



Le BFUP Projeté : une solution durable pour la réparation des ouvrages

Arnaud FLOQUET¹, François TEPLY²

1. Freyssinet France, Agence Grands Projets, Câbles et Manutention, 1 Rue Jean-Pierre Timbaud, CS90774, 78066 Montigny Le Bretonneux Cedex, France.
arnaud.floquet@freyssinet.com
2. Freyssinet France, Direction Ingénierie & Innovation, 280 Avenue Napoléon Bonaparte, CS60002, 92506 Rueil Malmaison Cedex, France.
francois.teply@freyssinet.com

Résumé :

Les ouvrages côtiers et notamment ceux en béton armé sont fortement agressés par leur environnement qui combinent des chlorures, des alternances d'états sec et humide, ainsi qu'une érosion significative. Ces sollicitations nécessitent un entretien important, avec des conditions d'exécution qui peuvent nécessiter de s'adapter aux marées.

Freyssinet a toujours eu pour objectif de développer des techniques de réparation destinées à améliorer la durabilité des ouvrages et ainsi étendre leur durée de vie. C'est dans ce contexte qu'a été développé le Béton Fibré Ultra-Performant - BFUP Projeté. Les propriétés des bétons fibrés ultra-performants sont bien connues, et notamment leurs performances en durabilité qui ont fait l'objet de recommandations éditées par l'AFGC ainsi que plus récemment de normes. Freyssinet, en partenariat avec Ductal, a développé une formulation spécifique et des procédés permettant de mettre en œuvre un BFUP par projection. Cette technique permet ainsi de réaliser des opérations de réparation des ouvrages, en remplaçant des bétons dégradés par un matériau bien plus performant en durabilité qui permet d'étendre significativement la durée de vie de l'ouvrage, de réduire l'entretien des bétons et de renforcer la structure.

Mots-clés :

Génie côtier, Réparation, Ouvrages d'art, Environnement littoral, Béton Fibré Ultra Performant-BFUP, BFUP Projeté, Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete-UHPFRC.

1. Introduction

Les ouvrages de génie civil côtier en béton armé sont exposés à de multiples facteurs qui impactent leur durabilité, en réduisant parfois de façon très significative leur durée de vie.

On peut notamment citer :

- L'alternance d'états humide/sec dans les zones de marnage qui accélère le processus de corrosion des armatures ;

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

- L'exposition au brouillard salin qui tend à saturer en chlorures le béton ;
- L'érosion plus ou moins forte en fonction des marées et des conditions climatiques.

Les désordres les plus significatifs apparaissent généralement dès que les bétons sont suffisamment pollués par les chlorures pour que s'amorce un effet de pile avec les armatures, générant ainsi leur corrosion et un gonflement conduisant à fissurer le béton voire à éclater l'enrobage. La corrosion des armatures s'en trouve alors accentuée. La diminution de la section utile des aciers peut ensuite aller jusqu'à rendre la structure impropre à supporter les charges pour lesquelles elle a été construite.

Ces désordres sont courants et bien connus. Les réparations mises en œuvre sont généralement une purge complète des bétons pollués par les chlorures avant leur reconstitution, ou parfois la mise en place d'une protection cathodique par courant imposé.

Ces deux techniques sont efficaces, mais ont des inconvénients :

- La purge et reconstitution du parement permet de revenir à une situation identique à la construction initiale, ce qui prolonge la durée de vie sans résoudre les problèmes de durabilité ;
- La protection cathodique nécessite une maintenance plus poussée.

Depuis leur apparition au début des années 1990, les BFUP - Bétons Fibrés Ultra Performants, ont montré des performances en durabilité significativement supérieures aux meilleurs bétons standards. Ces matériaux ont d'abord fait l'objet d'une Recommandation de l'Association Française de Génie Civil (AFGC), qui les a classés dans la gamme des « matériaux à durabilité améliorée ». Plusieurs normes ont depuis été publiées, permettant de mieux définir les exigences sur leur formulation et les performances à atteindre.

C'est pour ces raisons que la tourelle « Le Cabon » située au large de Lorient (DENARIE & CORVEZ, 2013) a été le premier ouvrage maritime renforcé en BFUP en 2013. Il s'agissait alors d'un BFUP coulé en place qui a donc nécessité la conception et la mise en œuvre d'un coffrage spécifique, ce qui peut être complexe en fonction des ouvrages.

Conscient du potentiel de ce matériau dans la réparation des ouvrages, notamment en milieu maritime, Freyssinet a développé conjointement avec Ductal une formule et un procédé de BFUP Projeté, qui se prête particulièrement à la réparation des ouvrages.

2. Le BFUP Projeté, une innovation Freyssinet

2.1 Propriétés des BFUP

Les BFUP sont caractérisés par 3 normes :

- NF P 18-470 qui vise à qualifier le matériau ;
- NF P 18-451 qui cadre sa mise en œuvre ;
- NF P 18-710 qui définit les règles de calcul pour la justification des structures (annexe à l'Eurocode).

Un BFUP se définit par des propriétés mécaniques (résistance en compression supérieure à 130MPa et résistance en flexion supérieure à 6 MPa), mais également par ses performances en durabilité. Trois critères doivent être atteints pour respecter les seuils de base, conformément à la norme NF P 18-470 (2016), voir ci-après, figure 1.

4.2.2 Classes de résistance aux transferts

4.2.2.1 Seuils de base

Les BFUP doivent satisfaire aux trois exigences suivantes :

- a. porosité à l'eau à 90 jours $\leq 9,0 \%$ (selon la norme NF P 18-459) ;
- b. coefficient de diffusion des ions chlorure à 90 jours $\leq 0,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 / \text{s}$ selon la norme XP P 18-462 adaptée suivant les dispositions de l'Article A.1 ;
- c. perméabilité apparente aux gaz à 90 jours $\leq 9 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ selon la norme XP P 18-463:2011 adaptée suivant les dispositions du paragraphe A.2.1 .

NOTE

Ces critères situent les BFUP dans la gamme des matériaux cimentaires à durabilité potentielle très élevée pour les classes d'exposition XC, XS, XD et XF, au sens du guide AFGC [5] .

4.2.2.2 Classes de durabilité potentielle améliorée

Le BFUP peut appartenir à l'une ou l'autre des classes suivantes de durabilité potentielle améliorée, selon l'atteinte des seuils ci-après :

- a. Dp+ : porosité améliorée :
porosité à l'eau à 90 jours $\leq 6,0 \%$ (selon la norme NF P 18-459) ;
- b. Dc+ : résistance améliorée à la diffusion des ions chlorure :
coefficient de diffusion des ions chlorure à 90 jours $\leq 0,1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 / \text{s}$ selon la norme XP P 18-462 adaptée suivant les dispositions de l'Article A.1 ;

NOTE 1

Dans l'attente de l'homologation de la norme XP P 18-462, des valeurs comprises entre $0,1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 / \text{s}$ et $0,2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 / \text{s}$ peuvent être acceptées si l'incertitude de mesure rend une valeur $\leq 0,1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 / \text{s}$ non significative.

- c. Dg+ : résistance améliorée aux transferts gazeux :
perméabilité apparente aux gaz à 90 jours $\leq 1 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ selon la norme XP P 18-463:2011 adaptée suivant les dispositions du paragraphe A.2.2 .

NOTE 2

Ces classes de durabilité potentielle améliorée sont notamment valorisées lorsque l'exposition particulièrement sévère ou la durée d'utilisation du projet particulièrement longue le justifie, comme précisé en 5.3.3 .

Figure 1. Extrait de la norme NF P 18-470 (2016).

Le respect de ces performances permet alors de viser une Durée d'Utilisation Prévues (DUP) de 50 ans, voire 150 pour les classes d'exposition XS3, XD3, et XC4 notamment, lesquelles sont fréquemment rencontrées en milieu maritime.

Les BFUP présentent également une résistance à l'abrasion hydraulique particulièrement améliorée par rapport aux bétons standards. Des essais performanciers ont été réalisés par le laboratoire du Centre d'Analyse Comportementale des Ouvrages Hydrauliques-CACOH (CNR, Lyon) et ont permis de comparer les matériaux en fonction de leur résistance à l'abrasion et aux chocs. Des résultats indicatifs sont donnés sur les figures 2 et 3.

Ces performances particulièrement élevées en durabilité ont conduit Freyssinet à développer l'usage de ce matériau en réparation.

Valeurs indicatives de l'indice d'abrasion

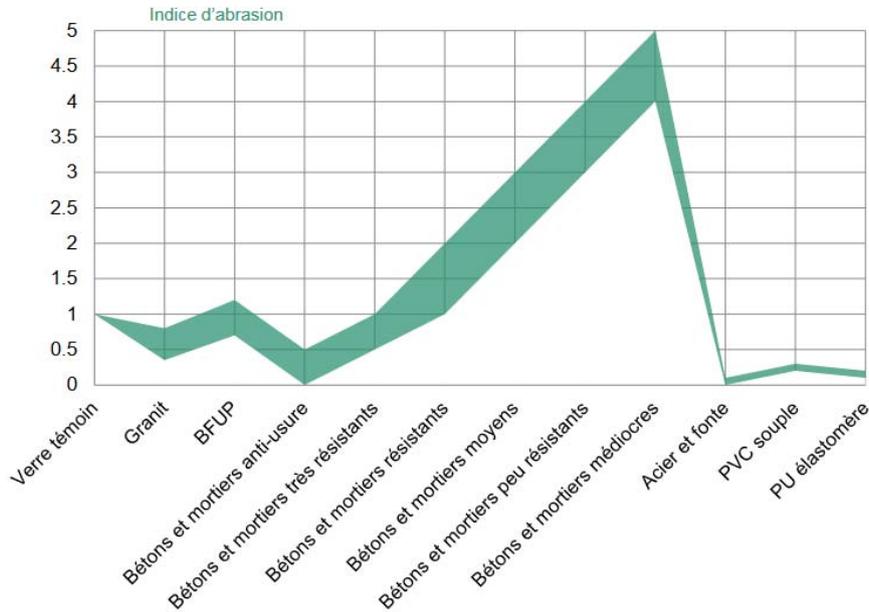


Figure 2. Ordre de grandeur de l'indice d'abrasion.

Valeurs indicatives des résultats

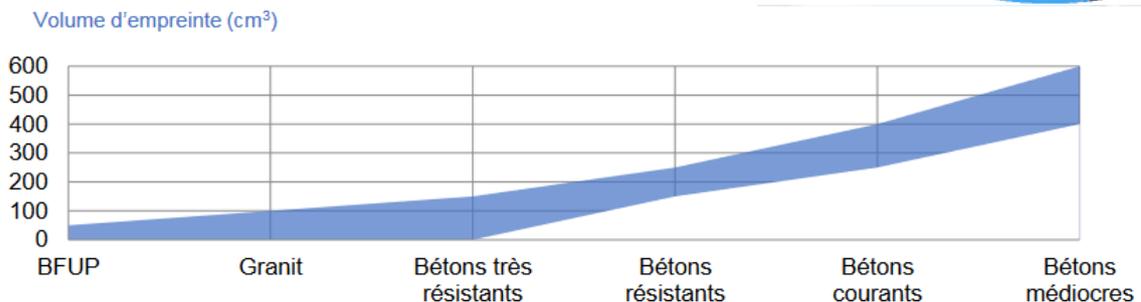


Figure 3. Ordre de grandeur de la résistance aux chocs.

2.2 Développement du BFUP Projeté

Avant le développement du BFUP Projeté, la mise en œuvre des BFUP nécessitait soit des coffrages, soit de limiter la mise en œuvre à des surfaces planes jusqu'à des pentes de l'ordre de 10%. Ceci limitait l'emploi de ce matériau en réparation, notamment lorsqu'il est nécessaire d'appliquer une épaisseur de l'ordre de 5-10cm contre un voile.

En partenariat avec Ductal, Freyssinet a mis au point un procédé de projection de BFUP, pour permettre sa mise en œuvre aussi bien en voile qu'en plafond jusqu'à des épaisseurs de 10cm par passe, sans nécessiter de coffrage.



Figure 4. Projection de BFUP en plafond.

Le développement de ce procédé a été réalisé sous la supervision du Centre d'Études des Tunnels (CETU) qui a apporté son expertise sur la démarche de qualification du matériau et les essais à réaliser. Des partenariats ont également été mis en place avec l'Université Gustave Eiffel et le CEREMA pour déterminer la loi de comportement du matériau à utiliser pour les calculs de structures.

Ce procédé a été mis en œuvre depuis 2018 sur plusieurs chantiers de réparation de buses métalliques, pour lesquels il est tout à fait approprié (voir figure 4). Il a également été mis en œuvre sur 2 barrages sur le Rhône, à Sauveterre et Caderousse.

2.3 Adhérence et compatibilité avec le support :

Dans le cas d'un support béton, il n'y a évidemment aucune incompatibilité chimique entre le BFUP Projeté et le support. L'adhérence a été caractérisée durant la phase de qualification : après une préparation de surface par sablage, la reprise de bétonnage n'est pas un point faible, la rupture en traction sur éprouvette se produit systématiquement dans le béton support.

L'application de BFUP Projeté sur un support béton préparé par hydrodémolition n'a pas été testée mais l'application de BFUP coulé sur béton après hydrodémolition est bien documentée. Elle est courante en Suisse où la technique est décrite dans la norme SIA 2052 (2016). Le comportement du composite béton armé / BFUP est monolithique

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

(BRUHWILER, 2016). En France Freyssinet a mis en œuvre la surcouche de BFUP sur le pont Warren de l'A36, avec une adhérence supérieure à 1,5MPa (APRR *et al.*, 2022). Dans le cas d'un support en maçonnerie, il convient en premier lieu de s'assurer, comme avant toute application de matériau cimentaire, de la compatibilité entre les pierres et la pâte cimentaire, d'une part, mais aussi de la compatibilité avec les joints. Certaines pierres calcaires ont tendance à fondre en présence de ciment, et les maçonneries hourdées au plâtre génèrent des sels gonflants quand elles sont soumises au ciment en présence d'humidité. Il importe donc avant toute application de matériau cimentaire sur une maçonnerie de faire caractériser par un laboratoire cette compatibilité chimique.

Une fois la compatibilité chimique acquise, l'adhérence peut être caractérisée si elle est nécessaire. Dans la plupart des applications cependant, le BFUP agit comme une couche de protection soit physique (abrasion, chocs), soit chimique (protection vis-à-vis des chlorures ou des sulfates). Une adhérence de « bonne construction » peut alors être suffisante. Ainsi, la protection de la tourelle du Cabon dans le port de Lorient (DENARIE & CORVEZ, 2013) s'est faite sans ôter la peinture en place. Dans le cas de réparation structurelle où l'adhérence est recherchée, celle-ci devra être caractérisée lors d'une épreuve de convenance, la très forte variabilité du matériau « maçonnerie » ne permettant pas de définir de façon générale la préparation de surface adéquate et l'adhérence pouvant être obtenue. Citons toutefois les travaux de CHEN & WANG (2020) qui ont démontré un comportement monolithique sur maçonnerie de briques.

3. Un matériau idéal pour l'entretien des ouvrages côtiers

3.1 Avantages du BFUP face aux agressions maritimes

En comparaison aux bétons traditionnels, les BFUP présentent une durabilité bien plus importante face aux agressions maritimes :

- Un coefficient de diffusion des ions chlorure plus faible ;
- Une résistance à l'érosion plus importante.

Le BFUP Projeté, présente l'avantage de ne pas nécessiter de coffrage, ce qui est plus adéquat pour les réparations en zone de marnage. Freyssinet développe actuellement une version RIG (Résistance Initiale Garantie), qui permet un début de prise immédiat et une résistance en compression >3MPa à 3h après malaxage de la gâchée. Ceci permet de pouvoir mettre en œuvre le BFUP à marée basse, sans avoir à mettre en place de protection pour le protéger à marée haute.

La mise en œuvre d'un renforcement à haute durabilité est également une solution intéressante pour réduire l'empreinte environnementale de l'entretien des ouvrages. En allongeant la durée de vie des structures, on réduit ainsi le nombre d'interventions et leur impact sur le climat.

3.2 Pertinence du BFUP pour la réparation d'ouvrages maritimes

Les caractéristiques de ce matériau permettent d'envisager son application à l'ensemble des ouvrages en béton ou maçonnerie présentant des pathologies liées à l'érosion, la pollution aux chlorures ou la corrosion des armatures. Par son adhérence au support, sa grande résistance en compression et son étanchéité aux agents agressifs, le BFUP projeté permet de réaliser un renforcement monolithique permettant à la fois d'augmenter la capacité portante des structures et de protéger les bétons intérieurs.

La pertinence du choix de réparation est guidée par le coût global du choix de la réparation, qui dépend de plusieurs critères :

- Coût direct des travaux ;
- Maintenance de l'ouvrage ;
- Durabilité des travaux.

La même analyse doit également être réalisée pour l'impact environnemental des travaux, en intégrant le cycle de vie complet de l'ouvrage.

Le BFUP est un matériau certes plus onéreux au m³ que les bétons standards, mais l'impact économique est minoré par une diminution des quantités nécessaires (les enrobages sont divisés par 2), et une amélioration de la durabilité qui réduit d'autant les réparations ultérieures. Dans le cas de la réparation des ouvrages maritimes, on note une part significative des accès et contraintes liées au travail en zone de marnage. Ceci réduit d'autant l'importance du coût du matériau dans le coût global de la réparation.

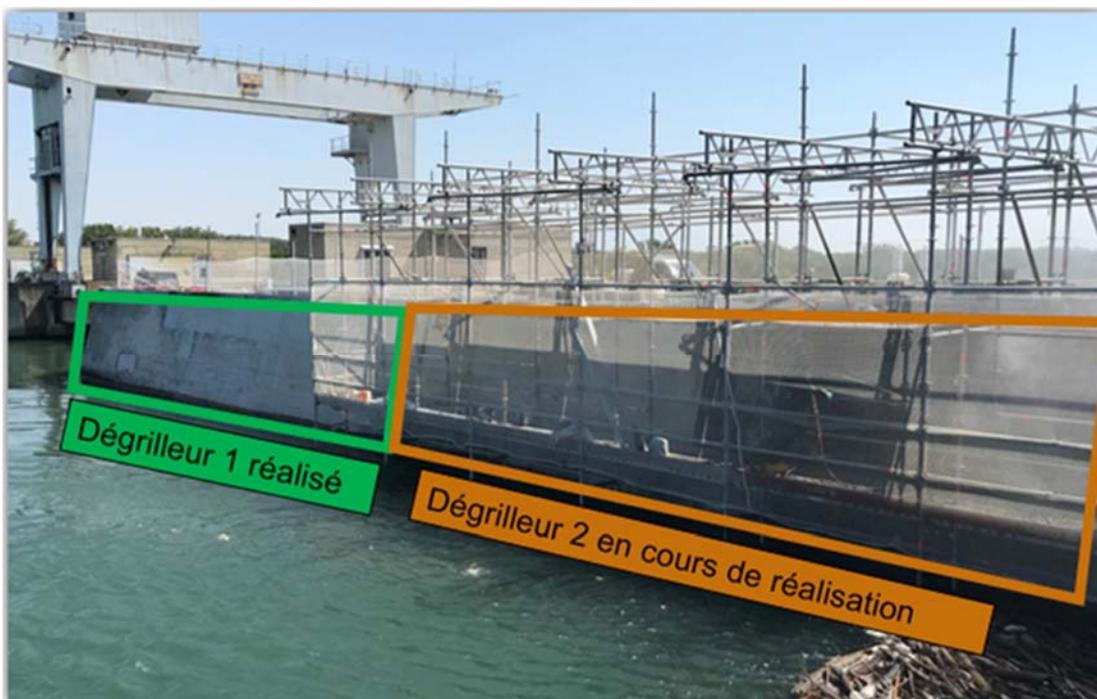


Figure 5. Réparation du parement des dégrilleurs du barrage de Sauveterre.

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

Le BFUP, et en particulier le BFUP Projeté est donc tout à fait pertinent pour la réparation des ouvrages tels que :

- Des poutres magistrales des quais ;
- Des digues ;
- Des embases de phares ;
- Des sous-faces de quais ;
- Des pieds de piles.
- Des parements de barrages (voir figure 5).

Grâce aux propriétés mécaniques des BFUP, il est également envisageable de réaliser des chemisages complets de piles d'ouvrage pollués par les chlorures, de telle sorte que le chemisage soit apte à reprendre la totalité des charges, et ainsi éviter la démolition en sous-œuvre par plots alternés de piles d'ouvrages sous exploitation.

4. Conclusions

Si l'usage des BFUP dans la réparation des ouvrages commence à se développer, on constate qu'il y a encore peu de cas d'ouvrages maritimes traités ainsi, notamment en raison des difficultés liées au travail en zone de marnage. Le BFUP projeté, et notamment sa version RIG assurant une prise rapide, est une innovation pertinente pour réparer de manière plus pérenne les ouvrages de génie civil côtier.

Avec une durabilité bien supérieure, c'est aussi une solution qui s'inscrit complètement dans une logique de réduction de l'impact environnemental des activités humaines, car les émissions liées aux travaux de réparation sont amorties sur une durée bien plus longue.

5. Bibliographie

APRR, FREYSSINET, VICAT, INGEROP (2022). *Mise en œuvre de BFUP pour l'étanchéité du Viaduc du Canal de Dérivation de la Saône sur l'A36*, Webinaire de l'AFGC du 11 janvier 2022.

BRUHWILER E., « *Structural UHPFRC* » : *Welcome to the post-concrete era !*, First International Interactive Symposium on UHPC, July 18-20, 2016, Des Moines, Iowa

CHEN Y., WANG S. (2020). *Feasibility Study of UHPC Reinforced Masonry Structure*, Scientific Journal of Intelligent Systems Research, Vol.2 Issue 08, 5-10. ISSN: 2664-9640

DENARIE E., CORVEZ D. (2013). *Rejuvenation of maritime signalisation structures with UHPFRC*, RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, UHPFRC 2013, October 1-3, 2013, Marseille, France, 157-166.

NF P18-470 (2016). *Bétons - Bétons fibrés à ultra hautes performances - Spécification, performance, production et conformité*, Editions AFNOR, 90p.

SIA 2052 (2016). *Béton fibré ultra-performant (BFUP) - Matériaux, dimensionnement et exécution*. Norme suisse, 48p.