
Caractérisation du comportement de murs de contreventement en maçonnerie chaînée avec une isolation en verre cellulaire PERINSUL à la base

Fournely E.^{1,2*} Godi G.^{1,2}, Racher P.^{1,2}, Salembier L.E.³, Boukolt N.⁴ Vitse P.⁵

¹ Clermont Université, Université Blaise Pascal, mail : eric.fournely@univ-bpclermont.fr, gael.godi@univ-bpclermont.fr, partick.racher@univ-bpclermont.fr

² CNRS, UMR 6602, Institut Pascal, mail : eric.fournely@univ-bpclermont.fr, gael.godi@univ-bpclermont.fr, partick.racher@univ-bpclermont.fr

³ L. E. Salembier Consultant, mail : louis.salembier@orange.fr

⁴ Pittsburgh Corning France (PCF), mail : nabil.boukolt@foamglas.fr

⁵ Pittsburgh Corning Europe (PCE), mail: piet.vitse@foamglas.be

RÉSUMÉ. La société Pittsburgh Corning, bien connue comme fabricant des produits FOAMGLAS®, propose des blocs PERINSUL® à base de mousse de verre qui permettent d'isoler à leur base les murs (en maçonnerie par exemple) afin, entre autres, de supprimer un pont thermique dans cette zone et d'apporter un filtre aux remontées capillaires. Ces produits, déclinés en "PERINSUL®HL" et "PERINSUL®S" (High Load et Standard pour murs porteurs et non porteurs) ont été précédemment qualifiés pour la reprise d'efforts verticaux. La caractérisation et la mise en œuvre de ces blocs dans des murs primaires, destinés donc à contreventer des bâtiments, fait l'objet de cette étude. Ce travail présente la campagne réalisée sur six murs de contreventement d'élanements différents et avec des chargements verticaux pour les deux familles de blocs. Les principaux résultats obtenus, les modes de ruptures identifiés, la résistance, la rigidité et le fonctionnement post-pic sont mesurés et évalués. La configuration des corps d'épreuve est rapprochée des prescriptions des PSMI et CPMI-Z3Z4 et les caractéristiques des composants sont rapportées. Les résultats sont mis en parallèle avec les exigences réglementaires.

ABSTRACT. Pittsburgh Corning company, is the manufacturer of FOAMGLAS® products like PERINSUL® blocks, based on high density cellular glass used to form an effective insulated joint between vertical wall insulation and horizontal floor. These products, available in "PERINSUL®HL" and "PERINSUL®S" (High Load and Standards for load-bearing and non-bearing applications) have been already qualified for persistent or transient design situations (fundamental combinations). Characterization and implementation of these blocks in the primary walls for seismic situation is the subject of this study. This work presents the campaign carried-out on six shear walls with different, L/H ratios, vertical loadings and PERINSUL® bloc types. The main results, the failure modes, the strength, stiffness and post-peak behaviour are measured and evaluated. The configuration of the walls are close to the requirements of PSMI and CPMI-Z3Z4, simplified code for individual housing in France. Characteristics of components are reported and the results are compared with standard requirements.

MOTS-CLÉS : isolant thermique, mousse de verre, blocs PERINSUL®, maçonnerie chaînée, parasismique, expérimentation.

KEYWORDS: thermal isolating, cellular glass, confined masonry, seismic assessment, experimentation.

1. Introduction

Les exigences d'isolation thermique associées aux performances énergétiques des bâtiments, ainsi que celles liées à la préservation des composants structuraux ou non-structuraux contre les différentes remontées capillaires conduisent assez naturellement vers l'interposition à la base des murs d'un écran isolant. Par ailleurs, ces murs doivent répondre aux exigences de résistance aux différentes situations de chargement fondamentales, accidentelles, sismiques... Ces exigences sont définies globalement dans le Règlement pour les Produits de Construction (RPC) et déclinés dans les différents règlements ou normes spécialisés. Pour cette étude, nous nous intéressons à la caractérisation en situation sismique du comportement de murs élémentaires en maçonnerie chaînée avec interposition à la base de blocs en mousse de verre. Les blocs testés sont des blocs PERINSUL HL & S, (High Load & Standard, pour murs porteurs & murs non chargés ou faiblement chargés). La résistance sismique des bâtiments est pilotée par la résistance sous chargements alternés des murs de contreventement, dits murs primaires. Ces murs primaires reprennent également une partie des charges verticales (gravitaires) plus ou moins importante, en fonction de leur positionnement et de la présence d'éléments porteurs non contreventant (murs secondaires). Outre la résistance "élastique", la présence d'un domaine post-élastique ductile autorise une dissipation pouvant être prise en compte dans le règlement parasismique (EC8, CPMI & arrêtés-décret) [AFNOR 98], [DHUP 15], [JORF 10] par le biais du coefficient de comportement q . Pour les maçonneries chaînées traditionnelles, l'effort tranchant est repris par la résistance au cisaillement des blocs, du mortier et des chaînages verticaux. Les charges gravitaires sont reprises par la résistance en compression des blocs et des chaînages verticaux. Le moment de renversement est repris par la résistance et la continuité des chaînages (périphériques) verticaux et horizontaux et par la résistance en compression de la bielle comprimée dans la diagonale du mur de contreventement [AFNOR 13-1]. La valeur retenue pour le coefficient de comportement q des maçonneries traditionnelles chaînées avec des blocs béton ou terre cuite est de 2,5 [AFNOR 13-2]. Les exigences associées à ce fonctionnement sont définies dans la NF EN 1992-1-1 [AFNOR 05-1] et dans la NF EN 1998-1 [AFNOR 05-2] sous formes d'exigences de performance et sous forme de règles de moyens dans les règles parasismiques simplifiées pour la conception des maisons individuelles (CPMI) [DHUP 15]. Elles portent essentiellement sur les caractéristiques des matériaux mis en œuvre et sur la quantité d'armature pour les chaînages.

Pour un mur de contreventement en maçonnerie chaînée avec interposition d'une rangée de blocs isolants, il reste à vérifier la résistance au cisaillement des chaînages verticaux et des blocs isolants, la résistance en compression des chaînages verticaux et des blocs isolants, la continuité des chaînages la compression de la bielle du panneau de maçonnerie avec un coté sur appui souple et des scénarios mettant en jeu la résistance en cisaillement de la liaison blocs béton ou terre cuite - chaînages verticaux dans une cinématique intégrant une compression des blocs isolants. La figure 1 illustre schématiquement ces sollicitations, résistances et cinématiques pour un sens de chargement, montrant ainsi la dyssymétrie de sollicitation des composants du mur. La figure 2 présente les résultats d'un modèle simple de mur de contreventement avec panneau maçonné, chaînages et liaisons plus ou moins rigides entre le panneau maçonné et la longrine. Le modèle simple est constitué d'éléments poutres, avec des mêmes caractéristiques sectorielles et mécaniques pour la configuration 1 et des caractéristiques minorées sur l'interface représentant la couche de blocs isolants pour la configuration 2. Ces résultats génériques montrent clairement l'augmentation du cisaillement entre chaînage vertical et panneau maçonné associée à une diminution de l'effort de compression à la base du panneau.

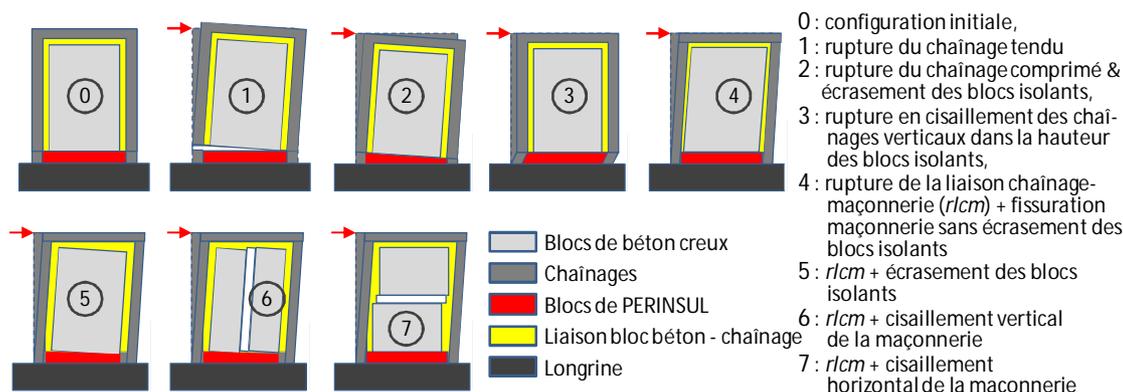


Figure 1. Scénarios possibles à la rupture d'un contreventement maçonné chaîné avec isolant à la base.

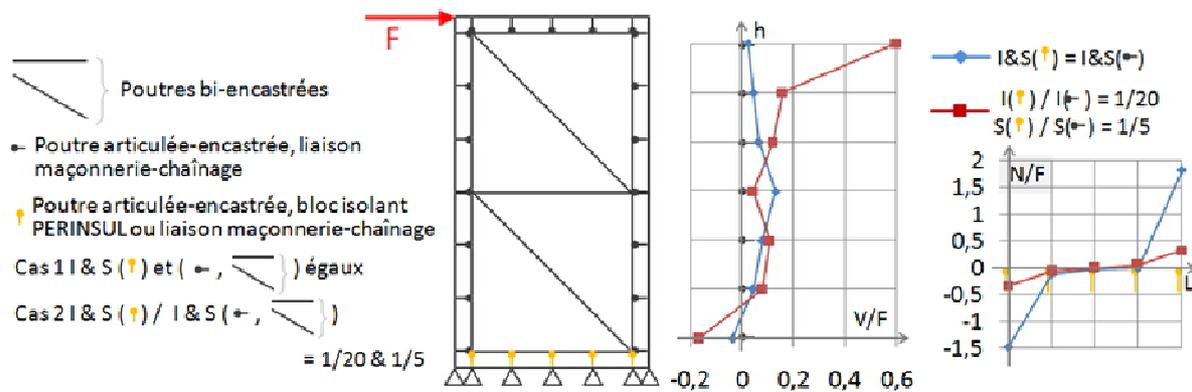


Figure 2. Comparaison des efforts panneaux maçonnés - chaînages en fonction de la raideur de liaison.

2. Présentation des blocs PERINSUL S et HL

Les blocs PERINSUL testés ici se présentent sous la forme de parallélépipèdes de largeur 20 cm pour une longueur de 45 cm et une épaisseur de 11,5 cm. Ils se déclinent en deux densités de mousse de verre qui conduisent à des caractéristiques physiques et mécaniques différentes. Des essais de caractérisation ont permis de définir ces caractéristiques. Le tableau 1 en rapporte les principales. Ces blocs et leur mise en œuvre font l'objet d'un avis technique hors zone sismiques [SGS 13-1], [SGS 13-2], [FOAM 16]. La figure 3 illustre quelques unes de ces prescriptions de mise en œuvre.

Tableau 1. Caractéristiques physiques et mécaniques des blocs PERINSUL®.

	PERINSUL HL	PERINSUL S
Réaction au feu (EN 13501-1)	Conforme à Euroclasse A1, incombustible, ne dégage pas de fumées toxiques en cas d'incendie	
Limites de température de service	de -265°C à +430 °C	de -265°C à +430 °C
Résistance à la diffusion de vapeur d'eau	$\mu = \infty$ (EN ISO 10456)	$\mu = \infty$ (EN ISO 10456)
Hygroscopicité	nulle	nulle
Capillarité	nulle	nulle
Point de fusion	>1000 °C (DIN 4102-17)	>1000 °C (DIN 4102-17)
Coefficient de dilatation thermique	$9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (EN 13471)	$9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (EN 13471)
Chaleur spécifique	1000 J/(kg.K) (EN ISO 10456)	1000 J/(kg.K) (EN ISO 10456)
Conductivité thermique λ_D (EN ISO 10456)	$\leq 0,058 \text{ W/(m.K)}$	$\leq 0,050 \text{ W/(m.K)}$
Masse volumique ($\pm 10\%$) (EN 1602)	200 kg/m ³	165 kg/m ³
Résistance à la compression (EN 826-A)	$\geq 2900 \text{ kPa}$	$\geq 1600 \text{ kPa}$

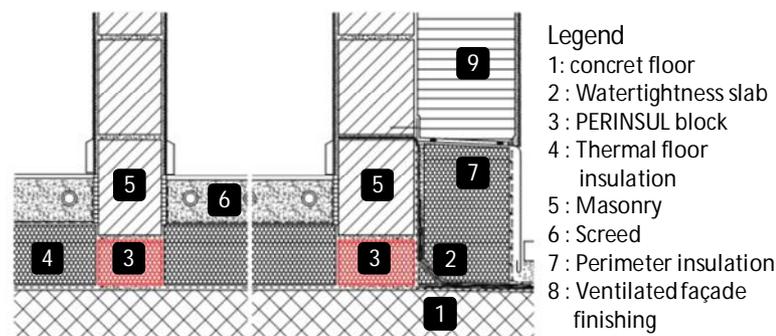


Figure 3. Mise en œuvre des blocs PERINSUL® hors zone sismique, d'après [SGS 13-1], [SGS 13-2].

3. Construction de la campagne d'essais

3.1 Définition des corps d'épreuve

Afin de mettre en évidence des comportements éventuellement différents en fonction de l'élanement du mur de contreventement, deux rapports hauteur sur longueur sont testés [FOUR 15]. Le premier rapport est de 0,8 représentant des murs "bas", $h=2,70$, $L=3,40$ m (entre nus extérieurs de chaînages) par exemple. Le deuxième rapport est de 2, représentant des murs "hauts", $h=2,70$ et $L=1,35$ m par exemple. Pour les corps d'épreuve les dimensions des murs longs sont $h=1,00$ m et $L=1,25$ m pour la configuration 1 et $h=2,50$ m et L

=1,25 pour la configuration 2. Ces murs sont construits sur des longrines en béton armé ; les aciers en attente pour les chaînages verticaux sont des HA10 qui respectent les prescriptions des CPMI et de l'Eurocode 8. Les armatures longitudinales des chaînages sont réalisées de 4 HA10 également. Les armatures transversales sont constituées de cadres en HA6 tous les 15 cm respectant ainsi les prescriptions de l'Eurocode 8 ou des CPMI [AFNOR 05-2], [DHUP 15]. La continuité entre les armatures des chaînages verticaux et horizontal supérieur est réalisée par des HA10 avec longueur de recouvrement respectant les prescriptions règlementaires. La réalisation de ces corps d'épreuve est confiée à une entreprise de maçonnerie. La mise en œuvre de la couche de blocs PERINSUL respecte les prescriptions fournies par Pittsburgh fabricant des blocs PERINSUL. La continuité des chaînages verticaux avec la longrine est assurée par les acier en attente et le aciers des chaînages verticaux et par la découpe à la scie des blocs de PERINSUL au gabarit des réservation des blocs de béton d'extrémité (rond de diamètre 150 mm). La figure 4 rend compte de la réalisation de ces corps d'épreuve. Le tableau 2 quant-à lui rend compte des caractéristiques du mortier et du béton des chaînages des corps d'épreuve.



Figure 4. Réalisation des maquettes murs hauts et bas, mise en place du PERINSUL®, réalisation des chaînages avec un béton fluide et contrôle du remplissage des chaînages verticaux à la base.

Tableau 2. Caractéristiques mécaniques du mortier et du béton utilisés.

mortier	épreuves	Résistance en traction Simrupt			Résistance en compression sur volume		
	masse (g)	σ SIMRUPT (MPa)	moyenne (MPa)	écart type (MPa)	σ_c (MPa) (7x7x7)cm ³	moyenne (MPa)	écart type (MPa)
	2899 / 2959 / 3018	2,21 / 2,35 / 2,38	2,3	0,09	20,2 / 20,8 / 25,7	16,7	3
	2881 / 2854 / 2910	1,86 / 1,62 / 1,63	1,7	0,14	13,3 / 17,9 / 17,1	17,8	0,6
	2895 / 2907 / 3021	1,64 / 1,81 / 1,24	1,61	0,22	18,5 / 20,2 / 14,6	17,8	2,9
	2844 / 2837 / 2940	1,24 / 1,21 / 1,47	1,31	0,14	17,3 / 17,5 / 12,3	15,7	2,9
	2916 / 2889 / 2867	1,68 / 1,38 / 1,36	1,47	0,18	16,4 / 17,3 / 17,5	17,1	0,6
	2860 / 2850 / 2815	1,0 / 0,92 / 1,03	0,98	0,06	13,0 / 10,7 / 10,7	11,5	1,3
	moyenne	1,57	MPa	moyenne	17,0	MPa	
	écart type	0,437	MPa	écart type	3,75	MPa	

béton	N° éprouvette	dimensions			rupture	
		d cm	L cm	S cm ²	F kN	sigma MPa
compression	ep 1	15,96	32	200	340	17,0
	ep 2	15,96	32	200	461	23,1
	ep 3	15,96	32	200	470	23,5
fendage	ep 4	15,96	32	200	185,8	2,3
	ep 5	15,96	32	200	240,7	3,0
	ep 6	15,96	32	200	236,6	3,0

3.2 Histoire de chargement et configuration d'essais

Le tableau 4 rapporte le plan d'expérience suivi pour les deux hauteurs de murs, pour les deux types de blocs PERINSUL et pour les deux configurations de charges gravitaires retenues. En effet, deux cas de charges verticales extrêmes ont été définies afin de favoriser soit un phénomène de traction maximal dans le chaînage tendu, soit une présence de compression élevée dans le chaînage comprimé et dans la couche de PERINSUL comprimée.

Tableau 3. Plan d'expérience.

type de blocs isolants	H/L	Force verticale (kN)	Appellation
PERINSUL [®] S	mur bas	0	Sbas
	mur haut	0	Shaut
PERINSUL [®] HL	mur bas	0	HL0bas
		50	HL50bas
	mur haut	0	HL0haut
		50	HL50haut

Dans la mesure où cette campagne d'essais est une campagne préliminaire destinée à valider des comportements génériques de contreventement maçonnés chaînés avec isolation à la base et également pour faciliter la configuration d'essai la charge horizontale est répétée et non alternée. L'histoire de chargement est définie à partir de celle proposée par la norme NF EN 12512 [AFNOR 06] sur la base d'un chargement répété non alterné afin d'identifier séparément les cinématiques d'atteinte de la ruine (cf. figure 5).

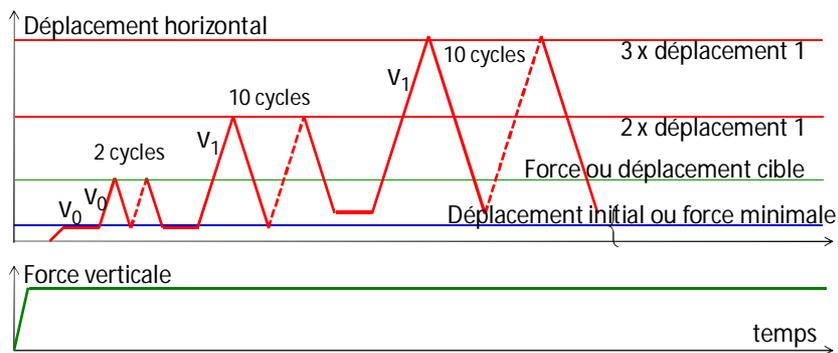


Figure 5. Histoire de chargement par séquences cycliques à amplitudes.

Le chargement est appliqué par un vérin animé par un groupe hydraulique autonome et un système électronique assurant le respect de la consigne de pilotage pour la force horizontale. Pour l'effort vertical, il est appliqué par le biais d'un vérin plat (boudruche) dont la pression est fournie par le système d'air comprimé du hall d'essais et une soupape permettant le respect la consigne constante. La souplesse du vérin plat et des plaques de type téflon permettent de laisser libre le déplacement horizontal en tête de mur, voire de sa rotation. La figure 6 rapporte le schéma et une photo de cette configuration d'essai. Les mesures de la force horizontale, de la force verticale, des déplacements globaux, des déplacements relatifs et de rotations sont assurées par des capteurs et une centrale de mesure HBM. Leurs positions sont également rapportées sur la figure 6.



Figure 6. Configuration d'essais et schéma de chargement.

4. Résultats expérimentaux

4.1 Résultats globaux

Le comportement global des murs de contreventement peut être synthétisé sous la forme des courbes force horizontale cyclique croissante appliquée versus le déplacement en tête. La figure 7 rapporte ces courbes avec la trace des chargements cycliques pour le mur HL50bas et pour l'ensemble des corps d'épreuve testés sous forme de courbe enveloppe. Ces courbes montrent une dégradation progressive pendant les dix cycles constituant chaque séquence, mais l'effort repris croit ensuite en changeant de séquence (pour la séquence suivante avec amplitude de la consigne de déplacement augmentée), jusqu'à des déplacements en tête atteignant plus de 40 mm. Un domaine plastique est clairement présent pour tous les murs HL hauts et HL bas, chargés ou non verticalement, traduisant ainsi le caractère ductile du comportement de ces contreventements. Pour les murs "S", un domaine plastique est présent pour le mur bas, mais il est très réduit pour le mur haut. Les raideurs et résistances dépendent de la hauteur de mur et de type de blocs PERINSUL.

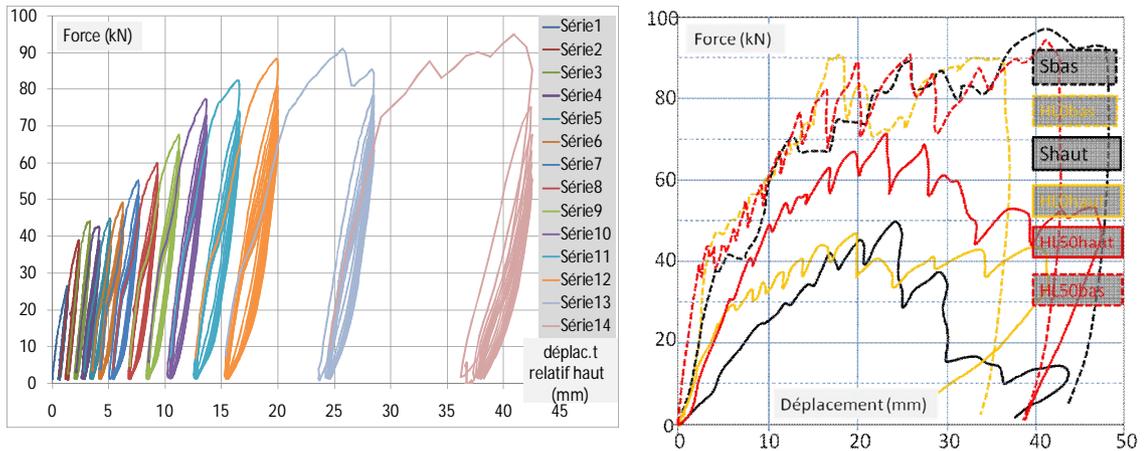


Figure 7. Résultats expérimentaux globaux, courbe complète HL50bas et courbes enveloppes.

4.2 Cinématique et facies de rupture

Pour les murs haut non chargés avec PERINSUL HL ou S (cf. figure 8), on observe des résistances équivalentes. Le plateau horizontal est plus important pour le mur avec les blocs PERINSUL HL. Les facies de rupture montrent une dégradation en traction dans le chaînage vertical tendu avec également du cisaillement. Les blocs présentent une fissuration perpendiculaire à la bielle comprimée. On observe également des fissures le long des chaînages dans les blocs : scénario 1+3+4 ou 5 (cf. figure 1). La perte de d'effort horizontal repris du mur Shaut en fin de chargement pourrait être associé à un écrasement des blocs PERINSUL S avec un scénario 5.

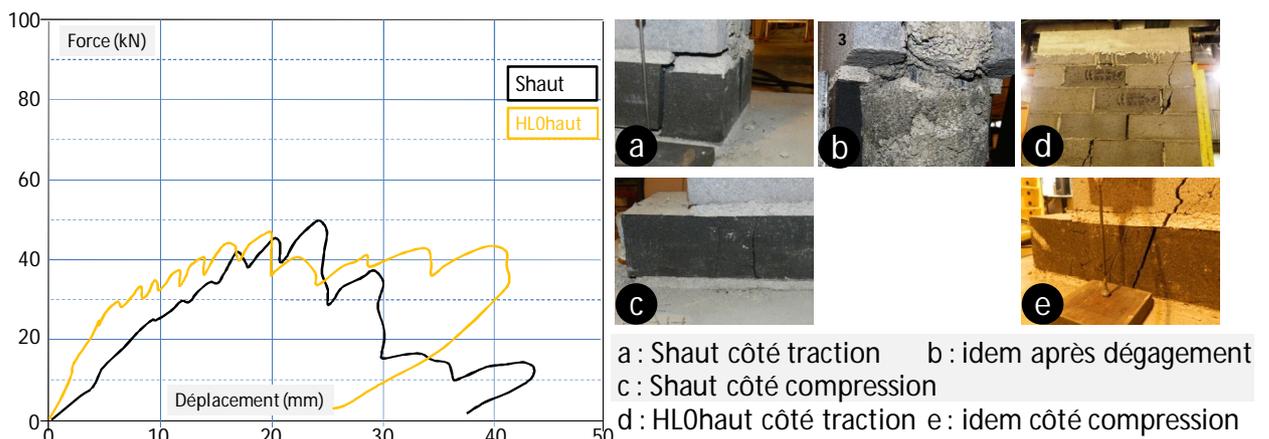


Figure 8. Comportement des murs hauts HL et S non chargés verticalement.

Pour les murs hauts avec les blocs PERISNUL HL chargés ou non chargés verticalement, on observe une différence sensible de résistance (cf. figure 9). Le facies de rupture fait apparaître des dommages coté chaînage comprimé et les blocs se sont séparés suivant une ligne quasi-verticale. On peut assimiler les scénarios à une combinaison des modes 2 et 6.

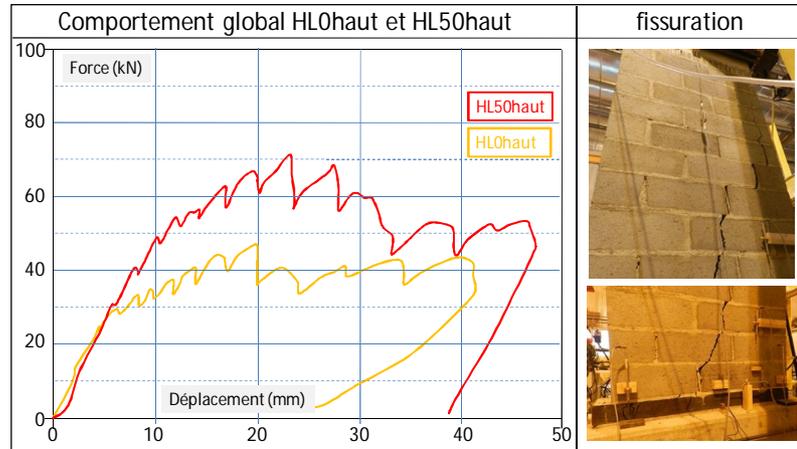


Figure 9. Comportement des murs hauts HL chargés et non chargés.

Pour les murs bas avec blocs PERINSUL S ou HL non chargés verticalement et HL chargé verticalement, les comportements globaux sont proches (cf. figure 10). Les faciès à rupture ou avec dégageement des zones endommagées font apparaître un cisaillement des chaînages verticaux à leur base. Le faciès de rupture est proche du scénario 3.

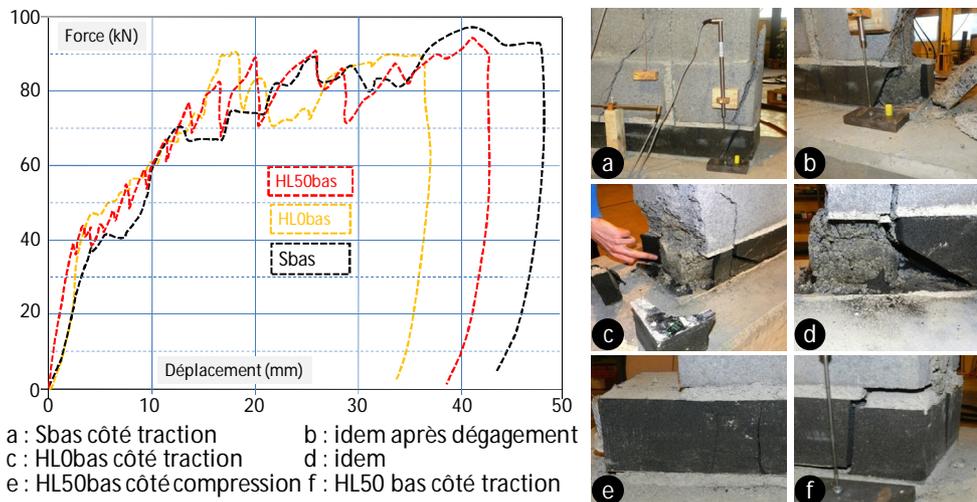


Figure 10. Résultats expérimentaux globaux, courbe complète HL50bas et courbes enveloppes.

5. Comparaisons-synthèse

Le tableau 4 synthétise les principaux résultats issus de cette campagne expérimentale. Il fournit des indications en termes de résistance, de raideur, de ductilité et de modes de rupture, paramètres qui sont à la base de la vérification des murs primaires en situation sismique.

Tableau 4. Paramètres mécaniques des murs de contreventement avec isolation PERINSUL® issus des essais.

	Raideur (kN/mm)	Fmax (kN)	ductilité	mode principal de ruine
Sbas	8	80	3-4	cisaillement chaînages verticaux
HL0bas				
HL50bas				
Shaut	3	40	2	chaînage tendu
HL0haut	5	40	5	
HL50haut		60-50	3-5	cisaillement chaînages verticaux

Ces résultats sont à rapprocher des résistances exigées en situation sismique en fonction de l'ouvrage à réaliser et de ses dimensions, de la sismicité du site et de la nature du sol de fondation. La ductilité observée est à comparer avec les exigences associées aux valeurs de comportement de comportement. Les raideurs seront également à prendre en compte d'une part pour le critère de déplacement entre étages et d'autre part sur l'effet bénéfique d'augmentation de la période propre de l'ouvrage en terme de chargement dynamique.

6. Conclusions et perspectives

Cette campagne d'essais préliminaires a permis de caler une mise en œuvre des blocs PERINSUL HL et S assurant la faisabilité, compatible avec la nécessité d'assurer la continuité des chaînages verticaux, tout en gardant l'efficacité des blocs. Le déroulement des essais a permis de mettre en évidence le comportement de murs de contreventement dans des dimensions proches de celles d'utilisation avec mise en évidence de plusieurs modes de ruine. Avant l'atteinte de cette limite de comportement cette campagne a permis d'obtenir l'effort maximal repris sous sollicitations répétées, les raideurs initiales et sécantes des corps d'épreuve, ainsi que l'étendue du domaine de fonctionnement plastique de ces maquettes. Les valeurs obtenues sont à comparer avec les valeurs intrinsèques des constituants des maquettes. Les premières analyses montrent que les modes de rupture observés se sont produits à des niveaux de chargement cohérents avec les valeurs de résistance élémentaires issues des Eurocodes et des normes produits, une méthode de vérification a été par ailleurs proposée. Ces éléments associés à des modèles numériques simples devraient conduire à parcourir les différentes configurations correspondant au domaine d'utilisation de tels murs isolés à leur base.

7. Bibliographie

- [AFNOR 05-1] NF EN 1992-1-1, Eurocode 2 - Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : règles générales pour les bâtiments, Octobre 2005
- [AFNOR 05-2] NF EN 1998-1, Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 1 : règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments, Septembre 2005
- [AFNOR 06] NF EN 12 512, Structures en bois - méthodes d'essais - essais cycliques d'assemblages réalisés par organes mécaniques, 10 pages, janvier 2006
- [AFNOR 13-1] NF EN 1996-1.1+A1, Eurocode 6 - Calcul des ouvrages en maçonnerie - partie 1-1 : Règles générales pour ouvrages en maçonnerie, 116 pages, mars 2013
- [AFNOR 13-2] NF EN 1998-1/NA, Eurocode 8 - Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 1 : règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments - Annexe nationale, Décembre 2013
- [DHUP 15] DHUP, Règles de construction parasismiques des maisons individuelles CPMI-EC8 zones 3 et 4 - version intermédiaire du 27 juillet 2015 - 70 pages
- [FOAM 16] Fiches produits FOAMGLAS® PERINSUL S & FOAMGLAS® PERINSUL HL, caractéristiques et domaine d'application, mars 2016
- [FOUR 15] E FOURNELY ET AL, Comportement d'un mur avec à sa base un lit de blocs de PERINSUL soumis à un chargement horizontal composé d'une succession de séquences cycliques à amplitude croissante - parties 1 à 7 - rapport d'essais Plateforme MSGC-Polytech Clermont-Ferrand-16p, 16p,17p, 17p, 18p, 18p, 57 p, juillet 2015
- [JORJ 10] Arrêté du 22 octobre 2010 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite "à risque normal" - version consolidé mars 2016, legifrance.gouv.fr
- [SGS 13-1] SGS Intron Certificatie B.V. Coupure thermique pour maçonnerie – Perinsul S – Agrément Technique Européen d'ETA 13/0004, juin 2013
- [SGS 13-2] SGS Intron Certificatie B.V. Coupure thermique pour maçonnerie – Perinsul HL – Agrément Technique Européen d'ETA 13/0163, juin 2013