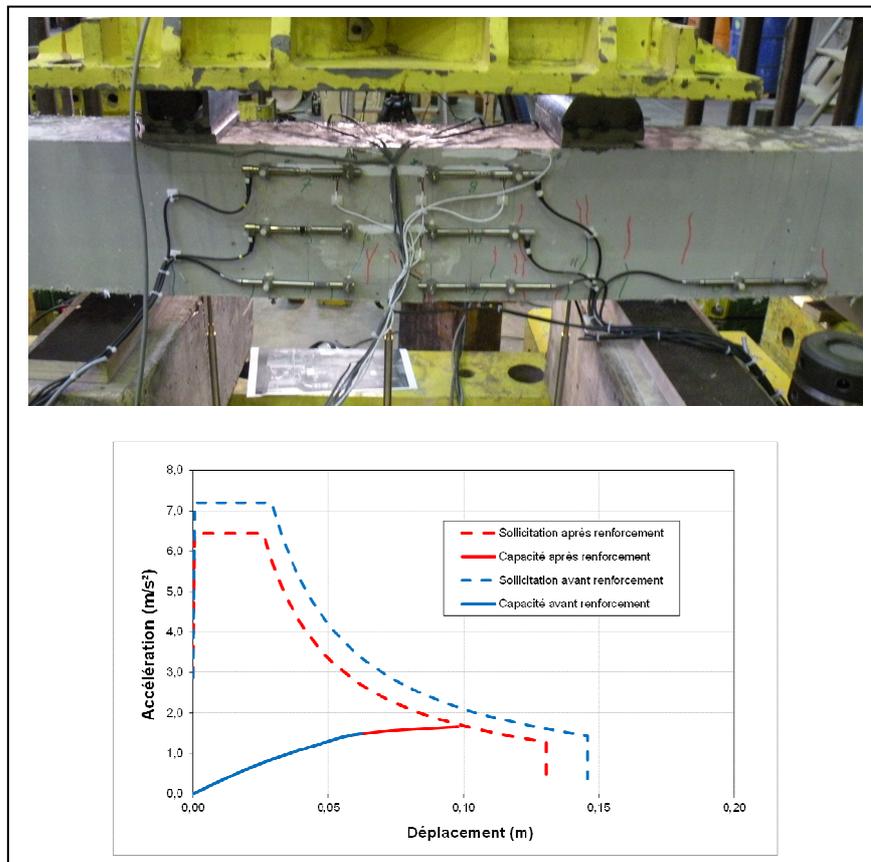


Rapport scientifique du projet / Project Scientific Report

BADIFOPS

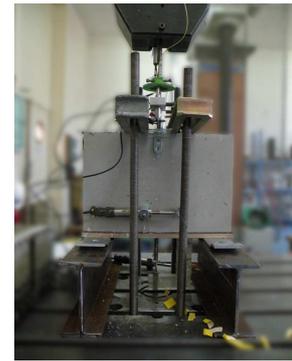
François TOUTLEMONDE, IFSTTAR



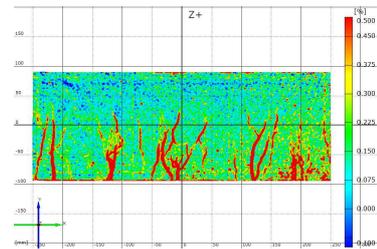
Indice	Date	Etabli par	Vérifié par	Observations
A	01/10/2014	François TOUTLEMONDE	<i>Grégory GENEREUX Pierre MARCHAND Philippe RIVILLON Alain SIMON</i>	<i>+ relecture de : Aghiad KHADOUR Ménad CHENAF Jean-Paul DEVEAUD</i>
B	02/10/2014	François TOUTLEMONDE		<i>Livré aux relecteurs du comité RGCU</i>
C	08/09/2015	François TOUTLEMONDE		<i>Intégration des réponses aux relecteurs</i>
D	10/09/2015	François TOUTLEMONDE		<i>Mise en forme des réponses aux relecteurs selon demande DRI</i>

Résumé du projet BADIFOPS

Le projet de recherche partenariale BADIFOPS (BFUP armés ductiles instrumentés par fibres optiques pour applications parasismiques) soutenu par la mission génie civil et urbain du Ministère en charge de l'écologie s'est déroulé de 2011 à 2014. Coordonnant les efforts du LCPC (devenu IFSTTAR), du CSTB, d'Eiffage TP et du Sétra (devenu Cerema), il s'est efforcé de poser les bases d'une méthodologie de conception ou de renforcement parasismique utilisant les bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP), le cas échéant renforcés d'armatures passives. Cette méthodologie est destinée à s'intégrer dans la révision des recommandations de l'AFGC et dans la future norme de calcul des structures en BFUP, en cours d'élaboration en tant que complément national à l'Eurocode 2.

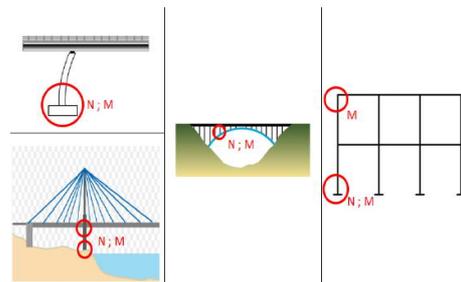


Le développement et l'application aux armatures de l'extensométrie par fibres optiques a permis de confirmer la très faible longueur d'ancrage de ces armatures dans le BFUP et les conditions de développement d'une multi-fissuration maîtrisée du BFUP armé dans les parties tendues d'une structure. Cette confirmation s'est appuyée sur des essais complémentaires d'arrachement d'armatures passives dans des



corps d'épreuve en BFUP massifs ou minces, de traction directe sur des tirants armés, et de flexion simple sur de petites poutres, réalisés sur un matériau représentatif de ceux susceptibles d'être utilisés tant en bâtiment que pour des ouvrages de génie civil. L'interprétation de ces essais, où la répétition des sollicitations sur plusieurs cycles (comme lors de séismes) n'a provoqué aucune dégradation du fonctionnement des armatures passives ni des fibres, a permis de conforter les dispositions de justification des éléments en BFUP armés tant aux états limites de service (maîtrise de la fissuration) qu'aux états limites ultimes (prévision de la capacité résistante selon les mécanismes considérés).

Une réflexion collective a conduit à identifier les éléments les plus critiques d'une conception de bâtiment ou d'ouvrage en BFUP en zone sismique, pour lesquels une justification de comportement ductile s'impose. Ces éléments, soumis à une compression axiale de service, qui peut être considérée comme quasi-statique, et à un moment de flexion combinant l'effet des charges de service et ceux du séisme, sont notamment les extrémités hautes ou basses des poteaux d'un bâtiment, ou celles des piles ou piles/voiles d'un ouvrage d'art ou des pilettes d'un pont en arc. Les éléments horizontaux (planchers de bâtiment, tablier d'ouvrage) devront quant à eux rester dans un fonctionnement élastique sous séisme, et pourront alors faire bénéficier la conception parasismique d'ensemble de la légèreté d'une solution BFUP. En s'appuyant sur les résultats de la littérature et sur des hypothèses de justification raisonnablement extrapolées des recommandations de l'AFGC (édition 2013), un projet de bâtiment et deux projets de remise à niveau d'ouvrages d'art (l'un courant, l'autre non) ont été étudiés et mettent en évidence la capacité des BFUP dans un tel contexte. Ils contribuent à illustrer une méthodologie de vérification qui pourra faire l'objet de recommandations révisées. Des essais cycliques alternés sur poteaux constitués entièrement de BFUP, ou représentatifs de piles en béton ordinaire réparées par un BFUP en paroi, conçus et préparés au sein du projet, doivent confirmer les performances du comportement prises pour hypothèse dans le calcul et valider les exemples d'application et les indications qu'on peut en tirer.



Sommaire

Résumé du projet BADIFOPS.....	3
Sommaire.....	5
1. Contexte et objectifs.....	7
2. Résultats expérimentaux.....	9
3. Conséquences pour le dimensionnement.....	19
4. Analyse de l'emploi des BFUP en ingénierie parasismique.....	21
5. Etude de cas.....	24
6. Conclusions.....	33
7. Pour en savoir plus : publications, rapports et communications issus du projet.....	34
8. Réponses apportées par les porteurs du projet aux observations des relecteurs.....	36

1. Contexte et objectifs

Les BFUP (bétons fibrés à ultra-hautes performances) sont des matériaux développés depuis le milieu des années 1990 notamment en France. Ils se caractérisent par une résistance en compression 5 à 10 fois supérieure à celle des bétons ordinaires, une excellente durabilité et l'emploi d'un assez fort taux de fibres métalliques conférant au matériau une non-fragilité intrinsèque et modifiant le recours habituel aux armatures. Les BFUP permettent ainsi de concevoir des structures très allégées, économes en matière pour des applications aussi variées que des passerelles élancées, des ponts routiers, des bâtiments audacieux. Lorsque l'on souhaite réaliser des poutres de grande portée avec ces matériaux, que ce soit pour des applications bâtiment ou génie civil, on place en général une grande quantité de précontrainte pour exploiter au mieux la grande résistance à la compression des BFUP et pour rester au maximum dans le domaine élastique. Les fibres servent alors à reprendre les tractions induites par les efforts dits secondaires tels que l'effort tranchant ou la flexion transversale. Plusieurs applications récentes ont démontré la pertinence technique et économique de cette association.

Pour des poutres ou des structures de moyenne portée, il est rare que les fibres suffisent pour reprendre les sollicitations principales. Dans ce cas, la solution consistant à renforcer la structure avec des armatures passives, comme on peut le faire en béton armé classique, peut s'avérer pertinente. Des tests récents ont montré que les **BFUP associés à des armatures passives** pouvaient fonctionner en synergie, pour reprendre les efforts de flexion principaux, sans imposer une précontrainte dans des situations où elle ne serait pas économique.

La difficulté de justifier l'association BFUP armatures passives réside dans le **calcul de l'espacement et de l'ouverture des fissures**, ainsi que dans la **démonstration de ductilité** qui en résulte. En effet, lorsque l'on dépasse la contrainte de fissuration du BFUP, les aciers prennent le relais pour reprendre l'effort, mais les contraintes reprises par le béton au niveau de la fissure ne deviennent pas nulles pour autant grâce au travail des fibres. Les formules classiques que l'on peut trouver dans les codes de calcul pour les bétons classiques, ne peuvent donc être transposées en l'état, et les recommandations de calcul actuelles sur les BFUP butent actuellement sur ce déficit de compréhension. Or la compréhension et la résolution de ce problème, à savoir le calcul de l'espacement des fissures, leur ouverture ainsi que la ductilité associée, peut permettre non seulement d'améliorer les règles de dimensionnement à l'état limite de service (ELS) pour assurer la durabilité des structures BFUP – armatures passives, mais aussi de prédire le comportement dynamique et la capacité effective de plastification (coefficient de comportement) de telles structures sous **sollicitations de type sismique**. Cette situation représente un enjeu important pour les bâtiments (notamment ERP) sachant que le nouveau zonage sismique a un impact tant sur l'existant (où le BFUP peut être une solution élégante de renforcement) que sur les nouvelles constructions. A cet égard la diminution de la masse autorisée par les très bonnes caractéristiques mécaniques du BFUP est un atout indéniable pour le comportement d'une structure sous séisme.

Le projet BADIFOPS a donc été proposé pour analyser le comportement des BFUP associés à un taux raisonnable d'aciers passifs en profitant des derniers développements des systèmes de mesure à fibre optique. L'extensométrie par fibres optiques, basée sur le principe d'une mesure distribuée, permet en effet de mesurer de manière quasi-continue la déformation

le long d'une fibre avec une résolution spatiale millimétrique. Outre leur propriété d'immunité électromagnétique, les capteurs à fibres optiques sont peu intrusifs et une résolution optimale était envisageable. Les **objectifs de BADIFOPS** étaient les suivants :

- Constituer la base de justification expérimentale d'une extension des recommandations AFGC sur les BFUP en cohérence avec l'Eurocode 8, dans le domaine de la ductilité, en vue d'applications parasismiques.
- Ajuster les dispositions permettant d'assurer la ductilité des sections de BFUP et la sécurité des ouvrages dans des zones de sismicité faible, modérée ou forte, sans consommation excessive d'aciers passifs.
- Lever les réserves actuelles des recommandations AFGC sur les BFUP dans le domaine de l'analyse linéaire avec redistribution, très utilisée dans le bâtiment, et/ou en préciser les limites d'application.
- Compléter et affiner les règles de dimensionnement à l'état limite de service des structures en BFUP, lorsqu'elles sont armées, pour le contrôle de la fissuration.
- Alimenter utilement la mise au point des recommandations sur les BFUP au sein du groupe TG 8.6 de la *fib*, compte tenu des manques dans le domaine des BFUP industriels armés.
- Favoriser la prise en main du calcul d'ouvrages en BFUP par l'ingénierie spécialisée, de façon à répondre à des demandes architecturales croissantes, tant en bâtiment qu'en ouvrages d'art, et à mieux cerner les domaines d'intérêt des BFUP pour des constructions robustes et légères, en particulier pour des ouvrages et des constructions de bâtiment de grandes portées, en zone sismique.
- Appliquer l'instrumentation interne par fibres optiques (extension de l'application de fibres noyées dans le béton à des fibres fixées le long des armatures) dans une situation où elle est particulièrement appropriée, voire seule à pouvoir accéder à certaines informations, et en la confrontant aux autres méthodes extensométriques lorsque l'inter-comparaison est possible, ce qui ouvre la voie à des utilisations efficaces en surveillance d'ouvrages.

2. Résultats expérimentaux

Le programme expérimental a comporté comme prévu (cf. Tableau 1) dans un premier temps des essais d'identification directe du fonctionnement de l'association armature-BFUP : essais d'arrachement, de traction directe sur tirants armés et de flexion de petites poutres armées. L'exploitation de ces essais est directement utilisable pour l'identification de lois de calcul. Comme prévu par ailleurs dans un deuxième temps, des essais de flexion composée sur éléments de structure armés ont été définis et préparés et les corps d'épreuve ont été fabriqués. Mais la réalisation des essais dans la durée du projet s'est heurtée au retard de livraison des moyens expérimentaux de l'IFSTTAR à Marne-la-Vallée, sans solution alternative possible. Au moment de la rédaction du présent rapport scientifique, la réalisation en est programmée pour fin 2014. Les résultats seront fournis et exploités dans un complément au présent rapport.

L'ensemble des essais ont été réalisés sur un **matériau d'étude** de la gamme BSI® comportant, outre 2,5 % de fibres métalliques, un pourcentage suffisant de fibres de polypropylène pour pouvoir résister à une instabilité thermique dans le cadre d'éléments de structure courants pour un bâtiment soumis à l'incendie. La composition de ce matériau a fait l'objet d'une mise au point nécessitée par un compromis délicat entre résistance visée, teneur en fibres et rhéologie adaptée aux moyens de fabrication. Pour les essais de validation sur éléments en flexion composée, la formulation du BSI « classique » a été retenue pour les éléments représentatifs du domaine ouvrages d'art. Une caractérisation complète du matériau utilisé, en vue de déterminer les paramètres de calcul permettant l'interprétation des résultats, a été réalisée (Fig. 1).

Tableau 1 : rappel des types d'essai prévus et de leurs objectifs

Essais	Objectifs
Essais d'arrachement	* Loi contrainte d'adhérence acier – BFUP * Longueur d'ancrage
Essais de tirants	* Compréhension du mécanisme de fissuration dans le cas de la traction pure
Essais flexion « petites poutres »	* Compréhension du mécanisme de fissuration dans le cas de la flexion
Essais flexion simple et composée	* Validation des lois précédemment obtenues et évaluation des possibilités de rotule plastique lors de sollicitations alternées

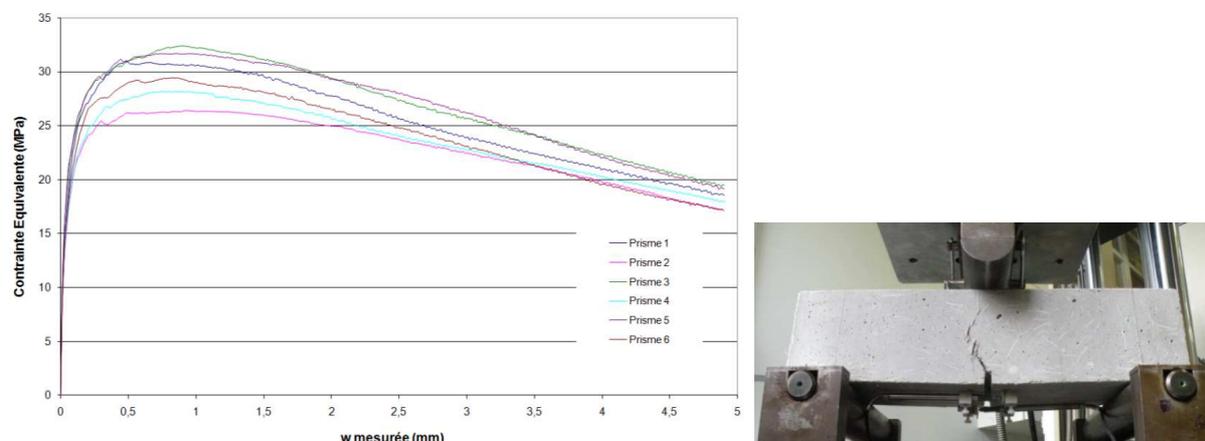


Figure 1 : Caractérisation en flexion 3 points sur prismes entaillés du matériau d'étude

Toutes les campagnes d'essais ont fait l'objet d'essais de mise au point sur un nombre limité de corps d'épreuve, parfois noté « essais prototypes » ou « **essais de convenance** ». L'objectif était de vérifier que la géométrie des corps d'épreuve et des pièces d'appui, le pilotage de l'essai et les moyens d'instrumentation adoptés fourniraient bien les résultats escomptés. Cette disposition n'avait pas été explicitement prévue dans le calendrier du projet. Elle peut néanmoins être considérée comme fructueuse car dans tous les cas elle a conduit à des adaptations dont l'application a été effective pour la série d'essais. Une partie des résultats acquis lors de ces essais a pu également bénéficier de l'exploitation réalisée sur l'ensemble du programme.

Préalablement aux essais, une procédure opérationnelle d'extensométrie des barres d'armature utilisant comme élément sensible et vecteur de l'information des **fibres optiques** a été mise au point et qualifiée. L'utilisation de fibres optiques monomodes équipées d'une gaine mince et rigide (permettant une bonne adhérence entre la protection mécanique des fibres et les barres), insérées dans une engravure millimétrique réalisée le long de la génératrice aplatie des barres, et fixées par remplissage à refus de l'engravure avec une colle peu visqueuse à l'état frais (de façon à éviter le bullage) et rigide à l'état durci, s'est révélée le choix le plus efficace pour assurer un transfert sur une distance inférieure au millimètre de la déformation du support à celle mesurée par la fibre. Le réglage des paramètres de traitement du signal a permis d'accéder à une résolution spatiale du millimètre sur des longueurs actives de l'ordre du mètre, avec une étendue de mesure atteignant 4 mm/m (limitée par la rupture mécanique de la fibre) et une précision de l'ordre du $\mu\text{m}/\text{m}$. Les fluctuations du signal mesuré sont cohérentes avec des variations locales de contraintes associées à la présence des verrous, ce qui illustre la qualité de la mesure et la possibilité de lissages en vue de l'interprétation des mécanismes à l'échelle intéressant l'ingénieur. Des dispositions technologiques de protection de la fibre à la sortie de la zone d'intérêt pour la mesure, permettant notamment de résister aux phases de coulage du béton et de transport des corps d'épreuve, ont également été mises au point. La méthodologie d'instrumentation a été validée par des essais de traction et de flexion sur barre nue (Fig. 2), puis sur armature noyée dans du béton, en particulier par comparaison avec des jauges collées sur armatures et avec des capteurs mesurant des extensions relatives sur le même corps d'épreuve (Fig. 3). Elle a également été validée par comparaison avec les autres moyens d'extensométrie (capteurs externes, analyse d'image) et vérification de la cohérence de l'information délivrée lors des essais du programme.

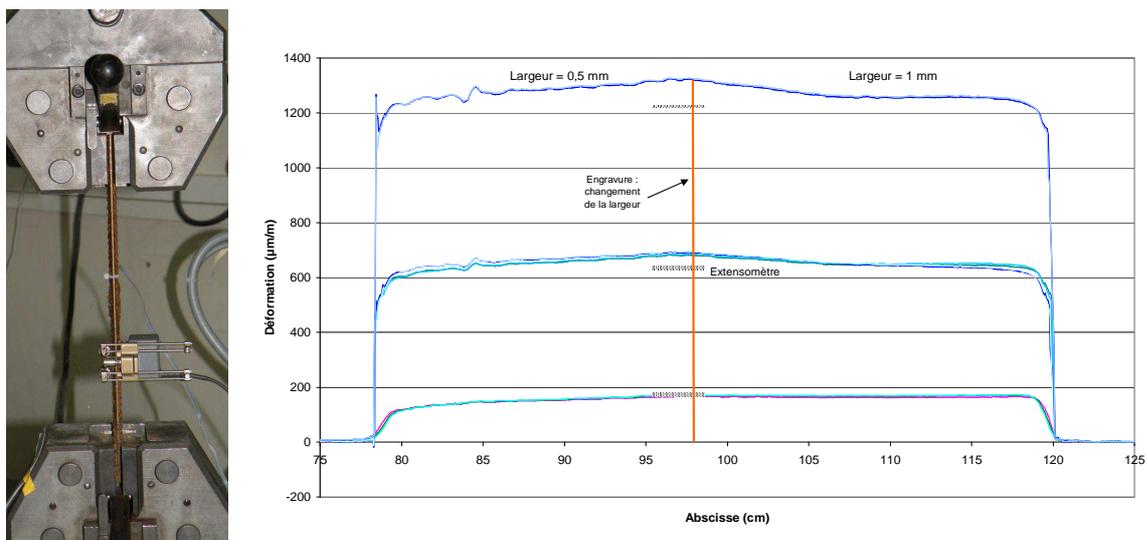


Figure 2 : Qualification de l'extensométrie par fibre optique par comparaison avec un extensomètre lors d'un essai de traction sur armature nue

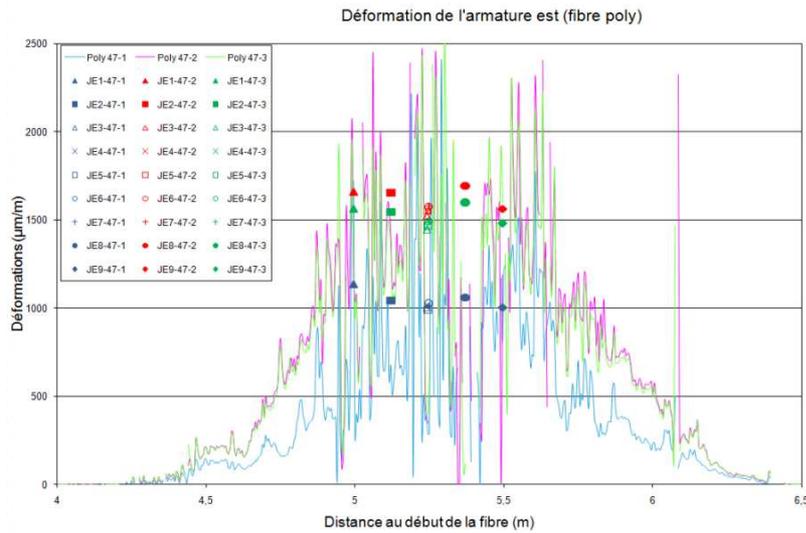


Figure 3 : Qualification de l’extensométrie par fibre optique sur armatures par comparaison avec des jauges de déformation dans un essai de flexion sur poutre en béton armé

Les **essais d’arrachement** ont été réalisés sur des pièces massives (enrobages largement supérieurs à 5 diamètres), avec des armatures HA de diamètre 12 et 16 mm, et des longueurs de scellement égales à 2,5 et 8 diamètres. Ils ont également été réalisés sur des barres HA de diamètre 8 et 12 mm placées dans des plaques minces (enrobages de 20 et 30 mm de part et d’autre de la barre) scellées sur une longueur de 4 ou 8 diamètres (Fig. 4). Les essais ont été menés de façon monotone d’une part, et d’autre part par paliers étagés de 20, 40, 60 et 80 % de la charge ultime statique avec une répétition de 3 cycles redescendant à 10 % de la charge ultime à chaque niveau de charge maximale atteinte (Fig. 5), cette répétition de cycles de chargement étant destinée à détecter un éventuel endommagement progressif de la liaison armature – BFUP au cours des cycles.



Figure 4 : Préparation des coffrages et des armatures avant coulage des corps d’épreuve « massifs » (à gauche) et « plaques minces » (à droite)

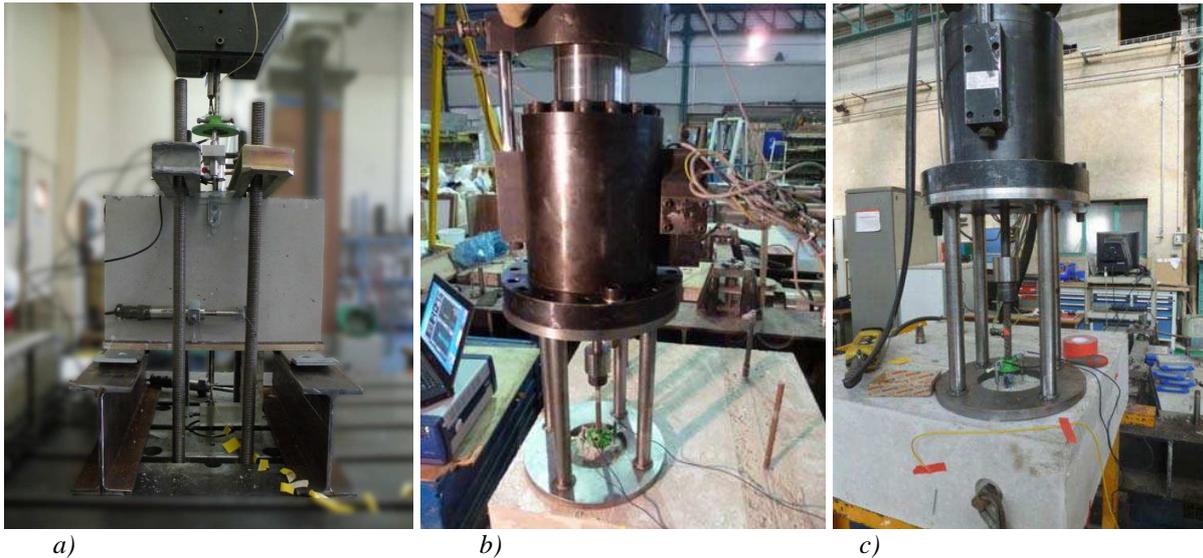


Figure 5 : Réalisation des essais d'arrachement a) sur plaques minces b) et c) sur corps d'éprouve massif

Tous les essais ont conduit à une rupture de la barre d'armature (contrainte de traction ultime dans cette dernière supérieure à 580 MPa) sauf ceux pour lesquels la longueur de scellement était inférieure à 3 diamètres où on a obtenu une rupture par glissement et déchaussement de la barre, correspondant à un cisaillement moyen ultime sur la longueur scellée de plus de 50 MPa. Le mode de réalisation de l'essai (monotone ou avec cycles) n'a pas eu d'incidence qualitative ni quantitative sur le résultat. Une fissuration de fendage concomitante n'a été observée que sur une partie des essais correspondant à une faible épaisseur d'enrobage (1,7 diamètre) sans lien avec la répétition de cycles, l'explication la plus probable résidant dans un défaut de mise en œuvre.

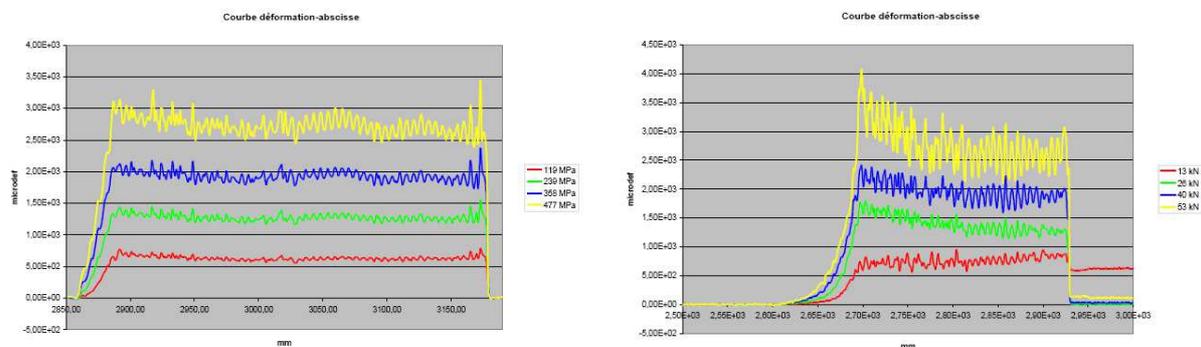


Figure 6 : Déformations mesurées par fibre optique le long de l'armature pour différents paliers successifs de chargement. Evolution linéaire pour de faibles longueurs d'ancrage (à gauche) non linéaire pour des longueurs d'ancrage de 8 diamètres (à droite) pour lesquelles la barre est totalement ancrée et rompt avant de se déchausser.

L'exploitation des mesures par fibres optiques (Fig. 6), aussi bien dans les essais monotones que dans ceux comprenant des cycles répétés (Fig. 7), a permis de tracer de façon précise des courbes cisaillement-glissement intrinsèques pour les très faibles déplacements relatifs entre la barre et l'armature, jusqu'à l'atteinte d'un cisaillement maximum correspondant à un palier (Fig. 8). Les mesures externes ont confirmé la valeur de ce palier, lorsque le mode de ruine obtenu a correspondu à un glissement de plusieurs millimètres, contrairement au cas du déchaussement d'armatures dans un béton ordinaire où on observe une redescende du cisaillement mobilisé lors de glissements importants. Les résultats obtenus

complètent utilement les rares données de la littérature pour actualiser les dispositions d’ancrage du ferrailage dans du BFUP armé (voir §3. ci-après).

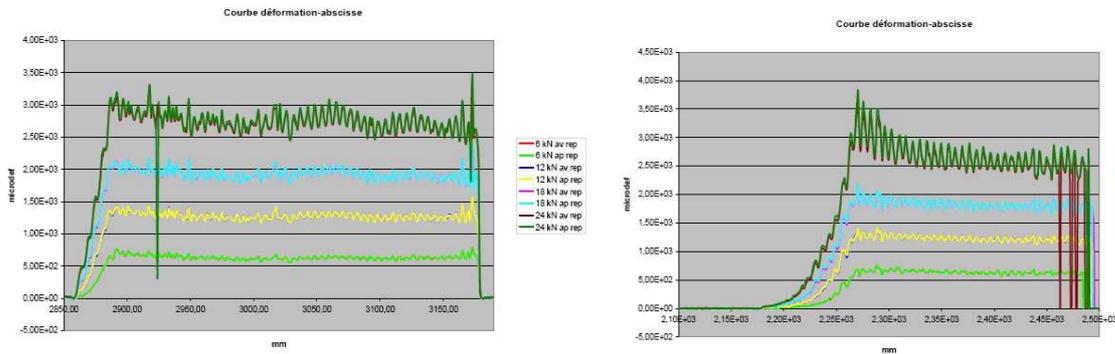


Figure 7 : Déformations mesurées par fibre optique le long de l’armature pour différents paliers successifs de chargement, avant et après répétition des paliers de chargement. Evolution linéaire pour de faibles longueurs d’ancrage (à gauche) non linéaire pour des longueurs d’ancrage de 8 diamètres (à droite) sans endommagement au cours des paliers dans les deux situations.

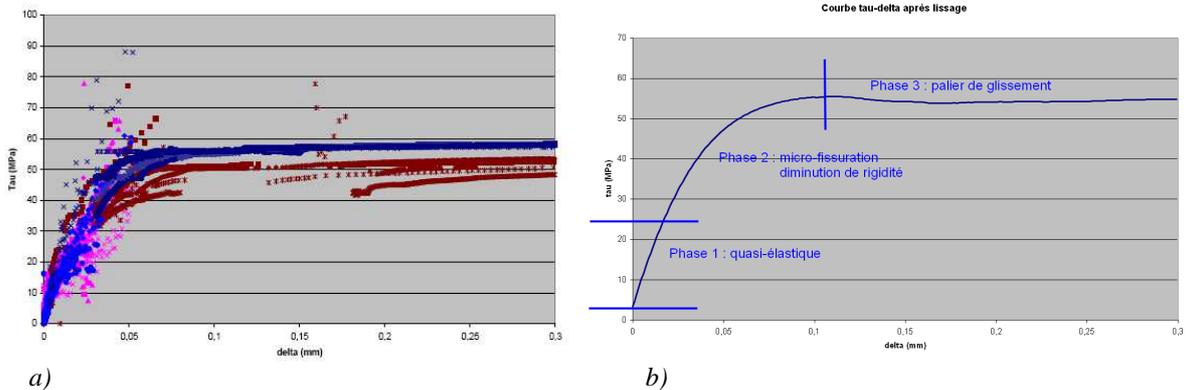


Figure 8 : Contrainte de cisaillement en fonction du glissement : a) exploitation directe des courbes issues des essais d’arrachement « pleine masse » ; b) phases de comportement identifiées sur la courbe intrinsèque moyenne issue de l’ensemble des essais

Les **essais de tirants** ont été réalisés sur 10 corps d’épreuve comportant une armature centrale HA 12 ou HA16. La zone d’étude était de 600 mm, la section carrée des tirants correspondait à un enrobage de 2 diamètres de l’armature centrale (Fig. 9). L’effort était introduit par l’intermédiaire d’une armature de gros diamètre soudée aux deux extrémités de l’armature à étudier, le tirant étant élargi autour de la zone de connexion entre les deux armatures. Les modalités de réalisation de l’accrochage rigide ont limité les efforts parasites de flexion (Fig. 10).

Le comportement observé pour les tirants de la série d’essais a été systématiquement différent de celui du prototype, où une fissuration très répartie avec très faible espacement avait été observée. Pour les tirants de même taille on a observé un effort moindre (en moyenne 81 kN pour les tirants avec une armature HA 12 au lieu d’un effort de 94 kN correspondant à une additivité directe de la capacité de l’armature au stade de sa plastification et de la capacité du BFUP en traction directe), et en proportion également un effort plus faible pour les tirants de plus grosse section (157 kN pour les tirants avec armature HA 16). On a en général observé une fissuration stabilisée avec 7 à 8 fissures dans les 60 cm centraux (Fig. 11). Il n’y a pas eu d’essai anormal, pas de rupture dans la tête au-delà de la zone de

transfert. Il n'apparaît pas de différence notable selon que les essais ont été conduits avec une augmentation monotone de l'effort de traction, et ceux où des cycles répétés (sur le même principe que ceux des essais d'arrachement) ont été appliqués.



Figure 9 : Préparation des corps d'épreuve testés en traction directe, vue rapprochée de l'élargissement des têtes autour des barres de gros diamètre transmettant l'effort, détail de la mise en place du BFUP



Figure 10 : Vue générale du montage d'essais et vue rapprochée de l'instrumentation par extensomètres extérieurs de la zone centrale des tirants

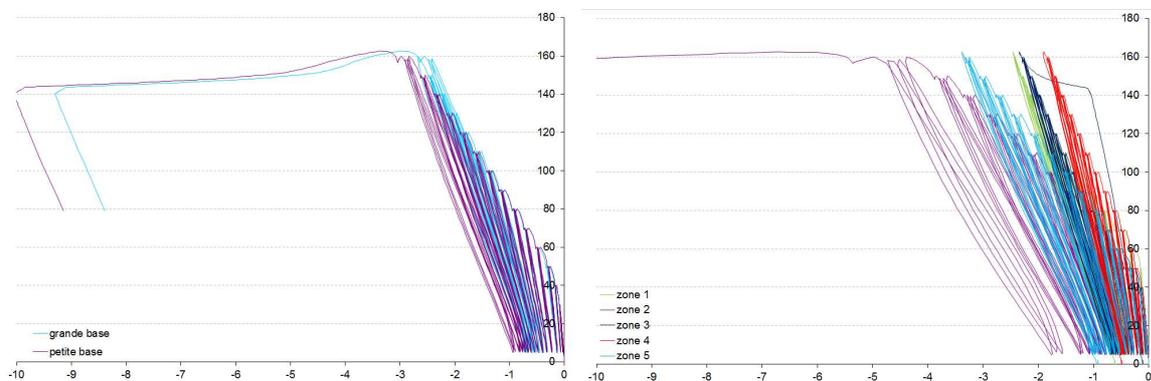


Figure 11 : Homogénéité de l'allongement en fonction de l'effort lors des essais de tirants (extensométrie « grande base » comparée à l'allongement relatif sur des zones d'une dizaine de cm de long)

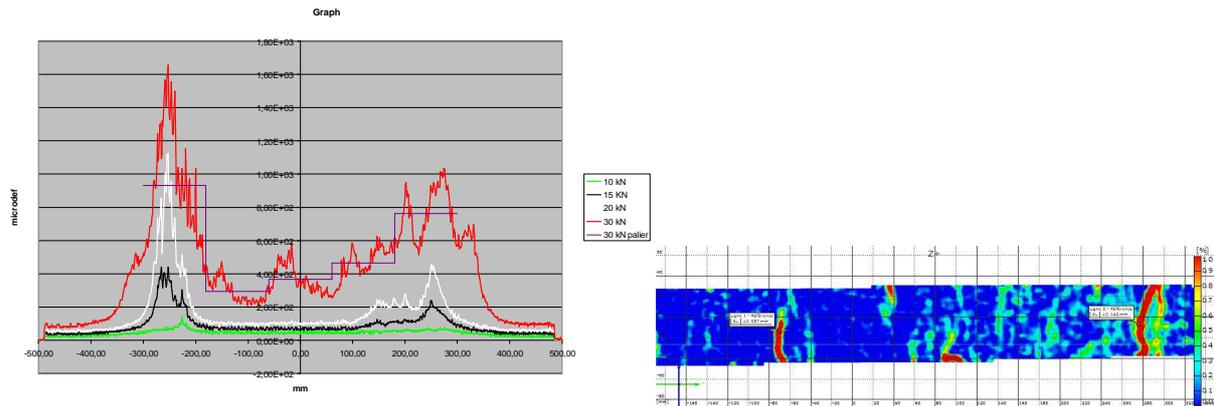


Figure 12 : Déformation répartie et ouverture progressive des fissures : suivi par fibres optiques le long de l'armature centrale (à gauche) et par analyse d'images correspondant à une des faces externes du tirant (à droite)

Les clichés traités par analyse d'images et les mesures par extensomètres et par fibres optiques ont été analysés. Ils permettent de confirmer la distinction entre une phase non fissurée (très courte, les fibres optiques notamment détectent des concentrations de déformations pour de très faibles valeurs de contrainte moyenne dans la section), puis une phase de fissuration stabilisée où les déformations augmentent de façon homogène sur toute la zone tendue avec également augmentation de l'ouverture des fissures principales, et enfin une phase de rupture avec augmentation des déformations localement au droit des fissures les plus critiques (Fig. 12). Ces résultats permettent de valider les hypothèses de justification d'une section de BFUP armé vis-à-vis d'un état limite de service de contrôle de la fissuration (voir §3. ci-après). Il est à noter cependant que les conditions de mise en place avec une possible sensibilité du matériau à ce stade, et les phénomènes de retrait empêché, peuvent contribuer à une contribution moins favorable du BFUP que ce que laisse espérer une identification sur élément non armé.

Les **essais de flexion sur petites poutres armées** ont été réalisés sur 8 poutres constituées du même BFUP, armées de 2 HA 12 ou 2 HA 16 en partie inférieure (Fig. 13), en plus de trois essais sur poutres témoins non armées. Le chargement a été appliqué de façon monotone, ou par application de cycles répétés successifs (sans changement de signe du moment) y compris au-delà du pic d'effort. Les poutres armées ont présenté de fines fissures (retrait empêché) dès avant le début des essais, détectées au microscope (ouverture d'environ 5 μm). Pour les poutres armées, les résultats sont cohérents avec la limite de linéarité calculée (23 kN) mais la contrainte équivalente ultime est plus faible qu'attendu. Ainsi on a obtenu des ruptures vers 75-92 kN pour 114 kN estimés de façon optimiste (pour les poutres avec 2 aciers HA 12) ; et vers 120 à 130 kN obtenus, pour 152 kN estimés (pour les poutres avec 2 HA 16). En fait, le dispositif de maintien de l'instrumentation a créé des sections privées de fibres dans le matériau situé sous la cote des armatures, ce qui modifie la prise en compte du comportement post-pic du BFUP dans la section. La localisation des déformations a été observée avec une fissuration principale vers $\frac{3}{4}$ de l'effort de ruine. L'analyse a pu se faire en section fissurée, en postulant une combinaison BFUP sans fibres en partie basse + armatures + BFUP en partie tendue au-dessus des armatures.

Les moyens complémentaires d'extensométrie (fibres optiques sur armatures, fibres optiques noyées dans le béton, extensomètres, analyse d'images, microscopie optique extérieure) ont fourni des résultats complets et cohérents d'ouverture progressive des fissures en fonction du chargement, permettant de valider les hypothèses d'une vérification à l'état-

limite de service (Fig. 14). Les fissures les plus importantes sont apparues avec un pas de 7 à 10 cm environ, ce qui est de l'ordre de grandeur de 2 longueurs d'ancrage (soit deux fois un peu plus de 3 diamètres) en cohérence avec le résultat des essais d'arrachement (Fig. 15).

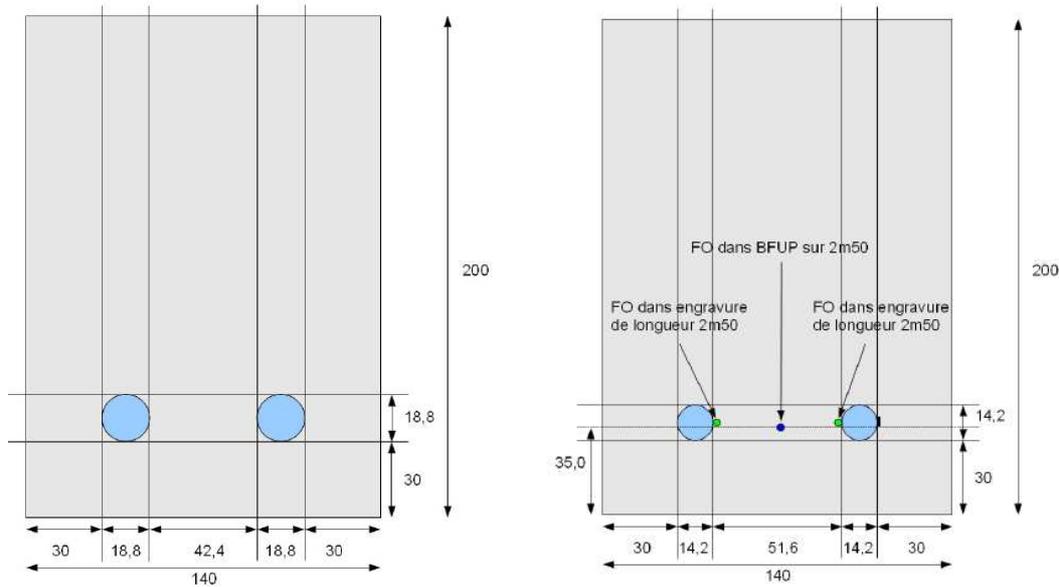


Figure 13 : Section transversale des poutres testées, armées de HA 16 (à gauche) ou de HA 12 (à droite)

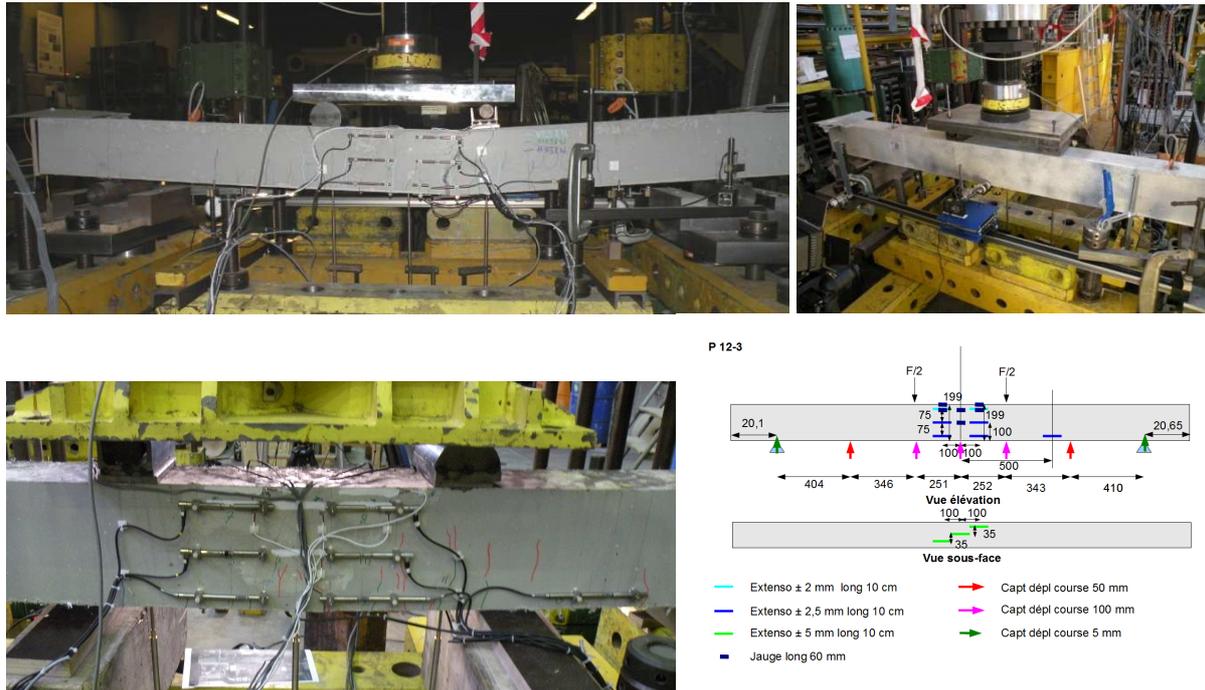


Figure 14 : Essais de flexion sur petites poutres rectangulaires armées, relevé de fissures, jauges et extensométrie externe

Les essais avec répétition de cycles ont été conduits selon le programme suivant : montée jusqu'à la flèche élastique, puis jusqu'à 1,5 fois la flèche élastique, basculement du pilotage en déplacement mais en vérifiant la force (pour qu'elle reste supérieure à un minimum de 1 kN), augmentation par paliers de flèche jusqu'à la rupture et au-delà par multiples de la flèche élastique (Fig. 16). On n'a observé aucune hystérésis dans les cycles

réalisés (pas d'endommagement / pas de dissipation). La force maximale est restée identique et la courbe effort-flèche enveloppe est restée la même que dans les essais statiques (Fig. 17).

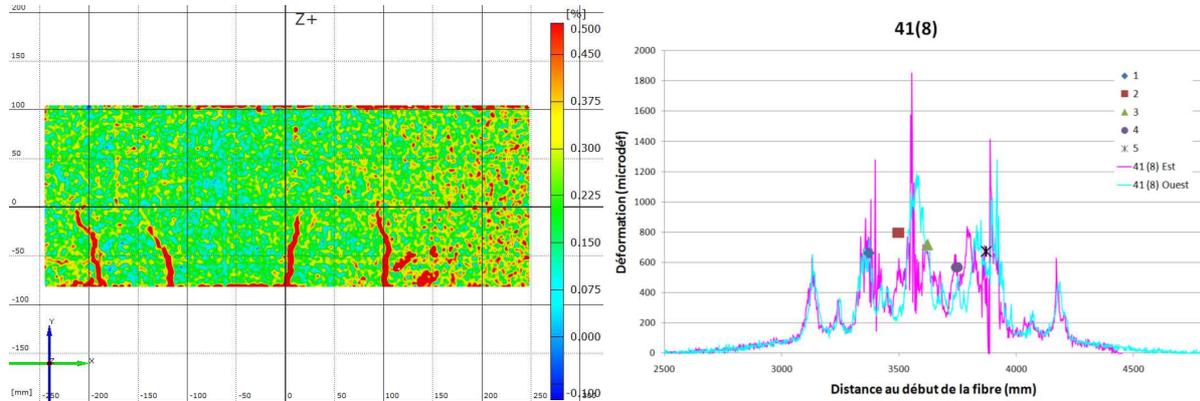


Figure 15 : Analyse des déformations réparties et de la fissuration par analyse d'images de la face externe (à gauche) et instrumentation des armatures par jauges et fibres optiques (à droite)

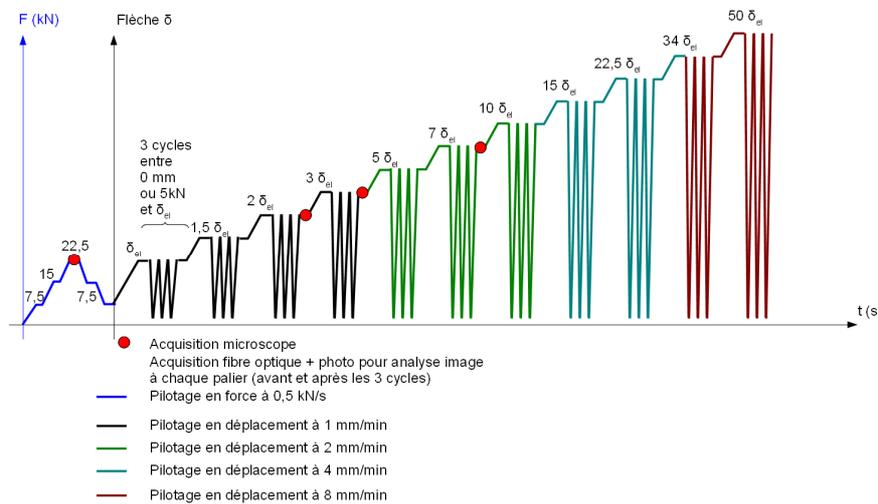


Figure 16 : Programme de chargement et pilotage pour les essais avec trains de cycles répétés

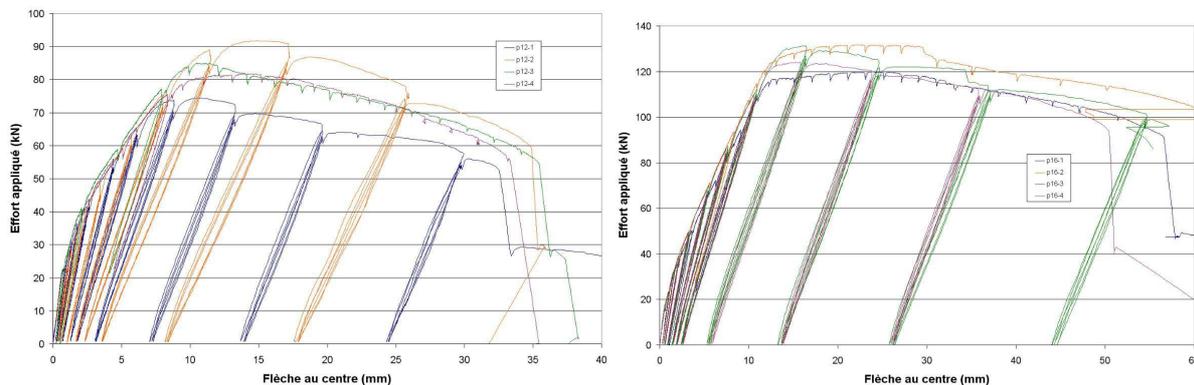


Figure 17 : Courbes effort-flèche correspondant aux poutres armées d'armatures HA 12 (à gauche) et d'aciers HA 16 (à droite). L'application ou non de trains de cycles progressifs répétés ne modifie pas la courbe enveloppe générale représentative des résultats globaux.

Le programme expérimental sur corps d'épreuve représentatifs soumis à une sollicitation complexe de **flexion composée** a fait l'objet d'une réflexion importante liée aux types d'éléments en BFUP pour lesquels la justification de ductilité serait critique vis-à-vis de la conception ou du renforcement de l'ouvrage. La présence d'une compression axiale associée à un moment alterné issu de l'action sismique est confirmée pour de tels éléments (pieds de poteau de bâtiment, jonctions poteaux-planchers, jonctions pilettes - arc) que l'on peut envisager réalisés en BFUP seul. La représentativité de l'encastrement a paru préférable avec un corps d'épreuve constitué d'un poteau mince, de section rectangulaire, connecté de façon monolithique à une semelle massive, par rapport à l'essai sur poutre initialement envisagé. Pour les applications dans le domaine des ouvrages d'art, la situation d'un chemisage BFUP autour d'un noyau de béton ordinaire armé a paru importante, d'où des corps d'épreuve « mixtes » de dimensions plus importantes. Cette partie du programme s'inscrit dans la lignée des travaux de B. Massicotte à Polytechnique Montréal. Le nombre de paramètres a été restreint pour conserver une faisabilité raisonnable et leur valeur (taux de compression axiale, ferrailage longitudinal, ferrailage transversal...) a été fixée pour éviter le flambement du corps d'épreuve et assurer un maximum de représentativité.

A la date de rédaction de ce document, les corps d'épreuve fabriqués en totalité depuis février 2014 sont en attente de pouvoir être testés sur la dalle d'essais de l'IFSTTAR (Fig. 18). Le résultat des essais (essais de référence monotones et essais combinant une compression axiale figée et une flexion transversale alternée, selon un protocole assez proche des essais réalisés dans le cadre du projet ANR Inpermise, par exemple) doit notamment permettre de quantifier la ductilité des éléments et leur capacité, par rapport à des structures traditionnelles respectant les dispositions de l'Eurocode 8. La ductilité ainsi quantifiée est directement valorisée dans les exemples de projet présentés en §5. ci-après.

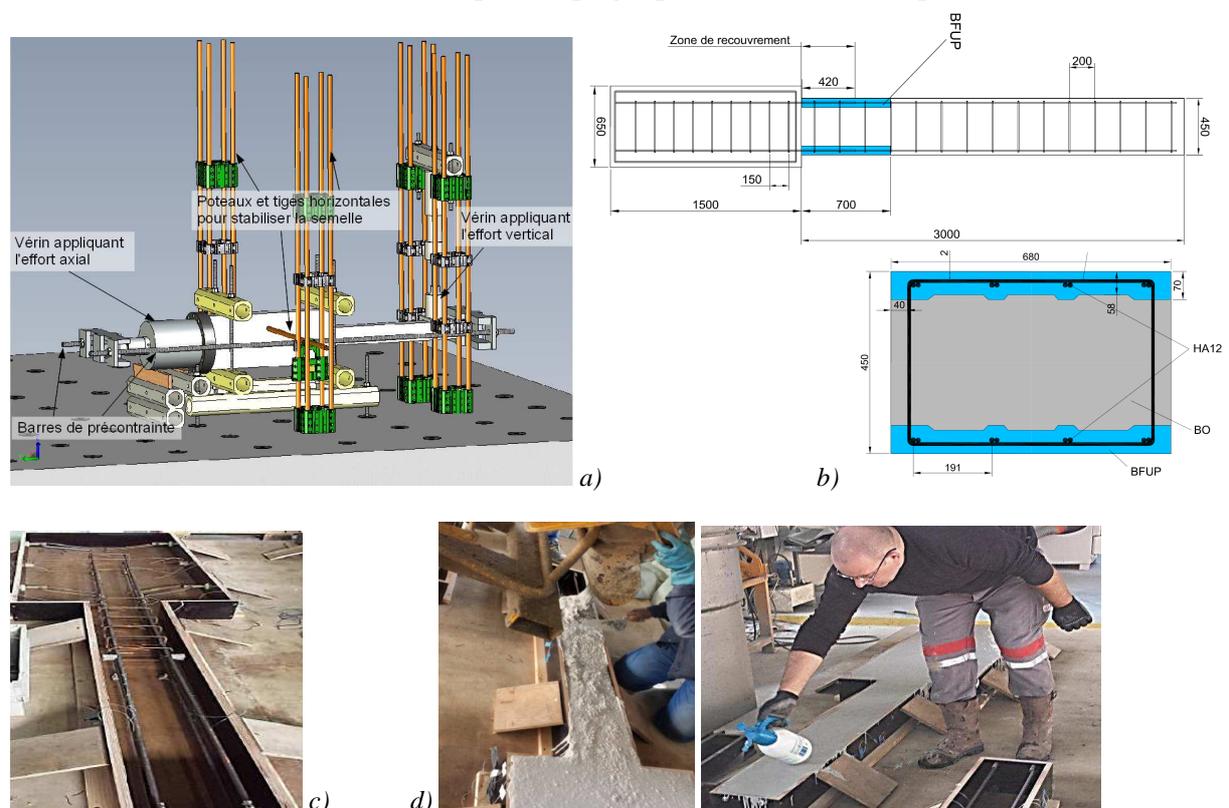


Figure 18 : Essais en flexion composée sur poteaux encastrés. a) schéma du montage b) plans de corps d'épreuve représentatifs du BFUP utilisé en chemisage c) coffrage d'un poteau en BFUP armé d) coulage et cure d'un poteau BFUP

3. Conséquences pour le dimensionnement

L'exploitation des essais d'arrachement permet de déterminer les **conditions d'un ancrage** complet d'une barre d'armature, en intégrant les résultats obtenus aux autres résultats de la littérature. Pour un enrobage supérieur à 4 diamètres, correspondant à un ancrage « en pleine masse », la contrainte limite correspondant à une rupture par glissement peut être prise égale à $3,5 f_c^{1/2}$. Pour un enrobage inférieur (mais qui reste au minimum égal à un diamètre) on peut considérer que la contrainte de cisaillement maximale en-deçà de laquelle une armature est ancrée s'obtient par interpolation linéaire entre $f_c^{1/2}$ et $3,5 f_c^{1/2}$ (Fig. 19). Cette expression peut par exemple être comparée à la clause 8.4.2(2) des recommandations AFGC révisées 2013, où l'on trouve l'expression du cisaillement ultime de calcul, en prenant à une valeur égale à 1 le coefficient de sécurité matériau.

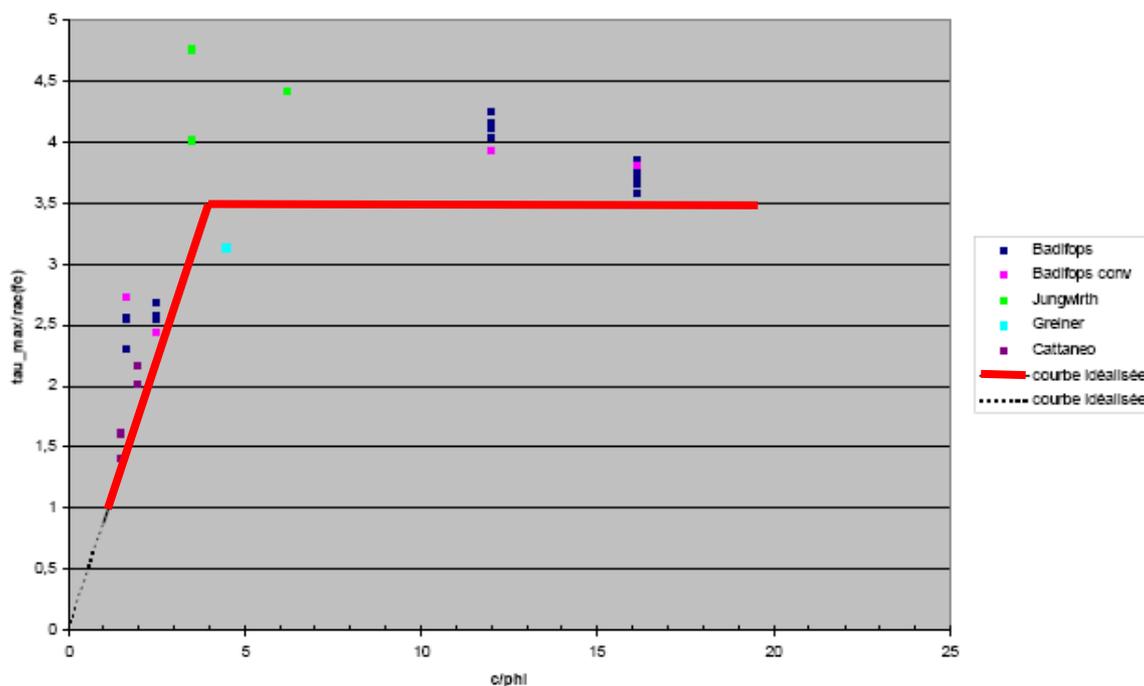


Figure 19 : Représentation simplifiée de la frontière correspondant au glissement des armatures (limite du domaine d'ancrage) dans un diagramme cisaillement (normalisé par $f_c^{1/2}$) en fonction de l'enrobage de l'armature (rapporté à son diamètre)

En s'appuyant sur l'analyse des essais réalisés, la longueur d'ancrage qui correspondrait à une contrainte de calcul (f_y/γ_s) de 500 MPa dans les barres à ancrer ($\gamma_s = 1$ en situation sismique), est de 10 diamètres lorsque l'enrobage est égal à un diamètre, 7 diamètres pour un rapport enrobage / diamètre de 1,5, 5,5 diamètres lorsque ce rapport vaut 2, et 3 diamètres lorsque l'enrobage est égal à au moins quatre diamètres. On souhaite que les sollicitations dynamiques ne mettent pas en défaut l'ancrage des armatures, or la valeur limite expérimentale au-dessus de laquelle on a systématiquement constaté que les barres étaient ancrées était de 3 à 3,5 diamètres même avec un enrobage de moins de 2 diamètres. Il ne semble donc pas nécessaire d'adopter de marge supplémentaire vis-à-vis de conditions d'ancrage réputées assurées y compris dans le contexte parasismique.

Ces valeurs sont significativement différentes de celle de 6 diamètres qui résulte de l'application des recommandations AFGC révisées 2013 pour une barre travaillant à 500 MPa

avec un coefficient de sécurité sur le BFUP pris égal à $\gamma_c = 1,0$ et n'étant que peu modulée par l'épaisseur d'enrobage. Elles restent de nature à conforter les faibles longueurs de scellement et de recouvrement à adopter lorsque des armatures passives sont utilisées dans du BFUP, y compris vis-à-vis du fonctionnement sous séisme, ce qui est de nature à faciliter et rendre économiques certaines dispositions constructives utilisant du BFUP plutôt que des matériaux cimentaires ordinaires (clavage, réparation). Il conviendra néanmoins de revoir les dispositions de calcul des longueurs d'ancrage (clause 8.4.4) en tenant compte de ces résultats, par exemple en modulant davantage le terme α_2 issu de l'Eurocode 2.

Les essais de petites poutres fléchies et de tirants, confrontés aux essais et aux modèles de la littérature (travaux de thèse de T. Leutbecher, en particulier), permettent de préciser les conditions de synergie entre les armatures passives et le BFUP dans un **calcul de section**.

Du point de vue du calcul de la résistance, lorsque le BFUP est écrouissant, au sens où il présente pendant une phase suffisamment significative de son comportement en flexion simple une multitude de microfissures, on peut admettre que la plastification des armatures sera atteinte avant que le BFUP n'impose la position de la macrofissure conduisant à la ruine, on peut donc combiner la contribution de l'armature et celle du BFUP (loi contrainte-déformation) en admettant la planéité des sections droites et la compatibilité des déformations. Cette situation correspond aux observations expérimentales dans les cas favorables (essai prototype du tirant, par exemple). Vis-à-vis de cette estimation reposant sur une « synergie parfaite », le comportement du BFUP peut se trouver dégradé par l'effet de la mise en place du matériau autour des armatures, susceptible de provoquer une orientation moins favorable des fibres, et par un retrait du BFUP gêné par les présences du ferrailage. Une prise en compte réduite de la contribution du BFUP est alors à envisager. Enfin, lorsque le BFUP est adoucissant, au sens où il présente rapidement lors de son comportement en flexion simple un nombre limité de fissures d'ouverture significative, ce sont ces fissures localisées qui imposent les concentrations de contrainte entraînant la plastification de l'armature. Le calcul de résistance de la section doit donc combiner la contribution de l'armature plastifiée avec celle du BFUP tendu, pour une ouverture de fissure associée à la déformation plastique ultime de l'armature (supposée ancrée entre deux fissures).

Du point de vue de la vérification des états-limites de service et notamment du contrôle de l'ouverture des fissures, la compatibilité des déformations du BFUP et de l'armature peut à bon droit être postulée, et les types de comportement de BFUP indiqués ci-dessus sont à considérer de la même façon, pour les ouvertures de fissure ou déformations limites appropriées. Les expérimentations ont confirmé un fonctionnement similaire, de ce point de vue, entre tirants et éléments fléchis.

Dans tous les essais réalisés avec répétition des sollicitations de traction, il n'y a pas eu d'évolution irréversible associée à ces répétitions par rapport à un chargement monotone, ce qui justifie de ne pas modifier les méthodes de vérification ELS et ELU lorsque l'action sismique ne risque pas d'induire d'inversion du signe de la sollicitation.

Enfin, compte tenu de l'absence de sollicitations alternées dans les essais de flexion simple et de traction réalisés à ce stade, la mise en évidence expérimentale de la **ductilité** lors de la rupture des corps d'épreuve n'a pas été possible. Il reste donc à attendre l'analyse des essais de poteaux en flexion composée pour répondre à cette question qui conditionne plus directement les possibilités du dimensionnement parasismique, notamment pour adapter les dispositions visant à assurer le bon fonctionnement contrôlé de rotules plastiques.

4. Analyse de l'emploi des BFUP en ingénierie parasismique

Les situations d'emploi structurel des BFUP et le besoin de justifier d'un comportement ductile pouvant nécessiter la présence d'armatures a été analysé de façon simplifiée par types d'ouvrages, afin de favoriser la pertinence des exemples de projets documentés en §5. ci-après.

Dans le domaine des **ouvrages d'art** courants, un tablier BFUP (neuf ou dans le cadre d'une rénovation lourde) a l'intérêt de la légèreté mais ne nécessite pas de ductilité, dans la mesure où son fonctionnement doit être borné à un comportement élastique ($q = 1$). Le BFUP peut dans ce cas contribuer à l'efficacité d'un dimensionnement en résistance. La ductilité est, quant à elle, intéressante dans les appuis, mais l'intérêt économique d'une section complète de BFUP n'y est pas évident, compte tenu de la nécessaire massivité due, entre autres, aux sujétions de résistance au choc. Ainsi le BFUP aurait plutôt un intérêt en chemisage de renforcement ou en coffrage perdu, avec un avantage de durabilité.

Pour des ouvrages en arc ou à béquilles, le BFUP apparaît pertinent dans les éléments comprimés (arc ou béquilles), mais l'Eurocode 8 limite la dissipation dans ces éléments (entre 1,2 à 2), ce qui limite l'enjeu d'une démonstration de ductilité. Par ailleurs le BFUP semble pertinent dans les pilettes, qui se trouvent dans une situation de flexion composée (assez similaire au cas de poteaux de bâtiment) et où se situeront les rotules plastiques. Comme dans le cas des ouvrages courants, le BFUP utilisé dans le tablier peut contribuer à l'allègement de l'ouvrage et à la réduction des efforts sismiques, mais il ne fait pas l'objet d'une demande de ductilité.

De façon générale pour les grands ouvrages non courants, le BFUP peut être pertinent dans les piles, pilettes, pylônes et appuis, qui sont généralement de section creuse. Cette situation est spécifique aux ouvrages d'art (les poteaux creux sont rares dans les bâtiments en béton). Elle peut aussi correspondre au pied des mâts d'éoliennes, aux cheminées (dont l'effort normal reste cependant limité, la fatigue et le séisme de service limiteront le coefficient de comportement à $q = 1$). Dans ces cas il faudrait pouvoir justifier d'une rotule suffisamment ductile en pied, qui peut concerner de grandes hauteurs).

Au total, pour les ponts, l'application des BFUP armés où une ductilité suffisante est à démontrer concerne plutôt des éléments en flexion composée, pleins et pas forcément en section tout BFUP (aussi bien pour des ouvrages neufs où le BFUP peut être envisagé en « coffrage perdu » participant, qu'en réhabilitation d'ouvrages anciens), ce qui rejoint des travaux internationaux (par exemple Massicotte *et al.*¹, Sokabe *et al.*²...) où le BFUP contribue à maintenir les armatures longitudinales pour les empêcher de flamber, à préserver l'efficacité des recouvrements d'armatures longitudinales lorsqu'ils sont situés dans ces zones, et permet de contrôler la hauteur de la rotule plastique, en se substituant au moins partiellement aux armatures de confinement extérieures.

Une analyse similaire a été conduite pour les ouvrages de **bâtiment**.

¹ Massicotte B., Dagenais M.-A., Lagier F. (2013) « Performance of UHPFRC jackets for the seismic strengthening of bridge piers », *UHPFRC 2013*, Marseille (France), RILEM PRO 87, Toutlemonde & Resplendino eds., pp. 89-98

² Sokabe N., Yamanobe S., Kono T. (2008) « Cyclic loading test of high-seismic performance RC piers with ultra-high strength fiber-reinforced concrete precast forms », *8th int. symp. on Utilization of High-Strength and High Performance Concrete*, Tokyo (Japan), T. Uomoto ed., pp. 445-450.

Concernant les éléments horizontaux (planchers), il est nécessaire de distinguer plusieurs cas. Compte tenu des autres fonctionnalités en bâtiment de logement, l'épaisseur minimale de béton des dalles est d'environ 18 cm ce qui supprime l'intérêt du BFUP. Une variante consistant en planchers nervurés 2D ne se fait plus, elle est trop complexe de réalisation. Enfin, les planchers constitués de poutres en Pi existent pour les parkings, mais leur rôle attendu de diaphragme conduit à ne pas en attendre un fonctionnement ductile en situation sismique. Comme pour les tabliers de pont, l'intérêt en sismique d'une solution BFUP pourrait être la légèreté. Par ailleurs, ces applications relèvent a priori de la préfabrication avec précontrainte par fils adhérents, avec une géométrie en I (pannes préfabriquées). Leur fonctionnement est essentiellement en flexion simple. La principale « demande » sous action sismique, qui s'applique plutôt au système de connexion, est que ces éléments n'échappent pas de leurs appuis.

Les poteaux, compte tenu du mode constructif habituel, n'assurent pas de fonction de contreventement. Lorsque leur fonctionnement recherché est bi-articulé, ils ne seront pas pris en compte dans le système résistant au séisme, il n'est donc pas besoin de justifier spécifiquement de leur ductilité. La possibilité de portiques BFUP (avec encastrement en tête des poteaux) est évoquée : ce système de portiques est rare en bâtiment (les murs sont plus économiques). Pour les bâtiments industriels, l'encastrement des poteaux (souvent préfabriqués) est réalisé en pied par exemple avec un encuvement, et plus rarement au niveau de la liaison avec la poutre. Dans l'hypothèse d'un poteau encasté se pose la question du maintien de la fonction porteuse (N) en concomitance au déplacement imposé (moment induit), la question est donc celle de la loi moment courbure (en dynamique) d'un élément en flexion composée (BFUP armé ou pas). Dans certains éléments en BFUP, les contraintes architecturales pourraient imposer que le contreventement soit assuré par les éléments eux-mêmes : dans de tels cas il faut assurer la capacité du BFUP à confiner les aciers longitudinaux sous compression combinée au cisaillement (poteau simultanément encasté et cisailé). Vis-à-vis de cette situation, il serait intéressant de pouvoir assurer la justification du BFUP en se passant au moins partiellement des armatures de confinement imposées par l'EC8.

Si on considère l'ensemble des autres éléments verticaux, on constate qu'en bâtiment classique les voiles ont des épaisseurs supérieures à 15 ou 20 cm pour d'autres fonctions que la descente de charge. Il est donc difficile d'y voir un intérêt pour les BFUP. Pour les immeubles de grande hauteur, l'expérience japonaise a été de substituer le BFUP au béton à hautes performances armé (C80 / 95 en général) dans des poteaux ferrailés vis-à-vis de l'exigence parasismique (en conservant alors l'équarrissage de la section et les quantités d'acier), sans démontrer une capacité de ductilité grâce aux fibres. Cette démarche paraît difficile à transposer directement en France à cause de la sismicité modérée qui conduirait à des dimensionnements peu économiques. Ainsi, en s'adaptant aux solutions constructives plus classiques en France, il pourrait s'agir de vérifier pour les murs que des murs en BFUP rempliraient avec moins d'armatures la fonction de mur ductile (type EC8), et d'explorer en conséquence la pertinence de cet emploi dans le contexte constructif français. Cependant on peut penser que des murs en BFUP seraient conçus pour reprendre la charge, et ne devraient alors pas justifier de ductilité. Enfin, pour des éléments de façade (par exemple des coques, probablement ajourées, et éventuellement porteuses) en fait on limiterait leur fonctionnement à un coefficient de comportement $q = 1$.

La conclusion de cette analyse (Fig. 20) a conforté, pour favoriser la représentativité et l'applicabilité directe des résultats, le choix de réaliser les essais prévus dans BADIFOPS sur éléments de structure, sur des poteaux encastés, soit constitués de BFUP en pleine section,

soit constitués d'un noyau en béton ordinaire confiné entre deux faces de BFUP, et de solliciter ces éléments en flexion composée avec sollicitation latérale alternée.

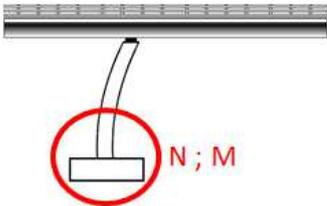
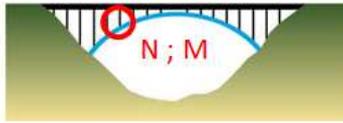
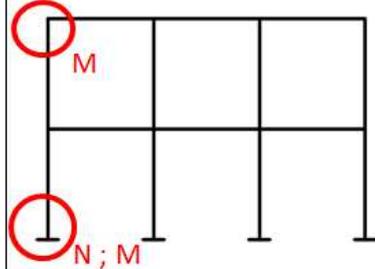
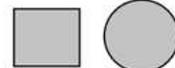
Ouvrages d'art		Bâtiments
		
Pile neuve ou existante	Pilette neuve	Poteau neuf
Pile en béton ordinaire + BFUP	Pilette en BFUP seul	Poteau en BFUP seul
Avec armatures longitudinales ($A_{sl} \neq 0$)	Avec ou sans armatures longitudinales ($A_{sl} \neq 0$ ou $A_{sl} = 0$)	Avec ou sans armatures longitudinales ($A_{sl} \neq 0$ ou $A_{sl} = 0$)
Avec ou sans armatures transversales ($A_{st} \neq 0$ ou $A_{st} = 0$)	Avec ou sans armatures transversales ($A_{st} \neq 0$ ou $A_{st} = 0$)	Avec ou sans armatures transversales ($A_{st} \neq 0$ ou $A_{st} = 0$)
Section rectangulaire ou circulaire	Section rectangulaire ou circulaire	Section rectangulaire ou circulaire
		

Figure 20 : Représentation schématique synthétique de situations d'emploi structurel du BFUP correspondant à une demande de ductilité lorsque l'ouvrage est situé en zone sismique

5. Etude de cas

Préalablement à l'étude de cas illustrant la possibilité de valoriser une certaine ductilité du BFUP, le cas échéant armé et/ou utilisé en combinaison avec le béton armé traditionnel, il a été procédé à une vérification de la **cohérence entre les outils de calcul** nécessaires aux tâches d'études réalisées par l'IFSTTAR, le Cerema, le CSTB et EIFFAGE TP. Cette vérification a consisté à calculer le diagramme d'interaction de différentes sections de BFUP armé et/ou précontraint représentatives des situations de calcul envisagées, sur la base de propriétés de calcul communes pour le BFUP étudié (Fig. 21). Les variantes de calcul (section brute ou nette, modalités de la prise en compte de la surtension du toron) ont été analysées. Tous les outils se sont avérés cohérents pour réaliser la suite des études. En particulier le logiciel SAP 2000 utilisé par le CSTB, même s'il ne permet pas de fournir directement les résultats en termes de contraintes et déformations, a pu bénéficier d'une programmation des lois BFUP et sur cette base fournir des lois moment-courbure conformes aux lois obtenues par les autres partenaires, permettant de réaliser des analyses en poussée progressive. Dans les sections considérées, le moment maximal est obtenu lorsque la contribution maximale des fibres se cumule à celle des armatures, puis on observe une redescente quand les fibres se déchaussent. La forme des lois moment-courbure, où on attend normalement une ductilité telle que le moment post-pic reste suffisamment longtemps supérieur à 85 % du pic, dépend de l'effort normal.

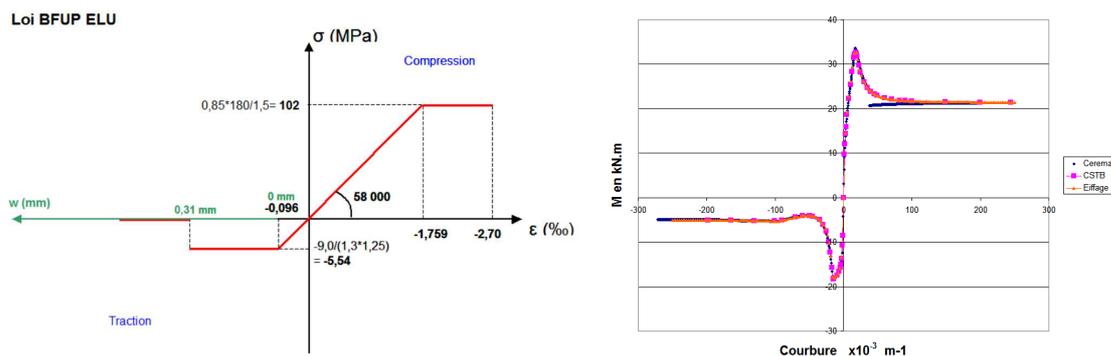


Figure 21 : loi de comportement prise en compte et diagramme moment-courbure résultant dans le cas d'une section rectangulaire armée, tel qu'obtenu par les outils de calcul des différents partenaires

Conformément à l'analyse présentée en §4., l'étude de cas associée à un exemple d'utilisation de BFUP en ouvrages d'art a considéré la situation d'ouvrages relativement anciens, dont les dispositions constructives sont jugées aujourd'hui insuffisantes vis-à-vis d'un aléa sismique récemment réévalué à la hausse en France. Cette situation est représentative d'un nombre important d'ouvrages, soit parce qu'ils sont désormais en zone de sismicité non négligeable (faible, modérée voire moyenne), soit parce qu'ils se trouvaient déjà dans une zone sismique mais d'aléa plus faible, et dans tous les cas parce que les avancées scientifiques et les retours d'expérience ont fait évoluer les règles de conception parasismique et montré les limites de dimensionnements ou dispositions anciens.

Les ouvrages étudiés sont un ouvrage d'art courant de type pont-dalle aujourd'hui situé en zone de sismicité moyenne et un ouvrage d'art non courant de type caisson en béton précontraint désormais situé en zone de sismicité modérée. Ces deux ouvrages ont été construits dans les années 70 et n'avaient pas fait l'objet d'une conception parasismique. Pour ces ouvrages, dont les plans et données géométriques, matérielles et de site étaient disponibles, on a envisagé une technique de renforcement qui consiste à substituer, en pied de

certaines piles, le béton ordinaire en périphérie par un **chemisage en BFUP**. Cette technique permet de pallier au manque de dispositions de confinement et d'augmenter la ductilité de cette zone très sollicitée afin de dissiper l'énergie sismique et obtenir, avec des dispositions capables d'assurer un fonctionnement dit de rotule plastique, un bon comportement de l'ouvrage. Contrairement à d'autres solutions de renforcement par chemisage (par composites ou tôle métallique...), cette solution reste efficace pour des sections transversalement élancées telles que celles de piles de type voile et permet de pallier un déficit d'armatures transversales supérieur. Elle reconstitue une protection durable des armatures longitudinales même avec un enrobage réduit. Les essais de poteaux, avec et sans chemisage, représentatifs d'appui d'ouvrage d'art, mentionnés au §2, sont directement destinés à confirmer par des chargements cycliques alternés en flexion composée, le gain de ductilité apporté par cette technique, une estimation provisoire pouvant en être tirée des essais de B. Massicotte *et al.*³ (Fig. 22).

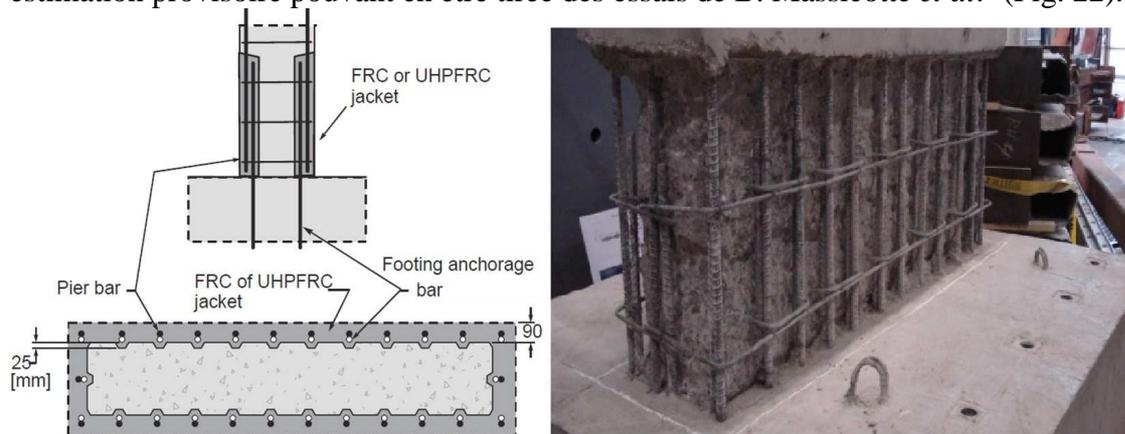


Figure 22 : Essais de chemisage BFUP en pied de pile, d'après B. Massicotte *et al.*³



Figure 23 : Ouvrage courant étudié, datant de la fin des années 1960, conçu sans disposition particulière vis-à-vis du séisme, et situé dans une zone dont l'aléa sismique a été récemment réévalué.

Dans le cas de l'**ouvrage courant** (Fig. 23), les piles sont constituées de 2 voiles trapézoïdaux, d'épaisseur 60 cm. La pile centrale est fixe tandis que les autres appuis, sont équipés d'appuis néoprènes. On note que la solution « classique » de confortement par changement de type d'appuis n'est pas évidente en termes constructifs. Pour l'analyse de vulnérabilité sismique, l'ouvrage a tout d'abord été représenté par un modèle à barres et a fait l'objet d'une analyse modale. Le mode fondamental s'établit pour une période $T = 0,71$ s et l'effort sismique vaut 3,44 MN en faisant le calcul avec une rigidité non fissurée. L'appui central reprend alors la moitié de cet effort, et la demande de déplacement est de 5 cm à la

³ Massicotte B., Dagenais M.-A., Lagier F. (2013) « Strengthening bridge piers using Ultra-high performance fiber reinforced concrete », 7th Nat. Seismic Conf. On Bridges & Highways, Oakland (California, USA).

limite tablier – culée. On a ensuite réalisé un calcul avec une inertie fissurée, évaluée selon l'EC8.2 (en tenant compte des dispositions constructives adoptées) à 20 % de l'inertie non fissurée. Dans cette hypothèse on recalcule l'effort sismique (2,19 MN), sa répartition (P3 ne reprend plus que 27 % de cet effort) et le déplacement lors du séisme, qui vaut 8 cm. La comparaison des efforts sismiques avec les efforts résistants montre que toutes les piles se placent hors du diagramme (Fig. 24).

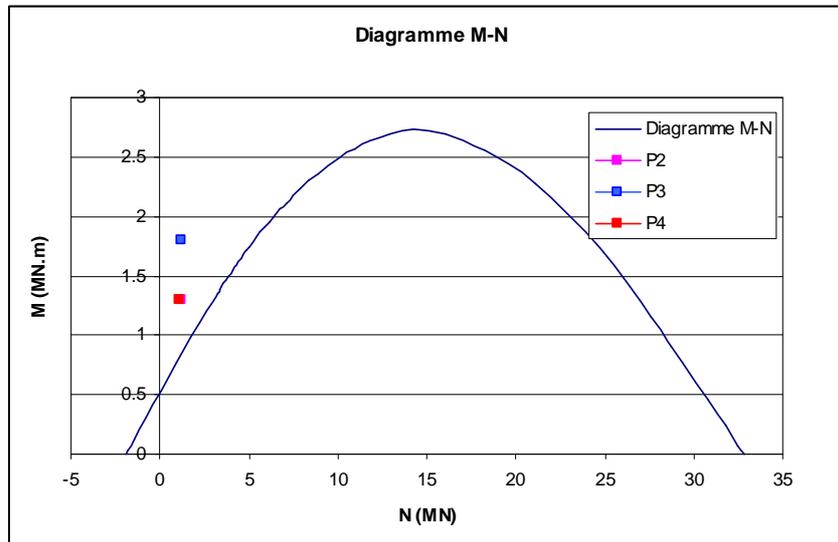


Figure 24 : Sollicitation sous séisme des sections fléchies des piles P2, P3 et P4 en regard du diagramme d'interaction moment – effort normal traduisant leur capacité résistante. P3 correspond au cas le plus critique, P2 et P4 sont équivalentes mais restent insuffisamment résistantes.

L'analyse est poursuivie par un calcul en déplacement (méthode en poussée progressive) en programmant la loi de comportement des piles et des culées, en ne dépassant pas la plastification des aciers car au-delà on craint le risque de flambement des armatures dû à la perte d'enrobage. Dans cette hypothèse, une partie du déplacement est prise par la pile et cela n'entraîne pas de glissement de l'appareil d'appui. La courbe de réponse est comparée à la sollicitation, issue du spectre réglementaire et intégrant un amortissement « de base » de 5 %. La comparaison montre que l'ouvrage ne passe toujours pas (l'accélération admissible est de 1,98 m/s² par rapport à une valeur de projet de 2,88 m/s²).

Le principe de renforcement considéré consiste à donner de la ductilité à P3, sans augmenter la résistance (afin d'éviter de reporter des efforts ailleurs), selon le procédé dit de « chemisage BFUP » dans la zone attendue de rotule plastique. La loi moment courbure est obtenue en faisant l'hypothèse, après chemisage, d'un fonctionnement où les armatures peuvent travailler jusqu'à leur capacité ultime de calcul (5 %) en considérant que le BFUP ne fait qu'empêcher leur flambement. On se borne à une valeur associée au maximum du déplacement élastique de P2 et P4 : on passe alors de 6 cm à 10 cm. Dans ces conditions, on peut calculer une ductilité de 1,44 et une valeur d'amortissement de 7,5 %. Ces valeurs conduisent à une valeur d'accélération admissible juste égale à la valeur de l'action (2,88 m/s²) et permettent donc de conclure à une réduction satisfaisante de la vulnérabilité sismique de l'ouvrage par cette méthode (Fig. 25).

Par rapport à d'autres solutions variantes de remise à niveau sismique (changements d'appui de P2, P3 et P4, introduction d'amortisseurs, éventuel chemisage ou reconstitution de rotule au pied de P3 en béton armé traditionnel), l'intérêt de la solution BFUP se caractérise

par une faible modification de la résistance et des dimensions de la pile, et par le caractère local de l'intervention avec uniquement une répercussion sur la demande de déplacement.

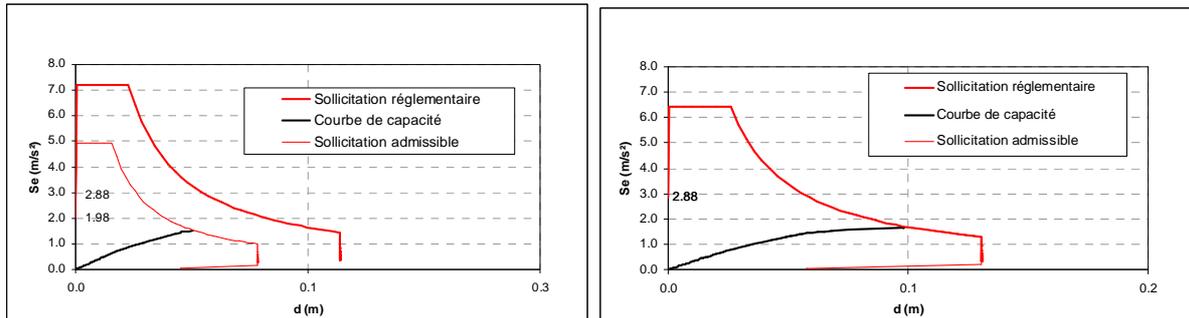


Figure 25 : Courbes de capacité et point de fonctionnement au regard du spectre de l'action sismique avant renforcement (à gauche) / après renforcement (à droite)

L'ouvrage non courant étudié (Fig. 26) a de la même façon fait l'objet d'une modélisation par un programme à barres, avec une évaluation appropriée des pertes de précontrainte et une action sismique réévaluée selon le nouveau zonage. Les dispositions critiques conditionnant la capacité de l'ouvrage sont liées à la présence de piles précontraintes, le tablier reposant sur ces piles avec des articulations Freyssinet sauf sur la pile P3 (où des armatures passives périphériques réalisent un encastrement). L'analyse modale et spectrale a mis en évidence l'insuffisance de capacité des piles P2 et P3 (Fig. 27). Pour confirmer l'apparition progressive des mécanismes critiques une analyse en poussée progressive a alors été effectuée en imposant le déplacement au centre d'un voussoir du tablier. Les sections critiques (rotules) apparaissent d'abord en haut et en bas de la pile P3 (fûts parallèles) puis en bas des piles P2 et P4 (Fig. 28). Avec le séisme réglementaire et un coefficient de comportement de 1,5 (probablement trop favorable compte tenu des dispositions de ferrailage) l'accélération admissible est de 0,83 au lieu de 1,32 m/s² (Fig. 29).

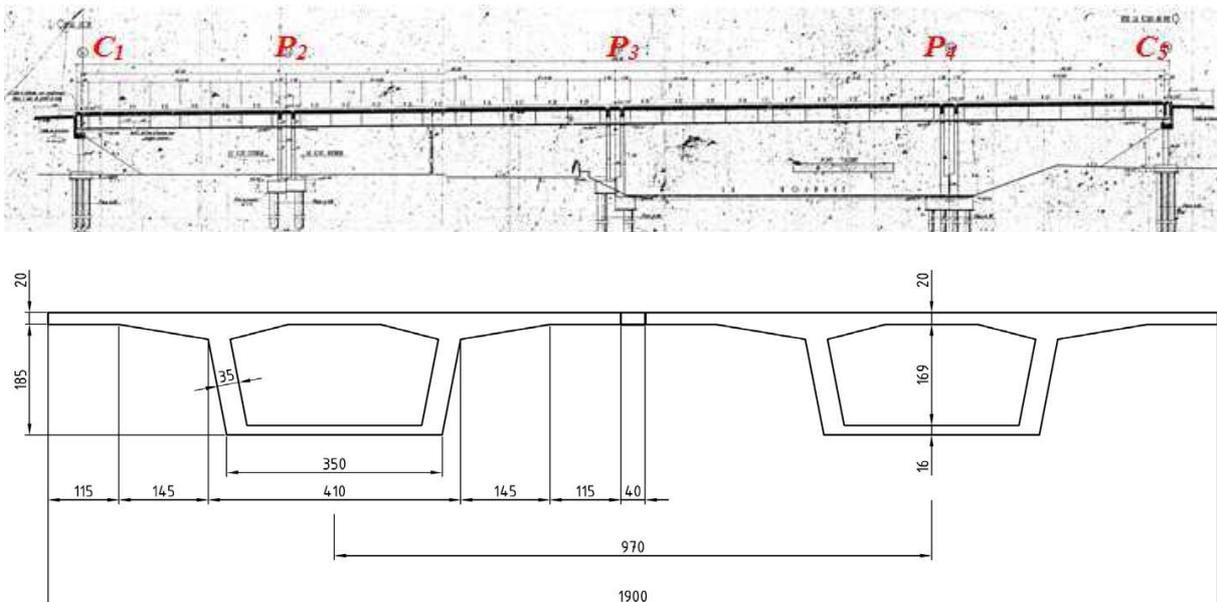


Figure 26 : Profil en long et coupe transversale de l'ouvrage étudié, tablier en double caisson en béton précontraint, fûts de pile dédoublés

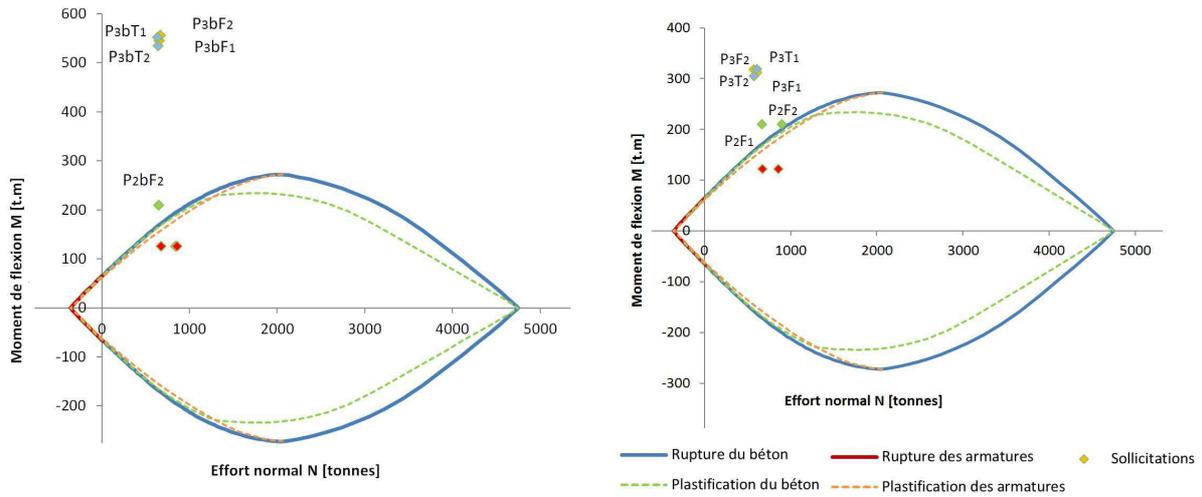


Figure 27 : Sollicitation sous séisme des sections fléchies des piles en regard du diagramme d'interaction moment – effort normal traduisant leur capacité résistante (selon les différents modes de rupture en flexion). P3 correspond au cas le plus critique aussi bien à la base (graphique de gauche) qu'en tête de pile (graphique de droite).

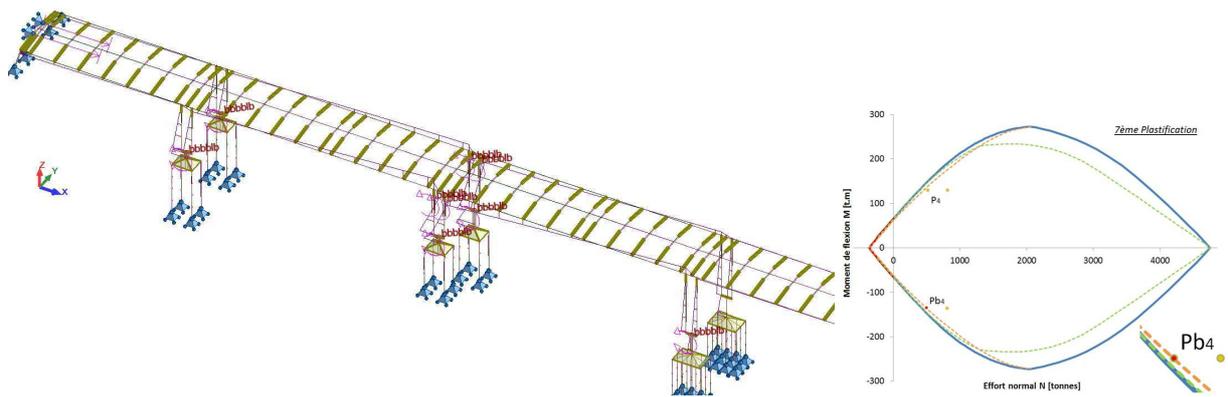


Figure 28 : Modèle de calcul en poussée progressive de l'ouvrage illustrant la présence des 7 rotules précédant immédiatement la perte de stabilité (mécanisme) et diagramme d'interaction correspondant

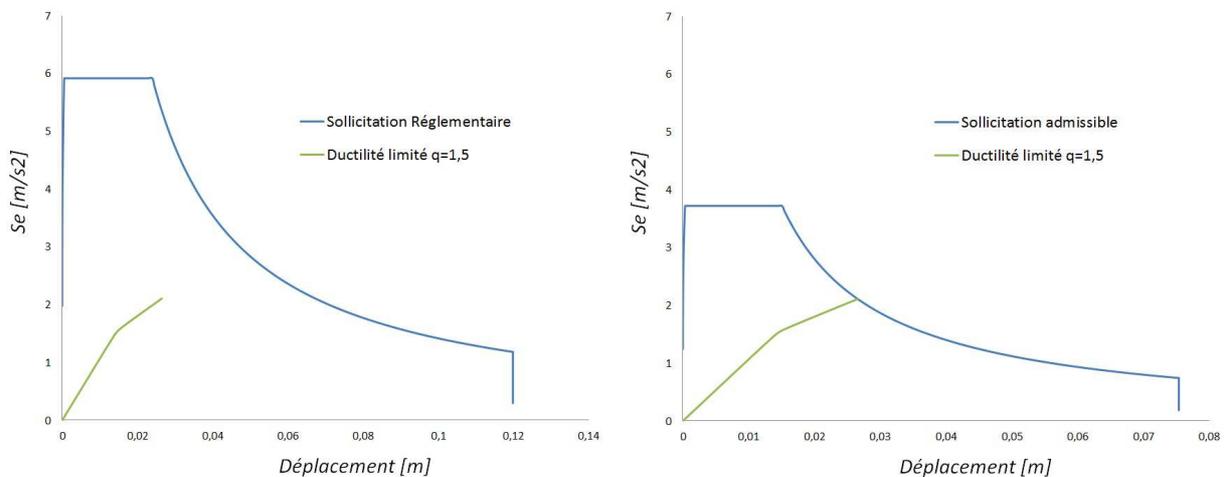


Figure 29 : Insuffisance de l'ouvrage non renforcé vis-à-vis de la sollicitation sismique réglementaire actuelle

Afin de remettre à niveau l’ouvrage un examen de solutions techniques alternatives *a priori* possibles a été effectué (Fig. 30) : démolition, mise en place de dissipateurs, chemisage par composites, changement d’appuis en élastomère, diminution de la raideur des piles pour éliminer l’encastrement, renforcement par béton projeté, chemisage BFUP. Plusieurs de ces solutions ne sont d’ailleurs pas viables dans le cas de cet ouvrage.

<u>Solutions Courantes</u>	<u>Coût</u>	<u>Difficultés Techniques</u>	<u>Temps</u>	<u>Risque</u>	<u>Pertinence?</u>
1) Démolition de l'ouvrage et Reconstruction 	•••••	••	•••••	•	
2) Dissipateurs d'énergie 	•••	•••	•••	••	
3) Chemisage Composites Carbonne 	•	•	•	•	
4) Appuis en Elastomère Fretté 	•••	••	•••	••••	
5) Diminution de la raideur des piles P3 en tête 	•	••	•	•••	
6) Renforcement de l'ouvrage 	?	•	•	?	

Figure 30 : Diagramme synthétique illustrant différents modes de renforcement sismique possibles et leur application au cas de l’ouvrage non courant étudié au regard de différents critères

La solution retenue pour l’étude consiste à considérer un chemisage BFUP au pied des piles P3 (Nord et Sud) et en l’élimination de l’encastrement en tête de P3 (sciage des armatures périphériques). L’analyse en poussée progressive est reprise après mise en œuvre de cette solution et on vérifie les déplacements vis-à-vis du souffle des joints de chaussées. La solution mobilise une ductilité limitée à une valeur de 5 au niveau des rotules sollicitées (lorsqu’intervient la formation du mécanisme considéré comme l’étape ultime de fonctionnement de l’ouvrage).

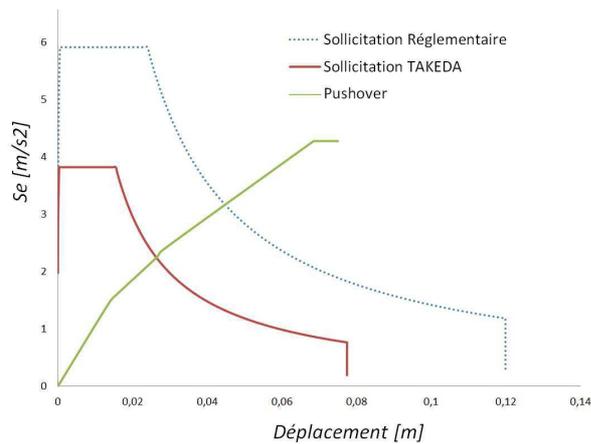


Figure 31 : Courbe de capacité de l'ouvrage renforcé superposé à la sollicitation sismique de calcul

Ainsi pour les deux ouvrages d'art étudiés le calcul montre que le chemisage de certaines piles permet de réduire significativement la vulnérabilité sismique de ces structures et de résister à une accélération de calcul comparable à celle de leur zone sismique.

L'étude de cas associée à un **exemple d'utilisation de BFUP dans un ouvrage de bâtiment** a considéré la situation d'une galerie périphérique (dalle en béton ordinaire armé sur poteaux minces) rapportée en façade d'un bâtiment situé en zone de sismicité élevée (Antilles) sans connexion avec ce bâtiment (Fig. 32). Cette situation s'est inspirée de projets réels en simplifiant le fonctionnement structural pour mettre en évidence les apports de la « variante BFUP ». Dans un tel ouvrage, le BFUP apparaît en effet susceptible de répondre à des demandes architecturales (minceur et espacement des poteaux) auxquelles une solution traditionnelle ne répondrait pas. Néanmoins il convient de vérifier comment se positionnerait cette solution alternative compte tenu du fonctionnement attendu de rotules plastiques en tête et/ou en pied des poteaux supposés encastrés.

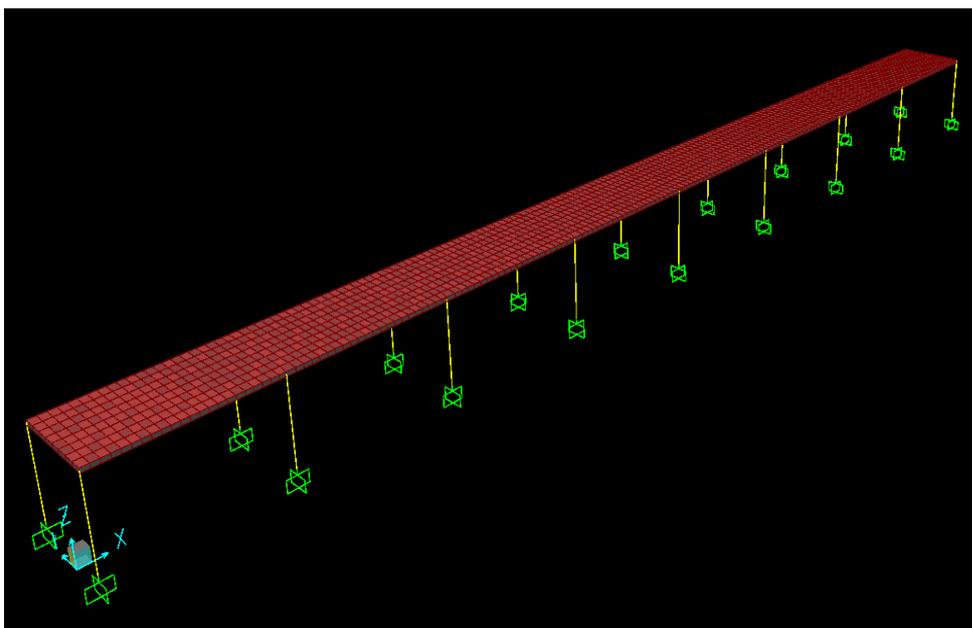


Figure 32 : Modèle de calcul de la galerie rapportée en avant d'un bâtiment

Le fonctionnement de la galerie a été étudié avec des poteaux de 20 cm de diamètre espacés de 6,55 m, armés longitudinalement de 8 armatures HA12, selon deux variantes différant uniquement par le béton employé : C90/105 conforme à l’Eurocode 2, et BFUP décrit par les lois de comportement issues de la caractérisation effectuée sur le matériau d’étude du projet (Fig. 33). Sans qu’une étude détaillée des dispositions de confinement ait été effectuée, il a été admis d’utiliser pour le calcul du fonctionnement des sections critiques (lois moment-courbure des zones de rotules plastiques) les lois de Sargin de ces deux matériaux conformément à l’Eurocode 2 d’une part, aux recommandations AFGC BFUP révisées 2013 d’autre part.

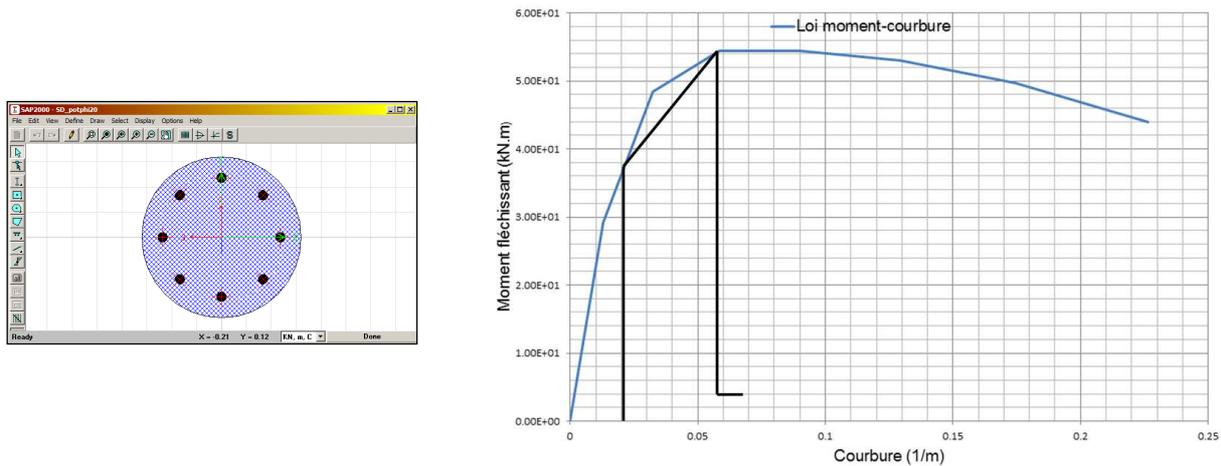


Figure 33 : Section des poteaux, loi moment-courbure calculée dans le cas des poteaux BFUP (en bleu) et loi de comportement idéalisée (en noir) de la rotule plastique obtenue lorsque la déformation des aciers longitudinaux dépasse 2,5 ‰ jusqu’à atteindre le moment résistant maximum.

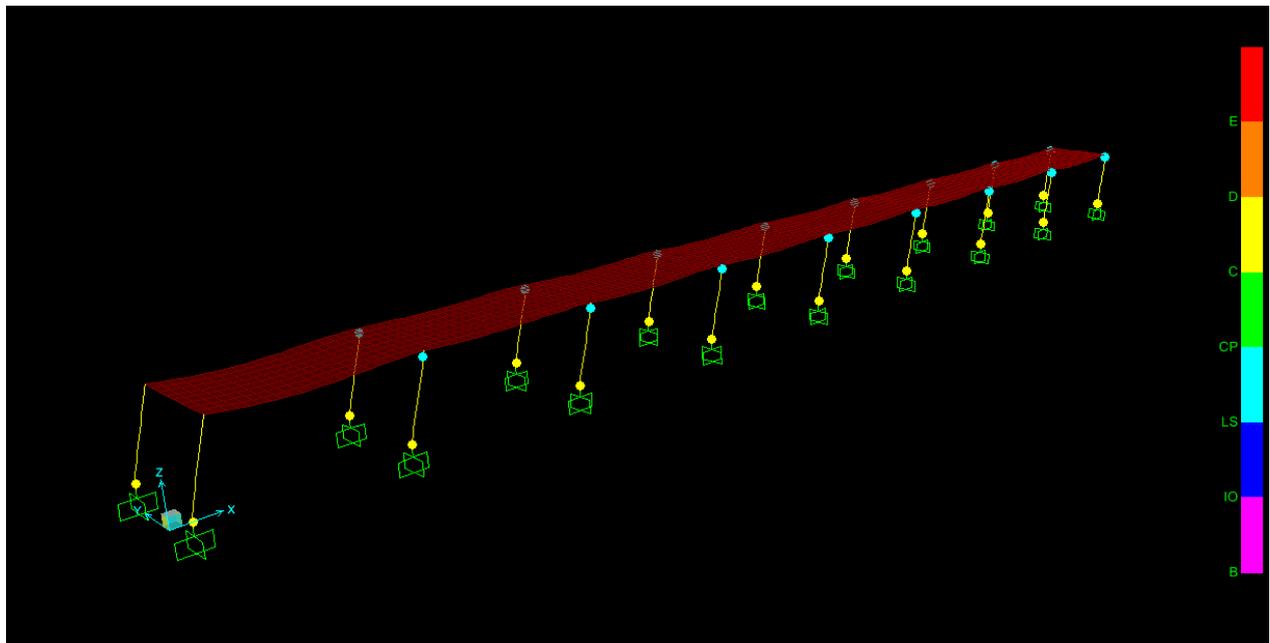


Figure 34 : Rotules plastiques au pied des poteaux mises en évidence par le calcul en poussée progressive, dans le cas des poteaux BFUP sous un effort de 560 kN. La couleur indique l’intensité de la courbure concentrée au niveau de chaque rotule.

Le calcul en poussée progressive piloté par un déplacement longitudinal de la coursière le long de sa plus grande dimension a fait apparaître dans les deux variantes des rotules plastiques au pied des poteaux supposés encastrés dans une longrine de fondation (Fig. 34). Pour ces sections fonctionnant comme des rotules plastiques, le moment correspondant à la limite d'élasticité et le moment au pic sont obtenus pour des courbures similaires dans les deux cas, le moment résistant étant cependant assez nettement plus élevé dans le cas de la section de BFUP (54 kN.m au lieu de 36 kN.m).

En conséquence, la courbe de capacité de la variante BFUP conduit à un effort maximal 24 % supérieur à celui de la variante C90/105, obtenu pour un déplacement au pic de 9,3 cm au lieu de 5.6 cm (Fig. 35). Ce déplacement au pic est lui-même égal à 5,8 fois le déplacement correspondant à l'apparition des premières non-linéarités. Avec un même spectre sismique et un coefficient de comportement égal à 1, la demande de déplacement en tête est de 4,2 cm pour la variante BFUP par rapport à une demande de 4,9 cm pour la variante C90/105. Le point de fonctionnement correspond donc à une marge nettement supérieure dans le cas de la variante BFUP.

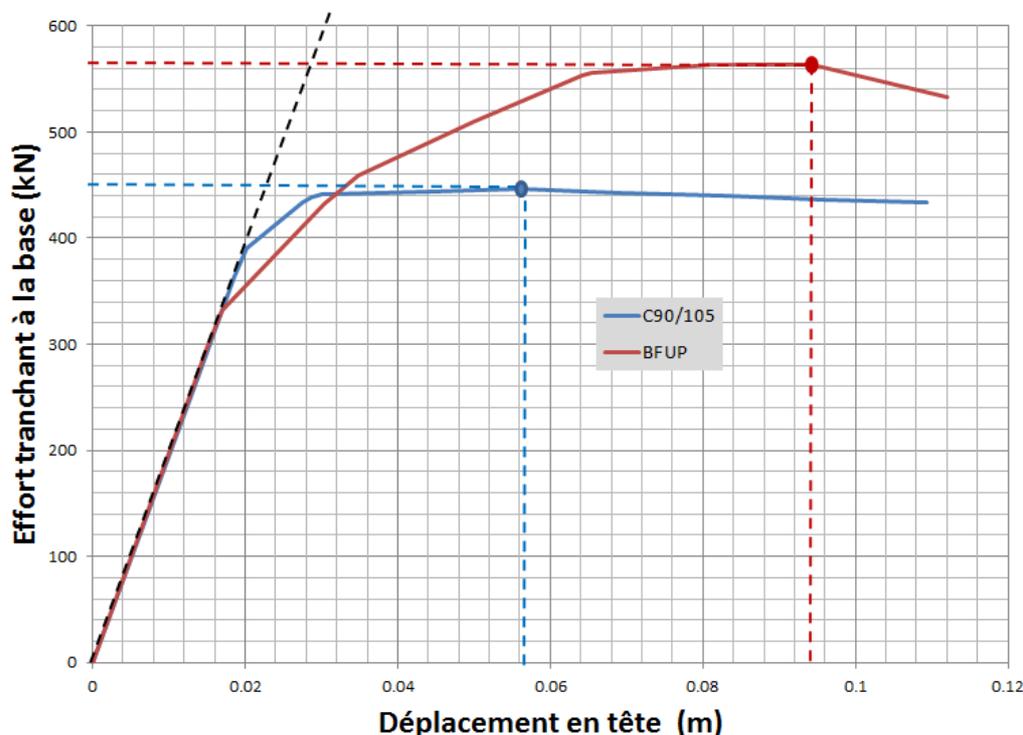


Figure 35 : Courbes de capacité de la galerie sur poteaux selon les deux variantes considérées (C90/105 et BFUP). Compte tenu de la demande de déplacement correspondant au séisme réglementaire il se dégage une marge nettement supérieure avec la solution BFUP.

Au total, même si ces conclusions quantitatives ne sont pas à transposer sans précaution à n'importe quelle situation, il apparaît bien possible de justifier, sur la base de diagrammes de comportement établis rationnellement, un fonctionnement sismique suffisamment ductile et satisfaisant pour les structures de bâtiment en BFUP. Les essais de flexion composée sur poteaux BFUP qui doivent être réalisés à l'IFSTTAR dans le cadre de la finalisation de ce programme, devront permettre de confirmer cette méthodologie de calcul et la ductilité ainsi mobilisable dans des sections de BFUP armé.

6. Conclusions

Une retombée méthodologique importante du projet BADIFOPS concerne la mesure précise, grâce aux fibres optiques, des déformations d'un acier passif sur toute sa longueur, ce qui a d'ores et déjà été valorisé dans d'autres contextes, et a permis de fournir des preuves décisives concernant l'adhérence et l'ancrage des armatures passives dans le BFUP.

La mesure des longueurs d'ancrage et la compréhension fine des mécanismes d'adhérence entre armatures passives et BFUP, dans des situations de sollicitation variées, a permis de mieux poser les bases des conditions du contrôle de la fissuration des BFUP armés, ce qui pourra se traduire par une amélioration significative des règles de conception et de leur bien-fondé, notamment dans le cadre de la démarche de normalisation des BFUP actuellement engagée.

L'analyse des nombreux résultats expérimentaux, obtenus avec une coopération remarquable des équipes techniques des organismes partenaires, et dont la mise à disposition est en cours de finalisation, est à même de répondre aux interrogations techniques à l'origine du projet :

- Possibilité, ou non, de redistribution des efforts par plastification contrôlée
- Dimensionnement des aciers passifs pour assurer une ductilité suffisante dans les zones de rotule plastique, détermination du coefficient de comportement associé
- Estimation des caractéristiques d'amortissement des structures en BFUP armé.

Ces points sont en effet critiques pour l'application des BFUP associés à des armatures passives, cette éventualité étant importante à maîtriser notamment dans le cadre de constructions parasismiques.

La réflexion sur l'utilisation des BFUP dans le cadre de structures de bâtiment et d'ouvrages d'art devant résister au séisme, et les études de cas réalisées, constituent une avancée significative du projet, consolidant les méthodes de conception et de réparation envisageables, et démontrant que même avec une ductilité modeste en termes quantitatifs, la réalisation de chemisages BFUP au niveau des rotules plastiques en tête ou au pied de piles ou poteaux en béton armé est une voie prometteuse de remise à niveau structurel. L'intérêt du BFUP pour réaliser des éléments porteurs minces, cependant capables d'assurer une capacité élevée au niveau des rotules plastiques, a également été analysé et confirme la faisabilité de conceptions innovantes et prometteuses vis-à-vis du potentiel architectural, de l'économie matérielle globale, et de solutions constructives nouvelles au service du développement durable.

Les expérimentations de validation sur poteaux en flexion composée, que l'on espère pouvoir réaliser à l'IFSTTAR à l'automne 2015, devraient permettre de consolider ces résultats, la méthodologie sous-jacente et le potentiel d'applications, et compléter la base d'une annexe informative « sismique » au sein de la future norme de calcul des structures en BFUP. A l'issue de ces essais et de l'exploitation de leurs résultats une manifestation technique compilant l'ensemble des acquis de BADIFOPS et les perspectives d'application à la conception et à l'utilisation des BFUP sera organisée à l'attention de la communauté scientifique et technique.

7. Pour en savoir plus : publications, rapports et communications issus du projet

- MADRID D. (2011) *Etude des structures en béton fibré à ultra-hautes performances avec armatures passives. Caractérisation et modélisation de l'adhérence des barres nervurées*, Projet de fin d'études, Ecole nationale supérieure des techniques industrielles des mines d'Alès, 29 juillet.
- BAUMANN O. (2012) « Comment utiliser les bétons fibrés en zone sismique », *Le Moniteur*, solutions techniques, 14 mai, dossier complet « spécial béton » (comprenant des photographies de plusieurs projets réalisés sur la plateforme d'essai des structures du LCPC / de l'Ifsttar) dans le n° 5657, p. 34.
- QUIERTANT M., BABY F., KHADOUR A., MARCHAND P., RIVILLON P., BILLO J., LAPEYRERE R., TOUTLEMONDE F., SIMON A., CORDIER J., RENAUD J.-C. (2012) *Deformation monitoring of reinforcement bars with a distributed fiber optic sensor for the SHM of reinforced concrete structures*, 9th international conference on NDE in relation to structural integrity for nuclear and pressurized components, Seattle (Washington, USA), 22-24 May.
- ATRACH M. (2012) *Structures en béton fibré à ultra-hautes performances pour des applications parasismiques*, projet BADIFOPS, projet de fin d'études, Ecole des Ponts Paris Tech, 31 juillet.
- HERRERA A. (2012) *Participation aux expérimentations du projet BADIFOPS*, rapport de stage, ENTPE, 17 septembre.
- SIMON A. (2013) *Bétons de fibres et BFUP : perspectives pour la réhabilitation sismique*, journée technique du chapitre ACI de Paris « Renforcement parasismique des constructions en béton », 4 juillet, CHEC Paris Ile de France
- KHADOUR A., BABY F., HERRERA A., TAILLADE F., MARCHAND P., RIVILLON P., SIMON A., QUIERTANT M., TOUTLEMONDE F. (2013) *Distributed strain monitoring of reinforcement bars using optical fibers for SHM*, Concrete under Severe Conditions. Environment and Loading, proc. CONSEC'13, Nanjing, China, September 23-25, pp. 1620-1629.
- TOUTLEMONDE F., SIMON A., RIVILLON P., MARCHAND P., BABY F., QUIERTANT M., KHADOUR A., CORDIER J., BATESTI T. (2013) *Recent experimental investigations on reinforced UHPFRC for applications in earthquake engineering and retrofitting*, 2nd International symposium on Ultra-high performance fibre-reinforced concrete, UHPFRC 2013, Marseille, France, October 1-3, Toutlemonde & Resplendino eds, RILEM PRO 87, pp. 597-606.
- QUIERTANT M., BABY F., KHADOUR A., MARCHAND P., RIVILLON P., TOUTLEMONDE F. (2013) Instrumentation par fibres optiques des ouvrages en BA pour la mesure répartie des déformations de traction des armatures, *Instrumentation Mesure Métrologie, N° spécial Capteurs à fibre optique - Développements et Applications*, sous la direction de Frédéric Taillade, Janvier-juin, vol. 13, n° 1-2/2013. p. 131-147.
- TOUTLEMONDE F. et al. (2014) *Crack control and ductility of reinforced UHPFRC structures answering to the demand in seismic engineering*, ACI Spring Convention « Concrete endures », Reno, NV, March 23-27, Special session « UHPC innovations in seismic performance ».
- MARCHAND P. et al. (2014) *Les expérimentations dans le projet BADIFOPS*, Journées Ouvrages d'Art IFSTTAR - Cerema, Marne-la-Vallée, 11-13 juin.
- DEVEAUD J.-P., GENEREUX G., SIMON A. (2014) *Projet RGPU BADIFOPS : Applications aux ouvrages d'art*, Journées Ouvrages d'Art IFSTTAR - Cerema, Marne-la-Vallée, 11-13 juin.

- AHOUANSON Z. (2013) *Conception et dimensionnement des ponts vis-à-vis du séisme et propositions de solutions innovantes à la base de béton fibré. Etude d'ouvrage non courant (projet BADIFOPS)*, rapport de stage de mastère, Ecole des Ponts et Chaussées, 16 décembre.
- ROUBAUD C. (2014) *Modélisation du comportement de structures en BFUP armé*, rapport de stage, ENTPE, 10 septembre.
- MOREIRA N. (2014) *Etude d'un ouvrage non courant. Renforcement sismique des piles de pont par chemisage BFUP (projet BADIFOPS)*, rapport de stage, Ecole des Ponts et Chaussées, 11 septembre.
- KHADOUR A., QUIERTANT M., BABY F., MARCHAND P., RIVILLON P., SIMON A., TOUTLEMONDE F. (2014) Experimental investigation on strain distribution in reinforcing bars by means of fiber-optic sensors, *Studies and Researches*, V. **33**, Politecnico di Milano, Milan, Italy, pp. 85-99.
- MARCHAND P., BABY F., KHADOUR A., BATTESTI T., RIVILLON P., QUIERTANT M., NGUYEN H.H., GENEREUX G., DEVEAUD J.-P., SIMON A., TOUTLEMONDE F. (2015) Bond behaviour of reinforcing bars in UHPFRC: experimental investigation, *Materials and Structures*, DOI 10.1617/s11527-015-0628-0, published online 21 May 2015.

8. Réponse apportées par les porteurs du projet aux observations des relecteurs

Observations générales

I. Indisponibilité de la dalle d'essais de l'IFSTTAR

L'indisponibilité de la dalle d'essais de l'IFSTTAR pendant la durée du projet a très sérieusement compromis l'atteinte des principaux objectifs du projet. Les expérimentations, analyses et modélisations sur corps d'épreuve représentatifs en BFUP soumis à une sollicitation complexe de flexion composée n'ont pu être menées. Il en résulte que les résultats obtenus sont très en deçà de ce qui était attendu dans le cadre du projet.

L'indisponibilité de la dalle d'essais de l'IFSTTAR à compter de septembre 2012 s'est imposée comme un cas de force majeure à l'ensemble des partenaires du projet. L'absence constante de calendrier fiable de livraison des nouvelles installations de l'IFSTTAR constitue une malheureuse réalité qui a dépassé l'ensemble des acteurs pendant toute la durée du projet, et qui interroge la légitimité de la maîtrise d'ouvrage représentée par la DAFI et l'organisation de conduite d'opération et maîtrise d'œuvre mise en place vis-à-vis des organismes « futurs exploitants » concernés.

L'organisation du projet s'est efforcée de pallier l'impossibilité de réaliser les essais de structure à l'IFSTTAR par la réalisation au CSTB de l'essai prototype, et par une utilisation plus complète des données de la littérature, qui a permis de réaliser l'essentiel des tâches d'études prévues.

Enfin, les conditions doivent être réunies à l'été 2015 pour que les équipes de l'IFSTTAR puissent effectivement utiliser leur nouvelle dalle d'essais de structures. Même s'il sera nécessaire de pallier à des conditions de réalisation dégradées, les essais de corps d'épreuve représentatifs du projet BADIFOPS seront réalisés en priorité, et les équipes concernées restent mobilisées pour exploiter ces essais comme prévu.

II. Caractérisation de l'ancrage des armatures dans le BFUP

Les résultats des essais de caractérisation qui ont pu être réalisés sont toutefois dignes d'intérêt. Ils sont notamment la source d'avancées probantes sur la détermination des conditions d'ancrage complet d'une barre d'armature.

Les résultats de cette partie du programme d'essais sont effectivement complets, originaux, la démonstration de la cohérence des informations a notamment bénéficié de l'instrumentation originale par fibres optiques. Cette partie du programme a fait l'objet de présentations dans des conférences et d'une publication dans une revue internationale, et a largement contribué à la calibration de la future norme sur la conception des structures en BFUP (PR NF P 18-710).

III. Mise en évidence de la ductilité des BFUP

La ductilité du BFUP n'a pu être mise en évidence, faute d'une base de données expérimentale suffisante.

La mise en évidence de la ductilité des BFUP sur éléments représentatifs était directement liée à la réalisation des essais prévus à l'IFSTTAR (voir réponse au commentaire 1.). Lorsque cela a été possible, les tâches d'études se sont fondées sur les résultats disponibles de la littérature. Les expérimentations sur poutres et tirants du projet ont mis en évidence une nécessaire prudence dans la prise en compte de la ductilité des sections de BFUP armé, lorsque les armatures ou d'autres mécanismes risquaient de perturber la mise en place optimale des fibres vis-à-vis des effets de renforcement ou de confinement attendus.

IV. Description de l'utilisation des fibres optiques

L'utilisation de fibres optiques pour la mesure des ouvertures et de l'espacement des fissures mériterait de faire l'objet d'une description plus détaillée. La mise en œuvre de ce type de matériau reste délicate ; le rapport pourrait y consacrer une part plus importante.

Cette nouvelle méthode d'instrumentation a fait l'objet de plusieurs communications dans des conférences spécialisées et de plusieurs publications scientifiques internationales, citées à la fin du rapport. Les dispositions mises au point ont justement visé à rendre la mise en œuvre de cette technique moins « délicate » et surtout fiable. Le retour d'expérience sur l'ensemble des campagnes d'essai réalisées (à compléter encore par les essais sur poteaux) est excellent.

V. Mise à disposition des données

Les données obtenues par fibre optique sont très appréciables. Il serait intéressant que le porteur du projet mette à disposition du public la base de données expérimentale des mesures, en s'appuyant sur les plateformes adaptées du réseau Internet (à l'image des bases de données comme NISEE, CHEOPS, Sourceforge, etc.).

La mise en ligne de données expérimentales ne faisait pas partie des attendus de la valorisation du projet. Les résultats d'essais ne semblent réellement utilisables qu'associés à l'interprétation qui en est faite et qui en synthétise l'information utile et validée. Les publications scientifiques (qui font l'objet d'une évaluation critique) sont le mode préférentiel normal de cette diffusion.

Il est par ailleurs important que les laboratoires ayant produit les résultats aient une interaction constructive avec les éventuels utilisateurs de ces données, susceptibles par exemple de calibrer des modèles avec. Cela peut notamment s'organiser dans le cadre de benchmarks numériques qui constituent des modalités riches de coopération scientifique.

VI. Limitations associées à l'Eurocode 8

Le rapport présente un état des lieux des possibilités d'utilisation de BFUP en parasismique. Certaines pistes sont écartées, du fait des limitations de l'Eurocode 8 (e.g. limitation de ductilité et dissipation d'énergie par compression du béton). Il serait intéressant de sortir de ce cadre et de chercher à valoriser le matériau BEFUP (armé ou pas) car son comportement est quelquefois très différent du béton armé ordinaire.

Les limitations évoquées ne sont pas liées à l'Eurocode 8, mais à la démarche usuelle de conception parasismique où la demande de ductilité est généralement exclue des éléments horizontaux (planchers, tabliers de pont). Il est clair que le BFUP peut trouver sa valorisation dans de tels éléments à cause de l'allègement qu'il peut procurer, sans pour autant qu'il soit fait appel par le calcul à sa capacité de comportement post-élastique, même si cette dernière existe. Le projet BADIFOPS a notamment contribué à prévoir dans la future norme sur la conception des structures en BFUP (PR NF P 18-710) une annexe associée à la conception parasismique, qui explicite comment peuvent s'appliquer les principes généraux de l'Eurocode 8, et comment en particulier peut être vérifiée l'exigence de ductilité lorsqu'elle est nécessaire, tout en s'affranchissant a priori dans le cas du BFUP des dispositions constructives héritées du béton armé.

VII. Positionnement vis-à-vis du renforcement par composites collés

Au chapitre 5, dans tous les cas étudiés, le renforcement par chemisage en matériaux composites est écarté sans raison. Pour la première application, cette solution n'est même pas

mentionnée. Dans le cas de la deuxième application, elle est mentionnée mais écartée, alors qu'elle présente essentiellement les mêmes avantages que la solution de renforcement par BFUP (Figure 30). Il s'agit d'une solution assez répandue, économiquement et technologiquement plus intéressante dans la plupart des cas comparée aux BFUP. Le fait que le BFUP soit une alternative intéressante quand la durabilité est une préoccupation (milieu agressif, risque d'incendie, autres risques de dégradation, etc.) mériterait d'être mieux argumenté.

Dans les cas étudiés (piles voiles), l'efficacité du renforcement par composites collés est compromise par la géométrie allongée de la section, et par la quantité de ferrailage transversal à reconstituer.

La possibilité de reconstituer une protection durable des armatures par un enrobage réduit de BFUP se déduit par exemple des recommandations AFGC 2013, et se base sur les très faibles coefficients de transfert mesurés sur ces matériaux (repris dans les spécifications de base des BFUP conformes à la future norme NF P 18-470).

VIII. Continuation par des expérimentations de grande taille

Dans la continuation de ces travaux, il serait utile de valider les premiers résultats obtenus sur des dispositifs expérimentaux de plus grande taille soumis à des efforts statiques et dynamiques. On peut penser à la table vibrante du CEA à Saclay par exemple ou bien au mur de réaction du laboratoire ELSA du JRC d'Ispra en Italie.

L'intérêt de validations ultérieures à grande échelle sur des installations susceptibles d'appliquer des sollicitations sismiques réalistes est indéniable. Cependant, le coût et les exigences organisationnelles de telles expérimentations les situent bien clairement dans un deuxième temps, après que la réalisation d'essais statiques aura fourni dans des conditions conventionnelles reconnues l'accès à une démonstration raisonnablement fiable de la réponse des éléments étudiés (voir commentaire 1.)

Observations complémentaires suite aux réponses apportées par les porteurs du projet

V^{bis}. Mise à disposition des données

Si les communications scientifiques sont un vecteur utile et nécessaire de dissémination des résultats, elles ne fournissent, dans le cas présent, qu'une interprétation des essais conduits ; elles ne peuvent donc se substituer à la publication des données expérimentales supports, lesquelles ont été obtenues à partir de financements publics.

Permettre à d'autres chercheurs de mener leur propre travail d'expertise et d'interprétation des essais réalisés reste le moyen le plus fructueux de valoriser les résultats de ce projet. Une telle dissémination n'est en rien contradictoire avec l'organisation de "benchmarks". On citera d'ailleurs pour exemple le cas récent du projet national CEOS.fr, pour lequel les données expérimentales obtenues seront mises en ligne sur des sites web dédiés.

Il est demandé que les partenaires du projet s'engagent à publier leurs données expérimentales en précisant quand et de quelle manière cette mise à disposition de données interviendra.

Les partenaires du projet BADIFOPS ont d'ores et déjà publié les résultats expérimentaux de certaines parties du programme (cf. Partie 7. du rapport scientifique), on citera notamment : KHADOUR A., QUIERTANT M., BABY F., MARCHAND P., RIVILLON P., SIMON A., TOUTLEMONDE F. (2014) *Experimental investigation on strain distribution in reinforcing bars by means of fiber-optic sensors*, Studies and Researches, V. 33, Politecnico di Milano, Milan, Italy, pp. 85-99. MARCHAND P., BABY F., KHADOUR A., BATTISTI T., RIVILLON P., QUIERTANT M., NGUYEN H.H., GENEUREUX G., DEVEAUD J.-P., SIMON A., TOUTLEMONDE F. (2015) Bond behaviour of reinforcing bars in UHPFRC: experimental investigation, *Materials and Structures*, DOI 10.1617/s11527-015-0628-0, published online 21 May 2015.

Ils s'engagent à poursuivre la publication des résultats notamment dans les actes de conférences dédiées aux BFUP, et dans des revues scientifiques internationales (ce qui se déroulera sur une période de 1 à 3 ans après l'achèvement des campagnes expérimentales).

VII^{bis}. Positionnement vis-à-vis du renforcement par composites collés

Il est demandé que [la réponse apportée à l'observation relative au renforcement par composites] soit développée et présentée dans le rapport du projet afin que le lecteur soit averti des raisons qui ont conduit à écarter cette solution.

Ces arguments sont rappelés dans la version définitive du rapport scientifique, lors de la description de la solution de chemisage des piles voiles étudiée dans les projets d'ouvrages d'art.