



ÉVOLUTION

DES TECHNIQUES DE RENFORCEMENT EN MATÉRIAUX COMPOSITES

AUTEURS : YVON GICQUEL, CHEF PRODUITS RÉPARATION RENFORCEMENT PROTECTION, SIKA -
THIERRY BERSET, CORPORATE KEY PROJECT MANAGER STRUCTURAL STRENGTHENING BUSINESS UNIT CONTRACTORS 

L'APPARITION, AU MILIEU DES ANNÉES 1990, DES TECHNIQUES DE RÉPARATION ET DE RENFORCEMENT DE STRUCTURES, À BASE DE FIBRES DE CARBONE, A RAPIDEMENT SUPPLANTÉ LES SOLUTIONS TRADITIONNELLES UTILISANT DES PLATS MÉTALLIQUES COLLÉS. AUJOURD'HUI, L'EMPLOI DE LAMELLES POST-TENDUES PERMET D'ACCROÎTRE LES CAPACITÉS DE CES SYSTÈMES GRÂCE À UNE MEILLEURE EXPLOITATION DES PERFORMANCES INTRINSÈQUES DU MATÉRIAU CARBONE.

Les techniques de renforcement et de réparation permettent, très souvent, d'accroître la résistance de structures endommagées, vieillissantes ou dégradées (corrosion, fatigue), et donc de prolonger la durée de vie des ouvrages (ponts, bâtiments, parkings, réfrigérants, réservoirs d'eau) impactés. Elles sont également capables de résoudre les nombreux problèmes structurels qui peuvent résulter de défauts de conception ou d'exécution, mais aussi liés à des modifications des conditions d'exploitation : création de trémies, nouvelles réglementations, changement d'activité des locaux...

LES FIBRES DE CARBONE SUPPLANT L'ACIER

Les solutions de renforcement traditionnelles, par plats métalliques extérieurs collés, qui étaient en vigueur depuis la seconde moitié du siècle dernier, ont été supplantées, à la fin des années 1990, par des produits composites, à base de fibres de carbone, issus des techniques employées notamment dans l'industrie aéronautique. Ce succès relativement rapide, du moins à l'échelle du BTP hexagonal, s'explique par un faisceau de performances qui, au final, a gommé l'argument financier qui était classiquement opposé à ces solutions, lors de leur émergence. Les tôles sont en effet lourdes à transporter et à manipuler, leur mise en place requérant l'installation préalable de structures d'étaie importantes afin de reprendre le poids propre des éléments métalliques, mais aussi d'exercer les efforts de mise en

pression qui assurent le collage.

Les textiles ou les lamelles composites se présentent, en revanche, sous la forme de rouleaux légers, pouvant être facilement découpés à la longueur voulue sur site, le collage des lamelles ou des lés de tissus s'effectuant simplement au moyen d'un adhésif à base de résine époxydique (photo 1)

Structurellement parlant, des études à long terme ont par ailleurs démontré que des zones de corrosion étaient susceptibles d'apparaître sous les plats métalliques sur des ouvrages soumis à des conditions météorologiques difficiles des problèmes de fatigue pouvant également survenir suite aux phénomènes de friction se produisant entre les tôles et les zones de béton fissurées. Dernier atout en faveur des composites des chantiers qui le plus souvent ne nécessitent pas d'interrompre le fonctionnement de l'ouvrage en cours de réparation ou de renforcement.

DES SOLUTIONS DE HAUTE TECHNICITÉ

Un argument technico-économique clé qui explique les premières applications en milieu hospitalier, ces solutions permettent de maintenir le bâtiment en exploitation lorsque des projets de remise aux normes, réclamant fréquemment la création de trémies ou lorsque l'arrivée de nouveaux matériels lourds de type scanner nécessitent de renforcer les dalles existantes. Facilité d'approvisionnement, simplicité de mise en œuvre, rapidité d'exécution et maintenance nulles s'inscrivent donc dans une vision globale qui a rapidement séduit tous les acteurs de la



2

© SIKA

1- Pose de lamelles Sika® CarboDur® – Viaduc de Toutry (Côte d'Or).
2- Sika® CarboStress®.

construction, des maîtres d'ouvrage aux entreprises applicatrices. Dans tous les cas, et contrairement à une apparente simplicité de mise en œuvre, l'emploi de ces techniques nécessite de respecter une méthodologie rigoureuse (calculs, protocole d'application), une étude de diagnostic devant être préalablement menée, conformément à la nouvelle norme européenne NF EN 1504 afin de déterminer les pathologies, leur origine et l'état du support. Ce dernier paramètre peut être en effet le facteur limitant de ces solutions, l'interface de collage étant le point crucial du système en raison des efforts de cisaillement générés entre le béton et la solution composite

D ou notamment l'idée de s'affranchir de ce problème, en allant chercher directement le point d'ancrage dans la couche de béton sain, et ce en engravant des barres de carbone dans la structure (voir encadré) ou en utilisant des lames de carbone post tendues in situ. Ce dernier système à base de lamelles PRFC (Polymère Renforcé de Fibres de Carbone), mis au point en laboratoire au milieu des années 90 et mis en œuvre in situ des 1999 permet donc d'exploiter de manière optimale les performances intrinsèques du matériau carbone (photo 2)

UNE SOLUTION COMPACTE

UNE SOLUTION COMPACTE

Le système à base de lamelles PRFC permet donc de réduire la déformation des aciers existants, d'augmenter la capacité portante, d'agir en tant que renforcement actif de réduire la fissuration dans les sections tendues du béton et de limiter les déformations, chaque lamelle recevant un effort de précontrainte atteignant 220 kN. Dans la pratique, il combine à la fois les avantages de la précontrainte additionnelle (renfort actif) et ceux du renforcement externe par collage (renfort passif), il répond également aux mêmes domaines d'applications que la précontrainte conventionnelle (prévention du risque sismique, réhabilitation des structures avec câbles de précontrainte

RENFORCEMENT PAR BARRES DE CARBONE ENGRAVÉES

Parmi les autres solutions classiques mises en œuvre pour renforcer une structure dégradée, insuffisamment dimensionnée ou mal réalisée, figure la technique qui consiste à apporter un supplément d'armatures via l'ajout de barres d'acier. Celle-ci nécessite un diagnostic préalable mais permet, notamment, de faire abstraction de l'état du support en surface en allant chercher le béton sain qui se trouve fréquemment, même sur des ouvrages dégradés, à quelques millimètres/centimètres de profondeur. Autre avantage : solution peu visible, faible risque de vandalisme, les armatures engravées étant naturellement protégées. Parfois malheureusement, et en particulier sur les ouvrages en béton armé mal conçus, les épaisseurs d'enrobage insuffisantes ne permettent pas toujours de réaliser des engravures suffisamment larges et profondes. D'où, là encore, l'intérêt de remplacer l'acier par le carbone, les performances de ce dernier matériau permettant de diminuer les sections à mettre en œuvre. Cette solution, qui bénéficie d'ores et déjà de recommandations en Italie, au Canada et aux États-Unis, garantit par ailleurs l'insensibilité totale aux problèmes de corrosion.

corrodés, ouverture dans un voile, limitations des ouvertures de fissures, limitations des déformations...). Principale différence . les têtes d'ancrages des tendons PRFC sont elles aussi en matériau composite et sont ajustées à la lamelle Sika® CarboDur® (sur site ou à l'atelier de l'entreprise), alors que les blocs d'ancrage fixes et actifs scellés à la structure sont en acier (photo 3). Les têtes d'ancrage se caractérisent également par leurs très faibles dimensions (100 x 80 mm), cette miniaturisation extrême des composants permettant, par voie de conséquence, d'engraver en partie le système et d'employer des vérins très compacts lors de la phase de mise en tension des tendons PRFC. Ces avantages en termes d'encombrement, couplés aux critères de maniabilité et de légèreté déjà évoqués pour les lamelles classiques, rend le système particulièrement intéressant dans toutes les configurations d'accès ou de cheminements difficiles, là où une solution par précontrainte conventionnelle serait beaucoup plus complexe et lourde à mettre en œuvre. En termes de références cette solution, qui bénéficie d'un rapport d'efficacité de l'EMPA (Laboratoire Fédéral d'Essais de Matériaux

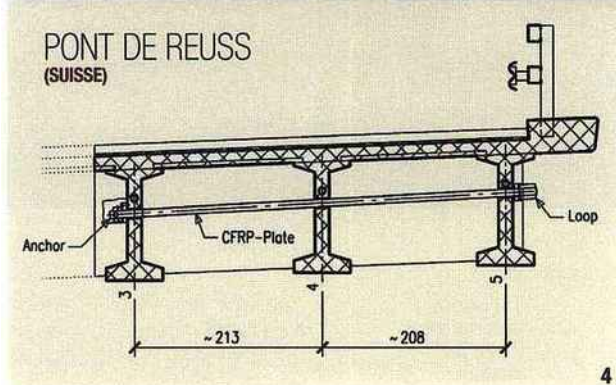
et de Recherches en suisse), a été appliquée sur de nombreux ouvrages helvétiques depuis une dizaine d'années. Elle devrait donc logiquement s'imposer sur le marché français eu égard, là encore, aux avantages qu'elle procure à l'ensemble des partenaires : maîtres d'ouvrage (réduction des délais d'intervention, maintenance minimisée, rapport coût/efficacité), maître d'œuvre (solution technique approuvée, retours d'expérience) et entreprises (délais d'installation rapide, personnel restreint). La technicité accrue que requiert cette solution, notamment au niveau des calculs, ne devrait pas être un frein à son développement dans l'Hexagone, puisque la majorité des entreprises de BTP qui interviennent dans le domaine de la réparation et du renforcement d'ouvrages disposent, en interne, des bureaux d'études et des compétences nécessaires en matière de conception et méthode.

UNE SOLUTION ÉPROUVÉE

Depuis 1999, plusieurs réalisations faisant appel au système de renforcement à base de lamelles PRFC ont eu lieu aussi bien dans le domaine des ouvrages d'art que celui du bâtiment d'habitation, de bureaux et de sites industriels.



FIGURE 4 / PHOTOS 3,4,5 © SIKA



3- Têtes d'ancrage fixes.
4- Pont de Reuss (Suisse).
5- Pont Hüttenbrücke (Suisse).

Applications aux ouvrages d'art

La première application en vraie grandeur s'est déroulée en 1999, dans le canton d'Uri (Suisse), sur un ancien pont à trois travées enjambant la rivière Reuss. L'ouvrage qui était constitué d'un tablier précontraint et de 5 poutres précontraintes, reliées par 9 poutrelles transversales, devait être détruit suite à l'augmentation du trafic et à l'apparition de corrosion au niveau de la précontrainte, les études ayant démontré un coût de renforcement et de réparation supérieur à celui de la construction d'un ouvrage neuf. Dans un premier temps, une moitié de l'ouvrage existant devait être démolie, la seconde moitié servant de pont provisoire pendant que le tablier du nouveau pont était préfabriqué, à proximité de l'ancien. La phase suivante consistait à démolir la seconde moitié pendant que l'ouvrage neuf était rippé à sa position définitive. Les différentes phases de déconstruction impliquaient de sectionner les câbles de précontrainte existant. Pour ce faire, 8 des poutrelles furent renforcées par l'intermédiaire d'une précontrainte extérieure classique, tandis que la neuvième l'était au moyen de lamelles PFRC post-contrainte (figure 4).

Ce chantier fut donc l'occasion de tester le système, avant et après la démolition

du pont, soit 7 mois après sa mise en œuvre. Les résultats attestèrent qu'aucune perte significative de précontrainte ne s'était produite durant cet intervalle de temps.

Sur le pont « Huttenbrücke », à Werthenstein (Suisse), ce sont les deux poutres longitudinales de cet ouvrage à trois travées qui ont été renforcées au moyen de lamelles PFRC post-contraintes, positionnées sur les deux côtés des porteurs (longueur 30 m), l'ancrage aux extrémités s'effectuant au moyen de broches noyées dans le béton (photo 5). L'objectif était d'accroître la capacité de l'ouvrage, construit dans les années 1950 pour une circulation de véhicules ne dépassant pas les 28 t de charge totale, les conditions d'exploitation actuelles nécessitant le passage de véhicules lourds, pesant jusqu'à 40 t, afin de permettre l'exploitation des forêts environnantes. Même cas de figure sur le pont du Stegweid à Spiez, dans le canton de Berne (Suisse), l'ouvrage devant lui aussi être renforcé afin de permettre l'augmentation des charges utiles de 28 à 40 t, le système mis en place dispose également d'ancrages fixes et mobiles.

Applications au bâtiment

Durant l'année 2010, deux références ont été réalisées en Suisse concernant

**LE SYSTÈME
SIKA®
CARBOSTRESS®
COMBINE
À LA FOIS
LES AVANTAGES
DE LA
PRÉCONTRAÎTE
ADDITIONNELLE
(RENFORT ACTIF)
ET CEUX DU
RENFORT PAR COLLAGE
(RENFORT PASSIF)**



PHOTOS 6, 7 & 8 © SIKA



le renforcement parasismique de bâtiment. La première réalisation se situe dans la sous-station électrique Regio à Solothurn (Suisse) où un bâtiment existant de 2 étages, constitué de murs en maçonnerie et de dalles en béton armé, a fait l'objet d'un diagnostic dont les conclusions préconisent un renforcement pour s'adapter aux exigences actuelles en matière parasismique. Parmi les différentes solutions envisageables, celle retenue fait appel au système Sika® CarboStress®, technique des tendons PRFC post-tendus et collés verticalement sur les murs en maçonnerie. Cette approche non conventionnelle fut la plus économique et les avantages suivants furent décisifs :

- Temps de mise en œuvre très court (3 jours de préparation, 3 jours d'installation des 6 tendons PRFC) ;
- Mise en œuvre facile dans un espace confiné grâce la faible épaisseur du système (passage derrière un transformateur, derrière des chemins de câbles électriques...);
- Réduction de la durée totale des travaux, grâce à l'installation d'autres équipements pendant l'application des tendons post contraints ;
- Technique dont l'efficacité a déjà été prouvée ;

6- Caisse d'Assurance Maladie Agrisano à Windisch (Suisse).
7 & 8- Sika® CarboStress®.

→ Coût du système Sika® plus faible qu'un nouveau mur en béton armé (qui aurait nécessité la dépose et repose de nombreux équipements).
Au total, 6 tendons verticaux de 7,00 à 14,50 m de long furent installés.

Le second exemple d'application se situe dans la ville de Windisch (Suisse) et concerne un bâtiment à usage de bureaux de la Caisse d'Assurance Maladie Agrisano (photo 6).

Il est actuellement constitué de huit étages et dans le cadre du projet devait recevoir un étage supplémentaire.

Le guide Suisse SIA 2018, en matière de sécurité sismique de bâtiment existant, exige la vérification totale du bâtiment en cas de changement structural significatif.

Cette vérification a mis en évidence la faiblesse de la structure dans une direction (10 % seulement de la résistance requise par la norme actuelle pour les bâtiments neufs).

Le contreventement dans cette direction était uniquement obtenu par un mur en maçonnerie relativement court. L'analyse de risque menée selon la norme SIA 2018 conduisait à des travaux d'un coût élevé pour accroître la résistance sismique recherchée.

L'étude et l'analyse comparative des différentes possibilités pour réaliser ce renforcement ont abouti au choix de la solution optimale : la mise en place d'une précontrainte additionnelle verticale utilisant des tendons PRFC post-tendus et collés en surface du support (photos 7 et 8).

Les murs ont été verticalement post contraints par 16 tendons PRFC (longueur de 8 à 24 m). L'avantage, un temps de préparation et d'installation très courts, alors que le planning initial n'avait pas envisagé le renforcement sismique.

Les 16 tendons Sika® CarboStress® ont ainsi été installés en façade, en 2 semaines, alors que les bureaux étaient occupés pendant les travaux. Légers les tendons PRFC de 24 m de long, facilement manutentionnés par un compagnon (transport et manutention sur échafaudage) ont été installés depuis le haut du bâtiment.

Quelques détails sur l'installation

Pour les blocs d'ancrages actifs, des broches de 120 mm de diamètre ont été installées dans le mur en béton armé du 1^{er} étage, application de la post-contrainte par vérin hydraulique et tiges filetées (voir photo 7).

Les ancrages fixes ont été positionnés dans les dalles en béton armé à différents étages (voir photo 8). Les tendons PRFC ancrés sont également collés au support avec l'adhésif structural Sikadur®-30 (toutefois dans ce cas, l'intégralité des efforts de traction est transférée aux ancrages d'extrémités fixes et actives). □

FAIRE ÉVOLUER LES SYSTÈMES DE COLLAGE

Si le génie civil français est axé, pratiquement à 100 %, sur le développement des techniques de renforcement à base de fibres de carbone, d'autres matériaux pourraient être employés dans un futur proche, à l'instar du verre ou de l'aramide, pour la mise au point de solutions hybrides répondant, notamment, aux nouvelles problématiques en matière d'applications parasismiques. Ces systèmes, déclinés sous forme de tissus composite, pourraient également être utilisés pour assurer un confinement anti-explosion, l'ensemble agissant en quelque sorte comme un verre securit qui empêcherait la dislocation, la dispersion et la chute de blocs de maçonnerie ou de béton. Autre piste d'évolution possible, au niveau des techniques de collage : l'Italie a, par exemple, suite au dernier séisme de l'Aquila, développé des systèmes de renforcement à base de tissu (grille) de fibres de verre imprégné par un produit à base de ciment pour renforcer les structures en maçonnerie. L'objectif était, en l'occurrence, de trouver des solutions rapides à mettre en œuvre, applicables dans des conditions difficiles (humidité ambiante et du support, température extérieure) et surtout par le maximum de personnes, les maçons étant plus habitués à travailler ce type de produits que de manipuler des résines synthétiques.