
1.1 Contexte de l'étude	4
1.2 Objectif de l'étude.....	4
1.3 Contributions et partenaires de l'étude.....	5
2. Comportement dynamique d'elements de murs a ossature bois.....	6
2.1 Configurations testées.....	6
2.2 Protocole expérimental.....	8
2.3 Procédure de détermination du coefficient de comportement q	10
2.4 Détermination du critère de non effondrement	11
2.5 Choix des accélérogrammes pour les essais sur table vibrante.....	13
2.6 Résultats d'essais dynamiques pour les murs OSB12.....	20
2.7 Résultats d'essais dynamiques pour les murs CP10.....	25
2.8 Résultats d'essais dynamiques pour les murs P16	28
2.9 Modélisation des essais dynamiques sur murs	29
2.10 Evaluation du coefficient de comportement q.....	34
3. Essais cycliques sur elements de mur.....	38
3.1 Protocole d'essai cyclique	38
3.2 Essais cycliques selon ISO/DIS 21 581 pour les panneaux OSB 12.....	41
3.3 Essais cycliques selon ISO/DIS 21 581 pour les panneaux CP10	44
3.4 Essais cycliques selon ISO/DIS 21 581 pour les panneaux P16.....	46
3.5 Détermination de la ductilité des murs selon la démarche de l'EN 1998-1	48
3.6 Détermination de la ductilité des murs à partir de l'analyse en énergie des essais cycliques	49
4. Conclusion Générale	51
5. Bibliographie.....	53
6. Annexe 1 : Détermination $PGA_{EC8,q=1}$ pour chacune des configurations expérimentales	54

1. INTRODUCTION

1.1 Contexte de l'étude

Dans le cadre des politiques de soutien au développement des matériaux bio-sourcés dans le bâtiment, les Pouvoirs Publics souhaitent recenser les actions potentielles de stimulation du développement d'une offre à base de solutions bois, à l'adresse des constructeurs et des industriels, tant sur le champ du neuf que pour celui de la rénovation. Cette orientation volontariste, cohérente avec les conclusions du Grenelle de l'environnement, se heurte à un état des pratiques largement en faveur des solutions béton et maçonnerie.

Dans ce contexte, la Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et des Paysages a confié au CSTB et à l'Institut Technologique FCBA en 2009, un programme d'étude pour identifier les obstacles réglementaires et normatifs en France à l'usage du bois construction.

Ce programme d'étude a abouti à la publication d'un rapport en juin 2009 (http://www.logement.gouv.fr/IMG/pdf/Rapport_Obstacles_Bois_construction_cle2527d1.pdf). Ce rapport propose un faisceau d'actions susceptibles de **nourrir l'engagement de l'État transcrit dans l'article 29 de la loi de programme des engagements du Grenelle Environnement, ou « Grenelle 1 », engagement visant entre autre « à adapter les normes de construction à l'usage du bois [...] »**.

Une des actions recensées, SISMOB, vise plus particulièrement à mieux appréhender le comportement en situation sismique des ouvrages à ossature bois.

1.2 Objectif de l'étude

Les objectifs de cette étude sont :

- d'une part, d'estimer, à partir d'essais dynamiques, le coefficient de comportement q pour des murs à ossature bois et panneaux en voile travaillant en OSB de 12 mm d'épaisseur pour lesquels il n'existe pas, dans l'EC8, de règles de moyens permettant de leur affecter un comportement dissipatif (classe MDL ou HDL). Ainsi, à l'heure actuelle, la valeur de $q=1,5$ est affectée par défaut à ces structures car l'utilisation des murs OSB n'est pas mentionnée dans l'EC8. A des fins de comparaison, des murs à panneaux en voile travaillant en contreplaqué de 10 mm et en panneaux de particules de 16 mm ont été également testés. La modélisation des essais dynamiques permet de justifier le choix des accélérogrammes utilisés lors des essais. Ce travail est présenté en chapitre 1.

- et d'autre part, de valider ou non le critère en énergie défini dans l'étude précédente SiSMOB 3 phase 1 [8], basé sur des essais cycliques à l'échelle des murs. Ce travail est présenté en chapitre 2.

1.3 Contributions et partenaires de l'étude

L'Institut Technologique FCBA et le CSTB, ont œuvré en complémentarité sur 2011 et 2012 pour mener à terme cette étude.

La présente étude a été menée par les personnes suivantes :

- L'Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement (FCBA), représenté par Mme Carole FAYE, M. Laurent LEMAGOROU, M. Jean-Charles DUCCINI & M. Patrice GARCIA,
- Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), représenté par M. Clément BOUDAUD & M. Stéphane HAMEURY.

2. COMPORTEMENT DYNAMIQUE D'ÉLÉMENTS DE MURS A OSSATURE BOIS

Ce chapitre étudie le comportement dynamique d'éléments de murs à ossature bois pour trois types de voile travaillant (OSB, contreplaqué et panneaux de particules) afin d'estimer un coefficient de comportement q pour les voiles en OSB d'épaisseur 12 mm (cf. §2.10).

Cette estimation du coefficient q est basée sur le couplage entre :

- des essais sur table vibrante d'éléments de murs pour 3 séismes. Les résultats sont présentés en §2.6, §2.7, §2.8 respectivement pour les voiles en OSB, contreplaqué et panneaux de particules ;
- une modélisation de ces essais dynamiques pour la configuration OSB, pour d'autres séismes afin d'évaluer la nocivité des séismes retenus pour les essais. Ce travail est présenté en §2.9.

Au préalable, sont présentées :

- en §2.1, les configurations de murs testées sur table vibrante,
- en §2.2, le protocole expérimental des essais sur table vibrante pour lesquels il n'existe pas d'essais normalisés,
- en §2.3 et §2.4, la procédure de détermination du coefficient de comportement q et le critère de non effondrement proposés pour les éléments de murs testés,
- en §2.5, la procédure de choix des accélérogrammes pour les essais sur table vibrante.

2.1 Configurations testées

Des éléments de murs de dimensions 2,4m×2,4m (cf. **Figure 1**) ont été testés pour les trois configurations de panneaux, conformes à la norme NF EN 13986, suivantes :

- configuration 1 : panneaux de contreplaqué (okoumé) d'épaisseur 10 mm,
- configuration 2 : panneaux de particules d'épaisseur 16 mm,
- configuration 3 : panneaux d'OSB d'épaisseur 12 mm.

Les configurations 1 et 2 ont été choisies afin de suivre les règles de moyens suivantes, données par l'EN 1998-1-1 (§8.2(4)), permettant de leur affecter, au sens de l'Eurocode 8, un comportement de structure dissipative :

- a) les panneaux de particules ont une masse volumique d'au moins 650 kg/m³ ;
- b) les panneaux en contreplaqué ont une épaisseur d'au moins 9 mm ;
- c) les panneaux de particules ou de fibres ont une épaisseur d'au moins 13 mm.

En revanche, aucune règle de moyens n'existe pour les panneaux OSB alors qu'ils représentent environ 80% du marché français de la maison à ossature bois. Ainsi, un panneau d'épaisseur de 12 mm a été retenu car c'est une configuration communément utilisée en zone sismique.

De plus, l'EN 1998-1 (§8.3 (4b)) impose les dispositions suivantes :

- le diamètre maximum d des organes de fixation est de 3,1 mm.
- l'épaisseur minimum du panneau est de $4.d$.

Afin de respecter ces dispositions, les panneaux sont fixés sur les montants par des pointes non lisses (annelées) $\varnothing 2,5 \times 50$ mm, marquées CE selon la norme NF EN 14 592.

Par ailleurs, l'ensemble des murs présente les caractéristiques communes suivantes :

- l'entraxe des pointes est de 150 mm pour les rives et de 300 mm au centre ;
- l'ossature est en Sapin / Épicéa de section 45×145 mm². Les montants de qualité C24 sont espacés d'un entraxe de 600 mm. Les assemblages entre les montants et les traverses sont réalisés par 4 pointes annelées $\varnothing 3,2 \times 90$ mm ;
- le mur est fixé à la dalle d'essai ou sur la table vibrante par 4 tiges filetées de diamètre 12 mm avec écrous entre chaque montant et 2 équerres Simpson AH290550/2 et rondelles US40/50/10G-B au droit des deux montants d'extrémité, ainsi les montants d'extrémité sont ancrés conformément à l'EC5.

Le choix de ces 3 configurations a été validé par les professionnels de la FIBC, de la CAPEB et de la FFB lors d'une réunion du Comité Technique de l'étude le 3 décembre 2010.

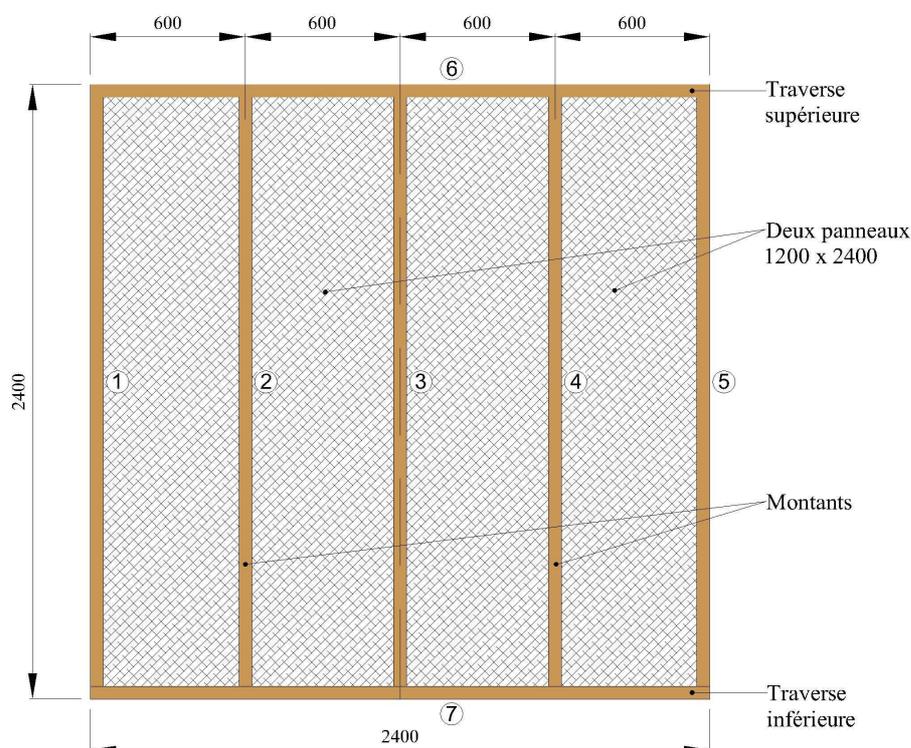


Figure 1 : Détail des murs d'essai : montants extérieurs en 1,3 et 5 / montants centraux en 2 et 4.

2.2 Protocole expérimental

Le montage expérimental (cf. **Figure 2**) a été établi afin de représenter au mieux les conditions réelles de sollicitations dynamiques d'éléments de murs :

- la charge verticale est posée directement sur le mur sans bridage vertical afin que les rotations des murs dans le plan ne soient pas bloquées,
- selon les essais, la charge verticale est de 1,5 tonne ou de 2 tonnes. Ce niveau de charge représente la masse à supporter par les murs pour un dimensionnement au séisme dans le cas d'un bâtiment d'habitation usuel en R+1 (soit entre 625kg/ml et 830kg/ml),
- le mur est fixé sur la table vibrante par 4 tiges filetées de diamètre 12 mm avec écrous entre chaque montant et 2 équerres Simpson AH290550/2 et rondelles US40/50/10G-B au droit des deux montants d'extrémité,
- un système de deux rails d'acier est mis en place pour éviter la chute de la masse verticale sur la table. Afin de limiter les frottements lors des essais, une bande de Téflon recouvre les deux rails métalliques. De plus, afin d'éviter tout choc transverse et de se placer dans des conditions d'essai reproductibles, un espacement constant de 5 mm entre le mur et la surface de la bande de Téflon est laissé pour chaque essai. Un essai effectué avec un espacement de 1 mm, a permis de vérifier que l'impact du frottement sur les déplacements des murs était négligeable car inférieur à l'erreur sur la mesure,
- la table sollicite les murs de façon unidirectionnelle parallèlement à leur plan.



Figure 2 : Détails du dispositif expérimental.

La procédure d'essai suit les étapes suivantes :

- (a) le montage du mur sur la table,
- (b) la sollicitation du mur par un bruit blanc de bas niveau pour déterminer la fréquence et les déformées modales initiales à partir d'une analyse modale expérimentale, et la FRF¹ entre les accélérations en tête et en pied du mur,

¹ FRF : la Fonction de Réponse en Fréquence est la représentation fréquentielle du rapport entre l'accélération du faitage sur celle de la table lors de sollicitation sismique.

- (c) la sollicitation du mur **par le séisme à son niveau d'origine** afin de déterminer le déplacement en tête du mur ainsi que les accélérations en tête et en pied du mur ;
- (d) la sollicitation du mur **par un bruit blanc** de bas niveau pour déterminer la FRF entre les accélérations en tête et en pied du mur suite au séisme précédent;
- (e) idem **à l'étape (c) mais pour le séisme à un niveau amplifié** tel que le mur atteigne (sans la dépasser) la limite de non effondrement;
- (f) idem **à l'étape (d)** afin d'étudier l'évolution de la structure suite au séisme de l'étape précédente ;
- (g) idem **à l'étape (c)** afin de s'assurer que le mur est en capacité de supporter à nouveau un séisme sans s'effondrer,
- (h) idem **à l'étape (d)** ;
- (i) idem **à l'étape (c) mais pour le séisme à un niveau maximal correspondant aux limites de la table vibrante.**

L'étape (c) n'a pas été menée systématiquement.

Pour chaque configuration de murs, au minimum 3 essais ont été réalisés correspondant aux trois séismes retenus. Pour la configuration relative à l'OSB, des essais supplémentaires ont été menés pour vérifier la reproductibilité des essais et l'influence de la charge verticale (1,5 ou 2 tonnes).

[Le choix des accélérogrammes](#) pour ces essais sur tables vibrante est détaillé en § 2.5.

[Le positionnement des capteurs](#), pour les essais sismiques (Murs 9 à 21), est le suivant :

- le positionnement des accéléromètres est présenté sur la [Figure 3](#): les accéléromètres 6 et 7 permettent d'étudier l'amplification du séisme due au mur. Les accéléromètres 1 et 5 permettent d'estimer le soulèvement des murs lors des essais ;
- la mesure du déplacement longitudinal des murs a été faite par différence entre la mesure du capteur à fil fixé à mi-longueur de la lisse haute du mur par rapport à une référence liée au sol et la mesure du capteur LVDT du vérin sismique (déplacement de la table).

Pour les analyses modales expérimentales, des accéléromètres 2 axes sont positionnés à chaque nœud du modèle.

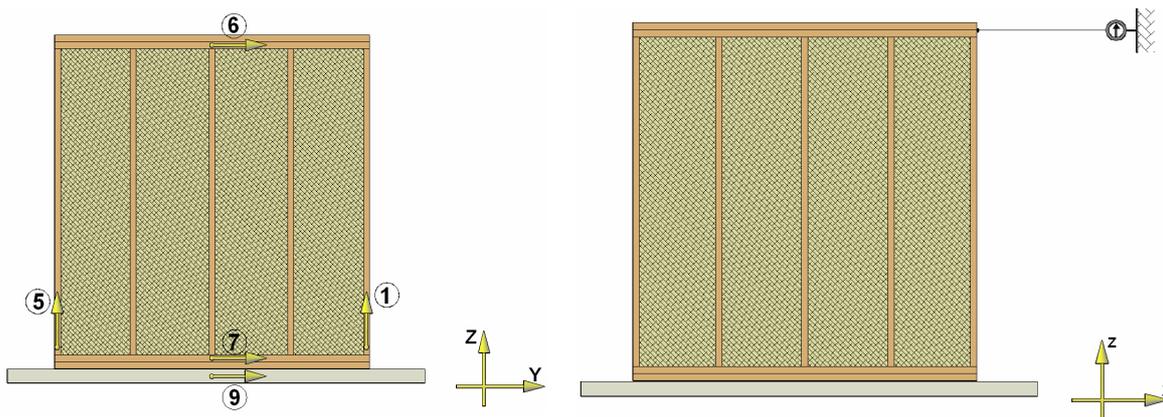


Figure 3 : Positionnement des accéléromètres et des capteurs de déplacements lors des essais sismiques (Murs 9 à 21).

2.3 Procédure de détermination du coefficient de comportement q

L'objectif étant d'évaluer le coefficient de comportement q permettant d'assurer le critère de non effondrement pour une structure dimensionnée selon l'EN 1998-1, le coefficient proposé sera donc associé à l'EN 1998-1.

La valeur du coefficient de comportement q pour une structure correspond à la valeur caractéristique déterminée à partir des valeurs $q_{\text{séisme } i}$ obtenues sur un nombre significatif de séismes. Chaque valeur $q_{\text{séisme } i}$ associée au séisme i est elle-même déterminée à partir de $PGA_{EC8,q=1}$ (cf. étape 1) qui est l'accélération de sol correspondant à un taux de travail des murs de 100% pour un dimensionnement mené selon l'EN 1998-1 avec une valeur de $q=1$, donc basée sur la valeur caractéristique de la résistance des murs selon l'EC5.

Autrement dit, le coefficient de comportement q correspond au rapport de l'accélération caractéristique que peut réellement supporter la structure sans effondrement sur l'accélération déterminée par un dimensionnement fait selon l'EN 1998-1, elle-même basée sur la valeur caractéristique de la résistance des murs selon l'EC5.

C'est la démarche récemment proposée dans les articles scientifiques relatifs aux structures bois [10] et [11].

Ainsi, la démarche générale pour déterminer la valeur q_i associée à un signal sismique i , se fait selon les quatre étapes principales suivantes:

Etape (1) : détermination par calcul du $PGA_{EC8,q=1}^2$: l'accélération de sol correspondant à un taux de travail des murs de 100% pour un dimensionnement mené

² PGA : Peak Ground Acceleration

selon l'EN 1998-1 avec une valeur de $q=1$. Pour chacune des 3 configurations de murs, le calcul de $PGA_{EC8,q=1}$ est présenté en Annexe 1.

Etape (2) : détermination par voie d'essais du $PGA_{s\acute{e}isme\ i, non_effondrement}$: pic d'accélération du sol correspondant à une amplification du signal sismique i pour atteindre la limite de non effondrement de la structure. La détermination du critère de la limite de non effondrement est proposée en § 2.4.

Etape (3) : pour le séisme i , calcul de $q_{s\acute{e}isme\ i} = \frac{PGA_{s\acute{e}isme\ i, non\ effondrement}}{PGA_{EC8, q=1}}$.

Pour calculer $q_{s\acute{e}isme\ i}$ pour un nombre significatif de séismes, la modélisation du comportement dynamique non linéaire par éléments finis est généralement utilisée.

Etape(4) : estimation de q à partir de la valeur caractéristique des valeurs $q_{s\acute{e}isme\ i}$.

Dans cette étude, la valeur caractéristique de q n'a pas pu être directement déterminée à partir d'un nombre significatif de valeurs $q_{s\acute{e}isme\ i}$ car la modélisation n'avait pas un niveau de fiabilité suffisant (cf. § 2.9) pour déterminer les valeurs de déplacements en tête de mur. En revanche, la modélisation a permis de montrer que le séisme dit lointain utilisé lors des essais était l'un des plus nocifs (5/40) sur l'ensemble des séismes représentatifs de l'aléa fort et modéré en France retenus pour cette étude.

2.4 Détermination du critère de non effondrement

Selon l'EC8 (§2.1), les exigences fondamentales à respecter pour les structures en zones sismiques sont :

(1) **l'exigence de limitation des dommages** : la structure doit être conçue et construite pour résister à des actions sismiques présentant une probabilité de se produire plus importante que les actions sismiques de calcul, sans qu'apparaissent des dommages et des limitations d'exploitation, dont le coût serait disproportionné par rapport à celui de la structure.

Dans le cadre de notre étude, qui consiste à déterminer le coefficient de comportement q et non à réaliser un dimensionnement, cette exigence n'est pas à prendre en compte.

(2) **l'exigence de non effondrement** : la structure doit être conçue et construite de manière à résister aux actions sismiques de calcul, sans effondrement local ou général, conservant ainsi son intégrité structurale et une capacité portante résiduelle après l'évènement sismique. Concernant les structures en bois à comportement

dissipatif, on prend en compte la capacité des zones dissipatives de la structure à résister aux actions sismiques au-delà de leur domaine élastique, i.e., jusqu'à une réduction de 20% de la capacité résistante.

Pour respecter cette exigence de non effondrement, **nous définissons une limite en déplacement** telle que le déplacement maximal autorisé en tête de mur correspond à une chute de 10% de l'effort maximal sur la courbe enveloppe des essais cycliques menés à l'échelle des murs chargés selon la norme ISO 21 581 : 2010 ou ATSM E2126-2008. Le fait de considérer une réduction de 10% donne une marge de sécurité par rapport au 20% admis par l'EC8.

Le **Tableau 1** présente, pour les trois configurations de panneaux :

- la valeur maximale de l'effort F_{max}
- et les valeurs de déplacement $V_{F_{max}}$, $V_{90\%F_{max}}$, $V_{80\%F_{max}}$ obtenues respectivement pour les 3 niveaux d'effort F_{max} , $90\%F_{max}$, $80\%F_{max}$

à partir de la courbe enveloppe des essais cycliques réalisés sur des murs avec un chargement vertical total de 1,5T.

Les courbes enveloppes des essais cycliques sont présentées en § 3.2, 3.3, 3.4 respectivement pour les murs OSB12, CP10 et P16.

Par ailleurs, afin d'éviter toute instabilité géométrique (de second ordre) de la structure, nous limitons le déplacement entre étages à 60 mm.

	F_{max} (kN)	$V_{F_{max}}$ (mm)	$V_{90\%F_{max}}$ (mm)	$V_{80\%F_{max}}$ (mm)
OSB12/ 1,5T / ISO 21 581	12,4	34	51	59
OSB12/ 1,5T/ ISO 21 581	14,0	35	54	61
P16 /1,5T/ ISO 21 581	22,0	63	66	69
P16 /1,5T / ISO 21 581	22,2	63	67	71
CP10 /1,5T/ ISO 21 581	20,8	45	54	64
CP10 /1,5T / ISO 21 581	22,2	44	56	62

Tableau 1 : Effort maximal et déplacements correspondant à F_{max} , $90\%F_{max}$, $80\%F_{max}$ obtenus à partir de la courbe enveloppe des essais cycliques pour les 3 configurations de murs étudiés.

Ainsi, la limite de non effondrement correspond aux déplacements horizontaux en tête de mur limites suivants :

- 51 mm³ pour les murs avec panneaux OSB en 12 mm,
- 54 mm⁴ pour les murs avec panneaux de contre plaqué en 10 mm,
- 60 mm⁵ pour les murs avec panneaux de particules en 16 mm.

Egalement, afin de vérifier que le panneau conserve une capacité résiduelle, nous le soumettrons à un nouveau séisme.

³ pour indication, 51mm= 0,021 H.

⁴ pour indication, 54mm= 0,022 H

⁵ pour indication, 60mm=0,025 H

2.5 Choix des accélérogrammes pour les essais sur table vibrante

Trois signaux d'entrée ont été utilisés pour mener les essais sur table vibrante.

L'un d'entre eux correspond au séisme de l'Aquila (référéncé GX066y, Italie en 2009) enregistré par la station V. Aterno-Centro Valle. Il a été retenu car il a été utilisé dans une étude scientifique [11] concernant également la détermination du coefficient q pour la construction bois. De plus, sa nocivité était supérieure à la nocivité moyenne des séismes utilisés dans cette étude.

Les deux autres signaux ont été choisis afin:

- d'atteindre la limite de non effondrement des murs avant d'atteindre les limites physiques de la table ($depl_{max} = +/- 10cm$ et $acc_{max} = 3,5g$).
- d'être le plus nocif possible pour la structure afin que l'évaluation du coefficient q se fasse sur la base d'une valeur $PGA_{séisme_i, non_effondrement}$ considérée comme caractéristique ;
- d'être représentatif de l'aléa sismique fort et modéré en France.

Nous déterminerons la nocivité des séismes sur la base de la Densité Spectrale d'Énergie (DSE) qui représente l'énergie du signal à une fréquence donnée. Elle est le module au carré de la Transformée de Fourier de l'accélérogramme par fréquence.

Il est à noter que, lors du choix des accélérogrammes, la modélisation présentait certains résultats incohérents avec les analyses en énergie ci-dessous. De ce fait, les séismes ont été retenus via l'analyse en énergie et leur nocivité a été vérifiée a posteriori par la modélisation (cf. paragraphe 2.8).

Les bases de données de séismes utilisées correspondent :

- à des séismes réels représentatifs de l'aléa fort en France sélectionnés par le BRGM (scénarios Guadeloupe lointain (cf. Tableau 2) et proche (cf. Tableau 3)),
- à des séismes réels représentatifs de l'aléa moyen en France sélectionnés par le BRGM (scénario Lourdes (cf. Tableau 4)).

identifiant accélérogramme	Pays	Année	Nom du séisme	Ms	Nom de la Station	Rh km	Sol de classe EC8	PGA m/s ²
004653			Palacios	6,5	San Salvador- Unidad de Salud Tonacatepeque	50	C	3,34
004655					Zacatecoluca (LaPaz) – Hospital Santa Teresa	58	B	3,92
009618	Japon		Miyagi	6,1	Kesenuma	68	B	3,89
009588					Ohfunato	74	A	3,82
009623					Toyosato	79	C	2,52
009589					Ichinoseki	79	B	3,26
009590					Mizusawa	83	C	3,57
009626					Ichinoseki	86	C	2,74
Séisme dit lointain					Tohno	87	B	3,24
009622					Furukawa	91	D	2,48
008547							Niigata	6,5
008548	Numata	71	B	3,61				
008659	Kanose	82	C	3,01				

Tableau 2 : Signaux retenus pour le scénario de séisme lointain en Guadeloupe (Rh : distance hypocentrale, Ms : Magnitude).

identifiant accélérogramme	Pays	Année	Nom du séisme	Ms	Nom de la Station	Rh km	Sol de classe EC8	PGA m/s ²
000587	Italie	1997	Umbria	3,9	Nocera Umbra	16	B	2,73
000829	Italie	1997	Umbria Marche (réplique)	4,2	Colfiorito- Casermette	2	C	3,79
006663	Italie	1997	Umbria Marche (réplique)	4,3	Nocera Umbra 2	12	B	2,78
006643	Italie	1997	Umbria Marche (réplique)	4,3	Nocera Umbra- Biscontini	4	C	2,82
006440	Turquie	1999	Izmit (réplique)	4,3	LDEO C0375	16	A	3,36
000027	Italie	1972	Ancona	4,6	Genio-Civile	11	C	3,74
000029					Ancona-Rocca	11	B	3,97
006131	Grèce	1988	Ionian	4,2	Lefkada- Hospital	12	C	2,70
006462	Grèce	1999	Duzce (réplique)	4,5	LDEO C0375	14	A	2,98
006486			Duzce (réplique)	4,4	LDEO C0375	16	A	3,07

Tableau 3 : Signaux retenus pour le scénario de séisme proche en Guadeloupe

identifiant accélérogramme	Pays	Année	Nom du séisme	Ms	Nom de la Station	Rh km	Sol de classe EC8	PGA m/s ²
000042	Grèce	1973	Ionian	5,8	Lefkada (OTE building)	17	C	2,52
001313	Grèce	1999	Ano Liosia	5,9	Athens 3	23	B	2,96
000122	Italie	1976	Frioul (réplique)	5,5	Buia	15	C	2,26
000123					Forgaria (Cornino)	19	B	2,31
000147					San Rocco	16	B	2,29
000591 000593	Italie	1997	Umbria Marche (choc 1)	5,5	Colfiorito	8	D	2,53
					Nocera Umbra	15	B	2,99
000592	Italie	1997	Umbria Marche (choc 2)	5,9	Colfiorito	8	D	2,04
006383	Turquie	1999	Izmit (réplique)	5,8	Bahcecik (Seymen Kislasi)	21	B	3,00
008922	Japon	2004	Niigata-ken Chuetsu (réplique)	6,0	Shiozawa	32	C	2,29
G002	Californie	1979	Coyote lake	5,8	Gilroy array # 2	14	C	2,07
ABIRD	Californie	1987	Whittier Narrows	5,9	Donley - Birchdale	21	C	2,93
AING					Inglewood - Union Oil	28	C	2,93
OPARK	Californie	1991	Sierra Madre	5,7	La - Obregon Park	32	C	2,24

Tableau 4 : Signaux retenus pour le scénario de Lourdes.

Les figures 4, 5 et 6 présentent les DSE de l'ensemble des séismes respectivement pour le scénario de Guadeloupe lointain, proche et de Lourdes. Les DSE sont établies pour les séismes normalisés à un même niveau d'accélération soit 1g.

A des fins de comparaison, les 3 séismes GX066Y, 4653ya et lointain apparaissent sur toutes les figures.

Pour le scénario Guadeloupe lointain, on constate que les séismes présentant la DSE la plus élevée sont les signaux 9622xa, 9623xa, 9618xa, 9626xa, lointain et 4653ya.

Pour le scénario Guadeloupe proche, on constate que les séismes lointain et 4653ya présentent la DSE la plus élevée.

Pour le scénario de Lourdes, on constate que les séismes présentant la DSE la plus élevée sont les signaux 8922xa, 0592xa, 0122xa, 6383xa, lointain et 4653ya.

Ainsi, la DSE a permis de retenir 9 signaux sur les 40 signaux initiaux.

Afin de finaliser le choix des 2 séismes pour les essais, nous avons déterminé la nocivité des 9 séismes sur la base d'indicateurs généraux du mouvement sismique selon une méthodologie proposé par le BRGM [12]. Les résultats, présentés dans le [Tableau 5](#), montrent que les séismes les plus nocifs et permettant de respecter les limites en déplacements de la table sont les séismes lointain (5/40) et le 4653ya (2/40).

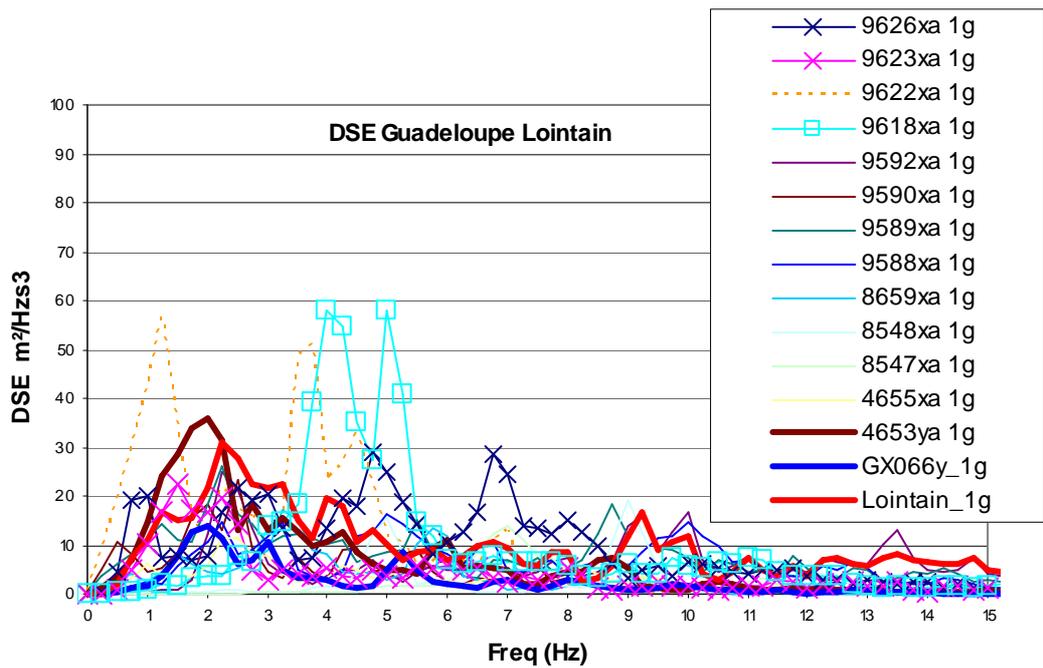


Figure 4 : Densité Spectrale d’Energie pour les séismes d’aléa fort (scénario Guadeloupe lointain).

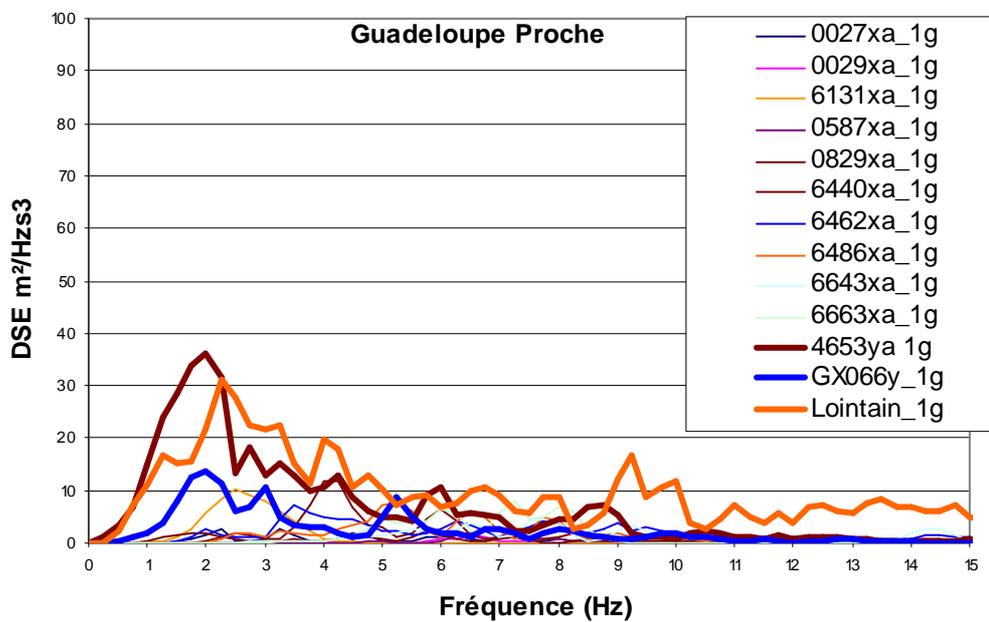


Figure 5 : Densité Spectrale d’Energie pour les séismes d’aléa fort (scénario Guadeloupe proche).

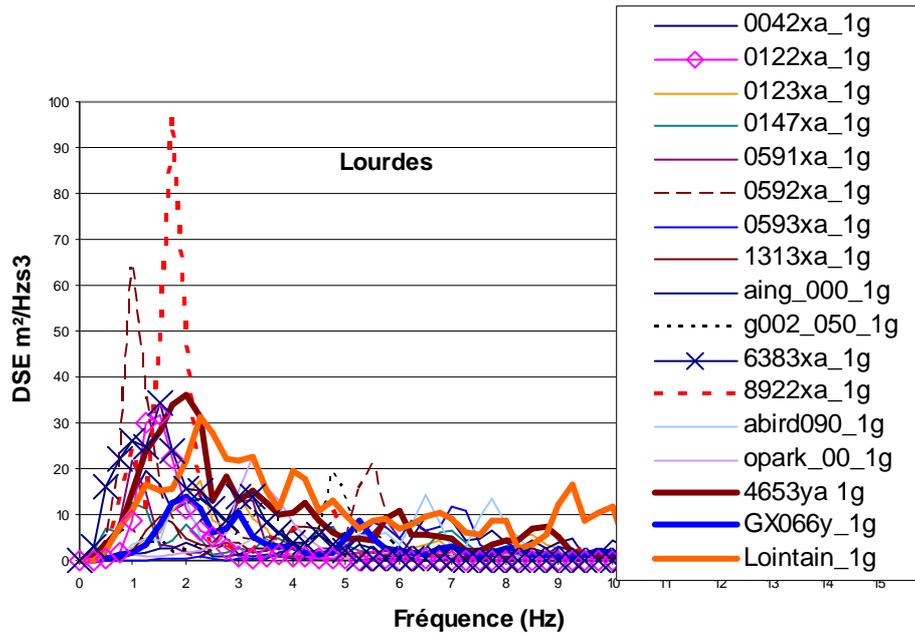


Figure 6 : Densité Spectrale d'Énergie pour les séismes d'aléa moyen (scénario de Lourdes).

Identifiant du séisme	Nom du séisme	Indicateurs généraux des accélérogrammes normalisés à 1g				Accélération maximale due à la limite en déplacement de la table vibrante	
		Intensité (PGV) ⁶	AI ⁷ (10 ⁻⁴ m/s)	CAV ⁸ (cm/s)	Classement final	PGA correspondant à un PGD ⁹ de 10 cm	PGD (cm)
009623xa	Miyagi	6.63	111 001	2365	1	1.18g	8.5
000122xa	Frioul	7.51	51 675	737	2	0.98g	10.2
000592xa	Umbria Marche	7.62	113 869	1825	3	0.77g	13.0
006383xa	Izmit	7.50	107 326	1433	3	0.42g	24.0
009626xa	Miyagi	6.67	242 137	4428	5	0.94g	10.6
lointain xa	Miyagi	6.54	266 299	4848	5	1.06g	9.4
009618xa	Miyagi	7.09	241 705	5204	7	0.81g	12.4
008922xa	Niigata-ken-Chuetsu	7.26	143 983	1898	8	0.67g	15.0
004653ya	Palacios	7.03	169 034	3461	8	0.73g	13.7
009622xa	Miyagi	6.89	249 309	4266	10	0.58g	17.4

Tableau 5 : Pour les séismes normalisés à 1g retenus sur la base de leur DSE : indicateurs généraux et accélération maximale due à la limite en déplacement de la table vibrante.

⁶ Intensité en échelle de Mercalli Modifiée convertie à partir de la valeur du PGV de l'enregistrement, de la magnitude et de la distance selon la loi de Tselentis et Danciu (2008)

⁷ Intensité d'Arias

⁸ Cumulative Absolute Velocity

⁹ Peak Ground Displacement

Ainsi, les 3 signaux sismiques retenus pour les essais dynamiques sont le *Lointain*, 4653ya, GX066y dont les PGA respectifs sont 0,33g, 0,24g et 0,56g. Etant donné la limite en déplacement de la table (+/- 10 cm), l'amplification des séismes sera limitée en fonction de leur PGD. Ainsi, l'amplitude en accélération maximale sera de 1,25 g pour le lointain, 0,88g pour le 4653ya, 1,8g pour l'Aquila.

Les signaux réels temporels en accélération et en déplacement sont présentés sur les figures ci-dessous.

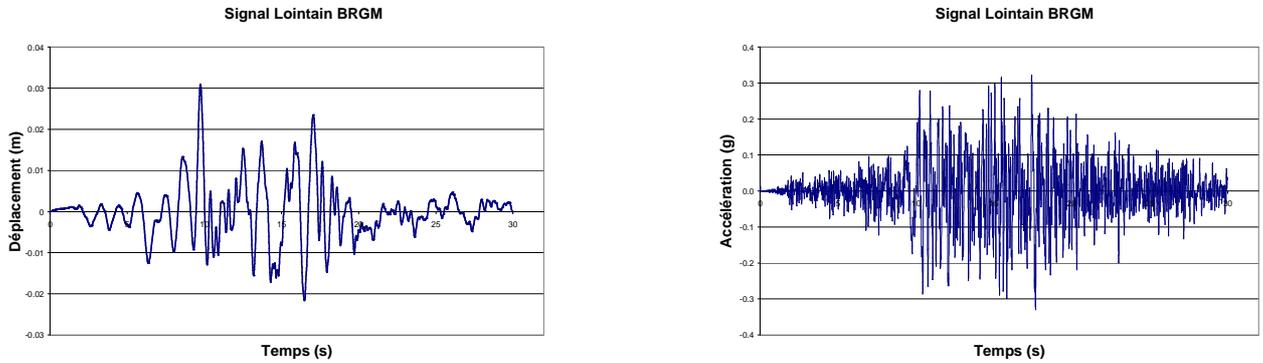


Figure 7 : signaux temporels en accélération et déplacement du séisme dit lointain (scénario Guadeloupe lointain).

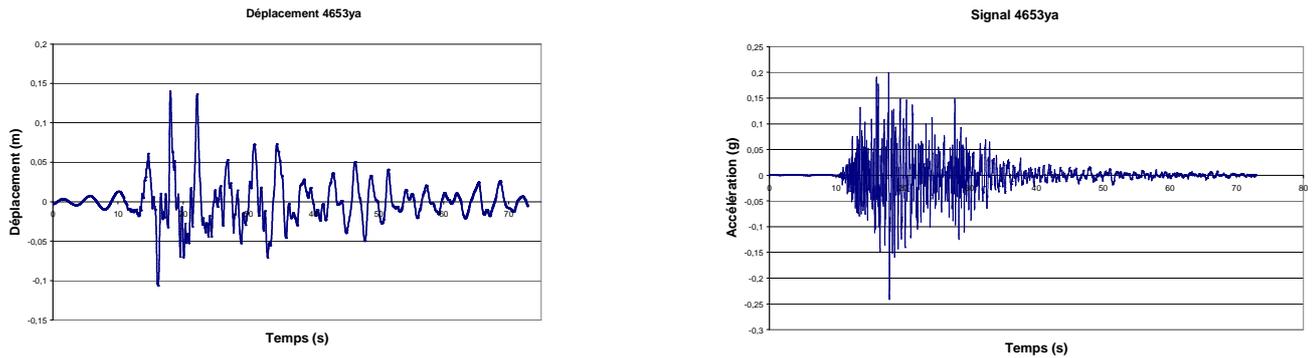


Figure 8 : signaux temporels en accélération et déplacement du séisme 4653ya (scénario Guadeloupe lointain).

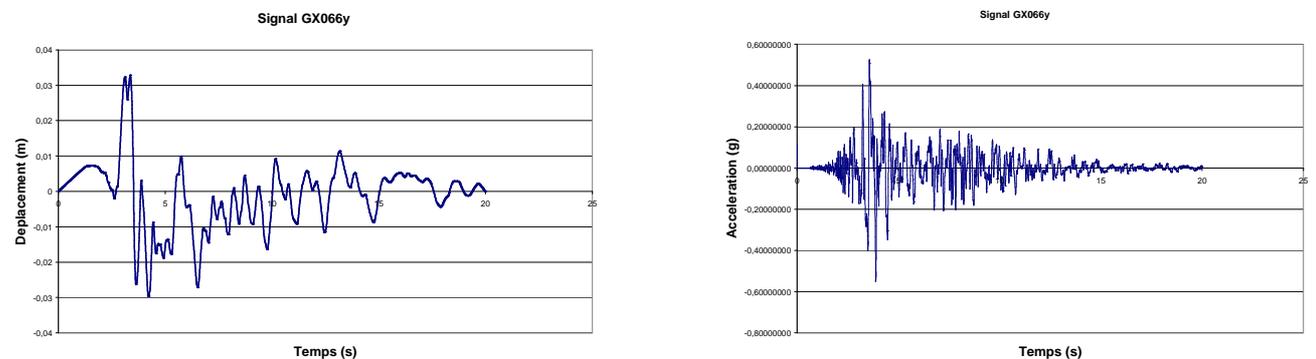


Figure 9 : signaux temporels en accélération et déplacement du séisme de l'Aquila GX066y.

Les courbes des figures 10, 11 et 12, respectivement pour les séismes lointains, 4653ya et GX066y présentent la comparaison des spectres de réponse au choc (SRC) des signaux sismiques théoriques envoyés en consigne à la table (en noir) avec les signaux accélérations enregistrés sur la table chargée de l'éprouvette d'essai (en rouge).

On constate que, pour tous signaux, les SRC de la réponse table+éprouvette sont proches des SRC des signaux de consigne correspondants :

- pour le séisme lointain, la SRC de la table+ éprouvette est légèrement supérieure à la consigne sur toute la bande des fréquences,
- pour le séisme 4653ya, le constat est le même sauf au voisinage de 9 Hz ;
- pour le séisme de l'Aquila, les SRC sont proches jusqu'à 14Hz.

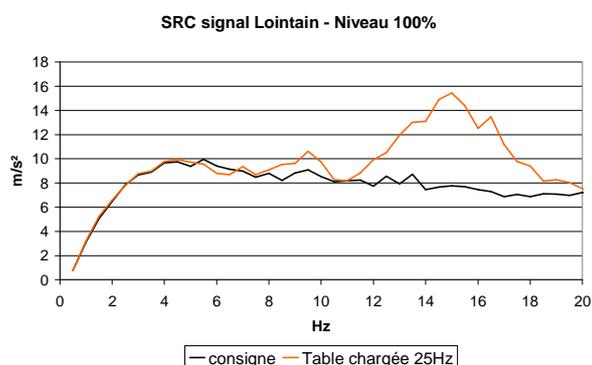


Figure 10 : SRC de l'accélération de la table et de la consigne pour le séisme lointain à 0,33g.

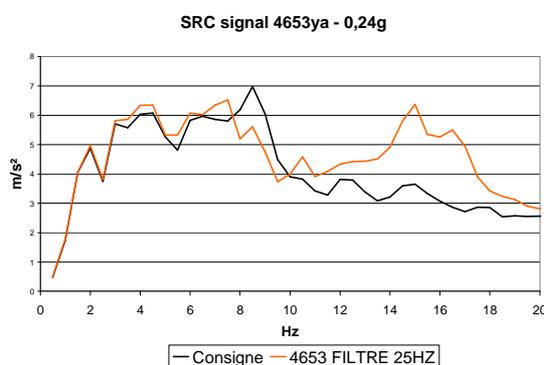


Figure 11 : SRC de l'accélération de la table et de la consigne pour le séisme 4653ya à 0,24g.

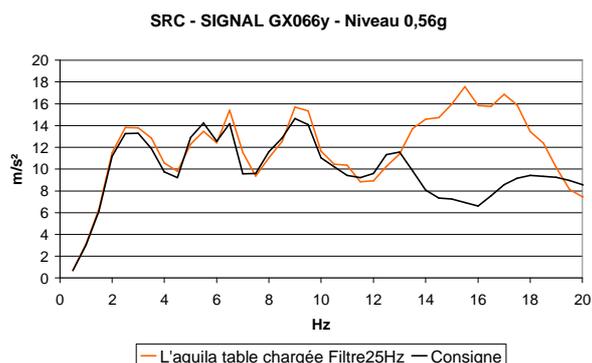


Figure 12 : SRC de l'accélération de la table et de la consigne pour le séisme GX066y à 0,56g.

2.6 Résultats d'essais dynamiques pour les murs OSB12

8 murs en voile travaillant en OSB de 12 mm d'épaisseur ont été testés sur table vibrante pour les 3 séismes retenus.

Le [Tableau 6](#) présente, pour chacun des murs :

- la fréquence propre (colonne 2) de l'élément de mur obtenue par l'analyse modale expérimentale (cf. étape (b) décrite en §2.2) ;
- la charge verticale appliquée lors de l'essai (colonne 3),
- la série des séismes, subis par le mur, représentés par la valeur maximale de l'accélération de la consigne (colonne 5), conformément au protocole expérimental détaillé en § 2.2,
- ainsi que les déplacements maximum obtenus pour chaque séisme (colonne 6) (à partir du LVDT et du capteur à fil, cf. §2.2);
- pour le séisme retenu pour le calcul de $q_{\text{séisme } i}$ (dont le déplacement maximal de la tête du mur et l'accélération maximale en consigne sont soulignés), l'endommagement visible du mur après essai (colonne 7) et le déplacement résiduel en tête de mur (colonne 8) ;
- l'accélération maximale de la table enregistrée pendant le séisme retenu pour le calcul de $q_{\text{séisme } i}$ (colonne 10). Pour cela, les signaux temporels des accélérations ont été filtrés à 9Hz pour les séismes de l'Aquila et 4653ya et à 12Hz pour le séisme lointain ;
- le calcul de $q_{\text{séisme } i}$ (colonne 12) si le mur n'a pas atteint la limite de non effondrement (51 mm). Mis à part le mur 13, les déplacements maximaux ont toujours été inférieurs à la limite de non effondrement. Ainsi, les valeurs de $q_{\text{séisme } i}$ obtenues expérimentalement sont des valeurs conservatrices.

N° de mur	f ₀ (Hz)	MASSE	SIGNAL	Séisme Consigne	Déplacements maximaux en tête de mur (mm)	résultats associés au séisme correspondant au dépl. maximal				acc. EC8 pour q=1, S=1 (m/s ²) (B)	q _{séisme} = (A)/(B)
						Dép. max. (mm) et consigne associée	endommagement visible	Dép. résiduel (mm)	acc. max. réelle (m/s ²) (A)		
7	6,8	1,5 T	Lointain	0,33g/1,06g/ 0,33g/1,25g	(-9/9)/(-38/39)/ (-31/22)/effondrement	39 mm à 1,06g	aucun	7	9,8	3,09	3,2
8	5,8	1,5 T	Lointain	0,33g/1,06g/ 0,33g/1,25g	(-13/10)/(-41/45)/ (-34/25)/effondrement	45 mm à 1,06g	aucun	10	9,6	3,09	3,1
11	7,2	1,5 T	Lointain	0,33g/1,06g/ 0,33g/1,25g	(-8,3/9,6)/(-36/36) / (-29/19)/effondrement	36 mm à 1,06g	aucun	4	9,8	3,09	3,2
12	7	1,5 T	Lointain	1,06g/0,33g/ 1,25g	(-38/36)/(-28/19)/ effondrement	38 mm à 1,06g	aucun	2	9,9	3,09	3,2
13	5,6	2 T	Lointain	1,06g/ 0,33g/1,25g	(-51/57)/ (-47/29)/effondrement	57 mm à 1,06g	1 pointe écartée	7	9,8	2,32	/
14	6,5	1,5 T	4653ya	0,73g/0,24g/0,88g	(-32/19)/(-17/09)/(-42/26)	42 mm à 0,88g	aucun	1	10,8	3,09	3,5
18	5,5	2 T	4653ya	0,73g/ 0,24g/0,88g	(-46/29)/ (-32/29)/effondrement	46 mm à 0,73g	aucun	3	8,8	2,32	3,8
15	6	1,5 T	Aquila	1,3g/ 0,56g/1,8g	(-35/40)/ (-31/28)/effondrement	40 mm à 1,3g	aucun	6	14	3,09	4,5

Tableau 6 : Résultats expérimentaux (déplacements maximaux en tête de mur, déplacement résiduel en tête de mur, accélération maximale de la table) pour les essais dynamiques sur les éléments de murs en voile travaillant en OSB de 12 mm d'épaisseur.

Les essais dynamiques sur les éléments de murs en OSB 12 montrent que :

- pour sept des huit essais retenus pour le calcul de $q_{s\acute{e}isme}$, le critère de non effondrement (51 mm) n'a pas été atteint et il n'y a eu aucun endommagement visible ni du panneau, ni des pointes. Pour le seul cas ayant dépassé le critère (Mur 13), le seul endommagement visible est l'écartement d'une pointe. Ceci montre l'endommagement limité associé au critère de non effondrement ;
- pour chaque série, l'élément de mur, après avoir subi le séisme ayant conduit au déplacement maximal, a été capable de subir un nouveau séisme sans que cela engendre son effondrement ;
- pour le séisme lointain : 3 séries (murs 7, 8 et 11) d'essais dynamiques identiques ont été menées afin d'étudier la variabilité expérimentale. On constate que les valeurs de déplacements présentent une variabilité de 9 %, ce qui correspond à la variabilité des murs ; en effet le mur 8 dont la rigidité est plus faible présente des plus grands déplacements que les murs 7 et 11 (cf. *Figure 13* et *Figure 14*). Cela montre une bonne reproductibilité du dispositif expérimental ;
- concernant le mur 11, le tracé des FRF des murs sur les bruits blancs après chaque séisme (cf. *Figure 15*) (obtenues à partir des étapes (b), (d), (f), (h) de la procédure d'essai du § 2.2) montre que la structure évolue dès le premier séisme de niveau 0,3g. Ainsi, il est décidé, dans la mesure du possible, de

mener directement le séisme à son niveau le plus fort. Toutefois, la comparaison des déplacements à 1,06g entre les murs 11 et 12 (cf. [Figure 16](#)) montre que de faire initialement un séisme à 0,3g (mur 11) n'impacte pas les valeurs de déplacements à 1,06g ;

- la comparaison des déplacements à 1,06g entre les murs 8 et 13 (dont les fréquences propres sont proches) montre que l'augmentation de la masse de 33% peut entraîner une augmentation de déplacements de plus de 33% sur les pics (cf. [Figure 17](#)).

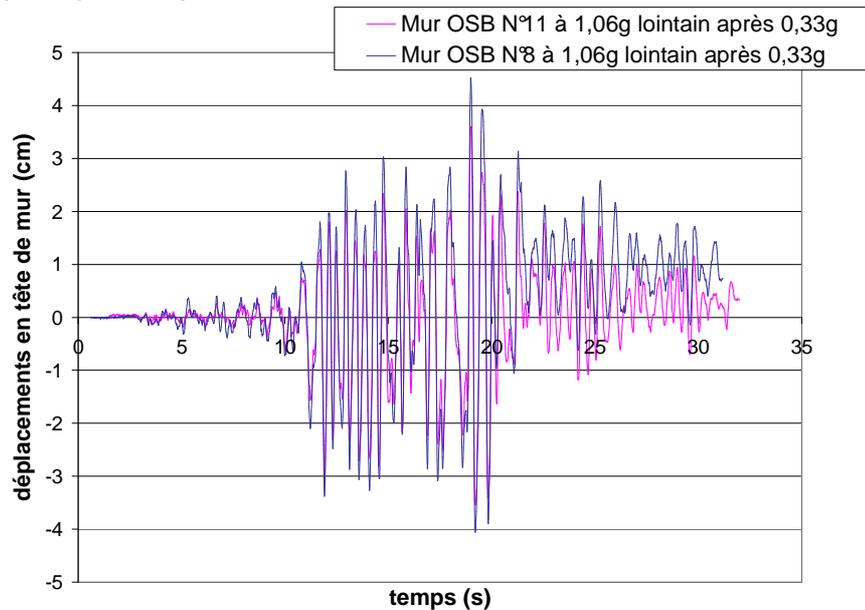


Figure 13 : signaux temporels en déplacement en tête des murs OSB N° 8 et 11 pour le séisme lointain à 1,06g après 0,33g.

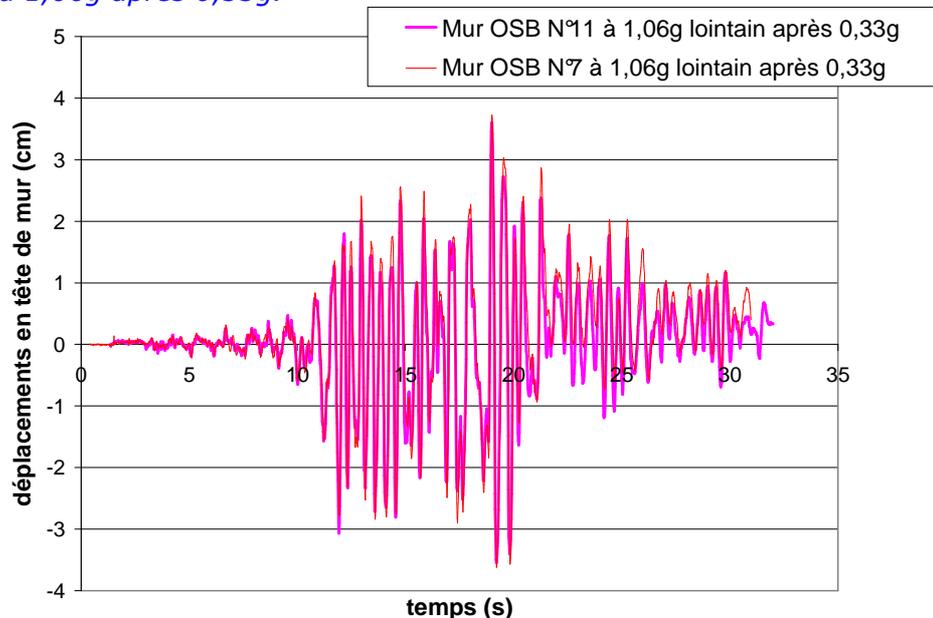


Figure 14 : signaux temporels en déplacement en tête des murs OSB N° 7 et 11 pour le séisme lointain à 1,06g après 0,33g.

MUR 11 - FRF BRUITS - OSB12 1,5T Lointain 22 mai 2012

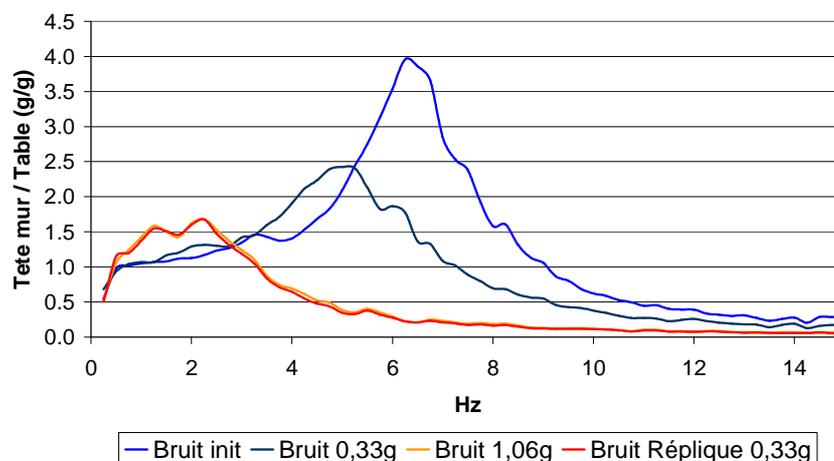


Figure 15 : FRF des murs sur les bruits blancs (entre la tête du mur et la table vibrante) après chaque séisme pour le mur OSB N°11.

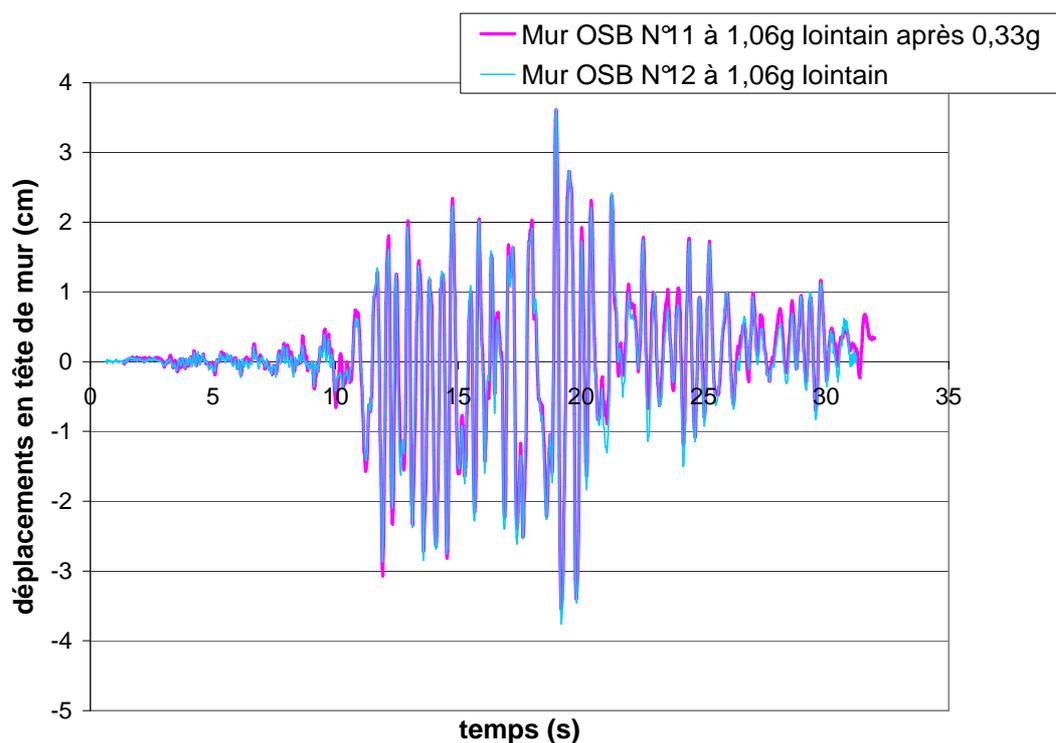


Figure 16 : signaux temporels en déplacement en tête des murs OSB N°12 et 11 pour le séisme lointain à 1,06g.

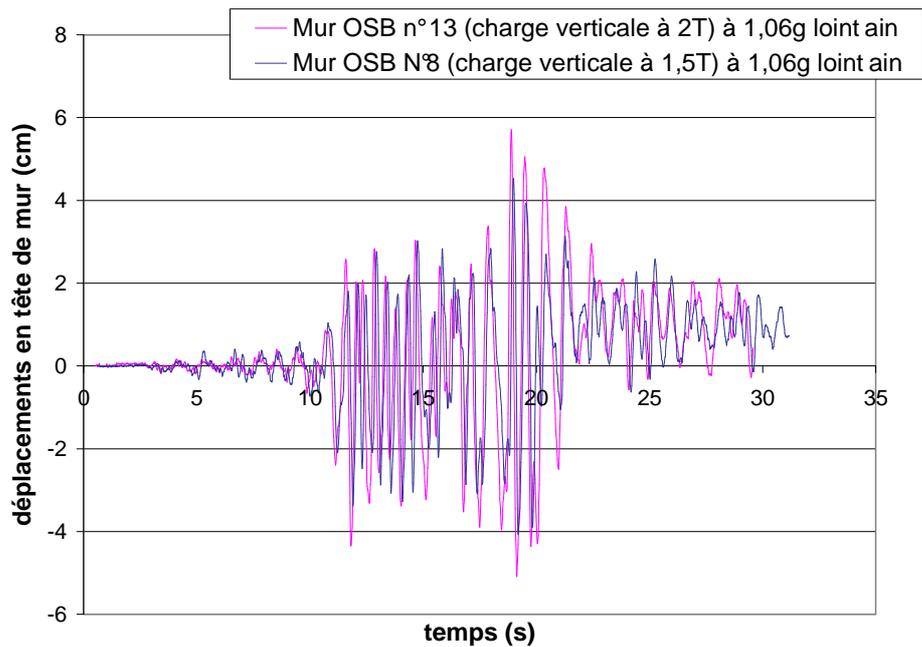


Figure 17 : signaux temporels en déplacement en tête des murs OSB N°8 et 13 pour le séisme lointain à 1,06g.

La comparaison des déplacements des murs 18 à 0,73g du séisme 4653ya et du mur 13 à 1,06g du séisme lointain montre que les séismes dit lointain et 4653ya ont un niveau de nocivité proche pour les murs OSB12 (cf. [Figure 18](#)).

En revanche, la comparaison des déplacements de ces murs et à ceux du mur 15 à 1,3g de l'Aquila (chargé à 1,5 T au lieu de 2T) montre que le séisme de l'Aquila est significativement moins nocif que les deux autres séismes (cf. [Figure 18](#)).

Ceci correspond à l'analyse en DSE.

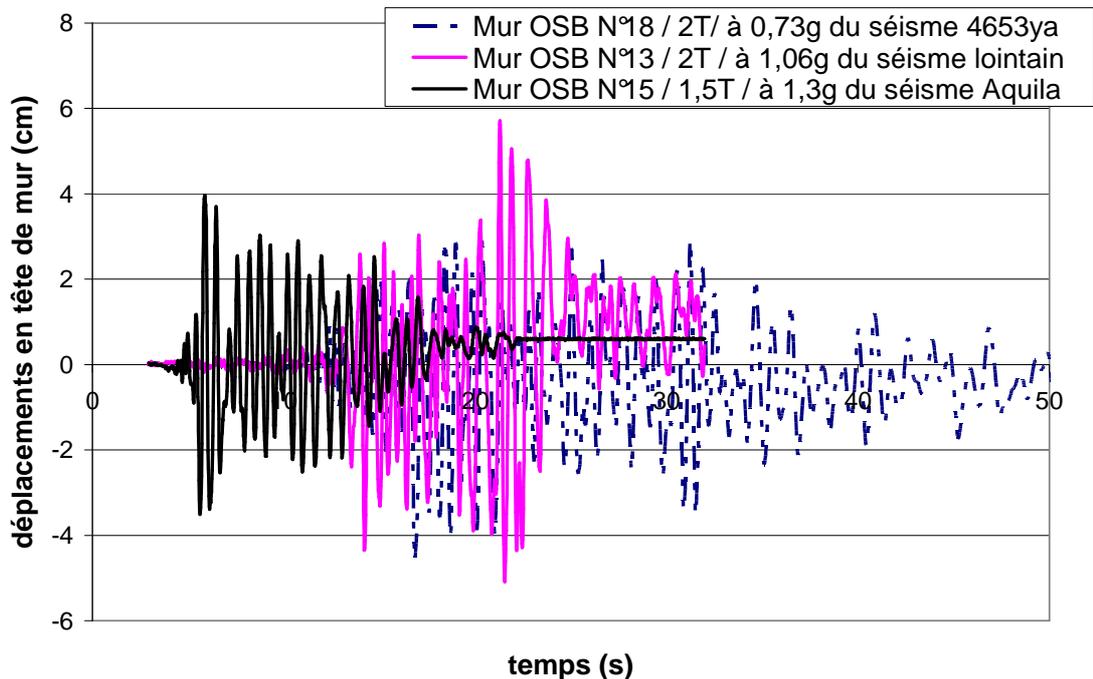


Figure 18 : signaux temporels en déplacement en tête des murs OSB N°13, 15 et 18 correspondants aux 3 séismes.

Les valeurs du coefficient q pour les murs OSB, obtenues à partir des essais, sont les suivantes :

- $q \geq 3,2$ pour le séisme lointain (moyenne des murs 7, 8, 11, 12),
- $q \geq 3,8$ pour le séisme 4653ya (mur 18),
- $q \geq 4,5$ pour le séisme de l'Aquila (Mur 15).

Les valeurs de $q_{\text{séisme } i}$ sont des valeurs sécuritaires car, dans tous les cas, le déplacement maximal expérimental en tête de mur, n'a pas atteint le critère de non effondrement (déplacement à 51 mm associé à une chute de 10% de la résistance maximale du mur).

2.7 Résultats d'essais dynamiques pour les murs CP10

4 murs en voile travaillant de contreplaqué de 10 mm d'épaisseur ont été testés sur table vibrante pour les 3 séismes retenus.

Le [Tableau 7](#) présente, pour chacun des murs, l'ensemble des résultats (cf. structuration idem à celle du [Tableau 6](#) en § 2.6).

Les déplacements maximaux des murs pour les séismes retenus pour le calcul de $q_{\text{séisme}}$ étaient :

- significativement inférieurs à la limite de non effondrement (54 mm) pour les murs 9 et 21,

- proches (d'environ 10%) à la limite de non effondrement pour les murs 19 et 20.

N° de mur	f ₀ (Hz)	MASSE	SIGNAL	Séisme Consigne	Déplacements maximaux en tête de mur (mm)	résultats associés au séisme correspondant au dépl. maximal					
						Dép. max. (mm) et consigne associée	endommagement visible	Dép. résiduel (mm)	acc. max. réelle (m/s ²) (A)	acc. EC8 pour q=1, S=1 (m/s ²) (B)	q _{séisme} = (A)/(B)
9	5,8	1,5 T	Lointain	0,33g/0,59g/1,19g/ 0,33g/1,25g	(-11/7)/(-21/16) / (-42/37) / (-30/23) / effondrement	42 mm à 1,19g	3 pointes cisailées	0,1	10,8	3,18	3,4
19	5	2 T	4653ya	<u>0,88g</u> /0,24g/ 0,88g	(-50/32)/(-26/27) / effondrement	50 mm à 0,88g	5 pointes cisailées	5	10,8	2,38	4,5
21	7	2 T	4653ya	<u>0,73g</u> /0,24g/ 0,88g	(-45/31) / (-33/27) / (-78/59)	45 mm à 0,73g	aucun	3,5	8,8	2,38	3,7
20	5,4	2 T	Aquila	<u>1,3g</u> /0,56g/ 1,8g	(-36/49)/(-36/42) / effondrement	49 mm à 1,3g	5 pointes cisailées	5	13,9	2,38	5,8

Tableau 7 : Résultats expérimentaux (déplacements maximaux en tête de mur, déplacement résiduel en tête de mur, accélération maximale de la table) pour les essais dynamiques sur les éléments de murs en voile travaillant en contreplaqué de 10 mm d'épaisseur.

Les résultats expérimentaux obtenus à partir des essais dynamiques sur les éléments de murs en CP 10 montrent que :

- pour chaque série, l'élément de mur, après avoir subi le séisme ayant conduit au déplacement maximal, a été capable de subir un nouveau séisme sans que cela engendre son effondrement.
- pour les murs 19 et 20, dont le déplacement maximal en tête de mur était d'environ 50 mm, un endommagement correspondant à 5 pointes cisailées a été relevé.

La similitude des valeurs absolues des déplacements du mur 19 à 0,88g du 4653ya et du mur 20 à 1,3g de l'Aquila (cf. *Figure 19*) montre que le séisme de l'Aquila est moins nocif que le séisme 4653ya pour un même PGA.

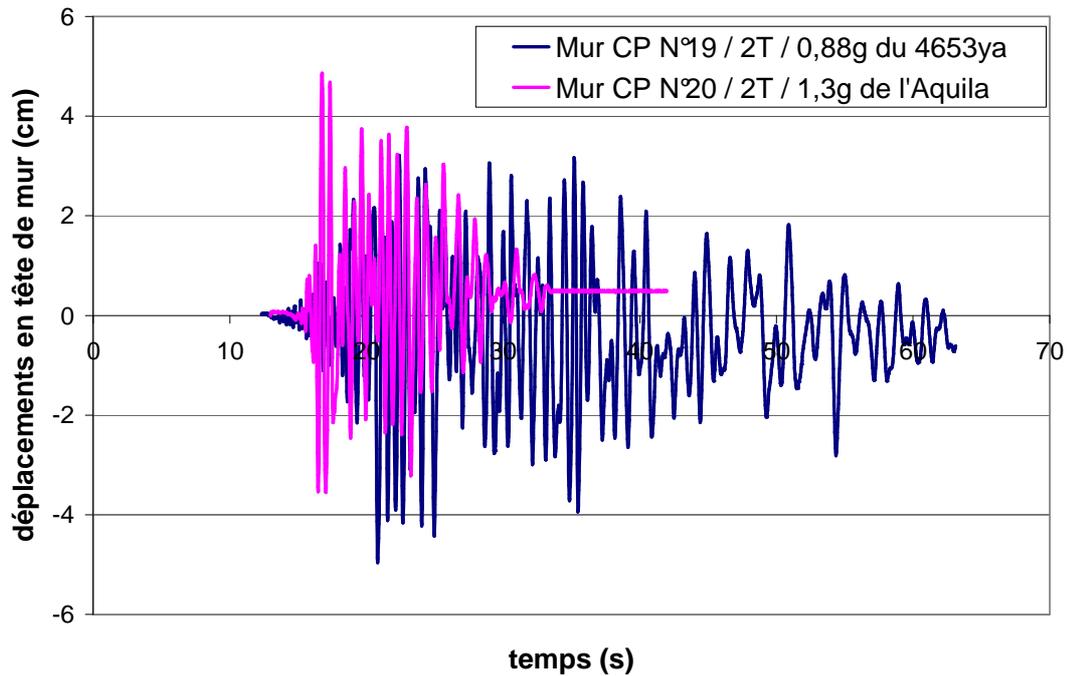


Figure 19 : signaux temporels en déplacement en tête des murs CP N°19 et 20 pour des PGA de séismes respectivement à 0,88g (4653ya) et 1,3g (Aquila).

Les valeurs du coefficient q pour les murs CP10, obtenues à partir des essais, sont les suivantes :

- $q \geq 3,4$ pour le séisme lointain (mur 9). Cette valeur de q est sécuritaire car le déplacement maximal expérimental en tête de mur, n'a pas atteint le critère de non effondrement (déplacement à 54 mm associé à une chute de 10% de la résistance maximale du mur).
- $q \approx 4,5$ pour le séisme 4653ya (mur 19),
- $q \approx 5,8$ pour le séisme de l'Aquila (mur 20).

2.8 Résultats d'essais dynamiques pour les murs P16

4 murs en voile travaillant de particules de 16 mm d'épaisseur ont été testés sur table vibrante pour le séisme de l'Aquila et le séisme lointain.

Le **Tableau 8** présente, pour chacun des murs, l'ensemble des résultats (cf. structuration idem à celle du **Tableau 6** en § 2.6).

Les déplacements maximaux des murs pour les séismes retenus pour le calcul de $q_{\text{séisme}}$ étaient inférieurs à la limite de non effondrement (60 mm) pour l'ensemble des murs 5, 16 et 17.

N° de mur	f_0 (Hz)	MASSE	SIGNAL	Séisme Consigne	Déplacements maximaux en tête de mur (mm)	résultats associés au séisme correspondant au dépl. maximal					
						Dép. max. (mm) et consigne associée	endommagement visible	Dép. résiduel (mm)	acc. max. réelle (m/s^2) (A)	acc. EC8 pour $q=1, S=1$ (m/s^2) (B)	$q_{\text{séisme}} = (A)/(B)$
5	7,4	1,5 T	Lointain	0,33g/0,66g/ 1,25g/0,33g/1,25g	(-5,1/4,7)/(-16/14) / (-39/35)/ (-26/18)/ effo	39 mm à 1,25g	2 pointes cisailées	0,1	11,2	3,41	3,3
10	6,2	2 T	Lointain	0,33g/ 1,25g/ 0,33g/ 1,25g	(-11/9)/(-49/54)/ (-30/39)/effondrement	54 mm à 1,25g	5 pointes arrachées / panneau non endommagé	1,5	11,5	2,56	4,5
16	7	1,5 T	Aquila	1,8g/0,56g/ 1,8g	(-28/41)/(-22/28)/ (-33/54)	41 mm à 1,8g	aucun	0,2	20,3	3,41	6,0
17	5	2 T	Aquila	0,56g /1,8g/ 0,56g/1,8g	(-12/15)/(-35/51) / (-39/40)/effondrement	51 mm à 1,8g	panneau déchiré autour de 3 pointes	10	20,5	2,56	8,0

Tableau 8 : Résultats expérimentaux (déplacements maximaux en tête de mur, déplacement résiduel en tête de mur, accélération maximale de la table) pour les essais dynamiques sur les éléments de murs en voile travaillant en panneaux de particules de 16 mm d'épaisseur.

Les résultats expérimentaux obtenus à partir des essais dynamiques sur les éléments de murs en P16 montrent que :

- pour chaque série, l'élément de mur, après avoir subi le séisme ayant conduit au déplacement maximal, a été capable de subir un nouveau séisme sans que cela engendre son effondrement,
- le mur 10 dont le déplacement maximal en tête de mur était de 54 mm, un endommagement correspondant à 5 pointes arrachées a été relevé.

La similitude des valeurs absolues maximales des déplacements du mur n°16 à 1,8g de l'Aquila et du mur n° 5 à 1,25g du séisme lointain (cf. **Figure 20**) montre que le séisme de l'Aquila est moins nocif que le séisme lointain pour un même PGA.

Les valeurs du coefficient q pour les murs P16, obtenues à partir des essais, sont les suivantes :

- $q \approx 4,5$ pour le séisme lointain (mur 10),
- $q > 8$ pour le séisme de l'Aquila (mur 17).

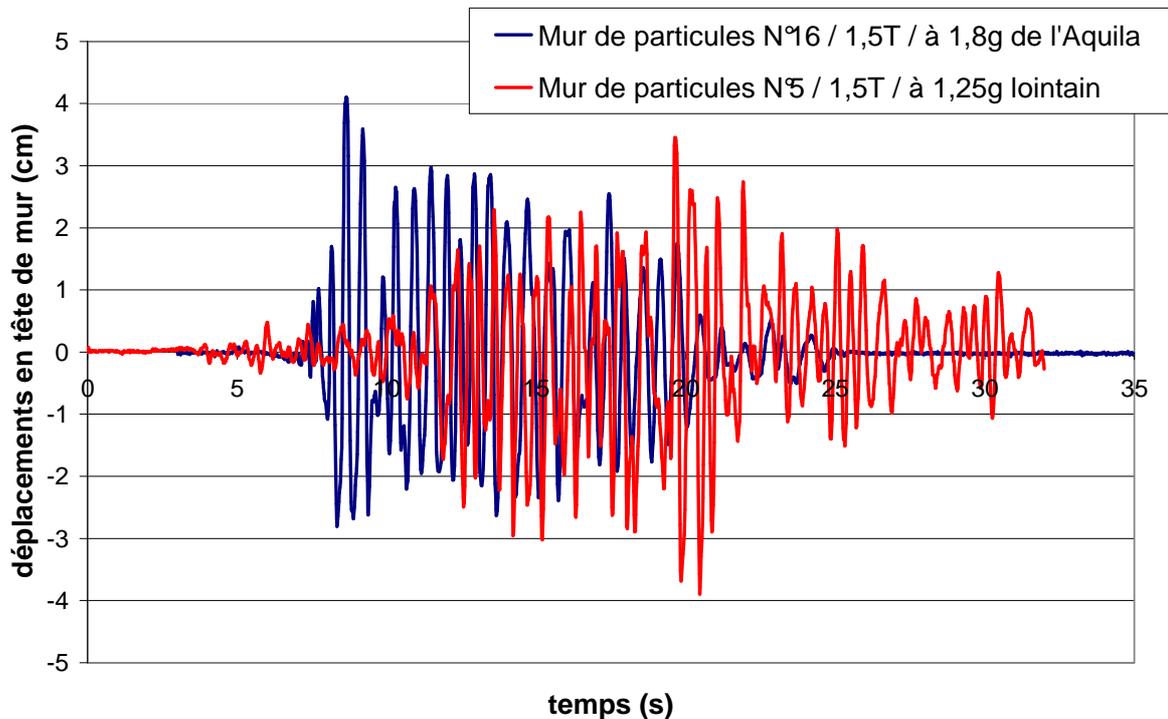


Figure 20 : signaux temporels en déplacement en tête des murs de particules N°16 et 5 pour des PGA de séismes respectivement à 1,8g(Aquila) et 1,25g (séisme lointain).

2.9 Modélisation des essais dynamiques sur murs

L'objectif de la modélisation des essais dynamiques des murs est d'élargir le champ de l'étude à d'autres séismes, notamment pour ceux dont il n'est pas possible de mener les essais du fait de leur PGD trop grand par rapport aux limites de la table.

Le développement du modèle macroscopique par éléments finis utilisé dans cette étude s'est fait dans le cadre de travaux de thèse [13].

La [Figure 21](#) schématise le modèle par éléments finis simplifié de mur. Il est composé de 4 nœuds reliés par 4 barres rigides qui forment un cadre de dimensions identiques au modèle détaillé. Ce système est articulé et se déforme en parallélogramme, ce qui est une idéalisation du comportement réel d'un mur. Le modèle possède donc un seul degré de liberté (ddl) et son comportement est défini par un élément à deux nœuds assimilable à un ressort. Sa raideur $k(t)$ est définie par la loi hystérétique de J. Humbert et ses

paramètres sont calibrés sur les résultats du modèle EF de mur détaillé sous chargements quasi-statiques.

Le modèle simplifié reproduit ainsi le comportement global du modèle détaillé, qui lui modélise l'ensemble des phénomènes locaux. Pour les calculs en dynamique, il convient d'ajouter deux masses ponctuelles aux nœuds supérieurs afin d'engendrer les forces inertielles. La modélisation de l'amortissement ne peut être similaire à celle utilisée pour le modèle détaillé, car le modèle simplifié ne possède qu'un seul mode propre. On utilise donc la relation suivante, en affectant au taux d'amortissement ξ la même valeur que pour le modèle détaillé : $c=2 \cdot \xi \cdot (k \cdot m)^{0,5}$.

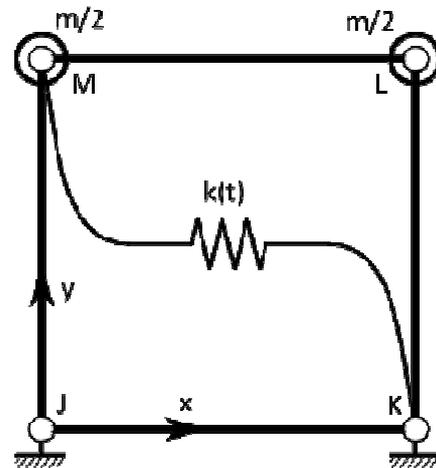


Figure 21 : schématisation du modèle macroscopique pour l'étude du comportement dynamique des murs.

De manière à rester cohérent avec le modèle de mur détaillé, la matrice d'amortissement n'est pas mise à jour au cours du calcul, bien que la légèreté du modèle le permette. Les paramètres de la loi de comportement du modèle simplifié sont calibrés sur les résultats du modèle détaillé en quasi-statique (monotone et cyclique).

Les figures ci-dessous présentent une comparaison du modèle macroscopique aux résultats expérimentaux. On constate que, pour les valeurs de déplacement proches de la limite de non effondrement, le modèle macroscopique surestime les déplacements expérimentaux en tête de mur de façon variable selon les séismes. En effet, les écarts entre les valeurs maximales simulées et expérimentales de déplacements sont les suivantes :

- pour le cas du séisme 4653ya correspondant au mur 14 (cf. [Figure 22](#)): le déplacement maximal expérimental et simulé sont respectivement de 42 mm et 62 mm soit une surestimation de 47% ;
- pour le cas du séisme d'Aquila correspondant au mur 15 (cf. [Figure 23](#)): le déplacement maximal expérimental et simulé sont respectivement de 40 mm et 48 mm soit une surestimation de 20% ;
- pour le cas du séisme 4653ya correspondant au mur 12 (cf. [Figure 24](#)): le déplacement maximal expérimental et simulé sont respectivement de 38 mm et 54 mm soit une surestimation de 47%.

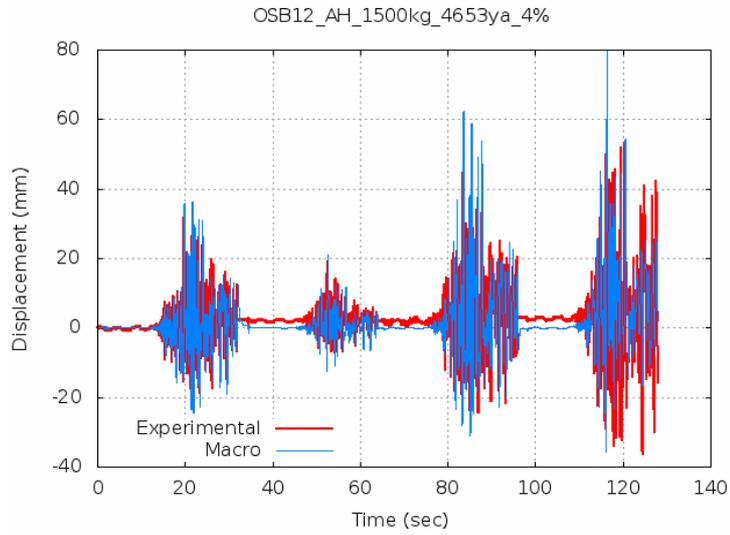


Figure 22 : signaux temporels en déplacement, expérimentaux et simulés par éléments finis, en tête du mur d'OSB N°14 pour le séisme 4653ya.

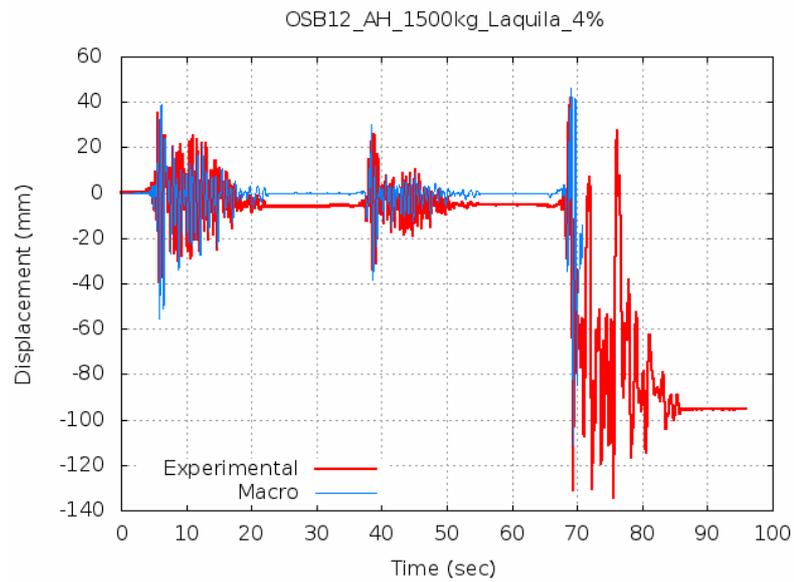


Figure 23 : signaux temporels en déplacement, expérimentaux et simulés par éléments finis, en tête du mur d'OSB N°15 pour le séisme d'Aquila.

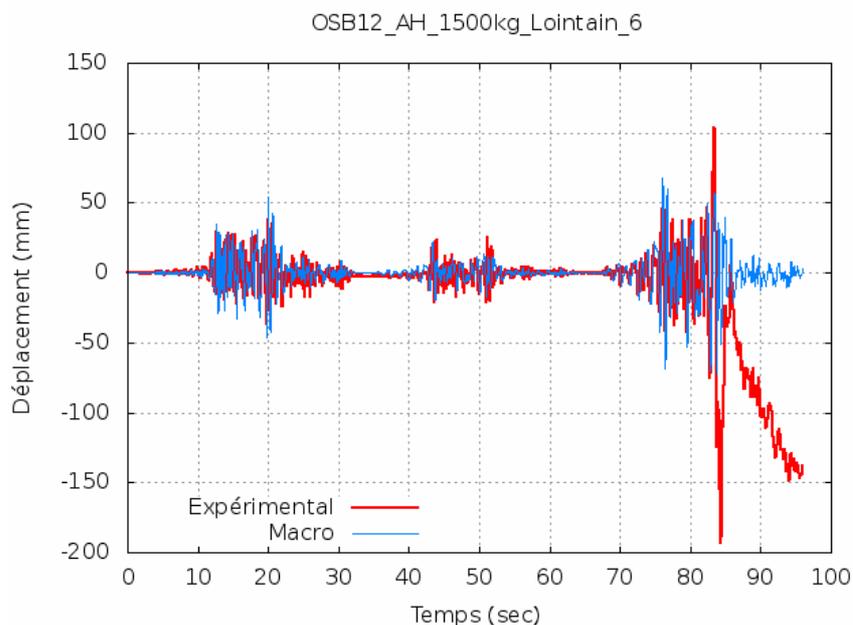


Figure 24 : signaux temporels en déplacement, expérimentaux et simulés par éléments finis, en tête du mur d'OSB N°12 pour le séisme lointain.

Le [Tableau 9](#) présente, pour la configuration des murs en voile travaillant en OSB de 12 mm d'épaisseur, la valeur simulée du déplacement maximal en tête des murs pour chacun des séismes des scénarios de Guadeloupe lointain (représentatif de l'aléa fort en France) et de Lourdes (représentatif de l'aléa modéré en France). Les séismes ont été normalisés à 1g afin de comparer leur nocivité pour la détermination du coefficient de comportement.

On constate que le séisme lointain mesuré sur la table (noté 'expérimental' dans le [Tableau 9](#)), est le séisme le plus nocif parmi ceux utilisés lors des essais et l'un des plus nocifs (5/40) sur l'ensemble des séismes représentatifs de l'aléa fort et modéré en France retenus pour cette étude.

L'écart variable constaté entre les déplacements expérimentaux et simulés en tête de murs selon les séismes ne nous permet pas de déterminer, par ce modèle, la valeur du coefficient q pour les séismes les plus nocifs.

Mur avec voile travaillant en OSB12 chargé verticalement avec 1500kg		
Séisme normalisé à (1g)	Scénario d'aléa associé au séisme	Déplacement maximal en tête du mur (mm)
008547xa	Guadeloupe lointain	11
008548xa	Guadeloupe lointain	12
aing_000	Lourdes	15
000593xa	Lourdes	16
000147xa	Lourdes	23
009592xa	Guadeloupe lointain	24
009618xa	Guadeloupe lointain	28
g002_050	Lourdes	29
Aquila GXO66y expérimental	/	30
009626xa	Guadeloupe lointain	31
008659xa	Guadeloupe lointain	31
004655xa	Guadeloupe lointain	32
009589xa	Guadeloupe lointain	34
001313xa	Lourdes	34
abird090	Lourdes	36
opark_00	Lourdes	37
000591xa	Lourdes	38
000123xa	Lourdes	39
Aquila GXO66y consigne	/	40
009623xa	Guadeloupe lointain	44
009590xa	Guadeloupe lointain	45
004653ya expérimental	Guadeloupe lointain	45
009588xa	Guadeloupe lointain	45
Lointain consigne	Guadeloupe lointain	47
000592xa	Lourdes	50
000042xa	Lourdes	52
Lointain expérimental	Guadeloupe lointain	54
000122xa	Lourdes	56
004653ya consigne	Guadeloupe lointain	59
009622xa	Guadeloupe lointain	76
008922xa	Lourdes	84
006383xa	Lourdes	85

Tableau 9 : tableau récapitulant les valeurs simulées de déplacement maximal en tête de mur pour les séismes du scénario de Lourdes (aléa modéré) et du scénario de Guadeloupe lointain (aléa fort).

2.10 Evaluation du coefficient de comportement q

Le [Tableau 10](#) synthétise, pour chaque configuration de mur et pour chaque séisme, les valeurs obtenues expérimentalement et présentées dans les paragraphes 2.6, 2.7, 2.8.

	OSB12	CP10	P16
Lointain	$q \geq 3,2$	$q \geq 3,4$	$q \approx 4,5$
4653ya	$q \geq 3,8$	$q \approx 4,5$	/
Aquila	$q \geq 4,5$	$q \approx 5,8$	$q \geq 8$

Tableau 10 : tableau récapitulant les valeurs de q obtenues de façon expérimentale pour les 3 configurations de murs.

Pour le séisme lointain qui est le séisme le plus nocif de la campagne expérimentale (tout en étant proche du séisme 4653ya), la valeur du coefficient q de 3,2 obtenue pour ce séisme est conservatrice car elle correspond à un déplacement maximal du mur (d'environ 40 mm) significativement inférieur au critère de non effondrement (déplacement à 51 mm).

L'analyse en énergie par DSE et la modélisation par éléments finis ont montré que le séisme lointain utilisé lors de la campagne expérimentale est parmi les plus nocifs sur un ensemble de 40 séismes représentatifs de l'aléa fort et modéré en France.

Par ailleurs, on peut constater que les murs CP10 et OSB12 ont un comportement similaire, car :

- leur limite de non effondrement est proche,
- pour le séisme 4653ya à 0,73g, le mur OSB12 n° 18 et le mur CP10 n°21 ont des déplacements en tête de mur proches (cf. [Figure 25](#) et [Figure 26](#)) ;
- pour le séisme lointain, le mur OSB12 n°7 et le mur CP10 n°9 sollicités à des niveaux proches (respectivement 1,06g et 1,19g) ont des déplacements proches (cf. [Figure 27](#)) ;
- pour le séisme de l'Aquila, il n'est pas possible de mener de telle comparaison car le mur CP10 a été testé pour une charge verticale différente de celle pour l'essai avec l'OSB.

Par ailleurs, la [Figure 28](#) et la [Figure 29](#) montrent que les murs en panneaux de particules de 16 mm d'épaisseur ont des déplacements significativement inférieurs respectivement aux murs avec panneaux d'OSB de 12 mm et de panneaux de particules de 10 mm.

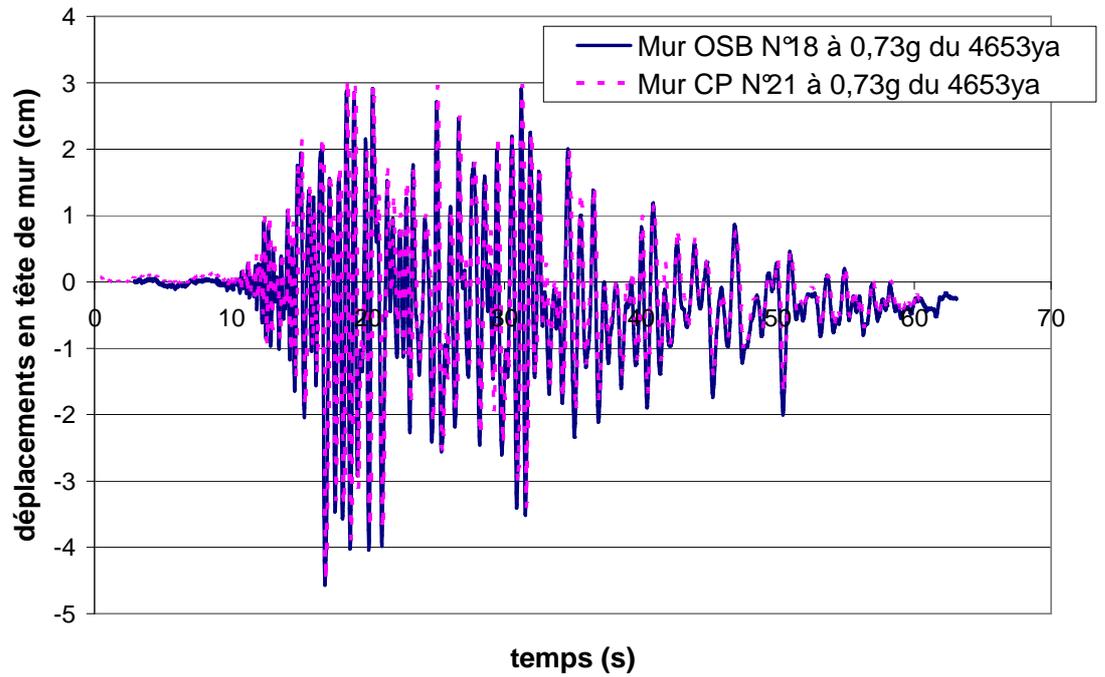


Figure 25 : signaux temporels en déplacement en tête des murs OSB N°18 et CP N°21 pour le séisme 4653ya à 0,73g.

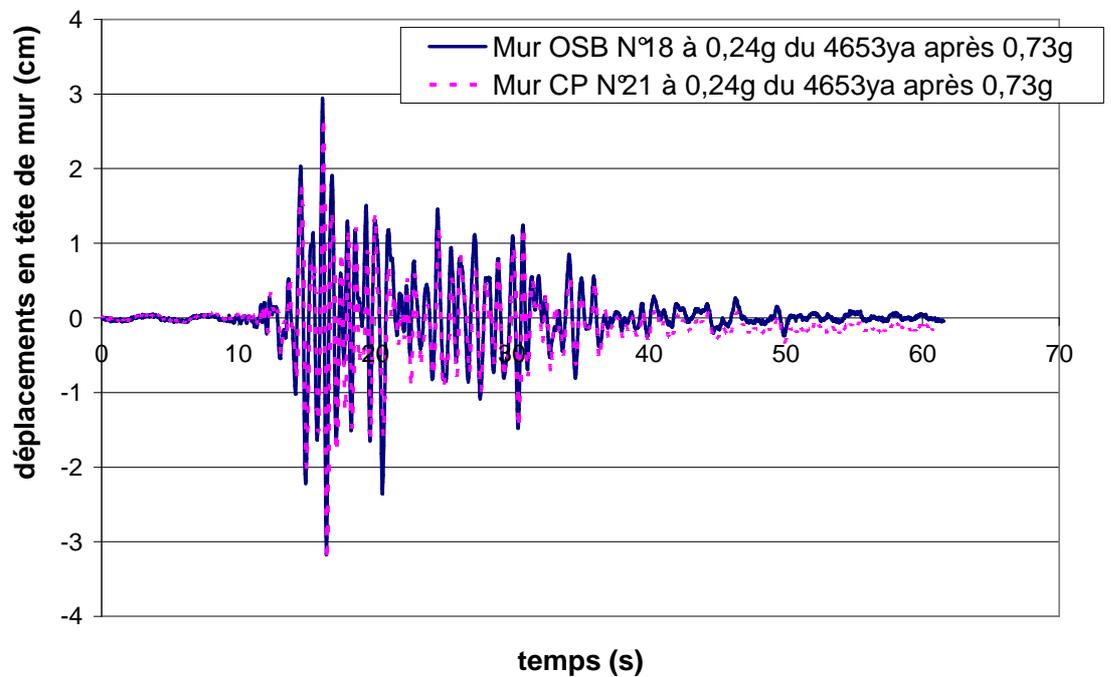


Figure 26 : signaux temporels en déplacement en tête des murs OSB N°18 et CP N°21 pour le séisme 4653ya à 0,24g après 0,73g.

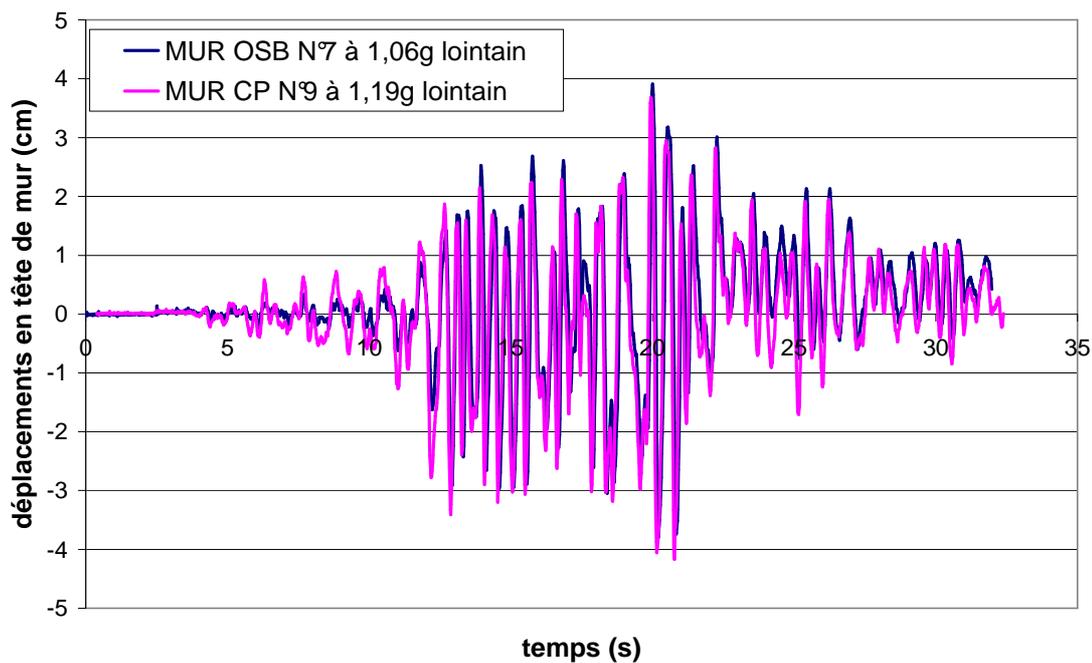


Figure 27 : signaux temporels en déplacement en tête des murs OSB N°7 et CPN°9 pour le séisme lointain respectivement à 1,06g et 1,19g.

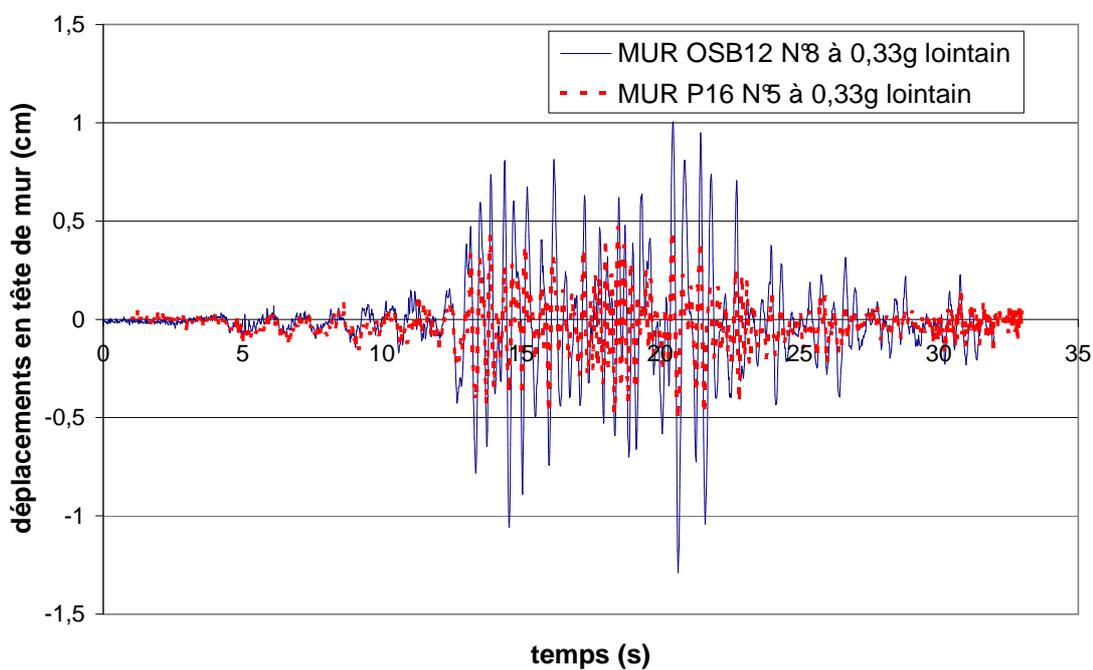


Figure 28 : signaux temporels en déplacement en tête des murs OSB N°8 et de particules N°5 pour le séisme lointain 0,33 g.

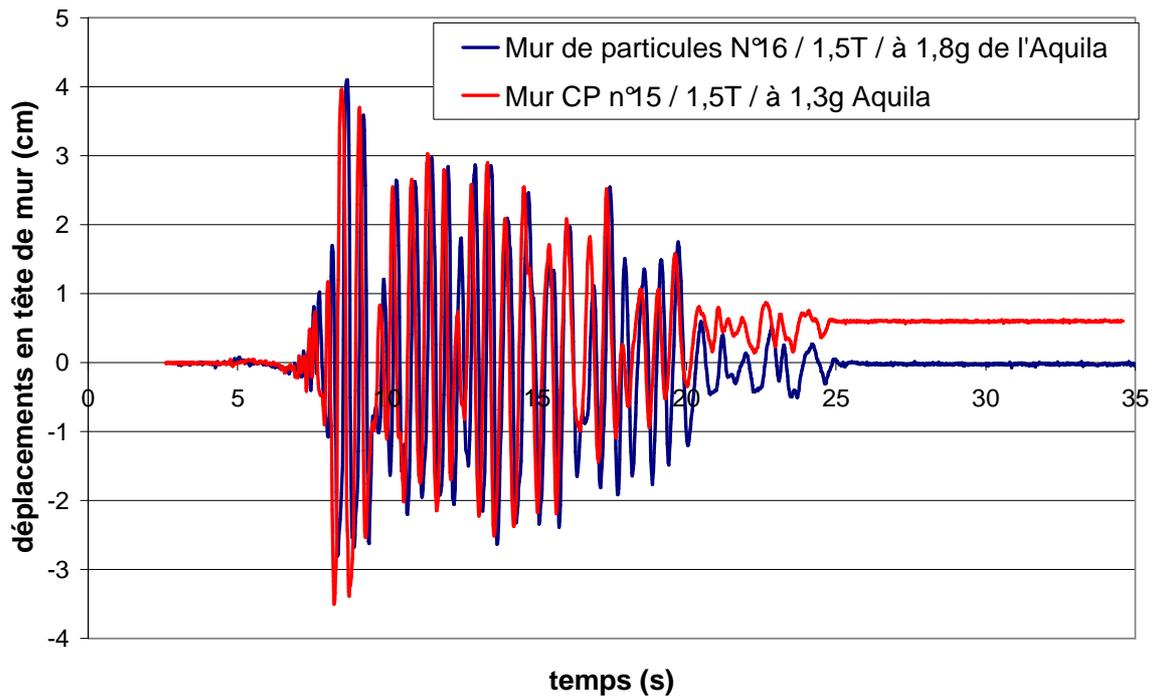


Figure 29 : signaux temporels en déplacement en tête des murs en contreplaqué N°15 et de particules N°16 pour le séisme de l'Aquila respectivement à 1,3g et 1,8g.

Ainsi, la comparaison entre les essais OSB12 et CP10 montrent que leur comportement vis-à-vis des séismes est similaire. D'après l'EC8 et l'annexe française, la valeur de q limitée à 3 est affectée pour les structures bois contreventées par des éléments de murs correspondant à la configuration en contreplaqué de 10 mm. De ce fait, et étant donnée la similitude constatée lors des essais entre les éléments de murs en CP10 et OSB12, **la valeur du coefficient q pour les murs OSB12 égale à 3 est proposée.** Il est à noter que cette valeur est compatible avec la valeur sécuritaire (car elle correspond à un déplacement maximal du mur (d'environ 40 mm) significativement inférieur au critère de non effondrement (déplacement à 51 mm)) de q égale à 3,2 obtenue par essais pour un séisme (séisme lointain) faisant partie des séismes les plus nocifs parmi 40 séismes représentatifs des zones d'aléa moyen et fort en France.

3. ESSAIS CYCLIQUES SUR ELEMENTS DE MUR

Ce chapitre présente la campagne expérimentale concernant les essais cycliques dans les paragraphes 3.2, 3.3 et 3.4 respectivement pour les murs en OSB d'épaisseur 12 mm, les murs en contreplaqué d'épaisseur 10 mm et les murs en panneaux de particules d'épaisseur 16 mm.

Au préalable, le paragraphe 3.1 décrit le protocole pour les essais cycliques.

Les objectifs sont :

- d'une part, de déterminer le critère de non effondrement (cf. § 2.4) à partir des courbes enveloppes des essais cycliques,
- et d'autre part, de valider ou non l'analyse en énergie pour la détermination du coefficient q proposée dans SISMOB3 phase 1 [8].

Les essais cycliques sont également nécessaires à la détermination des paramètres d'entrée de la modélisation présentée en § 2.9.

3.1 Protocole d'essai cyclique

Pour chaque configuration de panneaux, 4 essais cycliques ont été réalisés selon la norme ISO/DIS 21581 (2010) dont deux chargés et deux non chargés.

La norme ISO/DIS 21581 [3], relative aux murs de contreventement en bois a été retenue pour mener les essais cycliques car :

- contrairement à la NF EN 12 512, ses cycles sont déterminés à partir de la valeur de V_u et non celle de V_y . Par ailleurs, la norme ISO/DIS 21581 permet de mieux décrire l'affaiblissement de la résistance du mur dans la zone correspondante à une ductilité cyclique comprise entre 2 et 6 car les incréments de déplacement entre cycles successifs sont plus faibles,
- les cycles de la norme ISO/DIS correspondent également à l'une des méthodes d'essai de l'ASTM E 2126A.

Pour les essais cycliques chargés, la charge sera de 300 kg par montant. Ceci correspond à la charge supportée par un mur d'une maison R+1 de 8 m de large pour la combinaison sismique.

Le glissement limite V_u nécessaire à la détermination des valeurs de déplacements des essais cycliques ont été définis au préalable par un essai statique monotone mené jusqu'à rupture réalisé selon la norme NF EN 594. La valeur de V_u est la valeur de glissement correspondant à 80% de l'effort maximal.

L'ensemble de l'échantillonnage est présenté dans le **Tableau 11**.

Éprouvette N°	Panneaux	Procédure d'essai	Charge verticale	Caractéristiques communes
403/11/725.1/ 1	OSB 12	Monotone	Vide	pointes de fixation des panneaux : Ø2.5 x 50 mm, Entraxes des pointes : 300 mm aux centres / 150 mm aux rives 2 équerres d'ancrage aux angles inférieurs : SIMPSON AH29050/2 et rondelles
403/11/725.1/ 4 & 5	OSB 12	Cyclique ISO/DIS 21581	Vide	
403/11/725.1/ 6 & 7	OSB 12	Cyclique ISO/DIS 21581	300kg/ montant	
403/11/725.2/ 2	P16	Monotone	Vide	
403/11/725.2/ 3 & 4	P16	Cyclique ISO/DIS 21581	Vide	
403/11/725.2/ 5 & 6	P16	Cyclique ISO/DIS 21581	300kg/ montant	
403/11/725.3/1	CP 10	Monotone	Vide	
403/11/725.3/ 2 & 3	CP 10	Cyclique ISO/DIS 21581	Vide	
403/11/725.3/ 4 & 5	CP 10	Cyclique ISO/DIS 21581	300kg/ montant	

Tableau 11 : Echantillonnage et programme d'essais.

Chaque mur d'essai, représenté en [Figure 30](#), a été soumis au chargement cyclique défini en [Figure 31](#). Chaque cycle consiste en l'application d'un déplacement en tête de mur de la manière suivante :

- compression jusqu'à l'amplitude spécifiée pour le cycle puis retour à zéro,
- traction jusqu'à l'amplitude spécifiée pour le cycle puis retour à zéro.

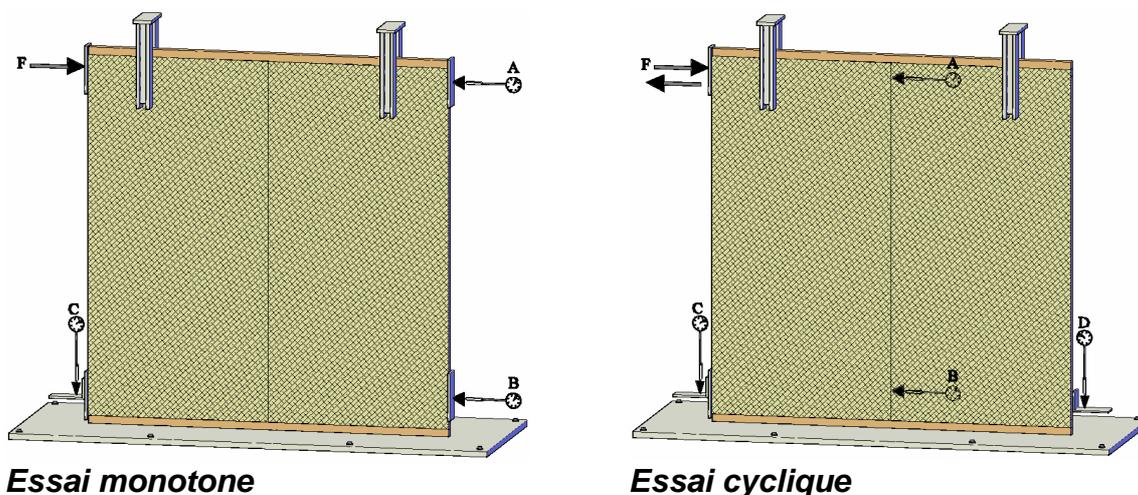


Figure 30 : Schémas de principe des essais.

Pour chaque essai cyclique, on enregistre la force appliquée en tête, le déplacement vérin ainsi que les déplacements des 4 capteurs LVDT en A, B, C et D.

Les courbes présentées dans ce paragraphe représentent l'évolution de la force appliquée en tête en fonction du déplacement relatif entre les points A et B.

Étape	Nombre de cycles	Amplitude
1	1	1.25% x V_u
2	1	2.5% x V_u
3	1	5% x V_u
4	1	7.5% x V_u
5	1	10% x V_u
6	3	20% x V_u
7	3	40% x V_u
8	3	60% x V_u
9	3	80% x V_u
10	3	100% x V_u

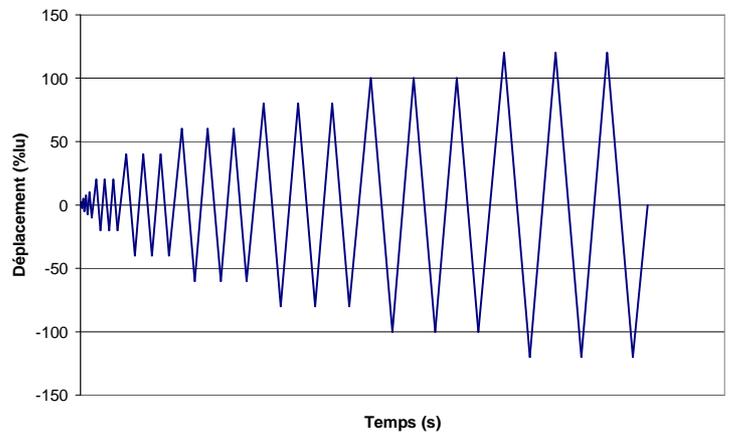


Figure 31 : cycles de déplacements selon ISO/DIS 21581.

La Figure 32 suivante présente les conditions limites des essais.

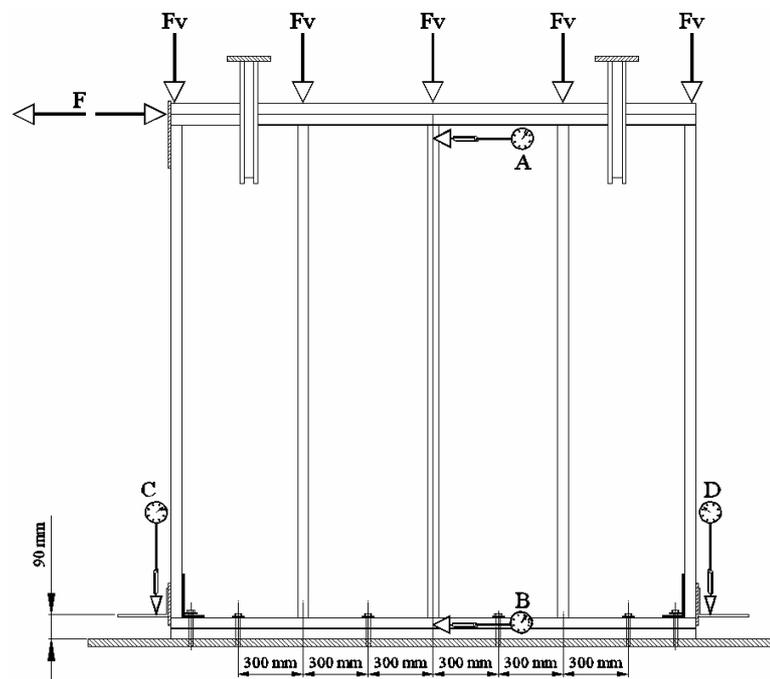


Figure 32 : conditions aux limites des essais.

- Les murs ont été guidés latéralement pour éviter les basculements hors du plan.
- Une charge verticale F_v est appliquée au droit de chaque montant par l'intermédiaire de « poids morts » suspendus symétriquement des deux côtés du mur. (Pour les essais à vide aucune charge n'est appliquée).
- Le mur est fixé sur une plaque métallique par l'intermédiaire de 6 boulons à tête hexagonale (M12 x 90, qualité 8.8) et 6 rondelles LL12. Une lisse inférieure de dimensions 2400 x 145 x 45 mm³ est intercalée entre le mur et la plaque.
- Le mur est ancré dans les deux angles inférieurs par des équerres Simpson AH29050/2 et rondelles US40/50/10G-B (cf. [Figure 33](#)), conformément à l'EC5.
- Une lisse supérieure de dimensions 2400 x 145 x 45 mm³ est fixée sur le haut du mur par l'intermédiaire de 16 vis empreinte torx ($\phi = 6$ mm, longueur = 80 mm).



Figure 33 : *Equerre d'ancrage des angles inférieurs SIMPSON AH29050/2 et rondelles US40/50/10G-B.*

3.2 Essais cycliques selon ISO/DIS 21 581 pour les panneaux OSB 12

L'essai statique a abouti aux valeurs de glissement suivantes : $V_y=24$ mm et $V_u = 99,6$ mm.

Pour les essais cycliques, le glissement ultime V_u a été fixé à 100 mm. Les paramètres pour le chargement cyclique sont présentés dans le [Tableau 12](#).

Selon l'ISO/DIS 21581 (2010), la vitesse de déplacement a été déterminée pour obtenir une durée d'essais jusqu'à la fin des trois cycles à 100% de V_u de 1 minute.

Les résultats, en termes d'affaiblissement de la résistance, sont présentés, synthétiquement dans le [Tableau 13](#), puis les graphes des essais cycliques en bleu (ainsi que leur courbe enveloppe en rouge et la courbe élasto-plastique équivalente en énergie) sont présentés pour chacune des éprouvettes chargées (cf. [Figure 34](#)).

Étape	Nombre de cycles	Amplitude (%V _u)	Amplitude (mm)
1	1	1,25	1,25
2	1	2,5	2,5
3	1	5	5
4	1	7,5	7,5
5	1	10	10
6	3	20	20
7	3	40	40
8	3	60	60
9	3	80	80
10	3	100	100

Tableau 12 : paramètres de l'essai cyclique.

N° Eprouvette		725.1/6 OSB 12mm chargé		725.1/7 OSB 12mm chargé	
		$\Delta F_{+,3}$	$\Delta F_{-,3}$	$\Delta F_{+,3}$	$\Delta F_{-,3}$
Affaiblissement					
20% V _u	0,8 V _Y	12%	10%	14%	11%
40% V _u	1,7 V _Y	30%	27%	29%	25%
60% V _u	2,5 V _Y	37%	37%	48%	32%
80% V _u	3,3 V _Y	25%	23%	28%	23%
100% V _u	4,1 V _Y	41%	62%	56%	64%

Tableau 13 : affaiblissement de la résistance (ΔF) à chaque cycle testé pour les panneaux d'OSB en 12 mm.

L'affaiblissement de 20% sur la valeur de résistance entre le 1^{er} et le 3^{ième} cycle se situe pour $V < 2,5V_Y$. Selon le principe d'affectation de l'EN 1998-1, ce type de mur aurait été classé en ductilité limitée.

Le mode de rupture était le même pour tous les essais. Il était constitué des phénomènes décrits ci-dessous:

- déformations par cisaillement des fixations du voile travaillant dans le plan bois / panneau, occasionnant un déplacement important d'un panneau par rapport à l'autre,
- rupture en cisaillement d'un nombre important de pointes de fixation panneaux/ossature par écrouissage.

Les équerres d'ancrage n'ont pas présenté de dépliage.

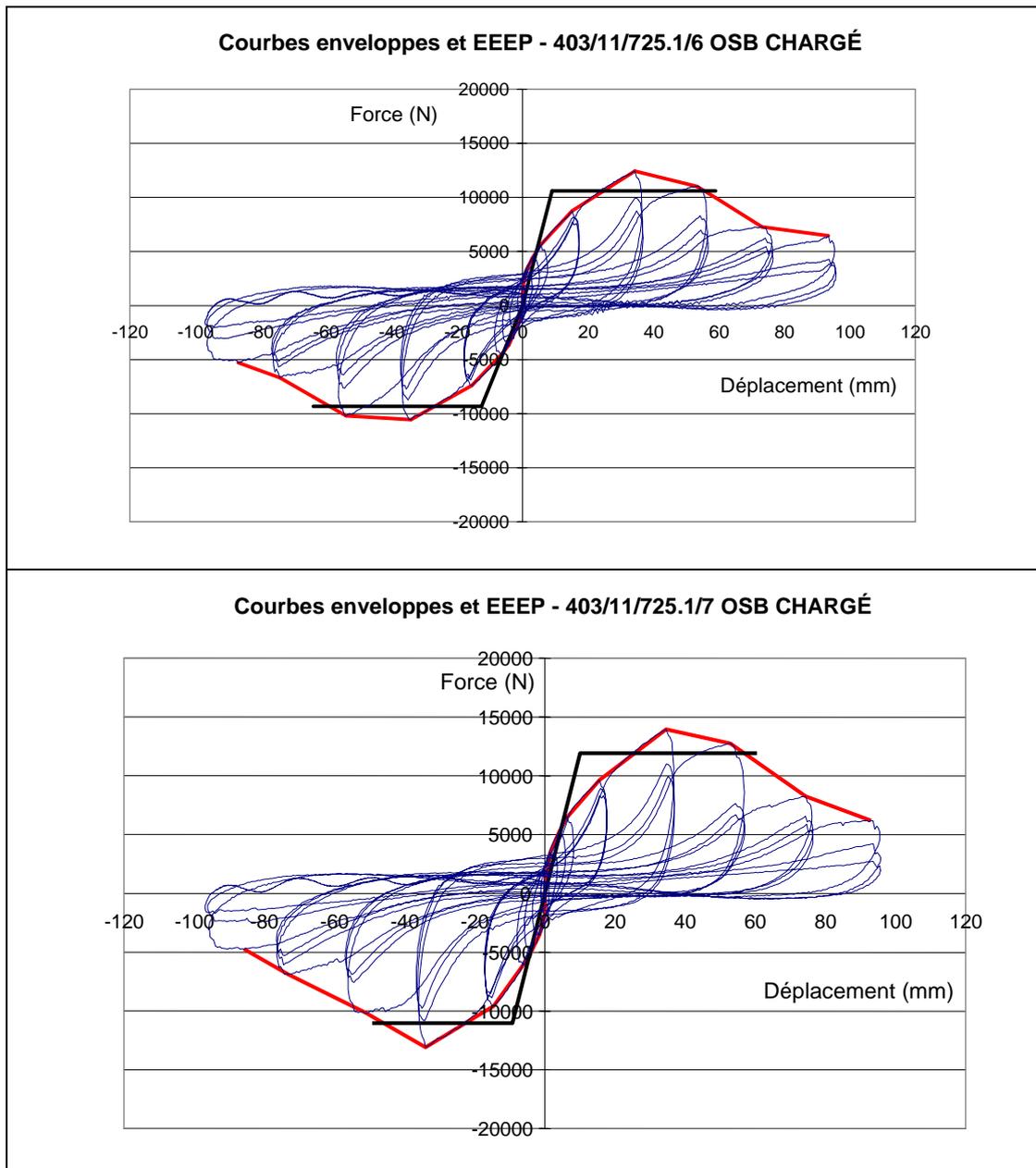


Figure 34 : Courbes Force=f(Déplacement) des essais cycliques pour les éléments de murs avec panneaux OSB de 12 mm chargé, en bleu, courbes enveloppes en rouge, courbes élastoplastiques équivalente en énergie en noir.

3.3 Essais cycliques selon ISO/DIS 21 581 pour les panneaux CP10

L'essai statique a abouti aux valeurs de glissement suivantes : $V_Y = 26$ mm et $V_u = 124$ mm.

Pour les essais cycliques, le glissement ultime V_u a été fixé à 124 mm. Les paramètres pour le chargement cyclique sont présentés dans le [Tableau 14](#).

Étape	Nombre de cycles	Amplitude (% V_u)	Amplitude (mm)
1	1	1,25	1,55
2	1	2,5	3,1
3	1	5	6,2
4	1	7,5	9,3
5	1	10	12,4
6	3	20	24,8
7	3	40	49,6
8	3	60	74,4
9	3	80	99,2
10	3	100	124

Tableau 14 : paramètres de l'essai cyclique.

Selon l'ISO/DIS 21581 (2010), la vitesse de déplacement a été déterminée pour obtenir une durée d'essais jusqu'à la fin des trois cycles à 100% de V_u de 1 minute.

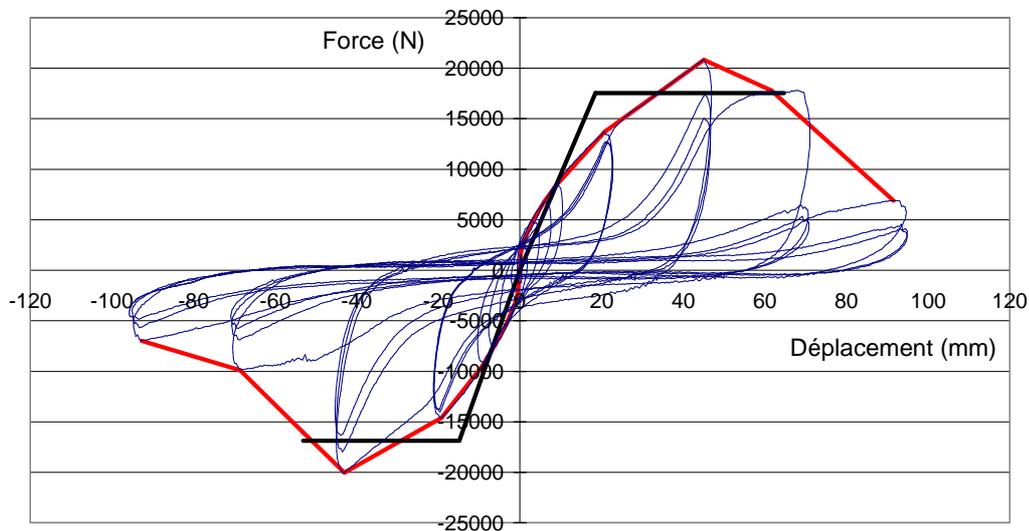
Les résultats, en termes d'affaiblissement de la résistance, sont présentés, synthétiquement dans le [Tableau 15](#) suivant, puis les graphes des essais cycliques en bleu (ainsi que leur courbe enveloppe en rouge et la courbe élasto-plastique équivalente en énergie) sont présentés pour chacune des éprouvettes chargées (cf. [Figures 35](#)).

N°Eprouvette		725.3/4 CP 10 mm chargé		725.3/5 CP 10 mm chargé	
		$\Delta F_{+,3}$	$\Delta F_{-,3}$	$\Delta F_{+,3}$	$\Delta F_{-,3}$
Affaiblissement					
20% V_u		8%	6%	7%	8%
40% V_u	1,9 V_Y	28%	19%	26%	23%
60% V_u	2,9 V_Y	70%	42%	74%	45%
80% V_u	3,8 V_Y	40%	31%	39%	51%

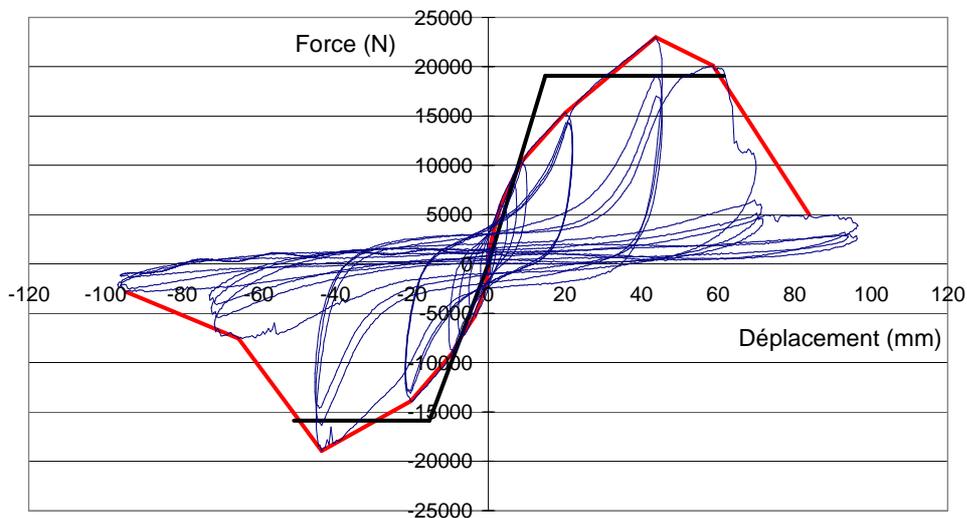
Tableau 15 : affaiblissement de la résistance (ΔF) à chaque cycle testé pour les panneaux de Contreplaqué de 10 mm.

L'affaiblissement de 20% sur la valeur de résistance entre le 1^{er} et le 3^{ème} cycle se situe pour $V < 2,9 V_Y$. Selon le principe d'affectation de l'EN 1998-1, le mur aurait été classé en ductilité limitée.

Courbes enveloppes et EEEP - 403/11/725.3/4 CP10 CHARGÉ



Courbes enveloppes et EEEP - 403/11/725.3/5 CP10 CHARGÉ



Figures 35 : Courbes Force=f(Déplacement) des essais cycliques pour les éléments de murs avec panneaux de contreplaqué de 10 mm chargés, en bleu, courbes enveloppes en rouge, courbes élastoplastiques équivalente en énergie en noir.

3.4 Essais cycliques selon ISO/DIS 21 581 pour les panneaux P16

L'essai statique a abouti aux valeurs de glissement suivantes : $V_Y = 18$ mm et $V_u = 116$ mm.

Pour les essais cycliques, le glissement ultime V_u a été fixé à 116 mm. Les paramètres pour le chargement cyclique sont présentés dans le [Tableau 16](#).

Étape	Nombre de cycles	Amplitude (% V_u)	Amplitude (mm)
1	1	1,25	1,45
2	1	2,5	2,9
3	1	5	5,8
4	1	7,5	8,7
5	1	10	11,6
6	3	20	23,2
7	3	40	46,4
8	3	60	69,6
9	3	80	92,8
10	3	100	116

Tableau 16 : paramètres de l'essai cyclique.

Selon l'ISO/DIS 21581 (2010), la vitesse de déplacement a été déterminée pour obtenir une durée d'essais jusqu'à la fin des trois cycles à 100% de V_u de 1 minute.

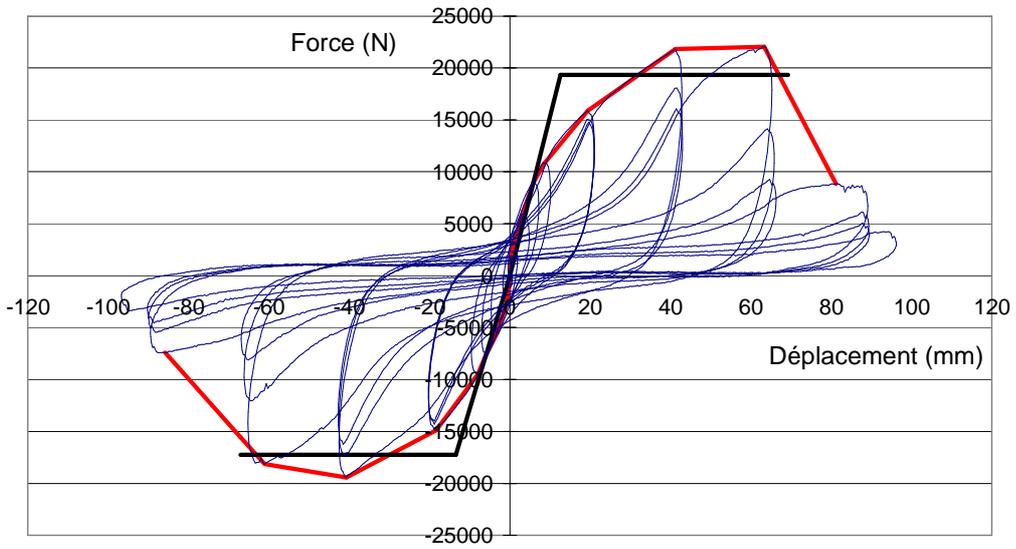
Les résultats, en termes d'affaiblissement de la résistance, sont présentés, synthétiquement dans le **Tableau 17** suivant, puis les graphes des essais cycliques en bleu (ainsi que leur courbe enveloppe en rouge et la courbe élasto-plastique équivalente en énergie) sont présentés pour chacune des éprouvettes chargées (cf. [Figure 36](#)).

N°Eprouvette		725.2/5		725.2/6	
		Particules 16mm chargé		Particules 16mm chargé	
Affaiblissement		$\Delta F_{+,3}$	$\Delta F_{-,3}$	$\Delta F_{+,3}$	$\Delta F_{-,3}$
20% V_u	1,3 V_Y	7%	6%	6%	5%
40% V_u	2,6 V_Y	26%	16%	21%	13%
60% V_u	3,9 V_Y	58%	55%	52%	51%
80% V_u	5,2 V_Y	43%	38%	43%	39%

Tableau 17 : affaiblissement de la résistance (ΔF) à chaque cycle testé pour les panneaux de particules en 16 mm.

L'affaiblissement de 20% sur la valeur de résistance entre le 1^{er} et le 3^{ème} cycle se situe pour $V < 3,9V_Y$. Selon le principe d'affectation de l'EN 1998-1, le mur aurait été classé en ductilité limitée.

Courbes enveloppes et EEEP - 403/11/725.2/5 P16 CHARGÉ



Courbes enveloppes et EEEP - 403/11/725.2/6 P16 CHARGÉ

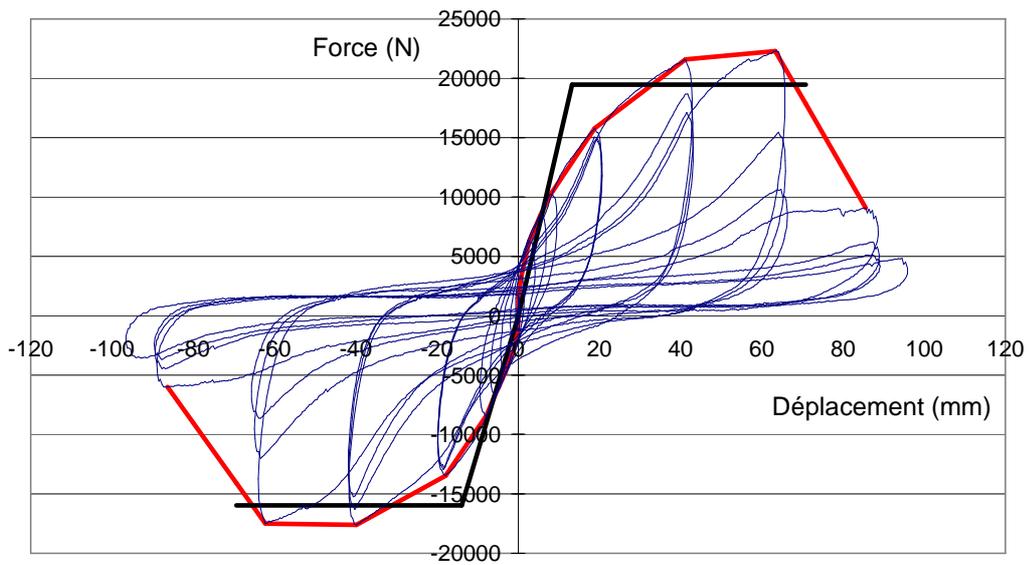


Figure 36 : Courbes Force=f(Déplacement) des essais cycliques pour les éléments de murs avec panneaux de particules de 16 mm chargé, en bleu, courbes enveloppes en rouge, courbes élastoplastiques équivalente en énergie en noir.

3.5 Détermination de la ductilité des murs selon la démarche de l'EN 1998-1

Le **Tableau 18** synthétise, pour les trois configurations de panneaux présentés dans les § 3.2, 3.3 et 3.4, les résultats d'essais suivants:

- le pourcentage d'affaiblissement de la force entre les 1^{ers} et 3^{èmes} cycles d'un même glissement,
- la classe de ductilité selon la démarche de l'EN 1998-1,
- et le coefficient de comportement q selon la démarche de l'EN 1998-1.

MURS							Ductilité EC8 niveau VY sans chute de 20%	Classe de ductilité EC8	q EC8
OSB-12									
725.1/6 chargé	Glissement (mm) % perte de charge	0,8xVY 11	1,7xVY 28	2,5xVY 37	3,3xVY 24	4,1xVY 52	1<D<1,7	LDL	1,5
725.1/7 chargé	Glissement (mm) % perte de charge	0,8xVY 12	1,7xVY 27	2,5xVY 40	3,3xVY 25	4,1xVY 60	1<D<1,7	LDL	1,5
Particules-16 mm									
725.2/5 chargé	Glissement (mm) % perte de charge		1,3xVY 7	2,6xVY 21	3,9xVY 57	5,2xVY 41	1,3<D<2,6	LDL	1,5
725.2/6 chargé	Glissement (mm) % perte de charge		1,3xVY 6	2,6xVY 12	3,9xVY 52	5,2xVY 42	2,6<D<3,9	LDL	1,5
Contreplaqué-10mm									
725.3/4 chargé	Glissement (mm) % perte de charge	0,95xVY 7	1,9xVY 24	2,9xVY 56	3,8xVY 36		0,95<D<1,9	LDL	1,5
725.3/5 chargé	Glissement (mm) % perte de charge	0,95xVY 8	1,9xVY 25	2,9xVY 60	3,8xVY 45		0,95<D<1,9	LDL	1,5

Tableau 18 : Interprétation des essais cycliques pour les trois configurations de panneaux : OSB de 12 mm, Particules de 16 mm et Contreplaqué de 10 mm selon la démarche de l'EN1998-1.

En complément des résultats obtenus dans les études SISMOB 1 et 2, ces résultats mettent, à nouveau, en évidence que l'approche proposée par l'EN 1998-1, initialement développée pour quantifier la ductilité de la zone dissipative (assemblage seul), n'est pas adaptée à l'analyse du comportement à l'échelle des murs.

En effet, quelque soit l'épaisseur et le type de mur testé, cette approche aboutit à classer les murs en classe de ductilité limitée (LDL) y compris pour les panneaux de particules de 16 mm et de contreplaqué de 10 mm que les règles de moyens de l'EN 1998-1 classent en ductilité élevée (HDL).

3.6 Détermination de la ductilité des murs à partir de l'analyse en énergie des essais cycliques

L'établissement de cette analyse en énergie a été proposé dans le cadre de l'étude SISMOB3 phase 1 et est détaillée dans le rapport [8]. Nous ne rappellerons ici que la procédure permettant la détermination de la ductilité et du coefficient de comportement q :

- (1) élaboration de la courbe enveloppe des essais cycliques de la structure selon la norme ASTM E 2126 [8],
- (2) détermination de la courbe élasto-plastique équivalente en énergie à la courbe enveloppe des 1^{ers} cycles selon la norme ASTM E 2126 ; cette courbe est construite à partir
 - a. du déplacement V_u correspondant à 80% de F_{max} , la force maximale de la courbe enveloppe,
 - b. de la droite élastique passant par 0,0 et le point de la courbe enveloppe d'ordonnée $0,4F_{max}$.
- (3) détermination de la ductilité cyclique telle que $D_c = V_u / V_y$ où V_y est l'abscisse du point d'intersection entre la partie linéaire et le plateau plastique.
- (4) détermination du coefficient de comportement q à partir de $q = \sqrt{2 D_c - 1} = \frac{F_c}{F_y}$.

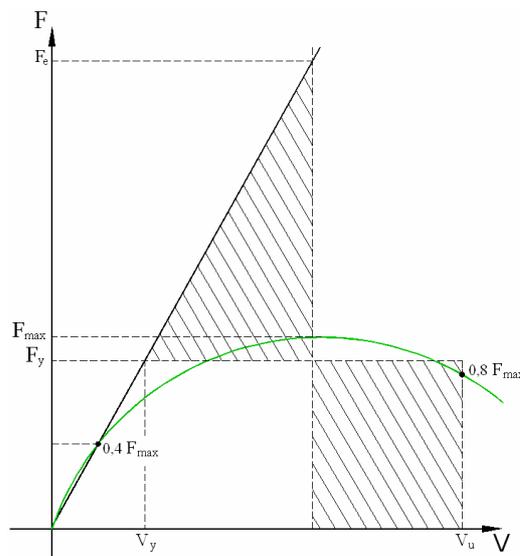


Figure 37 : courbes enveloppe et élasto-plastique selon ASTM E 2126 et modèle linéaire équivalent.

Le [Tableau 19](#) synthétise pour l'ensemble des essais cycliques présentés dans les § 3.2, 3.3 et 3.4, la classe de ductilité et le coefficient de comportement q obtenus selon l'analyse en énergie présentée ci-dessus.

Les résultats obtenus selon la variante dite de CSIRO (la différence est que la courbe élasto-plastique est construite avec $V_y = 1,25 \times V_{0,4F_{max}}$; cf. [8]) sont également présentés.

MURS	Analyse en énergie		Variante CSIRO
	Ductilité cyclique	Q _{énergie}	Q _{énergie}
OSB12			
725.1/6	6,5	3,5	4,6
725.1/7	6,0	3,3	4,4
Particules 16			
725.2/5	5,5	3,2	4,3
725.2/6	5,3	3,1	4,2
Contre plaqué 10			
725.3/4	3,5	2,5	3,3
725.3/5	4,1	2,7	3,6

Tableau 19 : Interprétation des essais cycliques pour les trois configurations de panneaux : OSB de 12 mm, Particules de 16 mm et Contreplaqué de 10 mm selon l'analyse en énergie proposée dans SISMOB3 phase 1.

On constate que l'analyse en énergie conduirait (cf. Tableau 20, pour l'affectation des classes de ductilité en fonction de la ductilité) à :

- une classe de ductilité élevée pour les murs OSB,
- une classe de ductilité moyenne pour les murs P16 et CP10.

Ainsi, l'analyse en énergie conduirait

- à classer les trois configurations en structure dissipative ; ceci est conforme aux règles de moyens de l'EC8 pour les panneaux de particules et de contre plaqué,
- des coefficients de comportement proches pour les P16 et OSB12 et plus élevés que ceux obtenus pour les murs en CP10 ; ceci ne correspond pas aux résultats obtenus à partir des essais sismiques pour lesquels on a constaté un comportement similaire des murs en OSB12 et CP10,
- des coefficients de comportement de 2,5 pour le contreplaqué ; ceci ne correspond pas à la valeur limitée à $q=3$ par l'Eurocode 8.

La variante de CSIRO conduirait à des valeurs plus élevées pour le coefficient de comportement q mais garderait la même similitude entre les murs P16 et CP10.

Ductilité	Classe de ductilité
$D \leq 4$	Réduite (LDL)
$4 < D \leq 6$	Moyenne (MDL)
$6 < D$	Elevée (HDL)

Tableau 20 : affectation des classes de ductilité en fonction de la ductilité D .

4. CONCLUSION GENERALE

Ces travaux, basés sur une approche expérimentale (essais cycliques et dynamiques sur table vibrante) et numérique par éléments finis non linéaire dynamique, ont permis d'étudier le comportement des murs à ossature bois et panneaux en voile travaillant en OSB de 12 mm d'épaisseur, en contreplaqué de 10 mm et en particules de 16 mm, en situation de séisme.

Les essais cycliques ont permis :

- de déterminer les paramètres d'entrée de la modélisation par éléments finis,
- d'établir la courbe enveloppe utilisée pour déterminer le critère de non effondrement de chaque configuration de mur,
- de mener l'analyse en énergie pour l'évaluation de la ductilité et du coefficient de comportement.

L'analyse en énergie proposée dans le cadre de l'étude SISMOB3 phase 1 conduirait à classer les trois configurations en structure dissipative (ductilité >4) ; ceci est conforme aux règles de moyens de l'EC8 pour les configurations testées en panneaux de particules et de contre plaqué. Il est à noter que la variante de CSIRO classerait les trois configurations testées en haute ductilité (ductilité > 6).

Ainsi, l'analyse en énergie menée à l'échelle des murs (qu'elle soit menée avec ou sans la variante de CSIRO) aboutirait à une détermination de la classe de ductilité conforme aux règles de moyens de l'EC8 (contrairement à l'approche proposée par l'EN 1998-1, initialement développée pour quantifier la ductilité de l'assemblage seul). En revanche, cette analyse ne permet pas d'estimer des coefficients de comportement en cohérence avec les résultats d'essais dynamiques.

Ainsi, les essais cycliques menés selon l'ASTM E2126 permettent la détermination de la ductilité cyclique mais ne suffisent pas à déterminer le coefficient de comportement q. Ils sont cependant nécessaires à la détermination du critère de non effondrement en déplacement.

La modélisation par éléments finis, développée pour élargir le champ de l'étude expérimentale à d'autres séismes, a permis de confirmer que le séisme dit lointain est l'un des plus nocifs (5/40) sur l'ensemble des séismes représentatifs de l'aléa fort et modéré en France et des différents types de sol (classifiés A, B, C et D dans l'EN 1998-1), retenus pour cette étude.

En revanche, l'écart variable constaté entre les déplacements expérimentaux et simulés en tête de murs selon les séismes ne nous permet pas de déterminer, par ce modèle, la valeur du coefficient q pour les séismes les plus nocifs.

Les essais dynamiques ont été menés sur trois configurations de murs à ossature bois conçus selon les principes de dimensionnement en capacité (ancrages dimensionnés en

sur-résistance et zones dissipatives localisées dans les fixations des voiles) et soumis à une charge verticale allant jusqu'à 850kg/ml.

Ils ont mis en évidence des modes de ruine correspondant à des rotules plastiques au niveau des pointes de fixation des panneaux (zones dissipatives).

Ceci est l'un des points clés dans la conception d'une structure à ductilité élevée (grande capacité de dissipation d'énergie).

Egalement, ces essais ont montré :

- d'une part, que, pour les murs en OSB12, une valeur de q égale à 3,2 sécuritaire a été obtenue expérimentalement pour le séisme dit lointain faisant partie des séismes les plus nocifs parmi 40 séismes représentatifs des zones d'aléa moyen et fort en France,
- et d'autre part, la similitude des éléments de murs en CP10 et OSB 12.

Ainsi, il est proposé la valeur de 3 pour le coefficient de comportement q pour des murs à ossature bois et panneaux en voile travaillant en OSB à partir de 12 mm d'épaisseur.

5. BIBLIOGRAPHIE

- [1] **NF EN 1998-1:2004**: Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 1 : Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments, 2005.
- [2] **NF EN 12512** : Méthodes d'essai – Essais cyclique d'assemblages réalisés par organes mécaniques, 2002.
- [3] **ISO DIS 21581** : Structures en bois – Méthodes d'essai de chargement latéral statique et cyclique sur murs de contreventement (2010).
- [4] **DTU 31.2**: Construction de maisons et batiments à ossatures bois, Mai 1993.
- [5] **ASTM E 2126A** : Standard Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for Buildings / Note 2, 2007.
- [6] FCBA, Rapport d'essais N°F-R / 68/ 06 / 197, **Essais Cycliques de murs à ossature bois en OSB**, 2007.
- [7] FCBA, Rapport d'études, **Comportement parasismique des Murs à Ossatures Bois en Panneaux de Particules, SISMOB2**, 2009.
- [8] FCBA et CSTB, Rapport d'études, **Comportement parasismique des Murs à Ossatures Bois, SISMOB3 Phase1**, Novembre 2010.
- [9] Ceccotti A., Vignoli A., "**Behaviour Factor of Timber in Seismic Zones**", CIB-W18, International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W18A – Timber Structures, 1987, Italy.
- [10] Ceccotti A., Sandhaas C., "**A proposal for a standard procedure to establish the seismic behaviour factor q of timber buildings**", WCTE, World Conference on Timber Engineering, 2010, Italy.
- [11] Schädle P, Blass HJ, "**Earthquake behaviour of modern timber construction systemes**", WCTE, World Conference on Timber Engineering, 2010, Italy.
- [12] BRGM, Rapport d'études RP-58886-FR, Projet ANR RiskNat SISBAT, **Modélisation de l'action sismique**, septembre 2010.
- [13] Boudaud Clément, **Analyse de la vulnérabilité sismique des structures à ossature en bois**, Thèse de l'Université de Grenoble avec un financement du CSTB, Décembre 2012.

6. ANNEXE 1 : DETERMINATION $PGA_{EC8,q=1}$ POUR CHACUNE DES CONFIGURATIONS EXPERIMENTALES

Cette annexe présente le calcul du $PGA_{EC8,q=1}$, l'accélération de sol correspondant à un taux de travail des murs de 100% pour un dimensionnement fait selon l'EC8 avec $q=1$ pour les trois configurations testées :

- d'un mur de $(2,4 \times 2,4 \text{ m}^2)$ fait de panneaux OSB d'épaisseur 12 mm (**OSB12**) fixés par pointes de diamètre 2,5 mm et de longueur 50 mm sur ossature bois C24,
- d'un mur de $(2,4 \times 2,4 \text{ m}^2)$ fait de panneaux de particules d'épaisseur 16 mm (**P16**) fixés par pointes de diamètre 2,5 mm et de longueur 50 mm sur ossature bois C24.
- d'un mur de $(2,4 \times 2,4 \text{ m}^2)$ fait de panneaux de contreplaqué d'épaisseur 10 mm (**CP10**) fixés par pointes de diamètre 2,5 mm et de longueur 50 mm sur ossature bois C24.

Pour la détermination de $PGA_{EC8,q=1}$, la masse du mur est négligée. Ainsi, l'évaluation de q est conservatrice.

Le système testé a une période propre comprise entre 0,13s et 0,19s, valeurs situées sur le palier d'accélération spectrale constante.

La réalisation de l'essai sur table vibrante correspond à un sol de type rocheux (classe de sol A), ainsi $S=1$.

La valeur du coefficient d'importance γ_i est prise égale à 1. Ce choix est sécuritaire pour l'évaluation du coefficient de comportement q car, conduisant à la plus grande valeur de $PGA_{EC8,q=1}$, cela aboutit à la plus petite valeur du coefficient q .

Mur OSB12 chargé verticalement à 1,5T

$R_{V,k}=11,64$ kN est la résistance caractéristique du mur de 2,4 m de long = $5,82$ kN \times 2.

$R_{V,d}=11,58$ kN (avec $\gamma_M=1$, $k_{mod}=\sqrt{1,1 \times 0,9}$) est la résistance de calcul du mur de 2,4m.

$$E_{V,d} = M \times S_d(T) = M \times (\gamma_i \times a_{gr} \times S \times 2,5 / q) = 1\,500 \times (1 \times a_{gr} \times S \times 2,5 / q)$$

$PGA_{EC8,q=1}$ étant l'accélération de sol correspondant à un taux de travail des murs de 100% pour un dimensionnement fait selon l'EC8 avec $q=1$, on a l'égalité suivante :

$$E_{V,d} = R_{V,d} \text{ avec } q=1 \text{ soit } (PGA_{EC8,q=1} \times S) = 11\,580 / (1\,500 \times 2,5) \text{ m/s}^2$$
$$PGA_{EC8,q=1} = a_{gr} = 3,09 \text{ m/s}^2.$$

Mur OSB12 chargé verticalement à 2T

$R_{V,d}=11,58$ kN

$$E_{V,d} = M \times S_d(T) = M \times (\gamma_i \times a_{gr} \times S \times 2,5 / q) = 2\,000 \times (1 \times a_{gr} \times S \times 2,5 / q)$$

$$E_{V,d} = R_{V,d} \text{ avec } q=1 \text{ soit } (PGA_{EC8,q=1} \times S) = 11\,580 / (2\,000 \times 2,5) \text{ m/s}^2$$
$$PGA_{EC8,q=1} = a_{gr} = 2,32 \text{ m/s}^2.$$

Mur CP10 chargé verticalement à 1,5T

$R_{v,k}=10,84$ kN est la résistance caractéristique du mur de 2,4 m de long = $5,42$ kN \times 2.

$R_{V,d}= 11,92$ kN (avec $\gamma_M=1$, $k_{mod}=\sqrt{1,1 \times 1,1}$) est la résistance de calcul du mur de 2,4m.

$$E_{V,d}= M \times S_d(T) = M \times (\gamma_i \times a_{gr} \times S \times 2,5 / q) = 1\,500 \times (1 \times a_{gr} \times S \times 2,5 / q)$$

$PGA_{EC8, q=1}$ étant l'accélération de sol correspondant à un taux de travail des murs de 100% pour un dimensionnement fait selon l'EC8 avec $q=1$, on a l'égalité suivante :

$$E_{V,d} = R_{V,d} \text{ avec } q=1 \text{ soit } (PGA_{EC8, q=1} \times S) = 11\,920 / (1\,500 \times 2,5) \text{ m/s}^2$$
$$PGA_{EC8, q=1} = a_{gr} = 3,18 \text{ m/s}^2.$$

Mur CP10 chargé verticalement à 2T

$$R_{V,d}= 11,92 \text{ kN}$$

$$E_{V,d}= M \times S_d(T) = M \times (\gamma_i \times a_{gr} \times S \times 2,5 / q) = 2\,000 \times (1 \times a_{gr} \times S \times 2,5 / q)$$

$$E_{V,d} = R_{V,d} \text{ avec } q=1 \text{ soit } (PGA_{EC8, q=1} \times S) = 11\,920 / (2\,000 \times 2,5) \text{ m/s}^2$$
$$PGA_{EC8, q=1} = a_{gr} = 2,38 \text{ m/s}^2.$$

Mur P16 chargé verticalement à 1,5T

$R_{v,k}=13,6$ kN est la résistance caractéristique du mur de 2,4 m de long = $6,8$ kN \times 2.

$R_{V,d}= 12,8$ kN (avec $\gamma_M=1$, $k_{mod}=\sqrt{1,1 \times 0,8}$) est la résistance de calcul du mur de 2,4m.

$$E_{V,d}= M \times S_d(T) = M \times (\gamma_i \times a_{gr} \times S \times 2,5 / q) = 1\,500 \times (1 \times a_{gr} \times S \times 2,5 / q)$$

$PGA_{EC8, q=1}$ étant l'accélération de sol correspondant à un taux de travail des murs de 100% pour un dimensionnement fait selon l'EC8 avec $q=1$, on a l'égalité suivante :

$$E_{V,d} = R_{V,d} \text{ avec } q=1 \text{ soit } (PGA_{EC8, q=1} \times S) = 12\,800 / (1\,500 \times 2,5) \text{ m/s}^2$$
$$PGA_{EC8, q=1} = a_{gr} = 3,41 \text{ m/s}^2.$$

Mur P16 chargé verticalement à 2T

$$R_{V,d}= 12,8 \text{ kN}$$

$$E_{V,d}= M \times S_d(T) = M \times (\gamma_i \times a_{gr} \times S \times 2,5 / q) = 2\,000 \times (1 \times a_{gr} \times S \times 2,5 / q)$$

$$E_{V,d} = R_{V,d} \text{ avec } q=1 \text{ soit } (PGA_{EC8, q=1} \times S) = 12\,800 / (2\,000 \times 2,5) \text{ m/s}^2$$
$$PGA_{EC8, q=1} = a_{gr} = 2,56 \text{ m/s}^2.$$