

17<sup>e</sup> édition des Journées scientifiques  
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton  
(RF)<sup>2</sup>B

---

IFSTTAR, Marne-la-Vallée, France  
7 et 8 juillet 2016

## **Renforcement des phares en mer à l'aide de Bétons Fibrés Ultra Performants**

Emmanuel Denarié<sup>1</sup>, Nicolas Fady<sup>2</sup>, Christophe Loraux<sup>1</sup>, Eugen Brühwiler<sup>1</sup>

1 Maintenance, Construction et Sécurité des ouvrages, (MCS-ENAC), École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), GC B3-435, Station 18, CH-1015 Lausanne, Suisse.

2 CEREMA – DtecEmf/DT/TSMF/PIE, Technopôle Brest Iroise B.P. 5, 155, Rue Pierre Bouguer, F-29280 – Plouzané

**RÉSUMÉ** : Les phares en mer constituent un patrimoine historique remarquable dont la gestion du vieillissement est un défi. La très faible perméabilité des BFUP, associée à leurs propriétés mécaniques exceptionnelles sont particulièrement adaptées pour le renforcement des ouvrages de signalisation maritime, d'accès difficile. Ces structures exposées à un environnement très agressif ont un accès très limité sous l'influence des marées et de la météorologie. Comme pour les ponts existants, les BFUP procurent dans ce cas une solution robuste et très durable, permettant de simplifier et réduire la durée des interventions. Dans ce contexte, une tourelle existante en mer, sur la côte sud bretonne, a été renforcée par l'application de 60 mm de BFUP, coulés en place par hélicoptère dans un coffrage autour de la structure existante en maçonnerie. Cette application ouvre la voie au renforcement avec la même technique de phares en mer tels que celui de la Jument à Ouessant.

## 1. INTRODUCTION

Au cours des douze dernières années, sous l'impulsion du MCS/EPFL, l'application en couches minces de Bétons Fibrés Ultra Performants (BFUP) écrouissants, avec ou sans armatures passives, coulés en place sur des structures existantes (ponts et bâtiments), a démontré ses nombreux avantages en termes de durabilité, économies, et réduction de la durée des chantiers, (Brühwiler et al., 2013), (Denarié et al., 2015). La même approche est naturellement applicable pour les structures en environnement marin qu'elles soient nouvelles, pour garantir leur durabilité, ou existantes, pour un renforcement efficace, rapide et durable adapté aux contraintes très sévères de l'environnement marin. Le temps à disposition pour des interventions sur des ouvrages en mer est extrêmement limité, non pas à cause des contraintes du trafic comme pour les voies de circulation terrestres, mais du fait des contraintes liées à la météorologie et aux marées (typiquement seulement quelques jours d'accès par an). Dans cette perspective, la stratégie d'interventions ciblées avec des BFUP utilisée pour les ouvrages routiers est également optimale pour les structures en environnement marin, particulièrement pour ceux, tels que les ouvrages de signalisation en pleine mer (tourelles et phares), soumis aux conditions les plus sévères. Depuis 2011, une collaboration entre le MCS/EPFL et le CEREMA de Brest a permis de mûrir ce concept et de le mettre en application pour la première fois en 2013 sur une tourelle dans la rade de Lorient en Bretagne.

L'application des BFUP aux nouveaux ouvrages en milieu marin a déjà fait l'objet de plusieurs réalisations et études conceptuelles ou de faisabilité. On peut citer sans être exhaustif: (1) La passerelle Sakata au Japon, en BFUP préfabriqué sous forme de segments assemblés par post-contrainte, située à l'embouchure d'une rivière en bord de mer (Musha et al., 2002) ; (2) l'extension en 2008 de l'aéroport de Haneda au Japon dans la rade de Tokyo, avec 24'000 m<sup>3</sup> de BFUP sous la forme de dalles précontraintes préfabriquées placées sur une ossature métallique (Musha et al., 2010); (3) la réalisation en 2012 d'un des 4 ponts multipoutres de 6 travées prévus pour l'extension d'un terminal de déchargement de containers à Port Klang en Malaisie avec un BFUP développé et produit localement (Voo et al., 2014) pour 102 poutres précontraintes de 12.1 m de longueur, sans armatures passives; (4) l'étude de faisabilité pour l'application d'éléments prébarriqués en BFUP à un quai à Lorient en France, (Kubwimana et al., 2011); (5) la proposition d'application d'éléments préfabriqués en BFUP pour le remplacement des barrières anti-submersion de polders aux Pays-Bas, (Bockhoudt, 2003) ; (6) la proposition de l'utilisation de BFUP pour les éoliennes en mer (Hansen, 2001) puis de la réalisation des fondations (Moeller et al., 2008), et éléments préfabriqués en BFUP assemblés par précontrainte pour les tours (Jammes et al. 2012); (7), le projet de centrales houlomotrices faisant appel à des flotteurs en BFUP, avec une centrale prototype réalisée en 2005 en mer du nord dans le cadre du projet Wavestar (Hi-Con A/S, 2011).

En ce qui concerne le renforcement d'ouvrages existants en milieu marin, (Buitelaar, 2004) cite : (1) le cas de la jetée du port de Puerto Cabello au Venezuela avec l'application entre 1991 et 1992 de 30 mm de BFUP pompé dans un coffrage autour de 254 piles tubulaires (épaisseur de 10 cm) en béton précontraint, endommagées et corrodées dans la zone de marnage; (2) le renforcement à l'aide de BFUP et de coulis de BFUP de plateformes de forage, d'abord au Venezuela en 1992 et 1993 sur le lac de Maracaibo, puis en mer du Nord en 1995 et suivantes (plateforme Ekofisk entre autres). Ce type de renforcement à l'aide de coulis de BFUP injectés est couramment appliqué depuis lors. Enfin, (Tanaka et al., 2016) ont validé l'application de BFUP à base de fibres synthétiques (UHP-SHCC) pour le renforcement de piles de jetées en site portuaires. L'utilisation en 1998 de 6000 plaques d'appui en Béton de Poudres Réactives avec fibres synthétiques (ou inoxydables dans les zones les plus sollicitées) pour le renforcement d'un mur en terre armée en front de mer à l'île de la Réunion (Tournette et al., 2000) est également représentative.

L'étude détaillée des archives sur la conception, la construction et l'évolution de deux phares en mer d'Iroise (la Jument au large de l'île d'Ouessant et Ar-men au large de l'île de Sein) a permis de modéliser de manière détaillée par éléments finis, en trois dimensions, l'évolution de ces ouvrages plus que centenaires, (Loroux, 2013a), (Chollet, 2014). L'effet des multiples renforcements appliqués au cours de la vie de ces ouvrages a pu être étudié et leur efficacité évaluée. La réponse dynamique du phare de la Jument a été modélisée et déterminée sur place à l'aide d'un capteur de vibrations ambiantes. Ceci a permis de valider les choix de propriétés élastiques des matériaux fait lors de la modélisation numérique. Enfin, le modèle numérique tridimensionnel du phare de la Jument a été utilisé pour élaborer les bases d'un projet d'intervention par l'application de BFUP pour le renforcement de la base de la tour et le confinement et la protection de la partie supérieure du soubassement.

Cet article présente dans un premier temps le contexte particulier des phares en mer et des défis associés à leur construction et à leur renforcement, sur la base de l'exemple du phare de la Jument. Dans un deuxième temps le concept d'intervention de renforcement à partir de BFUP est mis en avant. Finalement, la première intervention de ce type, réalisée avec succès sur la tourelle du Cabon à Lorient en 2013 est discutée de manière détaillée.

## 2. LE PHARE DE LA JUMENT

### 2.1 Contexte et étude historique

Même si la généralisation de l'utilisation du GPS a rendu les moyens de navigation visuels (diurnes et nocturnes) moins déterminants, ils restent très utilisés et présentent, avec les phares en mer, une valeur culturelle et patrimoniale importante qui doit être préservée de manière rationnelle, dans le cadre de l'obligation légale de l'état d'assurer le maintien en condition opérationnel des établissements de signalisation maritime (ESM). À ce jour on compte environ 70 phares classés ou inscrits au patrimoine des Monuments Historiques du Ministère de la Culture.

La construction des phares en mer a toujours été un défi demandant une ténacité, un courage et une patience hors normes. La construction du phare de la Jument a duré 7 ans entre 1904 et 1911, durée imposée par l'utilisation du legs ayant servi à financer le projet. La première année de construction, l'accès fut possible seulement 52 heures, puis entre 150 et 400 heures les années suivantes, pour un total de 2037 heures soit 85 jours répartis sur 7 ans. Il a aujourd'hui 115 ans et résiste toujours malgré les sollicitations extrêmes qu'il subit : configuration locale du fond marin favorisant la formation de vagues déferlantes de plus de 20 m de hauteur, pressions locales extrêmes supérieures à  $20 \text{ to/m}^2$ , sous l'action des plus puissantes. La figure 1a) illustre les débuts de la construction du phare avec la roche de substrat à droite. On distingue les tiges métalliques ancrées dans la roche pour servir de points d'appui. La figure 1 b) montre le phare dans les années 1980, pris depuis la vedette des phares et balises, lors d'un relèvement de gardiens. On relève dans les deux cas les conditions d'accès particulièrement difficiles.



a)



b)

Figure 1. Phare de la Jument, a) construction, b) relèvement de gardiens dans les années 80. Photos a) fonds Michel Cloâtre, b) George Pennec.

La lentille de Fresnel du phare avait jusqu'aux tempêtes de 2014 une portée de 22 milles marins, assurant le balisage de l'entrée du chenal du Fromveur, au sud d'Ouessant, qui a été à l'origine de nombreux naufrages jusqu'à la construction du phare. Depuis 2015, sa portée a été réduite à 10 milles avec l'installation prochaine d'une source lumineuse à LED.

La figure 2 d'après (Loroux, 2013a) présente la modélisation des principales phases successives de la vie de l'ouvrage. Sa hauteur totale du début du soubassement sur la roche, jusqu'au niveau de la plateforme de la lanterne, est de 40 m au-dessus de la cote marine CM 0 (basse mer coefficient 120). Les particularités de ce phare en mer sont : (1) la présence d'un encorbellement dans sa partie supérieure pour abriter la salle des machines, avec pour conséquence une distribution de masses défavorable vis-à-vis des sollicitations dynamiques, et (2) une section octogonale de la tour qui donne plus de prise aux efforts appliqués par les vagues qu'une forme cylindrique (comme c'est le cas pour le phare d'Ar-men).

À l'origine, la hauteur libre de la tour hors du soubassement était de 29.7 m, ramenée à 26.2 m après le rehaussement du soubassement. Le soubassement d'origine achevé en 1911 se terminait 3.5 m plus bas que le niveau supérieur actuel et était nettement moins large, quasi contigu à la base de la tour sur une grande partie de son périmètre. Peu après la mise en service de l'ouvrage en 1911, à la suite de fortes tempêtes, divers renforcements ont dû être entrepris pour stabiliser l'ouvrage qui était le siège de très fortes vibrations rapportées par les gardiens (ce phare a été automatisé en 1991) et remédier aux fissures constatées à la base de la tour. Le soubassement a été progressivement élargi et surélevé de 3.5 m entre 1912 et 1928 et la base de la tour a été cerclée entre 1917 et 1918 avec un anneau en béton armé qui s'étend vers le bas jusqu'au niveau de l'ancien soubassement, 3.5 m sous le niveau de la plateforme actuelle et vers le haut à 4 m du niveau de la plateforme actuelle.

Finalement, entre 1936 et 1941, 3 tirants d'ancrage inclinés de 1/10 vers l'extérieur ont été posés au pied de la tour dans le but d'appliquer des efforts de stabilisation en rapport avec la masse de la tour (système Coyne appliqué aux barrages dès 1931). Sur ces 3 tirants, au plus 1058 tonnes (probablement 2 tirants sur 3) ont pu être activées par rapport aux 3 x 1000 tonnes prévues, à comparer avec la masse totale de la tour d'environ 4800 tonnes. Compte tenu des conditions d'environnement très agressives salines et des doutes sur la tenue de leur ancrage, il est peu probable que ces tirants assurent encore une quelconque fonction après plus de 70 ans.

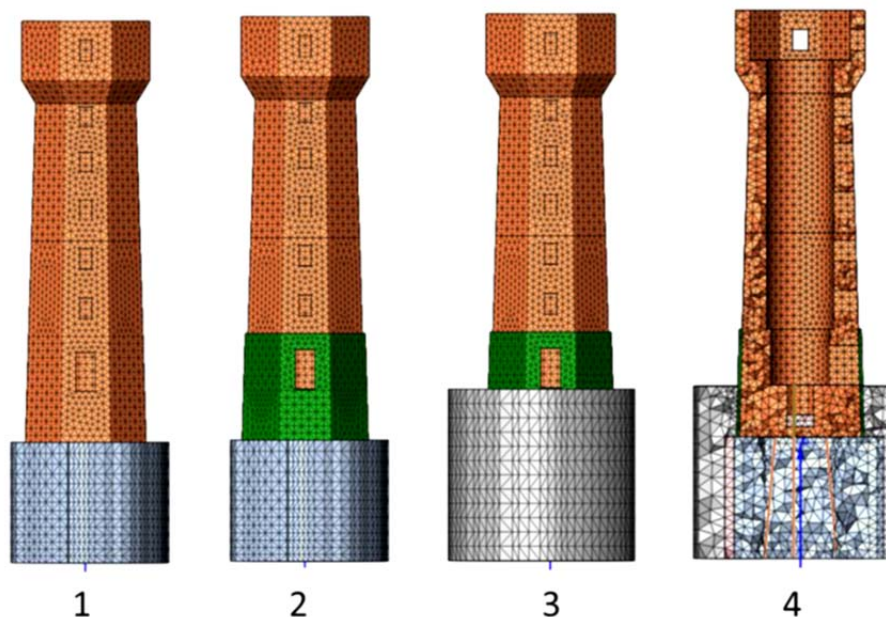


Figure 2. Phare de la Jument, modélisation par éléments finis des étapes successives de la vie de l'ouvrage : (1) état d'origine (1911), (2) cerclage en béton armé au pied du phare et renforcement de la citerne (1917-18), (3) agrandissements successifs et rehaussement du soubassement (1919-1928), (4) tirants d'ancrage précontraints (1936-1941), tiré de (Loroux, 2013a).

La figure 3a) et b) illustre l'état de la partie inférieure du phare en 2013. On distingue le caractère hétérogène du soubassement suite aux multiples interventions de renforcement réalisées par le passé et l'état de corrosion et de fissuration du cerclage à la base de la tour.



a)

b)

Figure 3. Phare de la Jument, Ouessant, France, état en 2013 : a) soubassement, b) couronne de renforcement en béton armé à la base de la tour, réalisée en 1918, photos E. Denarié.

L'effet positif le plus significatif de toutes les interventions réalisées est certainement le rehaussement du soubassement et son élargissement, et le cerclage de la base de la tour, comme la modélisation par éléments finis l'a montré, (Loroux, 2013a).

Du béton projeté par voie sèche a été appliqué localement sur le soubassement en 2010. Les fortes tempêtes survenues en hiver 2014 ont arraché des matériaux dans la partie supérieure du soubassement et endommagé 70 % de la surface de la plateforme en révélant les fissures radiales existantes. On ne note toutefois pas une augmentation significative de ces fissures visibles en surface par rapport aux documents d'archive. La large fente visible entre le pied de la tour et le soubassement confirme que la partie supérieure de ce dernier n'est probablement pas solidaire du rehaussement du soubassement mais ceci reste à confirmer par une inspection détaillée en cours de réalisation (Laboratoire de Saint-Brieuc du Cerema). La tour ne montre pas une augmentation apparente des faciès de fissuration après les tempêtes de 2014. Des mesures de vibrations ambiantes réalisées sur l'ouvrage avant et après les tempêtes de 2014 (Loroux, 2013a, b), (Chollet, 2014) ne montrent pas de différences significatives, à l'état de repos de l'ouvrage. Par contre il sera nécessaire d'instrumenter l'ouvrage avec des accéléromètres (prévu) pour déterminer sa réponse dynamique sous des sollicitations élevées et lier ces mesures à la réponse prédite par les modèles 3D. Du béton projeté par voie sèche en 2015 a permis de combler les vides laissés après les tempêtes de 2014 sur la partie supérieure du soubassement et de préparer le terrain pour une intervention plus large, le cas échéant à l'aide de BFUP coulé en place, renforcé localement par des armatures passives.

Divers examens complémentaires ont été réalisés ou sont en cours pour affiner le diagnostic de l'état de l'ouvrage et préparer un projet d'intervention.

## 2.2 Projet de renforcement

Le concept de renforcement de l'ouvrage est inspiré de la technique de protection/renforcement d'ouvrages routiers au moyen de BFUP coulés en place, combinés le cas échéant avec des armatures passives, appliquée avec succès depuis 2004 en Suisse, (Brühwiler et al., 2013), (Denarié et al., 2015), figure 4a).

Selon les informations à disposition, et sous réserve des études complémentaires encore prévues, le renforcement de l'ouvrage devra : (1) renforcer l'anneau en béton armé présent autour de la base de la tour, fortement endommagé, et (2) confiner la partie supérieure du soubassement et la recouvrir pour

empêcher la pénétration d'eau et faire obstacle à la pression des vagues déferlantes pour éviter l'élargissement des fissures radiales existantes, figure 4 b).

Enfin, l'interaction de la base de la tour et de la partie haute du soubassement devra être analysée pour déterminer si le renforcement devra être continu et solidariser ces deux parties (avec l'avantage de bloquer définitivement les infiltrations d'eau par cette voie) ou laisser la tour libre d'osciller plus ou moins librement dans l'espace du décollement actuel (ouverture de 20 mm, sur environ 3 m de profondeur, le long de 2 faces contiguës du périmètre octogonal de la tour) comme c'est apparemment le cas en l'état.

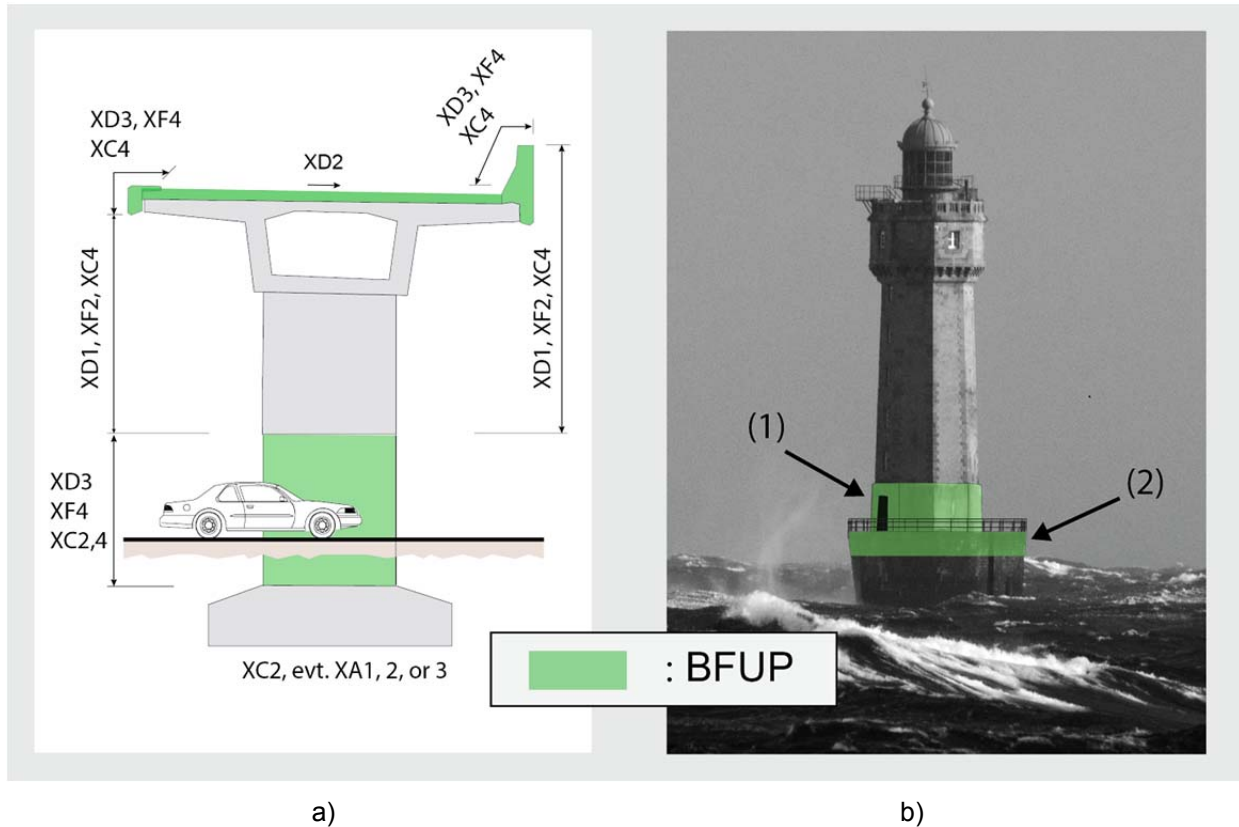


Figure 4. Concept d'application de BFUP pour a) le renforcement et la protection de ponts, proposé par Brühwiler en 1999 ; et b) de phares en mer (phare de la Jument, Ouessant, France) proposé par Denarié en 2011 : (1) renforcement du cerclage en béton armé datant de 1918, à la base de la tour, (2) confinement et protection de la partie supérieure du soubassement.

### 3. PREMIÈRE APPLICATION À LA TOURELLE DU CABON

#### 3.1 Contexte

La tourelle du Cabon est située dans la rade de Lorient, Bretagne, France (3° 21' 40" W – 47° 42' 08.2" N) entre Gâvres et Port Louis. Il s'agit d'un type très répandu de tourelle formée d'une maçonnerie de granulats grossiers (diamètre de la base = 3.25 m, hauteur = 4.55 m) âgée d'environ 70 ans. Pour l'ensemble de la Bretagne on compte environ 500 ouvrages de ce type. L'accès à la tourelle est très limité du fait des conditions météorologiques et des marées. Le jour de l'intervention, le 26 Juin 2013, le marnage total était de 4.7 m comparable à la hauteur de la tourelle. À marée basse il est possible d'accéder au fond rocheux entourant la tourelle. À marée haute ce dernier est totalement submergé de même que la moitié de la tourelle, tout ceci dans l'espace des 6 heures d'une marée.

Le renforcement a consisté à appliquer une couche de 60 mm de BFUP en moyenne sur l'ensemble de la surface de la tourelle y compris la plateforme supérieure, formant ainsi une coque continue.

### 3.2 Matériaux

Les exigences générales pour les bétons en milieu marin sont données dans (CETMEF, 2008). Les BFUP satisfont parfaitement à ces exigences. Vu la configuration du renforcement équivalente à un « essai d'anneau », avec une entrave de l'ordre de 92 %, les exigences additionnelles imposées au BFUP pour ce chantier étaient les suivantes :

- Minimisation du retrait endogène pour limiter les autocontraintes sous entrave et laisser l'essentiel du comportement écrouissant en traction pour résister aux effets résiduels après 70 ans des réactions de gonflement éventuelles du substrat qui étaient suspectées.

- Caractère autoplaçant (classe SF2 selon EN 206-9 à l'époque), soit un étalement entre 660 et 750 mm et un maintien de l'ouvrabilité sur 2 à 3 heures (transport de la centrale à la base de départ de l'hélicoptère : 1 heure).

- Réponse écrouissante en traction uniaxiale, valeur cible de la déformation en fin d'écrouissage  $\epsilon_{Utu}$  en moyenne entre 1 and 2 ‰ pour des éprouvettes découpées dans des plaques carrées (700/700/60 mm) coulées à l'horizontale. Résistance à la traction  $f_{Utu} \geq 10$  MPa en moyenne.

Le matériau NaG3 SR FM 3.25 % a été développé par LAFARGE pour cette application. Il contient 3.25 % vol. de fibres droites en acier (longueur 13 mm, diamètre 0.185 mm) et a un rapport eau/ciment compris entre 0.21 et 0.23. Il ne contient pas d'accélérateur et utilise un superfluidifiant optimisé pour maintenir l'ouvrabilité sur 2 à 3 heures. Un réducteur de retrait permet de limiter dans une large mesure le retrait endogène et ainsi de minimiser les autocontraintes de retrait entravé.

Les propriétés du BFUP utilisé ont été déterminées lors des essais de convenance en 2012 et lors du chantier (Denarié et al. 2013). Tous les objectifs fixés ont été atteints aussi bien en termes d'ouvrabilité et de son maintien (classe SF2 autoplaçant), que de la réponse en traction du BFUP avec un écrouissage en traction variant entre 1 et 2.3 ‰ et une résistance ultime entre 10 et 12 MPa (à 28 j), déterminés par analyse inverse d'essais de flexion sur prismes.

On notera que la résistance à la compression du BFUP utilisé valait en moyenne sur 6 cylindres 70/140 mm testés à 28 jours 135 MPa (121 MPa pour le fractile des 5 %). Ces valeurs sont dans la fourchette basse de celles obtenues habituellement pour des BFUP mais ne posent aucun problème dans cette application structurale pour laquelle seul le comportement en traction importe.

### 3.3 Exécution

Le coffrage en acier a été conçu pour résister à la pression hydrostatique du BFUP fluide, sur une hauteur de 4.6 m (masse volumique du BFUP de 26 kN/m<sup>3</sup>) et pour empêcher les fuites de BFUP frais. Il était fixé en pied par des ancrages à un muret (solin) en béton lui-même ancré à la base de la tourelle.

Le coulage a eu lieu le 26 Juin 2013. Le coffrage métallique avait été installé sur la tourelle le jour précédent, figure 5a). Le BFUP a été produit à la centrale à béton LAFARGE de Keryado, dans un malaxeur d'une capacité de 2 m<sup>3</sup>. Des gâchées de 1.25 m<sup>3</sup> de BFUP avaient été choisies pour optimiser la chaîne de production et le transport sur site en fonction de la cadence des rotations de l'hélicoptère. La matrice du BFUP (prémix, eau, adjuvant) a été mélangée entre 10 et 13 minutes avant l'ajout des fibres. Le temps de malaxage total était de 13 à 17 minutes pour chaque gâchée. Deux gâchées étaient réalisées consécutivement et versées dans un camion toupie.

Après un premier contrôle de l'ouvrabilité à la centrale, le BFUP frais était transporté par camion toupie jusqu'à Gâvres (37 km, 1 h en moyenne). De là, il suffisait de 4 à 5 minutes pour : charger la benne accrochée sous l'hélicoptère avec en moyenne 300 litres de BFUP (750 kg), les transporter jusqu'à la tourelle, les déverser dans le coffrage figure 5b), et retourner auprès du camion toupie,

Au total 4.2 m<sup>3</sup> de BFUP ont été mis en place avec 2 rotations du camion toupie et 18 rotations de l'hélicoptère sur une durée totale de 2 heures. Aucun compactage n'a été appliqué sur le BFUP lors du coulage.

La surface libre du BFUP sur la plateforme supérieure de la tourelle a été recouverte d'une feuille de plastique couverte de gravier laissée en place pendant les 7 jours de cure. Le coffrage a été retiré après 7 jours.

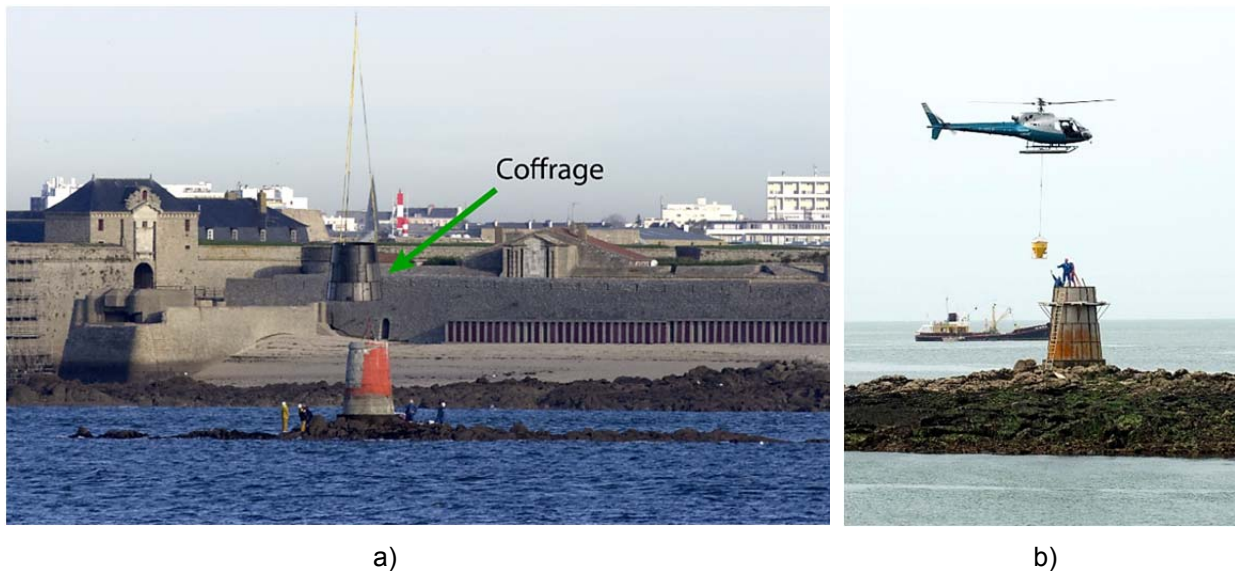


Figure 5. a) Mise en place du coffrage métallique sur la tourelle, b) mise en place du BFUP par hélicoptère, photos E. Denarié.

### 3.4 Premiers retours d'expérience et perspectives

La figure 6a) montre l'état de la tourelle en septembre 2013, 3 mois après le coulage. Aucune fissure n'était visible, tout au plus un faïençage localisé sur certaines zones. Le rendu de surface du BFUP était excellent et se prêtait très bien à l'application de la peinture rouge définitive, figure 6b). L'aspect visuel de la tourelle peinte et son rendu de surface s'apparentent à un ouvrage métallique.

Des essais de caractérisation de la pénétration de l'eau et des ions chlorures seront réalisés à intervalle réguliers sur des pièces témoin en BFUP d'épaisseur identique placées au pied de la tourelle, et à titre comparatif sur des carottes prélevées dans le béton du solin ayant servi à ancrer le coffrage métallique lors de l'intervention, qui est placé dans les mêmes conditions d'exposition que le BFUP.

Selon le propriétaire de l'ouvrage (Phares et Balises Lorient), l'intervention à l'aide de BFUP a permis de réduire significativement la quantité de matériaux nécessaires par rapport à une variante classique avec béton coulé en place. Ceci a pour conséquence de réduire significativement le temps d'intervention et les moyens nécessaires.

Les coûts d'intervention entre les deux variantes ont des valeurs comparables avec un avantage déterminant pour la variante BFUP en termes de durabilité et de résistance aux efforts et à l'abrasion souvent extrêmes imposés par la houle.

À ce jour, un nouveau projet d'intervention sur une autre tourelle en mer (Men er Houteliguet) de taille comparable à celle du Cabon, située à proximité de l'île d'Houat en Bretagne, en pleine mer, est prévu avec cette fois le défi supplémentaire de la production du BFUP sur site, sur une barge à proximité de la tourelle, à l'aide de malaxeurs embarqués.





a)



b)

Figure 6. a) état de la tourelle en septembre 2013, b) état en septembre 2015 après l'application de la peinture définitive et deux hivers. Photos E. Denarié

#### 4. CONCLUSIONS

- Le concept d'application de BFUP écouissants coulés en place pour le renforcement d'ouvrages en mer existants avec un accès difficile a été mis en œuvre pour la première fois avec succès sur une tourelle en Bretagne.
- La recette de BFUP écouissant développée pour cette application a donné toute satisfaction aussi bien du point de vue de l'ouvrabilité (autoplaçant SF 2) et de son maintien, que des performances mécaniques en traction (résistance à la traction entre 10 et 12 MPa, écouissage entre 1 et 2.3 ‰ sur des éprouvettes sciées dans une plaque carrée sans orientation préférentielle).
- L'application du BFUP par hélicoptère a été rapide et efficace en 2 heures.
- Cette application réussie ouvre la voie au renforcement de phares en mer tels que celui de la Jument, selon les mêmes principes.

#### 5. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient: (1) la Subdivision des Phares et Balises de Lorient, M. Ronan Goavec, et son équipe (Christophe Le Mouel, Pascal Conan, Michel Le Roux) pour avoir mis à disposition un de leurs ouvrages en mer pour cette application et pour leur contribution déterminante au succès de cette entreprise, (2) LAFARGE : MM. Dominique Corvez, Damien Jacomo, Julien Vernes pour leur engagement sans failles pour le développement du BFUP, la fourniture des composants et le soutien technique avant et pendant le chantier, qui ont rendu cette application possible, (3) Mme Binse directrice de la centrale à béton LAFARGE de Keryado à Lorient pour avoir mis à disposition sa centrale pour la production du BFUP, (4) Michel Menguy (CETE OUEST/DLRB, St Brieuc) pour ses conseils sur la production et le contrôle de qualité des matériaux employés, (5) Nicolas Bourneton (CETE OUEST/DIMER, Nantes) pour le calcul du coffrage.

## 6. RÉFÉRENCES

- Bockhoudt, F. (2003) Concrete gates in the flood barrier (in Dutch), *Cement* 4/2003, cité par: Buitelaar, P. (2004) Heavy reinforced ultra-high performance concrete, *Proceedings International symposium on ultra-high performance concrete*, Kassel: 25-35.
- Brühwiler, E. et Denarié, E. (2013) Rehabilitation and strengthening of concrete structures using ultra-high performance fibre reinforced concrete, *Structural Engineering International*, 23(4): 450-457.
- Buitelaar, P. (2004) Ultra high performance concrete: developments and applications during 25 years *Proceedings International symposium on ultra-high performance concrete*, Kassel, Germany, kassel university press, plenary session.
- CETMEF 2008 Guide d'utilisation du béton en site maritime, *Notice n° PM 08-01*.
- Chollet O. (2014) Phare d'Ar-Men, Modélisation des effets de la houle, analyse du comportement structural et études de renforcement, *Projet de Master*, MCS, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Denarié, E. et Brühwiler, E. (2015) Cast-on site UHPFRC for improvement of existing structures – achievements over the last 10 years in practice and research, *Proceedings HPRCC7*, Stuttgart, Germany: 473-480.
- Denarié E., Jacomo D., Fady N., Corvez D. (2013) Rejuvenation of maritime signalization structures with UHPFRC, *Proceedings UHPFRC 2013*, Marseille, RILEM Pro087: 157-166.
- Hi-Con A/S (2011) 1. Final report: FLOAT–development of new flexible UHPC, Hjallerup Erhvervspark 1, 9320 Hjallerup, Danemark,
- Fady N. et Denarié E. (2014) Rénovation d'une structure d'un établissement de signalisation maritime par béton fibré ultra-performant, *Bulletin de l'AIASM*, 1: 50-51.
- Hansen, K.L. (2001) Offshore wind turbine towers in high strength concrete, *European Wind Energy Conference and Exhibition*, Bella Center, Copenhagen, Denmark, cité par: Buitelaar, P. (2004) Heavy reinforced ultra-high performance concrete, *Proceedings International symposium on ultra-high performance concrete*, Kassel: 25-35.
- Jammes, F. X., Tosini, L., Céspedes, X., Resplendino, J. (2012) L'avenir des éoliennes offshore passe par le Béton Fibré à Ultra-Hautes Performances, *Travaux*, (886) : 60-64.
- Kubwimana T., Bourneton N., Rouxel N., Hauchecorne A. (2010) Utilisation des bétons fibrés à ultra hautes performances en site portuaire, *XI<sup>èmes</sup> Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil*, Les Sables d'Olonne, France, 22-25 juin 2010 : 685-692.
- Lorax C. (2013a) Comportement structural des phares en mer, étude historique sur le phare de la Jument et propositions d'interventions, *Projet de Master*, MCS, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Lorax C. (2013b) Campagne de mesure sur les phares de la Jument et du Creach, mesure des vibrations ambiantes et relevé de l'état (Jument seulement), *Rapport n° MCS 23.13.09-1*, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Moeller, A. (2008) Use of UHPC in offshore wind turbine foundations, *Proceedings Second international symposium on ultra-high performance concrete*, Kassel: 863-869.
- Musha H., Ohtake A., Seki F., Ohkuma H., Kodama A., Kobayashi T. (2002) Design and Construction of Sakata-Mirai Bridge Using of Reactive Powder Composite, *Bridge and Foundation Engineering*, vol.36, 11: 1-10.
- Musha H., Ohtake A., Yokoi K., Noguchi T. (2010) Development of Heavy Load Capacity UFC Slab and its Mass Production, *Concrete Journal* Vol. 48 No. 11: 28-35 (en Japonais, document traduit en Anglais disponible sur demande).
- Tanaka R., Kunieda M., Iwanami M., Kato E., Amino T. (2016) Jacketing Method for Pier Piles using UHP-SHCC, *Proceedings BEFIB 2016*, Vancouver, in press.
- Tournette, D., Pegon, J. L., Stefanni, A., Dugat, J. (2000) Plaques de tirants d'ancrage en BPR pour terre armée, *Proceedings BEFIB 2000*, RILEM Pro015: 203-212.

Voo Y.L., Sittampalam K., Peng C.W., Singh S. (2014) Design of Ultra-High Performance Concrete Jetty in Marine Environment, *Proceedings of the 12th International Conference on Concrete Engineering & Technology 2014, CONCET 2014*, Kuala Lumpur, Malaysia.