

RENUFORCEMENT PARASISMIQUE PAR MATERIAUX COMPOSITES DE POTEAUX, VOILES BA ET DE MURS MAÇONNÉS : LES ENSEIGNEMENTS DU PROGRAMME ANR : IN.PER.MISE

**P. HAMELIN^a, E. FERRIER^a, L. MICHEL^a, M. QUIERTANT^b,
R. SADONE^b, J.V. HECK^c, R. SALHAOUI^c, J. MERCIER^d,
C. TOURNEUR^d, L. DEMILECAMPS^e**

^a LGCIE INSA-UCBL - ^b IFFSTAR - ^c CSTB - ^d FREYSSINET - ^e VINCI CONSTRUCTION

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte de la recherche

Les textes et décrets d'orientation tels que la loi d'octobre 2008 relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, celle de juillet 1976 en relation avec la directive européenne SEVESO, la circulaire du 26 avril 2002 rela-

tive à la réduction de la vulnérabilité des bâtis vis-à-vis des actions sismiques et le nouveau zonage sismique ont favorisé le développement des techniques de réparation, renforcement, protection, maintenance, contrôle des ouvrages ou bâtiments existants par matériaux composites.[1] [2] [3].

Les procédés constructifs tels que le collage de plats pultrudés ou infusés, l'insertion de joncs dans les zones d'en-

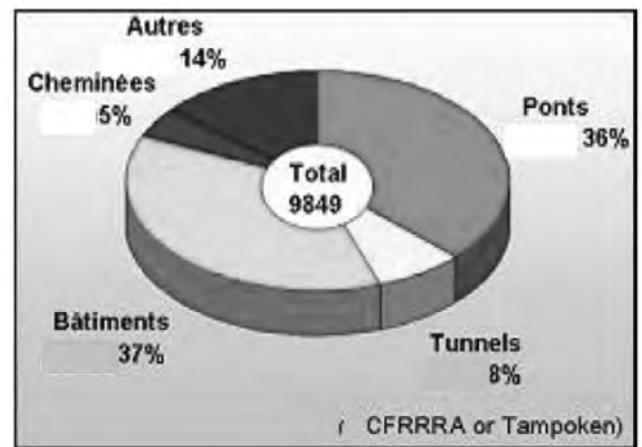
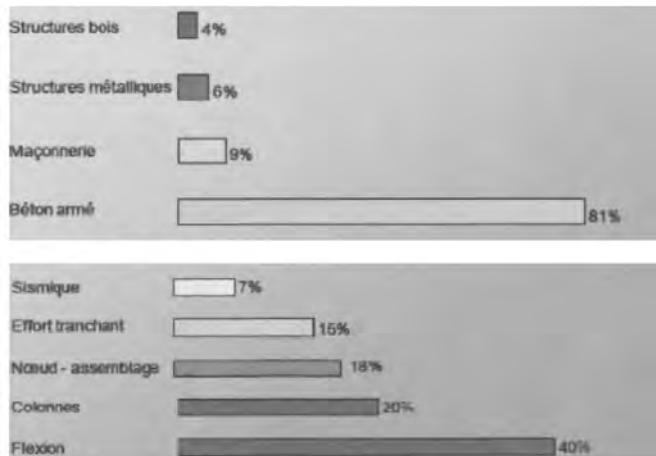


Figure 1 : Les différents domaines d'application

robage (NSM), la stratification directe au contact utilisant des tissus techniques de fibres de carbone, de verre, d'aramide et des matrices epoxydes ou vinyl-ester ont connu un développement particulièrement significatif lors de ces dix dernières années avec un taux de croissance de plus de 30 % par an et un marché mondial estimé à plus de 3 millions de m² par an.

1.2. Objectif de la recherche

Les objectifs du projet de recherche ANR « INPERMISE » *Ingénierie performante pour la mise en sécurité des ouvrages par renforcement composites* portent sur la volonté de faire évoluer les procédés de renforcement par composites en performance et en sécurité vis-à-vis de sollicitations accidentelles tels que les séismes, le choc, l'explosion.

Dans le cas du renforcement parasismique par composites, pour satisfaire des critères de résistance et de ductilité adaptées à l'absorption et la dissipation d'énergie, les objectifs scientifiques et techniques porteront sur :

Le développement de procédés constructifs plus performants de par leurs formulations et conditions de mise en œuvre.

La mise en place d'une méthodologie expérimentale adaptée, à l'échelle du matériau et de la structure, pour mieux comprendre les mécanismes et phénomènes se développant localement et globalement.

La validation de modèles robustes, au regard de l'expérience, transposables sous forme de règles de dimensionnement à l'usage des ingénieurs.

La proposition de dispositions constructives fiables et reproductibles garantissant les conditions d'exécution et les niveaux de performances des opérations de renforcement et de mise en sécurité.

L'ensemble de ces contributions doivent à terme permettre de faire évoluer les recommandations proposées par l'AFGC (recommandations provisoires concernant la réparation et le renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites) [4].

2. ORGANISATION ET MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE

2.1. Organisation de la recherche

Pour atteindre les objectifs visés, le consortium scientifique a associé des partenaires industriels (Vinci construction – Freyssinet) à des laboratoires et centres de recherche (IFSTTAR, CSTB, université de LYON-LGCIE) en considérant les différentes tâches évoquées dans la planification de la recherche de la figure 2.

2.2. Corps d'épreuves

2.2.1. Les voiles béton armé

Deux géométries de voiles béton armé ont été considérés :

élancée ($H/L = 2,5$) et courte ($\frac{H}{L} = 0,67$) pour générer

deux modes de ruine : flexion et cisaillement vis-à-vis du chargement en flexion composé. Le ferrailage retenu correspond au minimum d'armatures recommandé par la norme EN V 1992-1-1.

Le renforcement par composite a consisté à appliquer des bandes de FOREVA TFC® OU ROCC® en face extérieure (figure 3) et d'assurer leurs ancrages dans les massifs de fondations par des mèches d'ancre FOREVA® WFC 400 ou WFC 100. Douze configurations différentes de renforcement ont été étudiées (tableau 1).

2.2.2. Les poteaux béton armé :

Pour une géométrie de poteau (figure 4) avec un ferrailage longitudinal de 0,5 %, un béton C30/37, le principe de renforcement retenu a considéré des renforts par bandes FOREVA® TFC (systèmes PC1-PC2) ou la combinaison de renforts par lamelle FOREVA® LFC et par bandes avec des dispositifs d'ancre spécifiques (Lamèche) (figure 5).

**Tâche 1 : ANALYSE ET EVOLUTION DES PROCÉDÉS CONSTRUCTIFS
COMPOSITES INNOVANTS PROPOSÉS PAR LES SOCIÉTÉS FREYSSINET
ET GTM CONSTRUCTION**

Pour la réparation, la maintenance et le renforcement des ouvrages visant à assurer la sécurité des usagers

**Tâche 2 : APPROCHE SCIENTIFIQUE :
EXPERIMENTATION ET MODÉLISATION**

Sous-Tâche 2.1

Poteaux Renforcés
LCPC

Sous-Tâche 2.2

Voiles Renforcés
LGCIE

Sous-Tâche 2.3

Murs Maçonnés
CSTB

**Tâche 3 : EVALUATION DES PERFORMANCES ET
DES CONDITIONS D'APPLICATIONS**

Bilans des performances

Règles de calcul et de dimensionnement

Dispositions constructives

**VALORISATION – TRANSFERT
POUR LA MISE EN SÉCURITÉ DES INFRASTRUCTURES**

Figure 2 : Les différentes tâches du projet ANR « IN.PER.MISE »

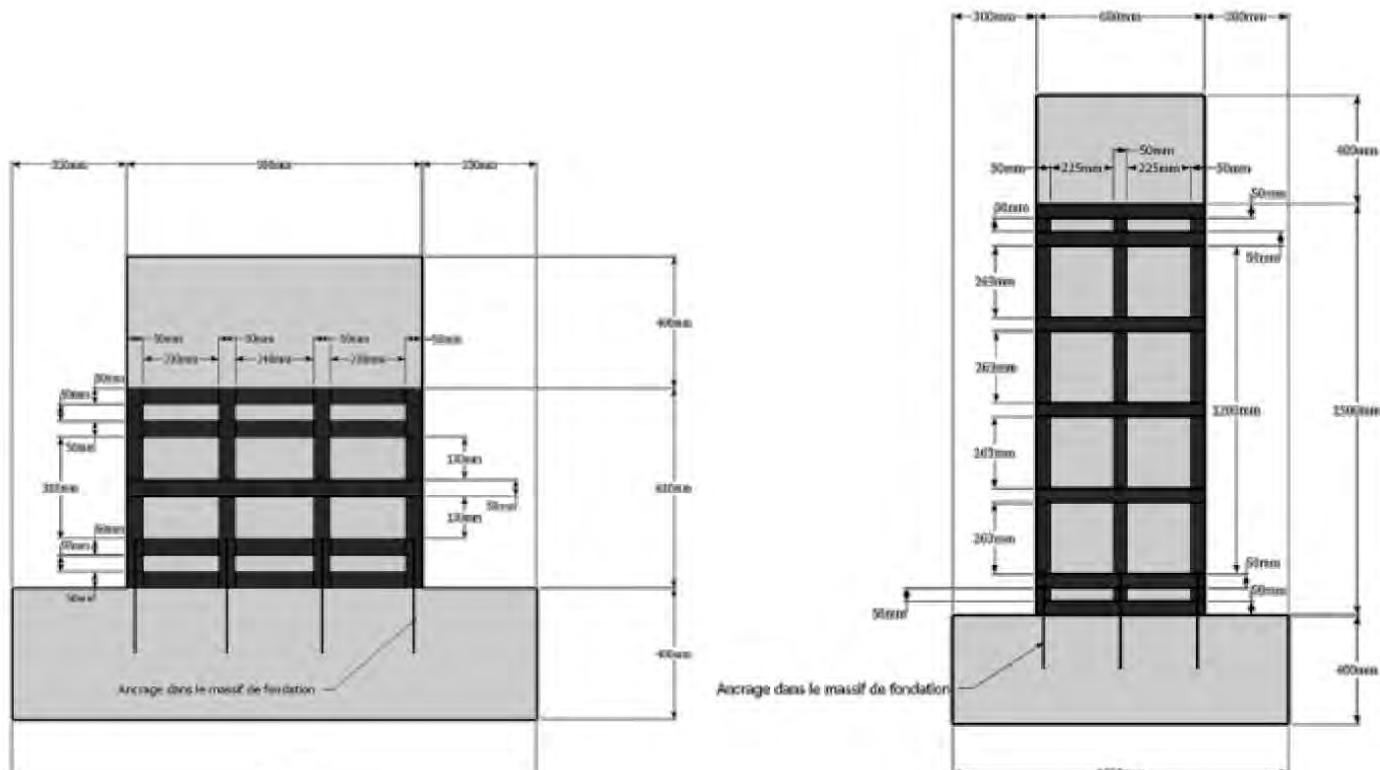


Figure 3 : Exemples de renforcement de deux géométries de voiles(court – élancé).

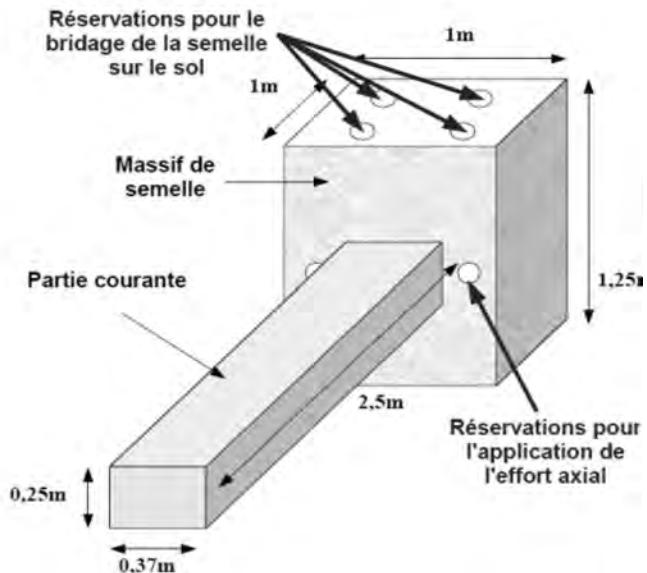


Figure 4 : Plan de coffrage des poteaux BA.

Poteaux	Configuration du renforcement
PRef1, PRef2	
PC1, PC2 et PC1_HAS, PC1_HAS	8 bandes de PRF (dimensions : 300 x 1440 mm ²)
PCL1, PCL2	8 bandes de PRF (dimensions : 300 x 1440 mm ²) Lamelles (50x2500mm ²) : - 6 lamelles / grande face - 4 lamelles / petite face
PCL1A1, PCL1A2	8 bandes de PRF (dimensions : 300 x 1440 mm ²) 4 lamelles 50 x 2500 mm ² sur la petite face Altération de lamelles ancrées et non ancrées sur la grande face selon la configuration de la Figure 2-10

Figure 5 : Différents modes de renforcement de poteaux.

2.2.3. les murs maçonnés

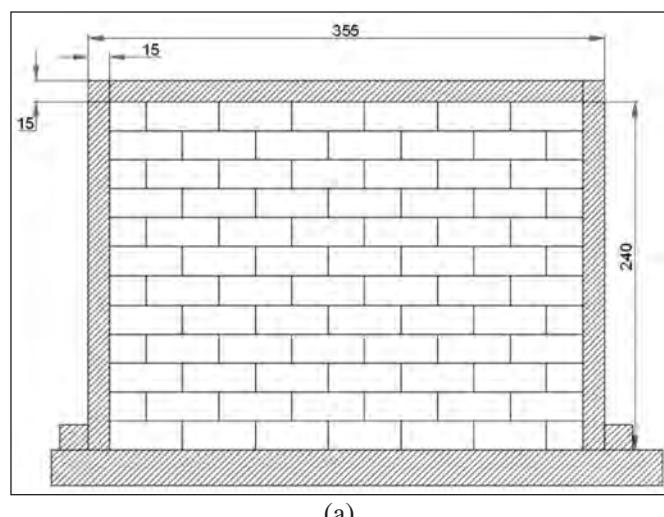
La géométrie des murs constitués de bloc de béton creux B40 à 6 alvéoles (200 . 200 . 500 mm) assemblés par du mortier Bat Express WEBER correspond à une hauteur de 2550 mm (figure 6). Le renforcement par bande composite FOREVA® sera comparé au renforcement réglementaire par chainage vertical BA (4HA10). Différents systèmes d'ancre par mèche, mèches à chas ont été étudiés pour assurer le non basculement du mur.

2.3. Conditions de chargement

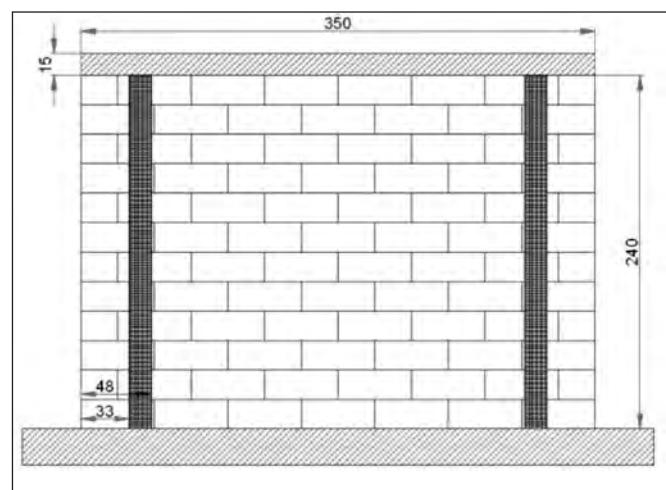
Les différents éléments structuraux (voiles, poteaux, murs maçonnés) ont été testés en flexion composée

(charge normale de 10 % de la résistance en compression correspondant à une estimation des sollicitations induites par la descente des charges) ; charge horizontale en tête des éléments dans le plan, sur les différentes plateformes d'essais des laboratoires : mur de réaction du LGCIE-Université Lyon 1, plateforme du CSTB, du LCPC (IFSTTAR) (figure 7) (figure 8) (figure 9).

Les trajets de changement retenus correspondent aux schémas de la figure 10. Le chargement de compression axial est maintenu constant, la charge horizontale de type « sismique » pilotée en déplacement correspond à des cycles alternés dont les amplitudes évoluent progressivement jusqu'à la ruine de la structure.



(a)



(b)

Figure 6 : Murs maçonnés avec chainage BA (a) et renforts composites (b)

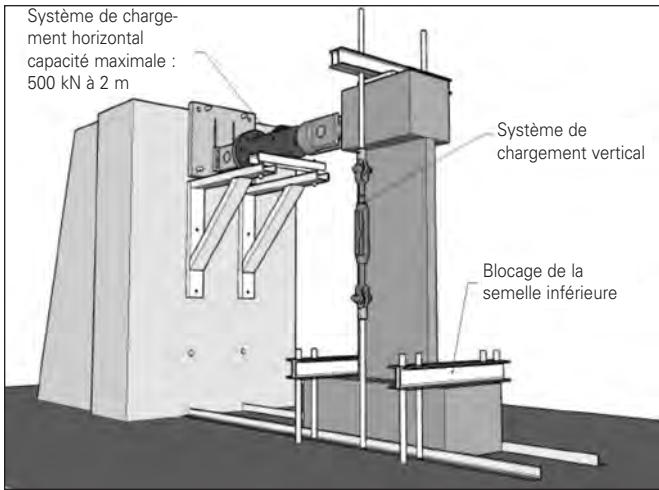


Figure 7 : Mur de réaction du LGCIE-Université de LYON pour tester les voiles.

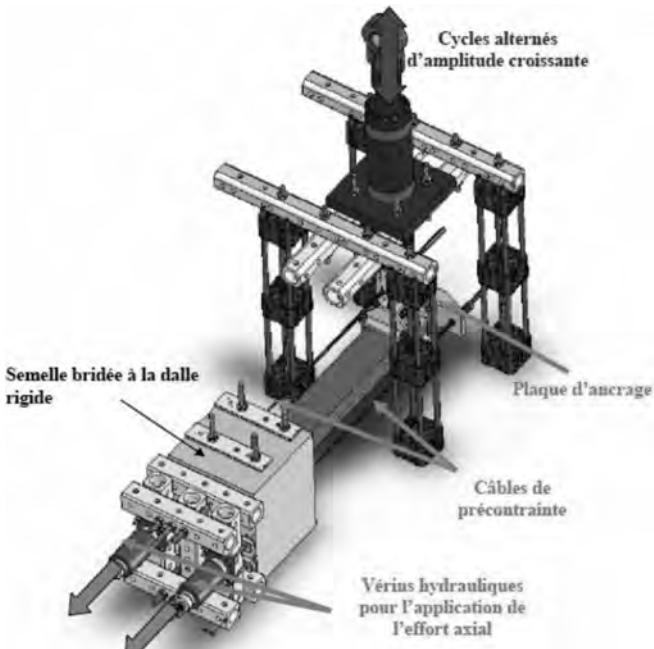


Figure 8 : Montages expérimentaux du LCPC (IFSTTAR) pour tester les poteaux BA.

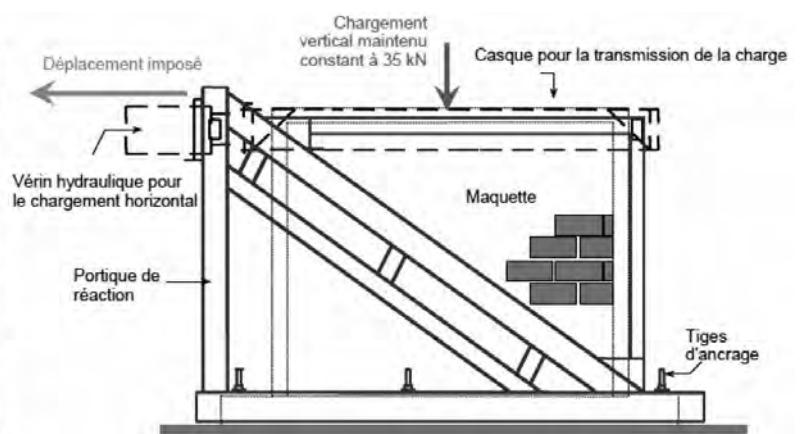


Figure 9 : Dispositifs d'essais du CSTB pour solliciter les maçonneries.

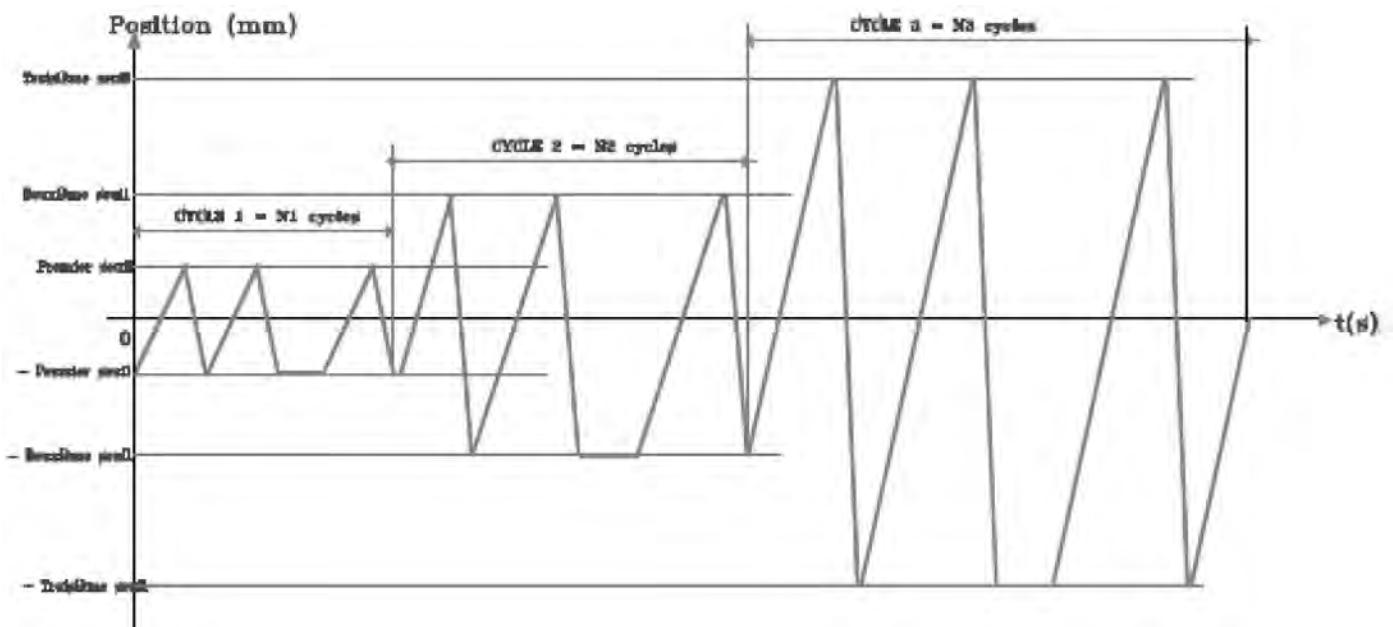


Figure 10 : Cycles de chargement progressif.

2.4. Mesures expérimentales

L'enregistrement des déplacements par capteurs LVDT en fonction de la charge horizontale permet de juger des gains de performance (figure 11) et d'estimer l'énergie dissipée à chaque cycle (figure 14), de la reversibilité des déformations.

Les capteurs ohmiques collés sur les aciers et les faces externes en béton permettent de juger des seuils de plastification des aciers, de la variation de la position de l'axe

neutre de la section, de la chute de rigidité de l'élément ou de la dégradation des conditions d'ancrages.

3. RÉSULTAT – SYNTHÈSE

3.1. Résultats concernant les voiles

L'examen du tableau 1 met clairement en évidence les modifications de comportement des voiles en charge et en déplacement.

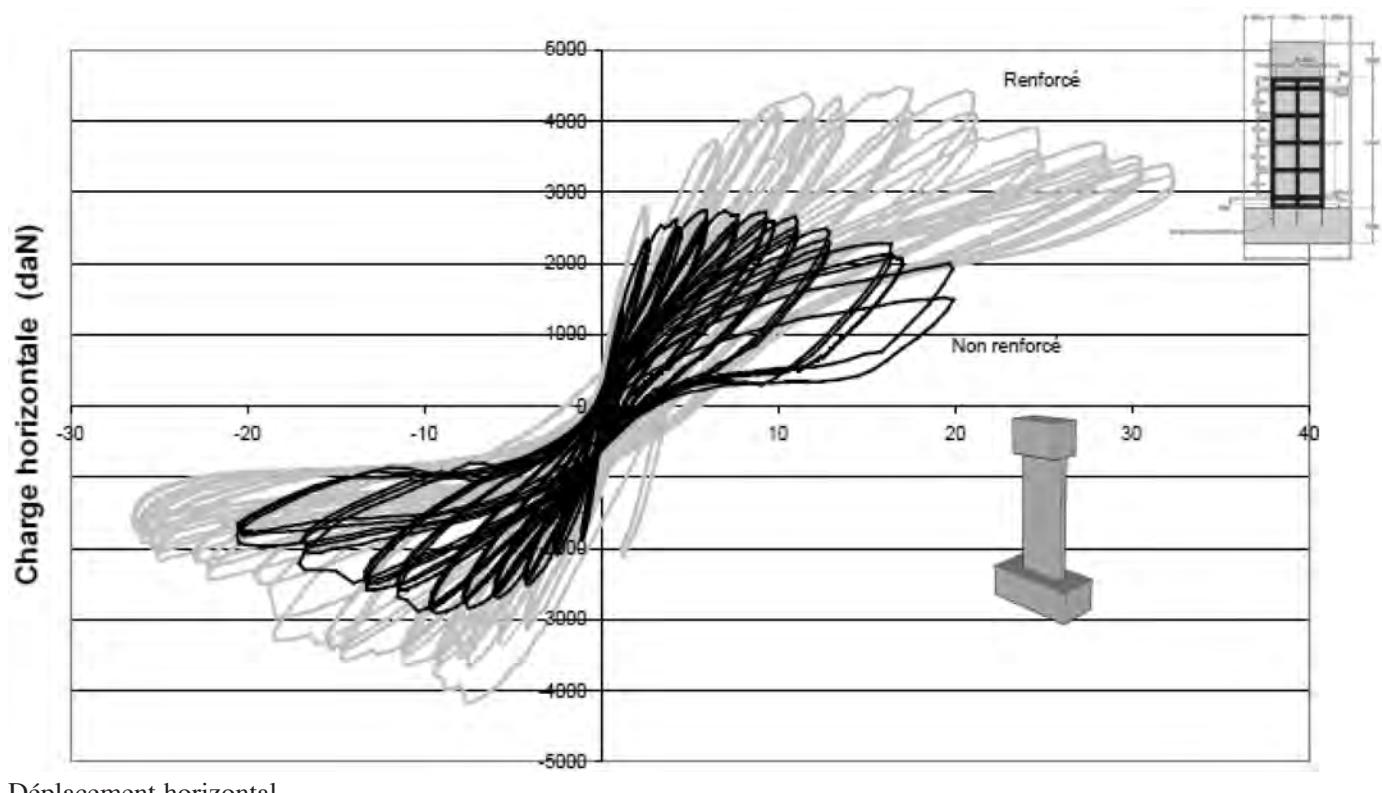


Figure 11 : Exemple de relations charge-déplacement de type sismique.

Voiles courts	S3	SR2	SI	Charge élastique	Déplacement élastique	Charge maximale	Déplacement maximale	Charge ultime	Déplacement ultime	Description	Mode de rupture
				[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]		
	100	1,03	158	4,2	/	162	8,6	/	/	V	
	114	1,03	219	7,43	219	8,0	/	/	/	V	
	71	1,4	138	7,4	/	/	/	/	/	V	
SR4	93	1,6	170	6,5	137	9,9	/	/	/	V	
SR5	97	1,0	185	5,1	132	9,4	/	/	/	V	
SR6	91	0,9	170	5,6	122	9,9	/	/	/	V	

Voiles élancés	SL1	SL2	SL3	SL4	SL5	SL6	Charge élastique	Déplacement élastique	Charge maximale	Déplacement maximale	Charge ultime	Déplacement ultime	Description	Mode de rupture
							[kN]	[mm]	[kN]	[mm]	[kN]	[mm]		
	20	2	25	3,2	25	14	/	/	/	/	/	/	F	
	25	3	40	10	34	24,9	/	/	/	/	/	/	F	
	19	1,1	27	9,6	16	20,5	/	/	/	/	/	/	F	
	25	2,6	41	20	29	31,4	/	/	/	/	/	/	F	
	35	4,0	46	9,6	28	17,7	/	/	/	/	/	/	F	
	35	4,0	57	15,6	35	18,9	/	/	/	/	/	/	F	

Tableau 1 : Bilan performantiel des voiles renforcés.

Les deux courbes (figures 12 et 13) confirment les gains en résistance pour les deux séries de voiles courts et élancés. Par contre, il faut remarquer que les gains en déplacement sont plus limités. Ceci s'explique essentiellement par le fait que le comportement ultime des voiles est contrôlé, après la phase d'arrachement et de rupture des ancrages composites par la fissuration du béton et la plastification des aciers dans la zone d'encastrement.

Il est possible, pour une exploitation ultérieure des résultats, (figure 14), sous forme d'indicateurs d'endommagement, de chercher à évaluer au cours des différents cycles de chargement la variation de l'énergie élastique et de l'énergie dissipée en fonction du drift exprimé en % (figure 16) ou la variation de la rigidité du voile (figure 15)

ou celle d'un indicateur d'amortissement en fonction du drift (figure 17).

3.2. Résultats concernant les poteaux

Dans le cas des poteaux, l'examen des courbes charge-déplacement (figure 18) obtenues pour les différents systèmes de renforcement confirme des gains significatifs en effort maximum et en déplacement ultime. L'efficacité des composites est directement dépendante des conditions d'ancrage (comparaison PCLA2/PCL2) et les mécanismes d'endommagement localisés à la jonction poutre-fondation (plastification des aciers, fissuration du béton, décollement des renforts...) jouent un rôle prépondérant sur la réponse globale du système.

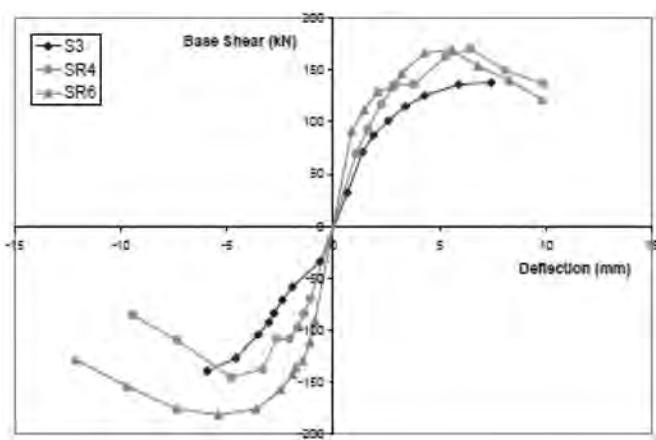


Figure 12 : Relation charge-déplacement des voiles courts non renforcés (S3) et des voiles renforcés (SR4-6).

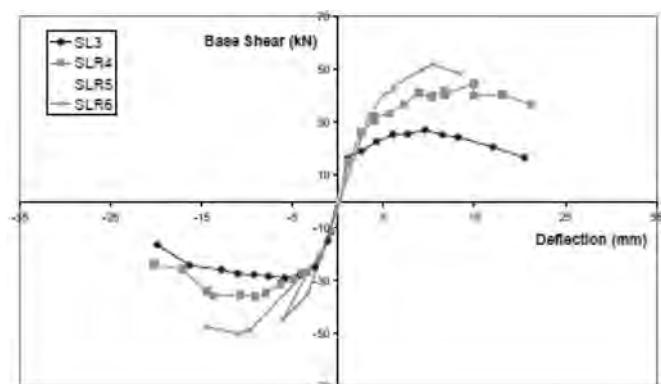


Figure 13 : Relation charge-déplacement des voiles élancés non renforcés (SL3) et des voiles renforcés (SLR4-6).

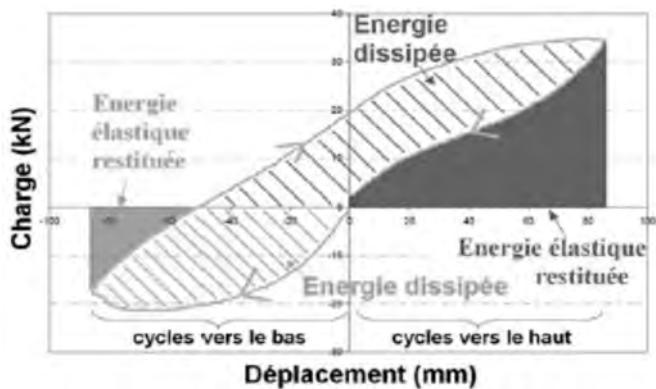


Figure 14 : Energie de déformation au cours du cycle de chargement.

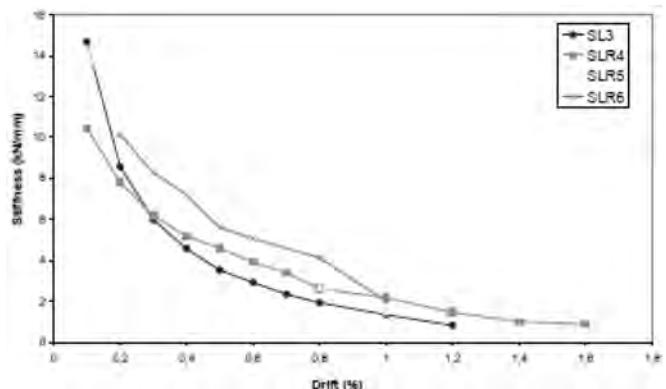


Figure 15 : Variation de la rigidité en fonction l'évolution des mécanismes d'endommagement (voiles).

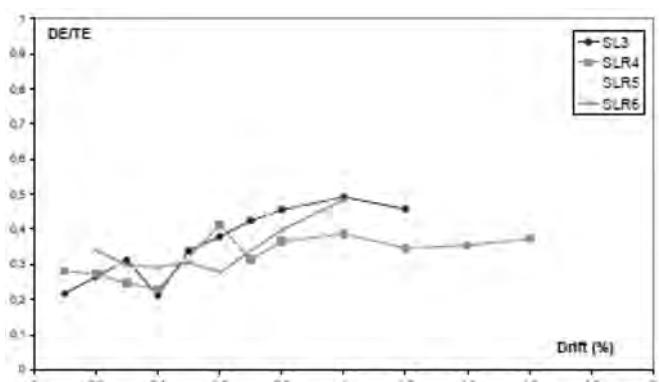


Figure 16 : Rapport des énergies dissipées sur les énergies totales.

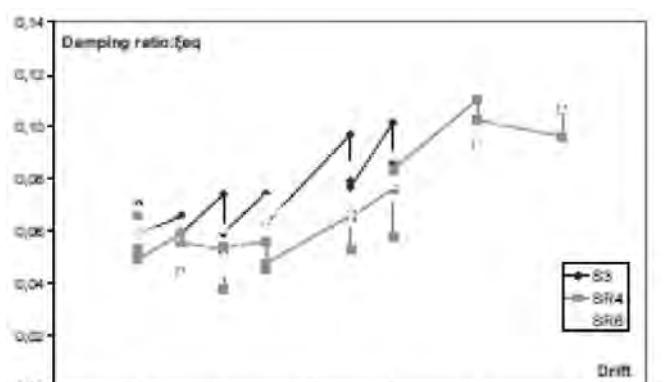


Figure 17 : Amortissement en fonction du drift (voiles).

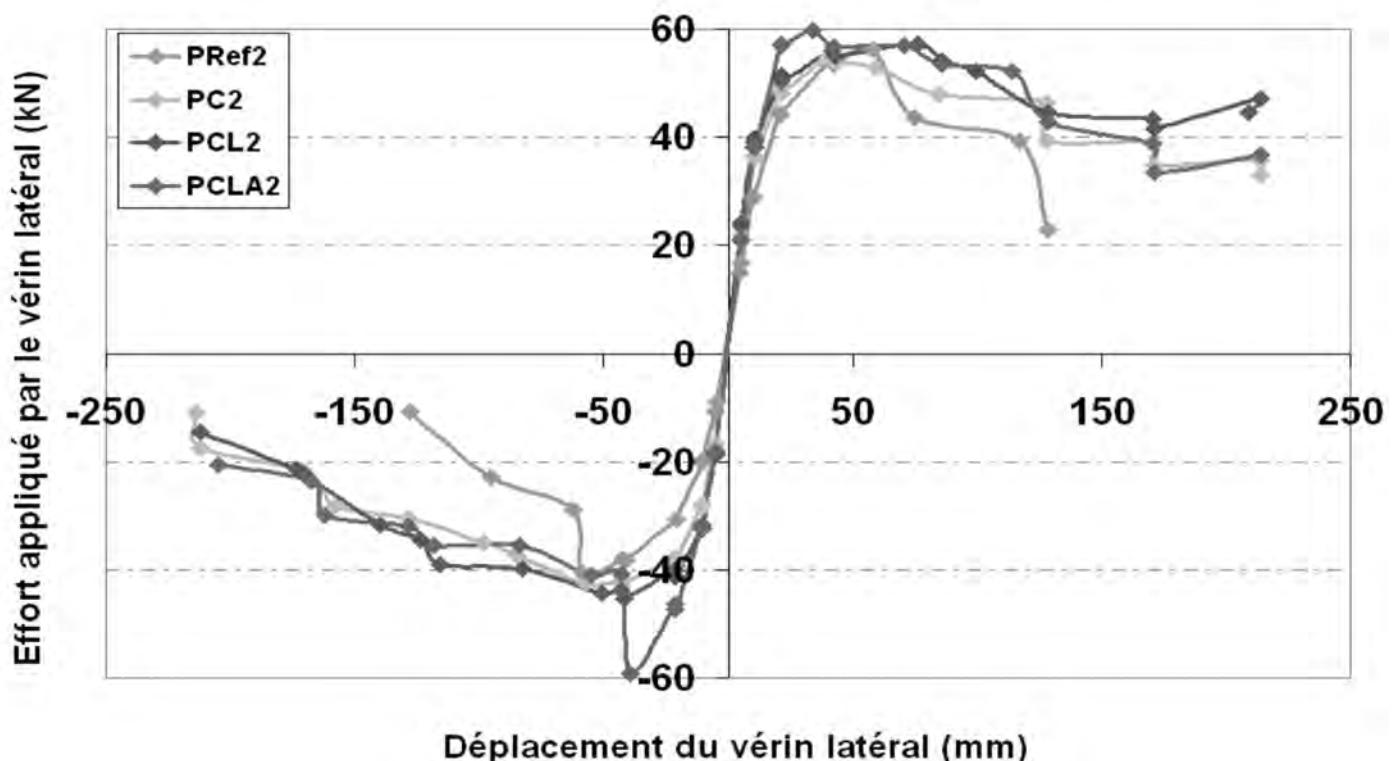


Figure 18 : Relations charge-déplacement entre poteaux non renforcé (PRef2) et poteaux renforcés (PCLA2,PCL2...).

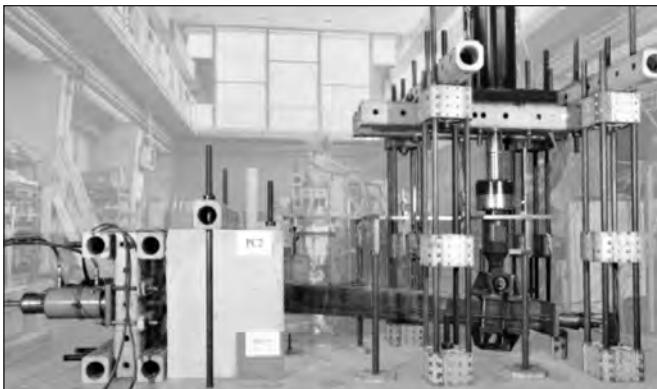


Figure 19 : Phénomène de « rotation de corps rigides » sur des poteaux renforcés.

La figure 19 illustre parfaitement cette notion de comportement ultime essentiellement dépendante des conditions de rotation au voisinage de l'encastrement et de l'absence de « flexibilité » le long du poteau due à une augmentation significative de la rigidité induite par le pontage des fissures.

3.3. Résultats concernant les murs maçonnés

L'examen de la figure 20 montre en première approche, que le renforcement par bandes composites sur les faces externes sont nettement moins efficaces que le chainage vertical en BA. Ceci s'explique essentiellement par les faibles propriétés mécaniques en cisaillement des blocs creux (figure 21).

De récents travaux [5] considérant des renforcements de murs maçonnés sur toute leur surface avec des systèmes composites (TRC : textiles fibres de verre-matrice mortier hydraulique) ont confirmé une meilleure efficacité et la possibilité de se substituer au chainage latéral en béton armé recommandé par les EUROCODES.



Figure 21 : Mécanismes de ruine mettant en cause la résistance au cisaillement des blocs en béton alvéolés.

4. CONCLUSIONS - PERSPECTIVES

Le projet de recherche INPERMISE a contribué à définir, à réaliser, à valider une procédure expérimentale d'évaluation des gains de performance (résistance/ductilité) apportés par des renforts composites (carbone-époxy) sur des sous-éléments structuraux de « référence » : voiles,

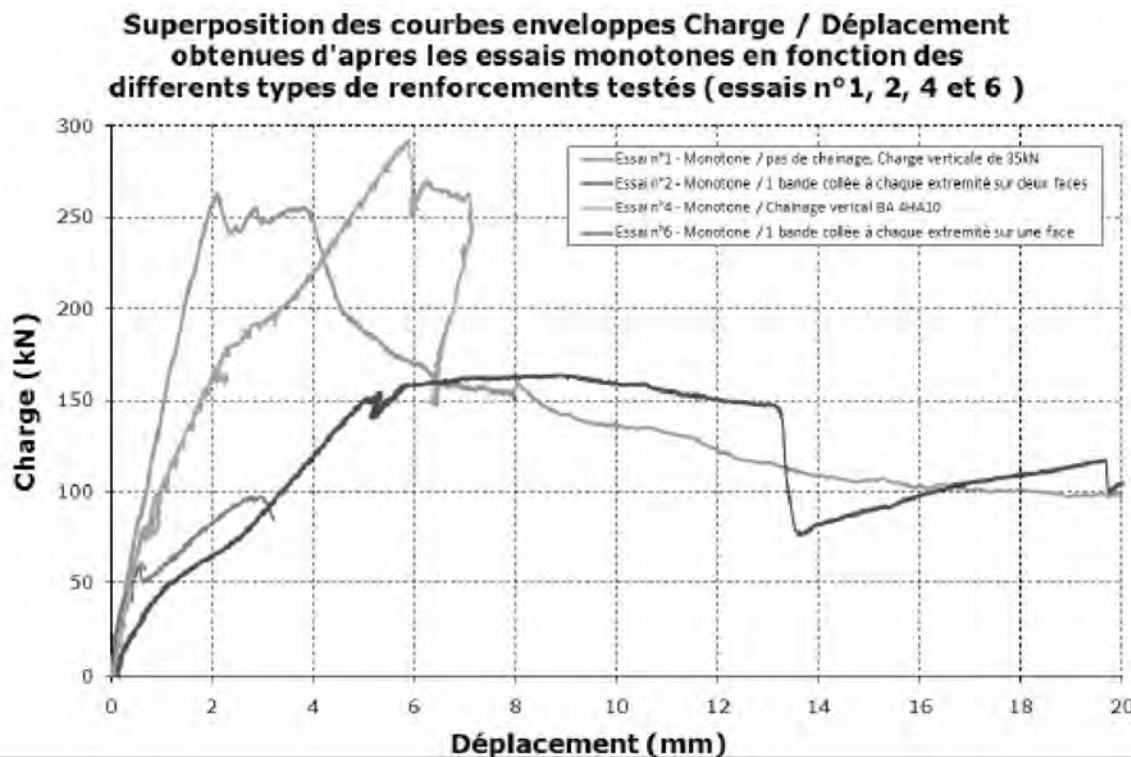


Figure 20 : Charge-déplacement pour différents systèmes de renforcement de murs maçonnés.

poteaux, murs maçonnés. L'analyse du comportement global sous forme de relations « charges-déplacements horizontaux » dans le cas de chargement en flexion composée où l'effort horizontal alterné (traction-compression) croît de façon cyclique jusqu'à la ruine ont permis de confirmer des accroissements significatifs des charges ultimes et de l'énergie de déformation des systèmes renforcés. Il faut remarquer que, tout comme dans le cas du renforcement par composite sous chargement statique, les efforts de traction repris par les composites limitent de façon significative les ouvertures de fissure du béton tendu et se traduisent par une augmentation de la rigidité de flexion des corps d'épreuve (poteau,voile).

Sur un autre plan, le cycle de chargement alterné (traction-compression) horizontal sollicite périodiquement en compression les renforts composites. La très grande différence de module entre composite et béton se traduit par des mécanismes de flambage, micro-flambage sur les faces comprimées. Ces constats justifient l'importance des dispositions constructives et des différents procédés d'ancrages développés par la société Freyssinet pour améliorer l'efficacité du système FOREVA®. L'utilisation de micro-mèches permet d'améliorer le transfert de charge au niveau de l'interface béton-composite dans les zones de béton d'enrobage, de retarder le micro-flambage des plaques. Les mèches d'ancrage standard et les dispositifs d'ancrage spécifiques aux lamelles pultrudés contribuent au renforcement dans les zones d'encastrement (jonction poteaux-voiles/fondations). Il est possible de comparer les performances des différents procédés en cherchant à évaluer des indices performantiels, des indicateurs d'endommagement : indicateur de déformabilité (6), indicateur de ductilité (7), indicateur énergétique (8), coefficient d'amortissement (9)...

Il faut toutefois souligner les limites de validité de ces différents indices déterminés dans la majorité des cas à partir de données expérimentales considérant un comportement global de la structure alors que les différents mécanismes à l'origine de ces réponses « globales » sont multiples et susceptibles d'inter-agir entre eux (fissuration-plastification, localisation de rotules plastiques, redistribution des efforts en fonction de rigidité variable, endommagement par destruction des ancrages...). En conséquence il est recommandé d'identifier l'ensemble des phénomènes physiques gouvernant la réponse en déformation de la structure, de les quantifier expérimentalement pour construire des « modèles mécaniques robustes et réalistes » pouvant être exploités dans des codes de construction. Cette approche pourra faire l'objet de l'un des axes de réflexion du groupe de travail AFGC « renforcement par composite de structures BA par composites » piloté par E. FERRIER et M. QUIERTANT.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. Hamelin. Composite materials for building industry: their potential for applications and technological checks on their development. Textile composites in building construction. Editions PLURALIS. Juillet 1990.
- [2] P. Hamelin. Etat de l'art sur l'utilisation des matériaux composites en génie civil et bilan des principaux freins à leur développement. 16^e conférence technique du chapter Français SAMPE. Novembre 2007. Toulon.
- [3] F. Colomb, H. Tobbi, E. Ferrier, P. Hamelin. Seismic retrofit of reinforced concrete short column by CFRP materials, Composites Structures Volume 82 Issue 4. February 2008 page 475-487.
- [4] AFGC : recommandations provisoires concernant la réparation et le renforcement des structures en béton au moyen des matériaux composites. Février 2011
- [5] M. Le Quan, A. Silarbi, P. hamelin. In plane externally reinforcement as strengthening and seismic retrofitting materials of masonry. CICE 2012. Rome.
- [6] N.K. Gosain, R.H. Brown, J.O. Jirsa. Shear requirements for load reversal on reinforced concrete members. Journal of earthquake engineering Vol 103 n°7. 1977.
- [7] Y.J. Park and A.H.S. Ang. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete. Journal of structural engineering Vol 111. 1985 page 722 – 739.

Production scientifique actuelle en relation avec le contrat de recherche IN. PER.MISE.

- Qazi S., Michel L., Ferrier E., Hamelin P., (2011). Seismic retrofitting of RC Shear wall with external bonded CFRP. 10th International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-10), Avril 2-4 2011, Tampa, (USA).
- Qazi S., Michel L., Ferrier E., Hamelin P., (2011). Experimental investigation of reinforced concrete shear wall strengthened by carbon fibre reinforced polymers (CFRP) strips. Conférence Internationale ICEES 25-26/04/2011 à Islamabad (Pakistan).
- Michel L., Ferrier E., Hamelin P., (2010). Seismic Behaviour of RC Shear Wall strengthened by External Bonded CFRP. 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2010), Beijing, China, 27-29 Septembre 2010.
- Michel L., Si Larbi A., Ferrier E., Hamelin P., (2010). Anchorage System Mechanical Performance Used for External Bonded CFRP Seismic Reinforcement. 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE 2010), Beijing, China, 27-29 Septembre 2010.
- Sadone R., (2011). Comportement de poteaux en béton armé renforcés par matériaux composites et soumis à des sollicitations de type sismique. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est, 305 p.
- Sadone R., Quirant M., Chataigner S., Mercier J., Ferrier E., (2010). Behaviour of an innovative end-anchored externally bonded CFRP strengthening system under low cycle fatigue CICE 2010. 5th International conference on FRP composites in civil engineering, September 27-29, 2010, Beijing, China.