

NOTE DE SENSIBILISATION SUR L'OBTENTION DE LA FONCTION RECHERCHÉE D'ÉTANCHÉITÉ SUR OUVRAGES D'ART PAR L'UTILISATION DU BFUP



Grégory GÉNÉREUX – Cerema Méditerranée
Christophe AUBAGNAC – Cerema Centre Est
Benoit CLEMENT – Cerema Centre Est
Didier GERMAIN – DGITM-FCA
Philippe JANDIN – Cerema Sud Ouest
Pierre MARCHAND - Cerema ITM
François TOUTLEMONDE – Univ. Gustave Eiffel

Contexte de la note

- Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances (BFUP) : matériau encadré par des normes française depuis le milieu des années 2010

(NF P18-470 – « Matériau », NF P18-710 – « Calcul », NF P18-451 – « Exécution »)

- Forte compacité du matériau → depuis quelques années, certains projets comptent sur le BFUP pour la fonction étanchéité

Suisse : Pont sur la Morge, pont frontalier de Bâle, viaduc de Riddes

France : pont de la Chabotte, pont Warren A36, pont d'Ouche A6

Etats-Unis : Delaware Memorial Bridge

- Les normes françaises BFUP ne couvrent pas la fonction étanchéité
- Pas d'avis techniques « étanchéité » du Cerema sur le BFUP
- De nombreux maîtres d'ouvrage français envisagent la fonction d'étanchéité du BFUP dans les réparations d'OA, avec parfois des défaillances (et la mise en place dans un 2^e temps d'une étanchéité classique). Alors que le BFUP peut être une solution efficace s'il est correctement utilisé

Contexte de la note

- Demande du Ministère (DGTIM) au RST de publier un guide sur l'utilisation du BFUP en réparation et renforcement d'ouvrages d'art, traitant le sujet de l'utilisation en tant qu'étanchéité
- Objectif d'une parution rapide de la note focalisée sur le sujet de l'utilisation du BFUP en tant qu'étanchéité pour éviter les défaillances dans les projets
- Groupe de rédaction :
 - Christophe AUBAGNAC (Cerema)
 - Benoit CLEMENT (Cerema)
 - Grégory GÉNÉREUX (Cerema) - pilotage
 - Didier GERMAIN (DGITM - FCA)
 - Philippe JANDIN (Cerema)
 - Pierre MARCHAND (Cerema)
 - Laurent SAUGER (Cerema)
 - François TOUTLEMONDE (Université Gustave Eiffel)
 - Jean-Philippe BISOGNO (Cerema) pour la plupart des schémas
- Relecteurs :
 - Pierre CORFDIR (Cerema)
 - Nathalie CORDIER (Cerema)
 - Pierre PEYRAC (DGITM – TEDET)
 - Romain PITTET (APRR)

Contexte de la note

• Titre : Obtenir la fonction d'étanchéité sur ouvrages d'art par l'utilisation du BFUP - Note de sensibilisation

• Sommaire

1 INTRODUCTION	
2 CONCEPTION D'UNE SOLUTION BFUP AVEC FONCTION D'ÉTANCHÉITÉ	
2.1 Prescriptions particulières requises pour obtenir un BFUP étanche	
2.2 Principaux cas d'emploi du BFUP comme étanchéité d'ouvrages d'art	
2.2.1 Généralités	
2.2.2 Etanchéité sur ouvrage avec tablier entièrement en BFUP	
2.2.3 Etanchéité sur tablier en béton	
2.2.4 Etanchéité sur platelage métallique	
2.3 Conception détaillée	
2.4 Règles spécifiques de justification pour assurer l'étanchéité du BFUP	
3 PROJET ET PRÉPARATION DU MARCHÉ DE TRAVAUX	
3.1 Etude de projet	
3.2 Règles spécifiques à la fabrication et à la mise en œuvre du BFUP étanche	
3.3 Dossier de consultation des entreprises et analyse des offres	
4 EXEMPLES DE CLAUSES DE PIÈCES TECHNIQUES DE MARCHÉ	18
5 CONDUITE ET EXÉCUTION DU PROJET	18
5.1 Généralités	18
5.2 Installations / approvisionnements / effectifs	18
5.3 Préparation du support béton	19
5.4 Coffrages et points singuliers	19
5.5 Production du BFUP	19
5.6 Alimentation du chantier	20
5.7 Mise en œuvre	20
5.8 Cure et montée en résistance du BFUP	21
5.9 Préparation de surface BFUP	21
5.10 Contrôles	21
5.11 Essais	22
6 BIBLIOGRAPHIE	22

ANNEXES :

- Exemple de clauses d'un CCTP
- Exemples de plans
- Exemples de clauses de BPU

Document de 43 pages dont 18 pages d'annexes

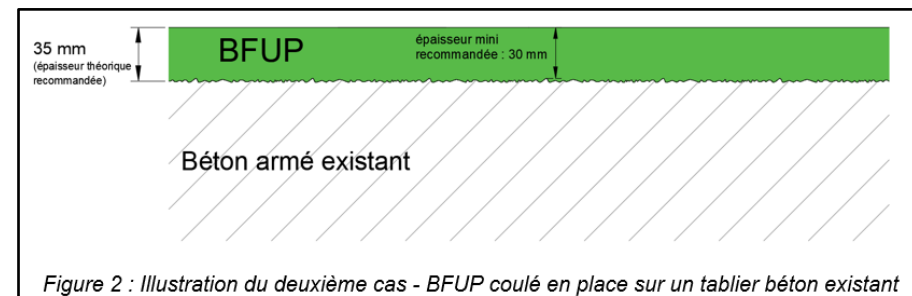
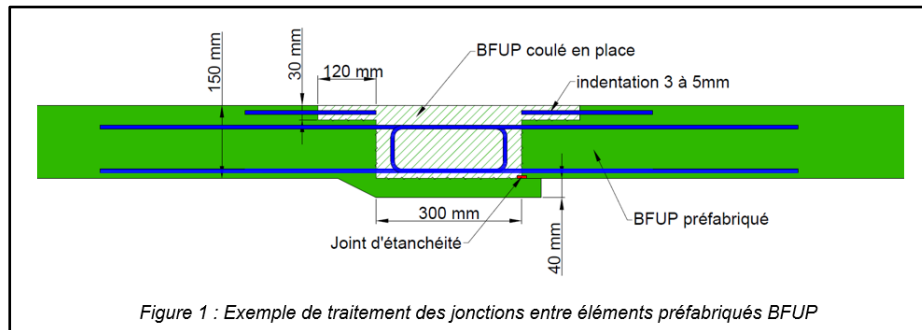
Points essentiels

• Principaux cas d'emploi

1) Etanchéité sur ouvrage avec tablier entièrement en BFUP, souvent préfabriqué

Enjeu : garantir l'étanchéité au niveau des joints, par exemple avec BFUP coulé en place :

2) Utilisation en extrados du tablier, par-dessus une structure existante en béton préalablement rendu rugueux (« overlay » traduit généralement par « revêtement »)



Points essentiels

• Principaux cas d'emploi

3) Utilisation en extrados d'un tablier avec platelage métallique

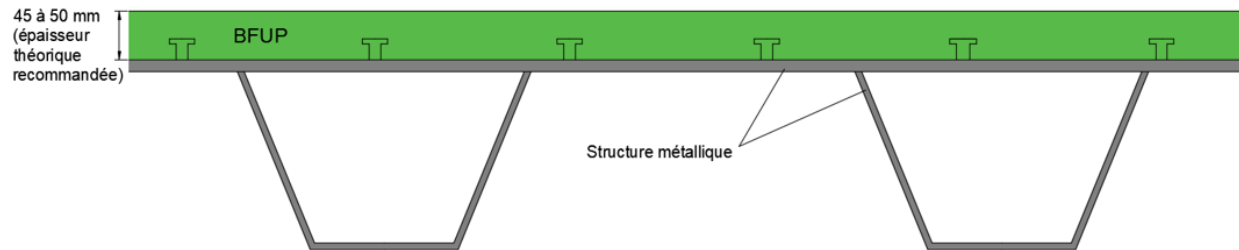


Figure 3 : illustration du troisième cas - BFUP coulé en place sur un tablier métallique (cas d'un pont relativement grand nécessitant des reprises de bétonnage)

Ce cas pourrait être envisagé pour des structures neuves (exemples en Chine)

BFUP surtout avantageux lorsque ses performances mécaniques sont également utilisées, mais possible d'envisager le BFUP pour la seule fonction d'étanchéité

Couche de roulement : emploi d'une couche d'enrobé classique par dessus le BFUP à ce jour recommandé, même si BFUP rainuré en couche de roulement déjà employé à grande échelle aux USA, et si dans le contexte français, des réflexions sont en cours à ce sujet

Points essentiels

• Prescriptions particulières requises pour obtenir un BFUP étanche

NF P18-470 à respecter. Notamment $f_{ck} \geq 130$ MPa, voire $f_{ck} \geq 150$ MPa si le BFUP a également un rôle structurel

Classe de comportement en traction : « T2 : BFUP peu écrouissant » ou « T3 : BFUP très écrouissant » (rappel : corps d'épreuve à tester fonction de l'épaisseur du projet et de la longueur de fibres)

Valeur caractéristique de la résistance post-fissuration supérieure à la valeur moyenne de la limite d'élasticité en traction : $f_{ctfk} \geq f_{ctm,el}$

Même si élément mince, essais de flexion 4 points sur prismes à exploiter conformément à annexe E de la NF P 18-470 (détermination loi post fissuration)

Eprouvettes testées devant avoir un comportement multi-fissurant (apparition de microfissures resserrées et absence de macrofissures dans le BFUP d'ouverture supérieure à 50 μm) jusqu'à une déformation de 2,0 ‰.

Porosité à l'eau : Dp+

Diffusion des ions chlorure : Dc+

En fonction des enjeux du projet, déformation écrouissante limite du BFUP supérieure à 2,0 ‰.

Points essentiels

- Règles spécifiques de justification pour assurer l'étanchéité du BFUP

Limitation de la déformation du BFUP à l'ELS caractéristique de 1,0 ‰, en tout point de la couche BFUP (inspiré de la pratique suisse, qui évoque une limite de 1,0 ‰ avec les charges fréquentes)

Cas des overlays sur béton : règle simple proposée pour le calcul des contraintes de traction dues au retrait gêné en l'absence d'une étude plus avancée (inspirée des règles des dalles de ponts mixtes acier-béton et du retour d'expérience des chantiers A6 et A36) : déformation de retrait générant de la traction dans le BFUP égale à 50 % de la valeur du retrait total (durant les premières heures suivant son coulage, le BFUP n'est en effet pas suffisamment rigide pour que son retrait soit gêné par le béton sur lequel il est appliqué)

L'ouvrage doit être justifié vis-à-vis de la charge permanente que représente la couche de BFUP.

Même si l'application est non structurelle, les calculs précisés ci-avant (effet du poids propre, limitation de la déformation à 1,0 ‰) doivent être réalisés en utilisant les lois de comportement et dispositions de calcul de la NF P18-710.

Points essentiels

• Conception détaillée

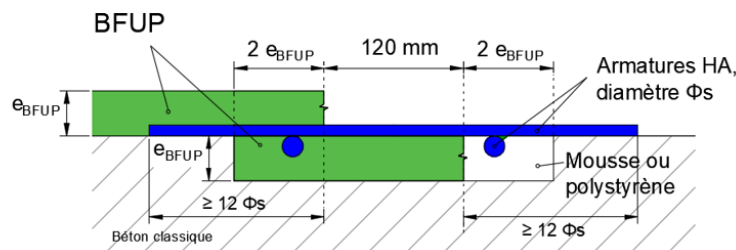
Prévoir des **dispositions constructives appropriées** pour **tous les points singuliers** que sont les reprises de bétonnage, les relevés d'étanchéité, les raccordements aux gargouilles ou avaloirs, aux solins des joints de chaussée, les points triples, les raccordements avec les étanchéités classiques, les ancrages de dispositifs de retenue etc.

En particulier, au niveau des reprises de bétonnage du BFUP, il faut **bannir les joints verticaux francs et prévoir des recouvrements horizontaux de BFUP** (dans le même esprit que ce qui est réalisé pour les étanchéités en feuilles préfabriquées).

Dispositions possibles pour les reprises de bétonnage (inspiré pratiques suisses) :

Méthode 1 (seulement 2 étapes de bétonnage mais coffrage complexe) :

Première étape :



Deuxième étape :

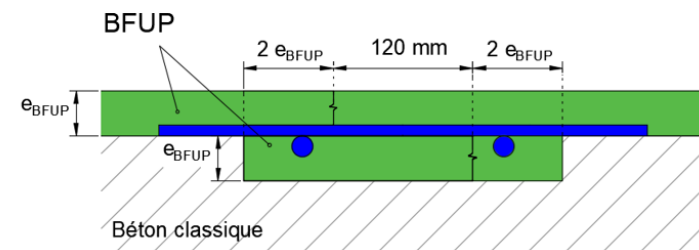


Figure 4 : Disposition pour les reprises de bétonnage BFUP étanches – méthode 1

Points essentiels

• Conception détaillée

Dispositions recommandées pour les reprises de bétonnage (inspiré pratiques suisses) :

Méthode 2 (coffrage moins complexe mais 3 étapes de bétonnage) :

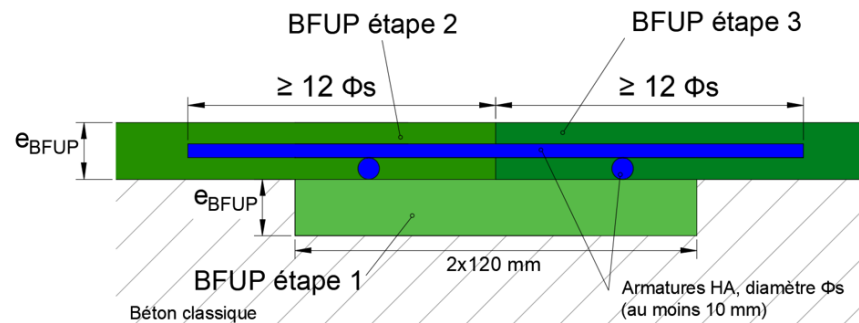


Figure 5 : Disposition pour les reprises de bétonnage BFUP étanches – méthode 2

Dispositions recommandées pour les relevés d'étanchéité (inspiré pratiques suisses) :

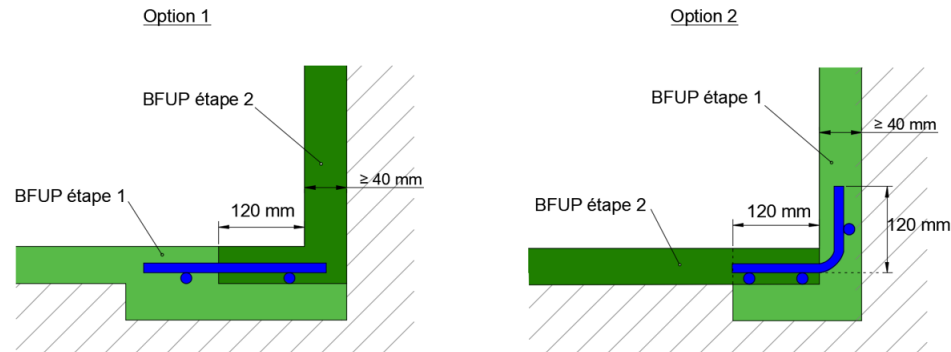


Figure 6 : Exemples de bonnes dispositions pour les relevés d'étanchéité en BFUP

Points essentiels

• Conception détaillée

Dispositions recommandées pour les relevés d'étanchéité appliquées à plusieurs cas de figure :

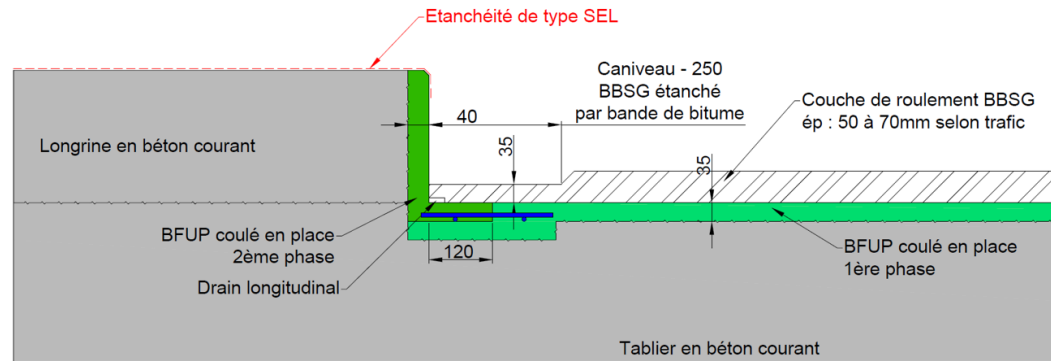


Figure 7 : Exemple de bonne disposition dans le cas où une étanchéité par BFUP est prévue sous chaussée mais pas sur les longrines

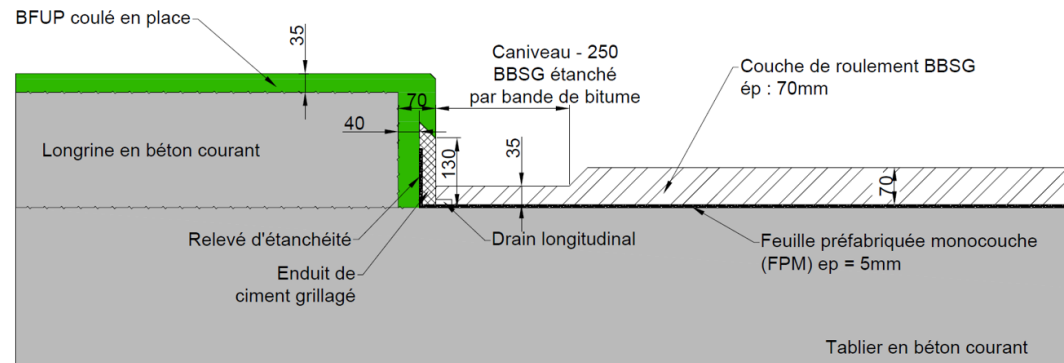


Figure 8 : Exemple de bonne disposition de relevé d'étanchéité dans le cas où le BFUP n'est prévu que sur les longrines

Points essentiels

• Conception détaillée

Dispositions recommandées pour les joints de chaussée :

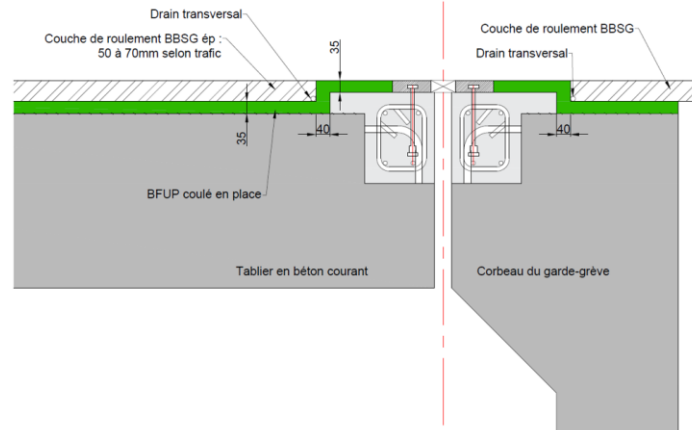


Figure 12 : Disposition recommandée au niveau d'un solin de joint de chaussée (par exemple dans le cas d'une intervention sur l'existant pour lequel le solin est sain)

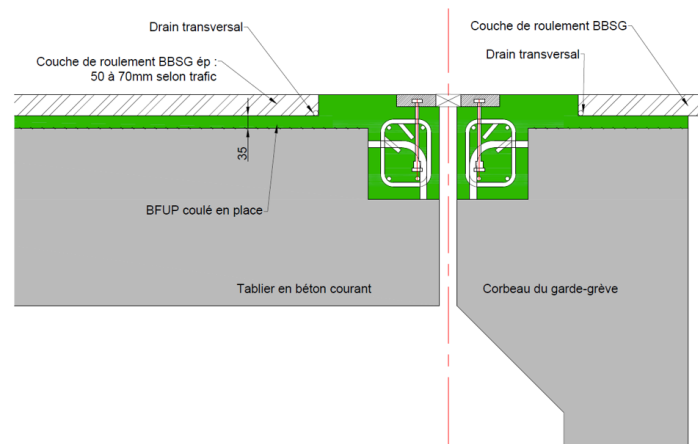


Figure 13 : Disposition recommandée au niveau d'un solin de joint de chaussée (option d'un solin entièrement BFUP)

Points essentiels

• Conception détaillée

Recommandations de joints de secours :

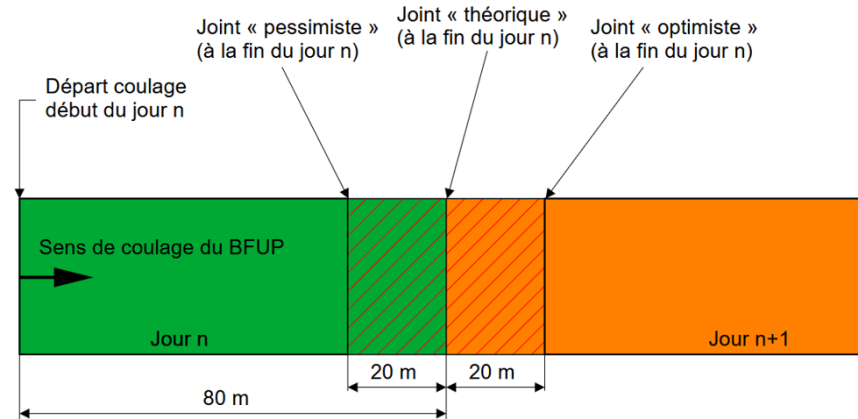


Figure 14 : Vue en plan du tablier - Exemple de joints de secours

• Règles spécifiques à la fabrication et à la mise en œuvre du BFUP étanche

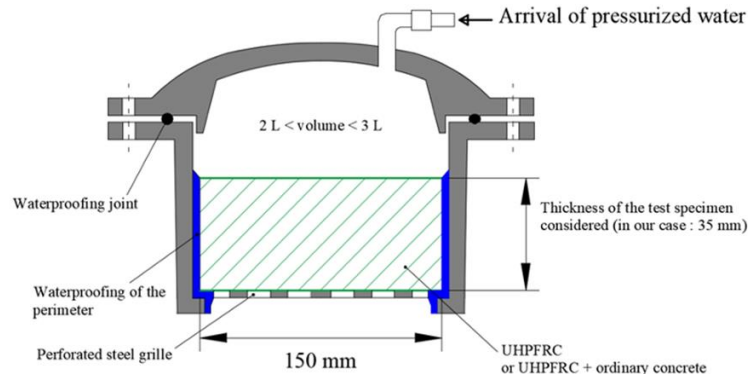
Nombreuses recommandations et clauses de CCTP à ce sujet, notamment la réalisation d'un élément témoin de grande dimension, sur élevée, avec en général la même largeur que l'ouvrage réel → épreuve de convenance mise en œuvre

En fonction des enjeux des travaux (importance de l'ouvrage, contraintes d'exploitation etc.), imposer des prélèvements dans cet élément puis des essais au perméamètre

Points essentiels

• Conception détaillée

- Essai au perméamètre (essai exigé pour les étanchéités classiques) :



Pression d'eau appliquée progressivement : 24 h à 0,1 / 0,5 / 0,7 MPa, puis 3h à 1,0 MPa.

Fluorescéine ajoutée pour faciliter la détection visuelle des fuites.

Idée de réaliser ces essais après avoir préfissuré des prismes prélevés dans la dalle témoin (déformation résiduelle dans le BFUP en cohérence avec la limite retenue pour l'ouvrage à l'ELS caractéristique)

- Méthodes, critères et essais donnés pour qualifier et valider :
 - la rugosité du béton support
 - la rugosité du BFUP avant application de l'enrobé
 - la résistance au cisaillement de l'enrobé sur le BFUP

Attention attirée sur le fait que les étapes de convenance en lien avec le BFUP conduisent en général à des durées de préparation de chantier plus importantes que pour des travaux classiques d'étanchéité

Points essentiels

- Dossier de consultation des entreprises et analyse des offres

Valoriser les moyens humains et techniques des entreprises dans les critères d'analyse
(Règlement Consultation)

Expériences passées probantes des entreprises en matière de BFUP : élément important de jugement de l'offre

Vérifier que les entreprises ont bien anticipé les contraintes du chantier (organisation, logistique, technique)

S'assurer de la conformité du BFUP proposé, du phasage, des cadences et des moyens mobilisés (cadence de mise en œuvre réaliste notamment)

Contrôler l'adéquation du système qualité aux exigences contractuelles (traçabilité, contrôles, points d'arrêt)

Recommandation de rendre le mémoire technique de l'entreprise « unilatéralement contractuel » au moyen d'une clause du CCAP

Points essentiels

• Conduite et exécution du projet

Logistique de chantier rigoureuse : stockage suffisant et protégé des matériaux, plan d'installation adapté, effectifs et matériel de secours disponibles.

Moyens mécanisés et humains adaptés pour garantir homogénéité, respect des épaisseurs et bonne réalisation de la cure.

Préparation du support (cas overlay) : rugosité contrôlée, humidification sans flaques, vérification des épaisseurs.

Coffrages et points singuliers : contrôle pour le respect des épaisseurs et de la réalisation des dispositions constructives des points singuliers

Production BFUP : respect d'un protocole strict (y compris en cas de panne de matériel), des cadences, contrôle de l'homogénéité des gâchées par essais et contrôles visuels (absences d'oursins notamment), élaboration d'un schéma décisionnel pour acceptation des gâchées



Figure 15 : Oursins de fibres



Points essentiels



• Conduite et exécution du projet

Alimentation continue pour éviter les joints froids. Consistance conforme et adéquate en lien avec les variations de température et les adaptations autorisées du dosage en adjuvant superplastifiant

Garantir le remariage des couches : alimentation en arrière du front + sollicitation manuelle (piquage, râteau etc.) obligatoire

Cure immédiate et continue jusqu'à atteinte de 35 % de f_{ck} (conduit en général à 4 jours). Veiller à la mise en œuvre de protections (bâche ou film plastique)

Réception contradictoire de l'état de surface ; réparation si nécessaire avec fiche de non-conformité.

Contrôles réguliers selon plan validé préalablement. Suivi rigoureux des épaisseurs (pige par exemple) et du remariage des couches.

Essais adaptés au BFUP fibré : aéromètre à mortier, vibration au remplissage des moules, utilisation d'un plan incliné pour coulage des plaques minces.



Figure 17 : Photos illustrant un des moyens de contrôle de l'épaisseur de la couche BFUP

Conclusions

- BFUP pour la fonction d'étanchéité : laisse espérer une efficacité au moins équivalente à celle des systèmes traditionnels avec une durée de vie probablement supérieure, mais obtenir effectivement cette fonction nécessite de porter un soin particulier à certains aspects critiques sur lesquels la note veut attirer l'attention
- La qualification d'un matériau BFUP, ou du prémélange de constituants permettant de le fabriquer, même associé à un taux de fibres métalliques élevé, ne constitue pas une exigence suffisante si elle n'est pas complétée par les dispositions de conception et d'exécution adaptées
- Note avec exemples de clauses de CCTP, BPU et plans contractuels pour un appui aux maîtres d'œuvre et maîtres d'ouvrage qui soit le plus efficace possible
- Note à paraître très prochainement

Merci de votre attention



gregory.genereux@cerema.fr