

Les  
ressources

NOTE D'INFORMATION

# OBTENIR LA FONCTION D'ÉTANCHÉITÉ SUR OUVRAGES D'ART PAR L'UTILISATION DU BFUP



## INTRODUCTION

---

**A**ssurer la durabilité des ouvrages d'art nécessite que leur structure soit protégée de façon pérenne des dégradations causées par les intempéries, les eaux de ruissellement et les liquides qui viendraient au contact des éléments porteurs ou participant à la sécurité. Rechercher cette fonction d'étanchéité pour les tabliers de pont par utilisation de Béton Fibré à Ultra-Hautes Performances (BFUP) est un objectif de plus en plus courant, particulièrement quand le BFUP assure en synergie un rôle de renforcement structural, voire constitue tout ou partie de la structure d'un tablier neuf.

**L'utilisation de 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 cette note veut attirer l'attention, notamment :**

- la sélection d'un matériau suffisamment écrouissant en traction ;
- la limitation des déformations de traction à l'État limite de service (ELS) caractéristique sous l'effet combiné des charges, des déformations thermiques imposées et, le cas échéant, du retrait gêné ;
- la régularité du BFUP fabriqué et l'adoption de modalités appropriées de mise en place, serrage et cure ;
- le respect rigoureux de dispositions de détail adéquates et l'exécution soignée des joints et reprises de bétonnage.

Ainsi, 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.

Les indications de cette note de sensibilisation issues du retour d'expérience de plusieurs chantiers importants viennent ainsi compléter pour la fonction étanchéité le référentiel normatif associé aux BFUP pour ce qui concerne le calcul (NF P18-710), la spécification et le contrôle des performances du matériau (NF P18-470) ainsi que l'exécution des ouvrages (NF P18-451), référentiel dont le respect garde toute son importance.

## SOMMAIRE

---

1 • Contexte normatif et performances de la fonction d'étanchéité du BFUP	4
2 • Conception d'une solution BFUP avec fonction d'étanchéité	6
3 • Projet et préparation du marché de travaux	14
4 • Exemples de clauses de pièces techniques de marché	17
5 • Conduite et exécution du projet	17
Bibliographie	22
Glossaire	23



# 1 • CONTEXTE NORMATIF ET PERFORMANCES DE LA FONCTION D'ÉTANCHÉITÉ DU BFUP

## 1.1 Contexte

Grâce à ses excellentes performances mécaniques, à ses performances en termes de protection face aux environnements agressifs (eaux, chlorures, attaques chimiques) du fait de sa faible porosité, et de protection mécanique (abrasion, chocs, etc.), le Béton Fibré à Ultra-Hautes Performances (BFUP) est un matériau identifié depuis une vingtaine d'années comme une solution technique très pertinente pour répondre à des demandes et enjeux variés.

En France, l'utilisation de ce matériau a été encadrée par des recommandations de l'AFGC, parues tout d'abord dans une version provisoire en 2002, puis dans une édition révisée en 2013. Ces recommandations traitent des trois aspects que sont le matériau, le calcul et l'exécution.

Quelques années après la parution de ces recommandations, un travail normatif a été réalisé en France afin de capitaliser les retours d'expérience et faciliter la réalisation des projets BFUP dans un cadre technique et contractuel stabilisé. Ce travail a conduit à la parution des normes françaises suivantes :

- NF P18-470 *Bétons Fibrés à Ultra-Hautes Performances (BFUP) spécification, performance, production et conformité* - 2016 [1] ;
- NF P18-710 *Complément national à l'Eurocode 2 - Calcul des structures en béton : règles spécifiques pour les Bétons Fibrés à Ultra-Hautes Performances (BFUP)* - 2016 [2] ;
- NF P18-451 *Bétons - Exécution des structures en béton - Règles spécifiques pour les BFUP* - 2018 [3].

Ces normes constituent désormais les règles de l'art à suivre en France pour la spécification du matériau, le calcul et l'exécution des structures en BFUP. Elles permettent de réaliser des projets d'ouvrages d'art neufs en BFUP, ainsi que des travaux de réparation et de réhabilitation. Ces référentiels français n'abordent cependant pas la fonction d'étanchéité.

Le matériau BFUP offre une excellente protection pour les structures existantes face à des environnements agressifs : les agents agressifs (tels que les ions chlorure) pénètrent difficilement ce matériau cimentaire très fermé et compact (comme en atteste le coefficient

de diffusion des ions chlorure réduit d'au moins un facteur 5 par rapport aux bétons classiques d'ouvrages d'art, ce qui correspond à une classe de durabilité très élevée). Ainsi, depuis plus d'une vingtaine d'années, du BFUP a été mis en œuvre pour protéger un autre matériau vis-à-vis d'un environnement agressif ou pour assurer la fonction de résistance structurale dans cet environnement. Dans ce cadre, différents projets peuvent être cités : les poutres BFUP des aéroréfrigérants de la centrale nucléaire de Cattenom (1997-1998) [4], les plaques d'ancrage BFUP d'un mur en terre armée à La Réunion (1999) [5], la rénovation en BFUP des piliers des Spélugues à Monaco (2020-2021) [6], des protections de longrines d'ancrage en béton armé de dispositifs de retenue sur ouvrages fortement soumis aux sels de déverglaçage (ouvrage d'APRR sur A36), etc.

L'atout de ce matériau face aux environnements agressifs se traduit également dans les normes françaises précitées : la norme NF P18-710 permet par exemple des enrobages BFUP pour les armatures de béton armé inférieurs à ceux des bétons classiques (enrobage minimal quant à la durabilité divisé par environ 2,2).

## 1.2 Le BFUP et la fonction d'étanchéité

La compacité du BFUP est telle qu'il est également envisagé depuis quelques années de l'utiliser comme solution d'étanchéité pour les ouvrages d'art : du BFUP mis en œuvre en extrados d'un tablier de pont pourrait assurer durablement la fonction d'étanchéité et donc permettre de se dispenser d'une étanchéité classique de type feuilles préfabriquées, systèmes d'étanchéité liquide (SEL) ou systèmes mis en œuvre par des moyens à haute cadence (MHC), l'étanchéité devant être renouvelée régulièrement dans la vie d'un ouvrage.

L'une des premières utilisations du BFUP comme étanchéité est un projet suisse<sup>1</sup> remontant à 2004, avec la réhabilitation du pont sur la Morge [7]. Les travaux du viaduc de Chillon en Suisse en 2014 constituent une étape importante, puisque ce chantier a permis de valider la faisabilité d'une mise en œuvre à grande échelle de BFUP coulé en place en extrados de tablier, même si dans ce cas le BFUP n'a pas le rôle d'étanchéité [8]. Toujours en Suisse, une application du BFUP en tant

1. Il est à noter que le terme « CFUP » (composite Cimentaire Fibré Ultra-Performant) est utilisé dans certains documents suisses en lieu et place de « BFUP ».

qu'étanchéité à grande échelle est le pont frontalier de Bâle (Grenzbrücke – Basel), de 1,5 km de long, recouvert de BFUP sur 8 300 m<sup>2</sup> (lors de travaux réalisés de 2018 à 2023) [9].

En France, la fonction d'étanchéité du BFUP a été retenue sur des ouvrages fortement circulés, faisant partie du réseau APRR : le pont Warren portant l'A36 (2021) franchissant le canal de dérivation de la Saône et le viaduc de Pont d'Ouche portant l'A6 (2022-2023) [10] et [11]. À noter également que le pont de la Chabotte, constitué de voussoirs en BFUP, construit au-dessus du réseau AREA en 2005, se dispense d'une étanchéité classique, puisqu'il est considéré sur cet ouvrage que le BFUP seul est apte à assurer cette fonction [12].

Ces dernières années, le principe d'utiliser du BFUP en tant qu'étanchéité d'ouvrage d'art a été retenu sur de nombreux projets suisses, comme le viaduc de Riddes (réparation et renforcement en 2021-2022) [13] ou le Grand-Pont de Lausanne (réparation et renforcement en 2022). La Suisse reste, tout comme la France, parmi les pays pionniers du matériau BFUP, via la réalisation de nombreux projets et en ayant très tôt normalisé l'utilisation de ce matériau. En effet, la norme suisse SIA 2052, en vigueur depuis 2016, encadre les spécifications matériau, le calcul et l'exécution des BFUP [14]. Elle encadre également l'utilisation du BFUP en tant qu'étanchéité, ce qui n'est pas le cas des normes françaises.

Les critères suisses permettant de qualifier un BFUP d'étanche sont basés sur des essais avec des pressions d'eau bien moindres que celles retenues dans les essais exigés dans le cadre des avis techniques Cerema sur les étanchéités classiques en France [15]. Des essais d'étanchéité à hautes pressions sur BFUP sont d'ailleurs actuellement en cours de développement au niveau français, la spécification d'étanchéité pourrait donc être couverte par les normes françaises dans un futur proche [16]. Cette utilisation, si elle est bien cadrée en termes de conception, de prescription, de calcul et de mise en œuvre, reste une option prometteuse. Il est également possible qu'à terme des BFUP conçus spécialement pour la fonction d'étanchéité fassent l'objet d'avis techniques du Cerema.

L'Office fédéral des routes (Ofrou) suisse a récemment publié un guide intitulé *CFUP pour la maintenance et la construction d'ouvrages d'art de l'infrastructure routière* (2023) [17]. Ce guide fournit, entre autres, de nombreux éléments (calculs, dispositions constructives, etc.) relatifs à l'utilisation du BFUP en tant qu'étanchéité. En plus

des applications françaises et suisses, il est important de mentionner les applications américaines. En effet, depuis la fin des années 2010, de nombreux projets de ce type ont vu le jour aux États-Unis, notamment le Delaware Memorial Bridge, un pont de 3,3 km de long renforcé en 2023 par 3 750 m<sup>3</sup> de BFUP mis en œuvre en extrados de tablier [18]. Un document américain intéressant est d'ailleurs paru récemment à ce sujet. Intitulé *Experiences from Early Implementations of UHPC Overlays* et édité par la Federal Highway Administration, il revient en détail sur de nombreux exemples américains [19].

### 1.3 Objet de la note

À ce jour, de plus en plus de maîtres d'ouvrage français entreprennent des projets d'ouvrages d'art utilisant le BFUP, qu'ils soient neufs ou à réparer/réhabiliter, en comptant sur le BFUP pour assurer leur étanchéité. Des pièces techniques de marché insuffisamment développées ou détaillées pour l'utilisation du BFUP en tant qu'étanchéité peuvent conduire, si l'expérience et le professionnalisme des acteurs ne viennent pas pallier ces manques, à une défaillance de cette performance d'étanchéité recherchée, alors même que le BFUP peut être une solution efficace s'il est correctement utilisé.

Ces constats, liés à l'utilisation d'un matériau exigeant, conduisent aujourd'hui à publier la présente note de sensibilisation pour attirer l'attention sur les spécifications et dispositions constructives à adopter lorsqu'une fonction d'étanchéité est recherchée pour les tabliers de pont en France. Cette note a été rédigée à la demande de la direction générale des Infrastructures, des Transports et des Mobilités (DGITM) qui souhaite à la fois encourager l'usage du BFUP pour des réhabilitations durables d'ouvrages d'art et fournir l'encadrement technique sur les points non couverts par les référentiels normatifs.

Cette note s'accompagne d'une annexe présentant des exemples de pièces techniques de marché (CCTP, BPU et plans) disponible sur [doc.cerema.fr](https://doc.cerema.fr).

Enfin, il est à noter que des recommandations complémentaires sur l'utilisation du BFUP en réparation et en réhabilitation des ouvrages d'art, sont en préparation, traitant notamment de multiples exemples de renforts structurels, de protection vis-à-vis des environnements agressifs, de protections mécaniques et du cas particulier de la réparation des buses métalliques.

## 2 • CONCEPTION D'UNE SOLUTION BFUP AVEC FONCTION D'ÉTANCHÉITÉ

### 2.1 Prescriptions particulières requises pour obtenir un BFUP étanche

Selon la norme NF P18-470, le BFUP doit présenter une résistance caractéristique à la compression minimale de 130 MPa et un comportement ductile écrouissant en traction, permis par l'emploi de fibres d'acier en quantité suffisante. L'expérience actuelle montre qu'un taux de fibres en acier compris entre 3,0 et 4,0 % est pertinent pour des applications de revêtement BFUP destiné à assurer une fonction d'étanchéité et coulé en place (et donc soumis à du retrait gêné), sans armatures autres que celles permettant d'assurer la couture des zones de reprise. Toutefois, s'il n'est pas recommandé d'exiger dans un marché un taux de fibres, les performances attendues doivent elles être contractuelles. La classe de comportement en traction du matériau doit *a minima* être « T2 : BFUP peu écrouissant », voire « T3 : BFUP très écrouissant ».

En complément des exigences de la norme NF P18-470, le BFUP doit remplir les exigences suivantes, à spécifier explicitement :

- en complément des exigences de la classe T2, la valeur caractéristique de la résistance postfissuration doit être supérieure à la valeur moyenne de la limite d'élasticité en traction :  $f_{ctfk} \geq f_{ctm,el}$  ;
- même si l'épaisseur de la partie en BFUP de la section dépasse celle des éléments minces au sens de la norme NF P18-470, les essais de flexion 4 points sur prismes doivent être exploités conformément à l'annexe E de la norme NF P18-470 en vue de la détermination de  $f_{ctel}$  et de la loi postfissuration ;
- que l'élément soit mince ou épais, les éprouvettes testées doivent avoir un comportement multifissurant (apparition de microfissures très resserrées et absence de macrofissures dans le BFUP d'ouverture supérieure à la limite de détection visible qui est d'environ 50  $\mu\text{m}$ ) jusqu'à une déformation de 2,0 ‰ ;
- en fonction des enjeux du projet, il pourra être exigé que la déformation écrouissante limite du BFUP soit supérieure à 2,0 ‰. Des détails sont fournis dans le CCTP présenté en annexe de la présente note sur la façon de déterminer la valeur de la déformation écrouissante limite du BFUP, à partir des essais de flexion 4 points.

De plus, dans le but d'obtenir la performance d'étanchéité, il est recommandé la prescription de classes de durabilité potentielle améliorées (cf. § 4.2.2.2 de la norme NF P18-470) :

- pour la porosité à l'eau - Dp+ : porosité à l'eau à 90 jours  $\leq 6,0 \%$  ;
- pour la diffusion des ions chlorure - Dc+ : coefficient de diffusion des ions chlorure à 90 jours  $\leq 0,1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ . Compte tenu de la difficulté à réaliser l'essai exigé par l'actuelle norme NF P18-470:2016 sur les BFUP avec de forts taux de fibres métalliques, il est admis de réaliser l'essai sur un BFUP de composition équivalente sans fibres métalliques.

La classe de consistance du matériau BFUP doit être adaptée à son mode de mise en œuvre, tenir compte des pentes transversales et longitudinales du tablier, des relevés d'étanchéités en BFUP, etc. Il est ainsi fréquent d'avoir des classes de consistance différentes pour le BFUP coulé sur le tablier et celui coulé sur les longrines de rives, ce qui nécessite l'étude et la mise en œuvre de deux BFUP différents.

### 2.2 Principaux cas d'emploi du BFUP comme étanchéité d'ouvrages d'art

#### 2.2.1 Généralités

De façon générale, le BFUP peut être utilisé en tant qu'étanchéité pour les tabliers de ponts dans trois cas principaux : sur un ouvrage neuf dont le tablier est entièrement en BFUP, sur des ouvrages existants à tablier en béton ou à tablier métallique.

#### 2.2.2 Étanchéité sur ouvrage avec tablier entièrement en BFUP

Le tablier est entièrement conçu en BFUP, en général à partir d'éléments préfabriqués, et le fait d'utiliser ce matériau peut permettre de se dispenser de la couche d'étanchéité, sous réserve d'une bonne conception et de bonnes dispositions constructives (joints entre éléments, fenêtres de connexion et reprises de bétonnage notamment).

Pour garantir l'étanchéité entre éléments BFUP préfabriqués, des joints en BFUP coulé en place peuvent par exemple être conçus en retenant le principe de la figure suivante :

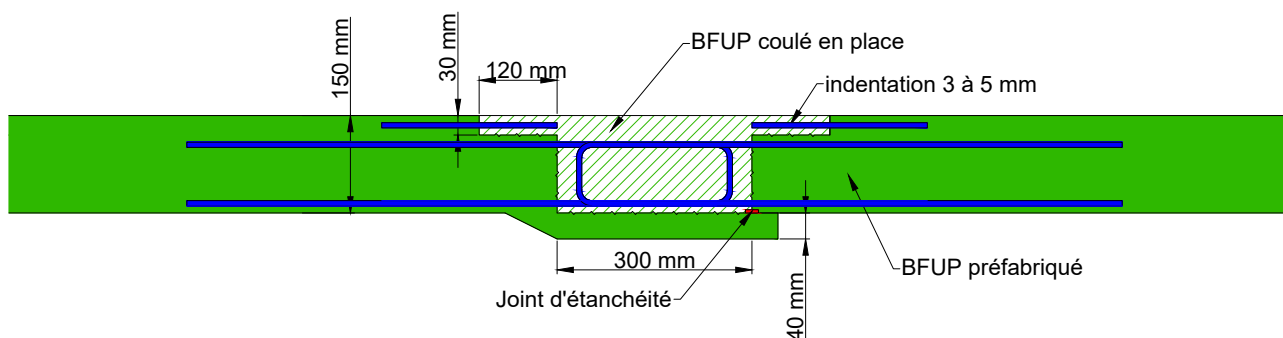


Figure 1 : exemple de traitement des jonctions entre éléments préfabriqués BFUP.

Pour garantir l'étanchéité, il ne faut pas prévoir de joint droit vertical entre éléments BFUP. Dans l'hypothèse où ce choix de conception serait néanmoins retenu, il convient de prévoir une étanchéité classique au-dessus du BFUP ou *a minima* au droit des joints. La surface du BFUP devra alors subir un traitement particulier (à exiger au CCTP) pour être en mesure de recevoir dans de bonnes conditions l'étanchéité classique. Pour le support BFUP, il est recommandé d'exiger les caractéristiques de surface décrites au paragraphe 8.4 du fascicule 67 titre I [20]). Les fibres métalliques du BFUP qui dépassent devront de plus être éliminées par ponçage (opération également à exiger au CCTP).

### 2.2.3 Étanchéité sur tablier en béton

Le BFUP est utilisé en extrados du tablier, par-dessus une structure existante en béton préalablement rendu rugueux (utilisation dénommée « *overlay* » dans le monde anglo-saxon, traduit généralement par « revêtement »). Ces cas se présentent *a priori* plutôt dans les projets de réparation et de réhabilitation d'ouvrages existants, il est recommandé en zone courante l'emploi d'une épaisseur minimale de BFUP de 30 mm, ce qui conduit à considérer pour les projets une épaisseur nominale supérieure (qui doit être accompagnée dans le CCTP de tolérances d'exécution). L'épaisseur nominale (distance entre cote théorique du béton existant après hydrodémolition et arase supérieure du BFUP) recommandée est alors de 35 mm.

**Note :** le caractère étanche d'un BFUP a été validé en Suisse pour une épaisseur minimale supérieure à 30 mm (dans le cas d'un BFUP non armé).

### 2.2.4 Étanchéité sur platelage métallique

Le BFUP peut être utilisé en extrados d'un tablier avec platelage métallique. En réparation, la pathologie conduisant à prévoir la mise en œuvre du BFUP sur ce type de tablier est souvent un problème de résistance structurale à la fatigue du platelage métallique. Ajouter du BFUP par-dessus la tôle de platelage peut alors être un moyen de réduire sensiblement les contraintes dans les parties métalliques et donc d'allonger la durée de vie de l'ouvrage [21]. Si la fonction étanchéité par le BFUP est également retenue (BFUP coulé en place dans ce cas), il est recommandé une épaisseur nominale de 45 mm, voire 50 mm. Ces épaisseurs permettent en effet non seulement la connexion acier/BFUP au moyen de goujons de faible hauteur ou par l'enrobage par le BFUP d'un treillis soudé, lui-même soudé à la tôle, mais permettent également d'envisager des reprises de bétonnage BFUP avec recouvrement (becquet horizontal, cf. § 2.3 ci-après), nécessaires pour assurer la fonction d'étanchéité. Un traitement de la tôle métallique par grenaillage avant de mettre en œuvre le BFUP est également recommandé.

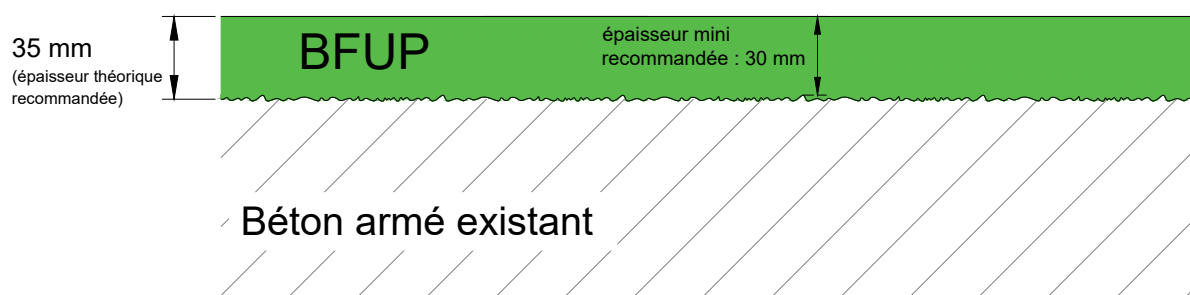


Figure 2 : illustration du deuxième cas - BFUP coulé en place sur un tablier béton existant.

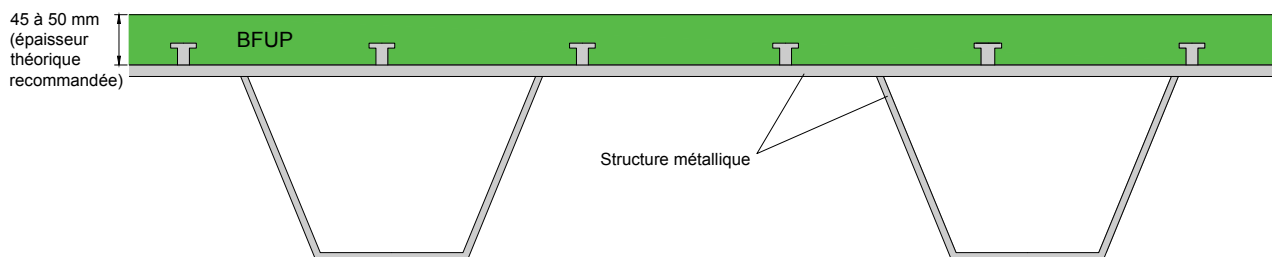


Figure 3 : illustration du troisième cas - BFUP coulé en place sur un tablier métallique (cas d'un pont relativement grand nécessitant des reprises de bétonnage).

Pour augmenter la résistance en fatigue, la connexion peut être complétée par application sur le platelage d'une résine gravillonnée ou sablée. En effet, en l'absence de ce traitement, les essais réalisés lors du projet de recherche Orthoplus [22] ont montré que des glissements se produisaient entre le BFUP et la tôle métallique entre les points de connexion que constituent les goujons, réduisant ainsi l'efficacité du BFUP pour rigidifier le platelage et réduire les effets de fatigue.

Cette solution de dalle orthotrope avec BFUP peut même être envisagée pour des structures neuves (il existe notamment plusieurs exemples récents de ce type de réalisation en Chine).

En général, le BFUP est surtout avantageux lorsque, en plus de l'étanchéité, ses performances mécaniques sont un réel apport dans la résistance de la structure, mais il est possible d'envisager le BFUP pour sa seule fonction d'étanchéité.

Dans le cas du BFUP coulé en extrados d'une structure béton existante, il est souvent possible de se dispenser d'armatures de béton armé en zone courante, mais pas dans les zones de reprise de bétonnage du BFUP, indépendamment du traitement des points singuliers.

Pour la couche de roulement, l'emploi d'une couche d'enrobé classique est à ce jour recommandée, même si l'utilisation du BFUP rainuré en couche de roulement

est employée à grande échelle aux USA [23] et si, dans le contexte français, des études sont en cours pour déterminer si un traitement de surface du BFUP pourrait permettre de se dispenser de cette couche d'enrobé rapportée.

## 2.3 Conception détaillée

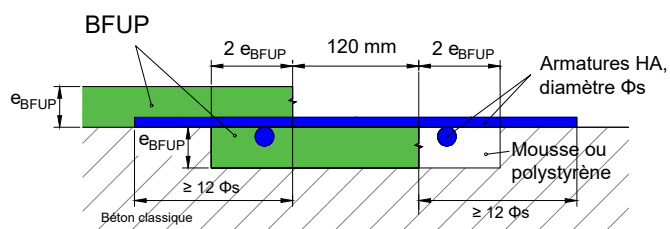
**Pour que soit assurée l'étanchéité d'ensemble de l'ouvrage, il est fondamental de prévoir des dispositions constructives appropriées pour tous les points singuliers que sont les reprises de bétonnage, les relevés d'étanchéité, les raccords aux gargouilles ou avaloirs, aux solins des joints de chaussée, les points triples, les raccords 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). En l'absence d'une étude dédiée, pour un revêtement BFUP sur tablier existant en béton, les conceptions illustrées sur les deux schémas suivants, issus des préconisations suisses de la norme SIA 2052 [14], sont les seules recommandées pour réaliser les reprises de bétonnage BFUP en assurant la fonction d'étanchéité.



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

#### Première étape :



#### Deuxième étape :

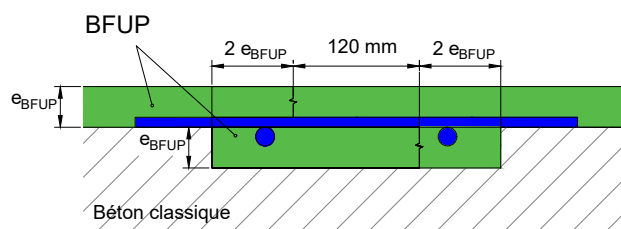


Figure 4 : disposition pour les reprises de bétonnage BFUP étanches – méthode 1.

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

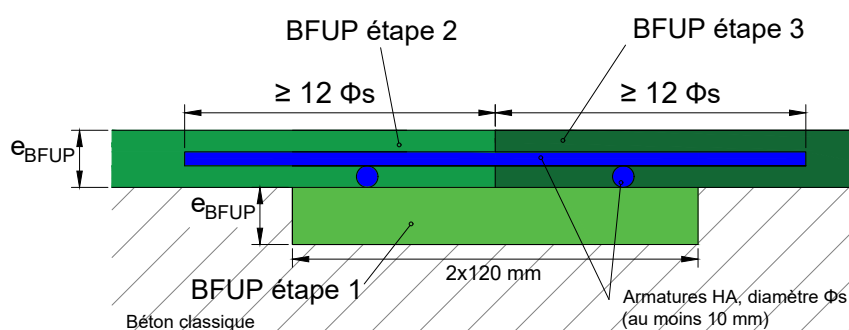


Figure 5 : disposition pour les reprises de bétonnage BFUP étanches – méthode 2.

Comme illustré sur les figures précédentes, cette disposition constructive consiste à réaliser une importante engravure (de profondeur égale à l'épaisseur du BFUP mis en œuvre en dehors de cette zone) dans le tablier en béton classique, sur toute la longueur de la reprise de bétonnage (qui correspond souvent à la largeur de l'ouvrage), afin d'avoir *in fine* des recouvrements de couches BFUP d'épaisseur suffisante.

Quelle que soit la méthode, la quantité d'armatures traversant la reprise de bétonnage à mettre en œuvre est d'au moins 2,4 % de la section du BFUP (en référence à l'épaisseur  $e_{BFUP}$ ). Avant de couler les couches supérieures de BFUP, il est important que la première couche de BFUP soit propre et qu'elle présente une microrugosité obtenue par une préparation de surface adéquate (par exemple : hydro-décapage à 1 000 bars).

Lorsqu'il n'est pas possible de réaliser des engravures et que la longueur de l'ouvrage est telle que des reprises de bétonnage sont nécessaires (cas par exemple des tabliers de grands ponts à dalle orthotrope), l'épaisseur de la couche d'étanchéité BFUP doit être supérieure à 45 mm, de façon à pouvoir réaliser les joints de reprise étanches dans son épaisseur.

Les relevés d'étanchéité, ou plus généralement les reprises de bétonnage « verticales », sont des points singuliers qu'il est important de bien prévoir et réaliser pour obtenir une étanchéité efficace. Les figures suivantes, issues des préconisations suisses, proposent des dispositions pertinentes quand la longrine de rive est également protégée par du BFUP. À noter que pour assurer un bon remplissage des parties verticales il est préconisé des épaisseurs d'au moins 40 mm.

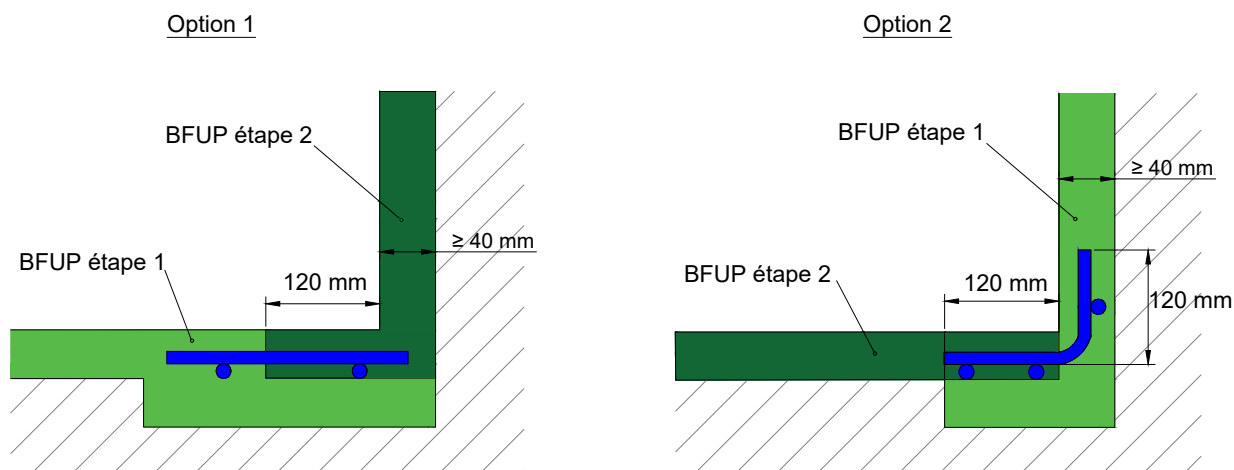


Figure 6 : exemples de bonnes dispositions pour les relevés d'étanchéité en BFUP.

Les surfaces supérieures du BFUP de première phase des joints doivent être propres et faire l'objet d'un traitement de surface par hydro-décapage, pour donner une rugosité permettant une bonne liaison avec la couche de BFUP de deuxième phase. Même si la consistance du BFUP n'est pas une donnée à faire figurer dans le CCTP, puisqu'elle relève d'un choix de l'entreprise, il est recommandé pour les relevés d'étanchéité verticaux d'utiliser des BFUP de classe de consistance Ca « BFUP susceptible d'être autoplaçant » ou Cv « BFUP visqueux ».

**Note :** en revanche, une classe de consistance Ct « BFUP à seuil » est recommandée pour la tenue de pentes importantes.

Si la longrine de rive n'est pas protégée par du BFUP (mais par une étanchéité de type SEL par exemple), mais que l'étanchéité du tablier de l'ouvrage sous chaussée est réalisée par du BFUP, il convient d'adopter la conception suivante :

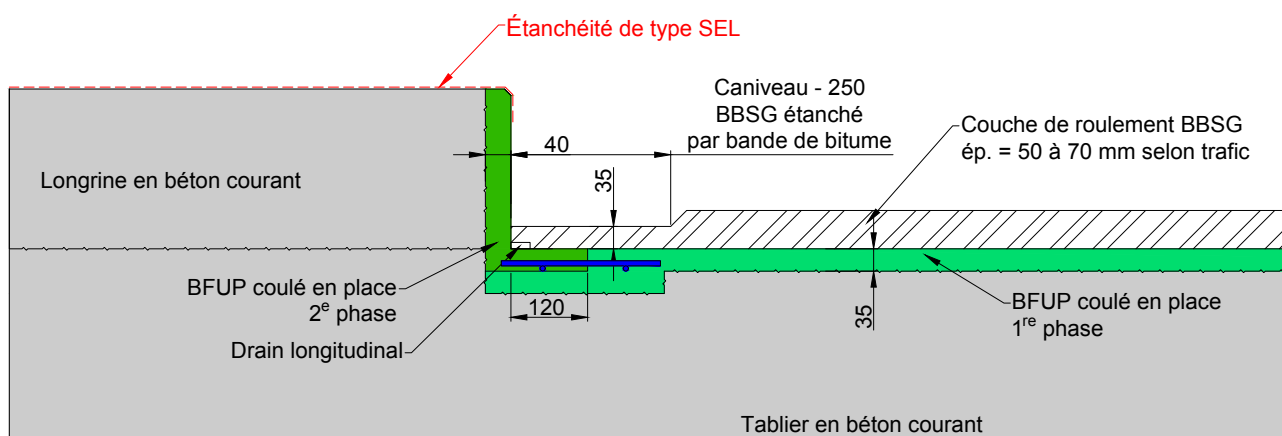


Figure 7 : exemple de bonne disposition pour le cas où une étanchéité par BFUP est prévue sous chaussée mais pas sur les longrines.

Comme il est possible de le constater sur la figure 7, même s'il n'est pas prévu une protection BFUP sur l'ensemble de la longrine, il convient, pour des raisons pratiques de réalisation, de prévoir un relevé d'étanchéité BFUP sur toute la hauteur de la longrine. Dans le cas d'une réparation, il faudra alors hydro-démolir par exemple

la largeur de 40 mm apparaissant sur le plan avant de venir couler le BFUP. Afin de ne pas endommager l'étanchéité de type SEL, les fibres métalliques du BFUP dépassant au niveau du recouvrement avec l'étanchéité de type SEL devront être éliminées par ponçage.

À noter également que le schéma précédent (ainsi que d'autres schémas à suivre) fait apparaître un caniveau en BBSG étanché par bande de bitume, disposition plutôt prévue pour les interventions sur ouvrage existant. Il est néanmoins possible d'appliquer les principes des schémas à des dispositions avec caniveau asphalté (disposition plutôt prévue pour les ouvrages neufs), la seule différence, mis à part le matériau constitutif du caniveau, étant

la position du drain longitudinal qu'il convient alors de placer côté chaussée et non côté longrine.

À l'inverse, s'il est prévu une protection de la longrine par du BFUP mais que l'étanchéité du tablier sous chaussée est assurée par un système classique de type feuille préfabriquée, il est recommandé la conception de la figure 8 :

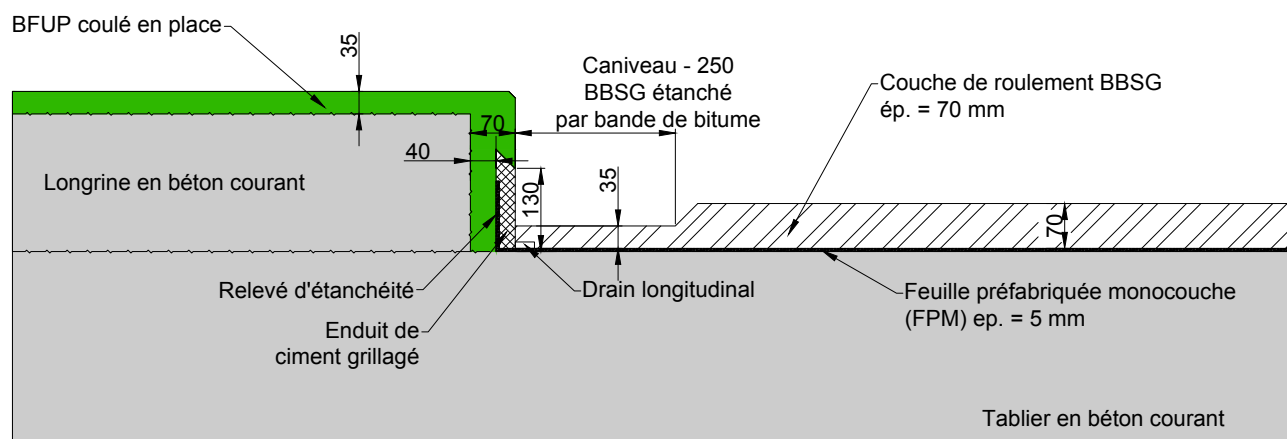


Figure 8 : exemple de bonne disposition de relevé d'étanchéité pour le cas où le BFUP n'est prévu que sur les longrines.

**Note :** lorsque le BFUP est utilisé en protection de longrine, cette protection peut être étendue au parement vertical extérieur, le BFUP pouvant alors également remplir le rôle de corniche.

Dans le cas de la figure précédente, l'application du BFUP ne doit en rien réduire le diamètre des avaloirs existants. Il est même préférable de profiter des travaux pour redimensionner les dispositifs d'évacuation des eaux.

Les avaloirs (ou gargouilles) sont aussi des points singuliers à traiter convenablement. Les exemples suivants montrent des dispositions qu'il convient d'adopter, dont certaines sont inspirées des pratiques suisses.

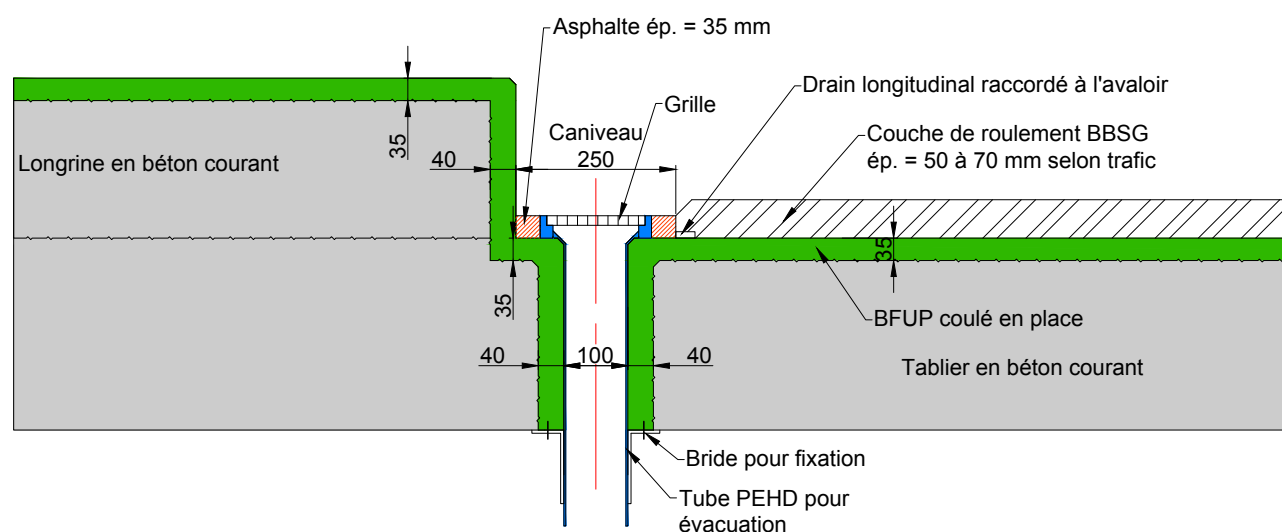


Figure 9 : disposition idéale au droit d'un avaloir pour le cas où le BFUP est utilisé à la fois en zone courante du tablier et sur les longrines (Note - Sur de l'existant, cette disposition nécessite de remplacer l'avaloir).

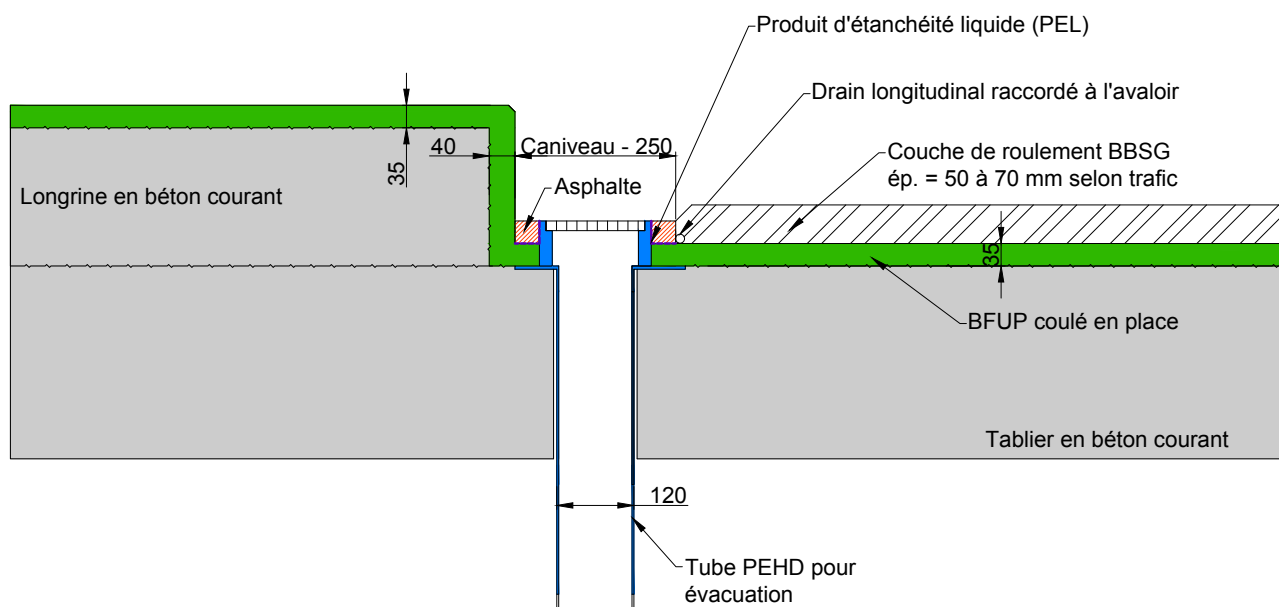


Figure 10 : disposition possible au droit d'un avaloir pour le cas où le BFUP est utilisé à la fois en zone courante du tablier et sur les longrines (Note - Sur de l'existant, cette disposition permet de conserver l'avaloir en place).

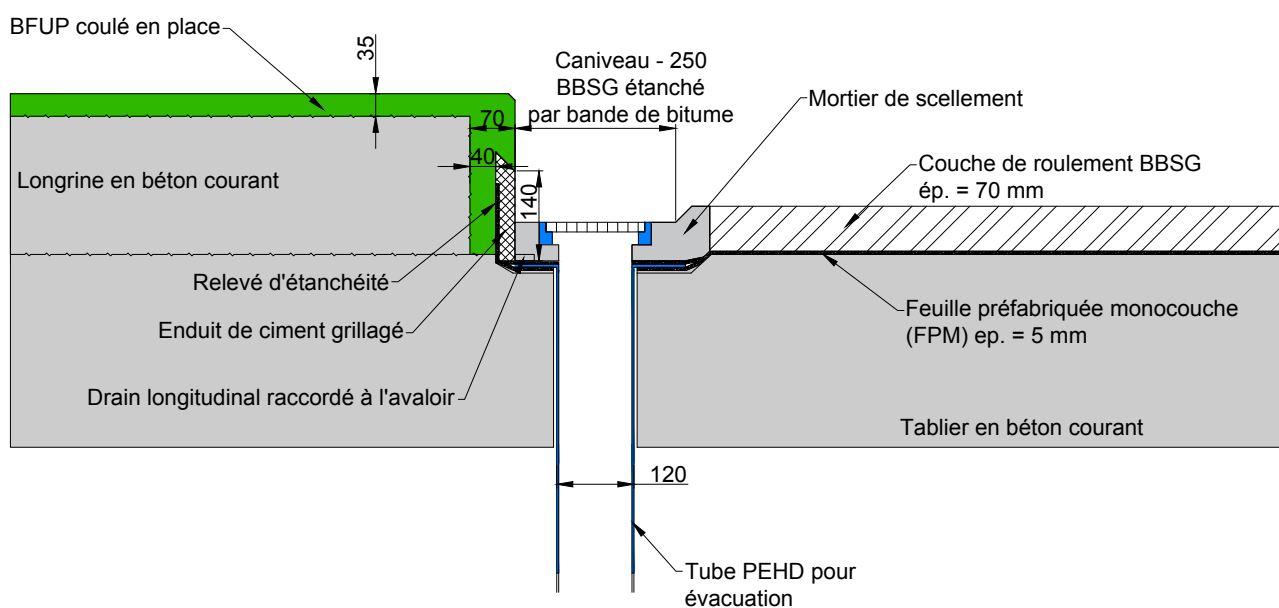


Figure 11 : disposition recommandée au droit d'un avaloir pour le cas où le BFUP n'est prévu que sur les longrines.

Les solins des joints de chaussée font également partie des points singuliers à traiter convenablement afin d'obtenir l'étanchéité générale de l'ouvrage.

Les exemples suivants montrent de bonnes dispositions constructives relativement à cet aspect.



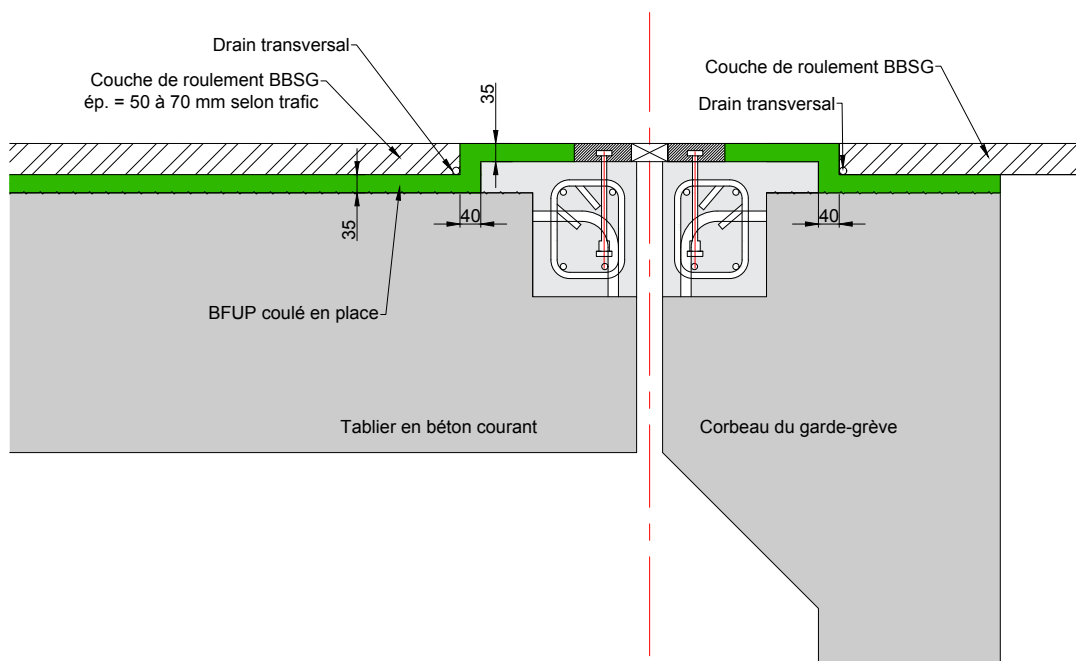


Figure 12 : disposition recommandée au niveau d'un solin de joint de chaussée (par exemple dans le cas d'une intervention sur l'existant pour lequel le solin est sain).

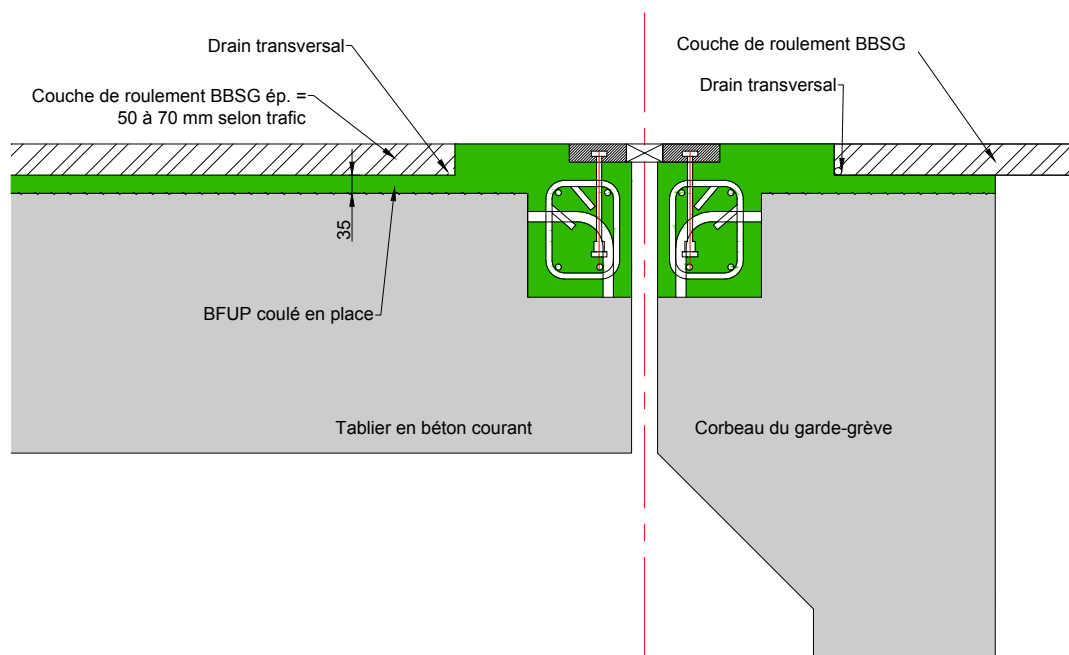


Figure 13 : disposition recommandée au niveau d'un solin de joint de chaussée (option d'un solin entièrement BFUP).

## 2.4 Règles spécifiques de justification pour assurer l'étanchéité du BFUP

Il est important, pour assurer la fonction d'étanchéité, d'imposer un critère calculatoire de déformation maximale sur le matériau BFUP, afin de minimiser le niveau de traction et la fissuration dans le matériau. En effet, si les ouvertures de fissures s'avéraient trop importantes, l'eau pourrait traverser le BFUP.

Par référence aux règles suisses (SIA 2052 *Béton fibré ultra-performant (BFUP) – Matériaux, dimensionnement et exécution* [14]), il est recommandé de limiter la déformation du BFUP à l'ELS caractéristique, à 1,0 ‰, en tout point de la couche BFUP.

**Note :** dans le guide suisse Astra de 2023 [17], il est précisé l'utilisation du « *cas de charge fréquent* » pour la détermination de la déformation du BFUP. Dans le cadre de la présente note, il est toutefois recommandé une détermination de cette déformation à l'ELS caractéristique, pour diminuer le risque d'un défaut d'étanchéité accentué par le trafic lourd sur l'ouvrage.

Lorsque le BFUP est coulé sur un support existant, le calcul des déformations du BFUP, outre l'effet des charges de trafic et des effets thermiques, doit tenir compte du retrait gêné, qui peut générer des tractions. Les contraintes de traction dues au retrait gêné peuvent se révéler complexes à calculer. Il est alors proposé une règle simple à défaut d'étude plus avancée, inspirée des règles applicables aux dalles de ponts mixtes [25] : durant les premières heures suivant son coulage,

le BFUP n'est pas suffisamment rigide pour que son retrait soit gêné par le béton sur lequel il est appliqué, et le fluage (ou la relaxation) sous l'effet de la déformation gênée conduira à une diminution des contraintes dans le matériau. Il est alors possible de considérer que la déformation de retrait générant de la traction dans le BFUP est égale à 50 % de la valeur du retrait total.

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

Même si l'application est non structurale, 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 norme NF P18-710.

## 3 • PROJET ET PRÉPARATION DU MARCHÉ DE TRAVAUX

### 3.1 Étude de projet

Quels que soient les cas de figure dans lesquels le BFUP est envisagé pour la fonction d'étanchéité, **l'étape de l'étude de projet est essentielle.**

L'étude de projet doit envisager l'utilisation du matériau BFUP pour la fonction d'étanchéité recherchée, mais également pour la fonction de résistance structurale si le projet le nécessite, ce qui accroît l'intérêt du recours à ce matériau.

Elle doit prendre en compte la nécessité d'étanchéité globale du tablier de l'ouvrage en section courante, ainsi que les points suivants :

- relevés d'étanchéité latéraux, avec le raccordement étanche à un éventuel revêtement de protection en BFUP des longrines d'ancrage des dispositifs de retenue (solution fortement recommandée pour valoriser encore d'avantage l'utilisation de ce matériau) ;
- raccordement étanche aux évacuations d'eau (avaloirs, gargouilles, etc.) ;
- raccordement étanche aux solins d'ancrage des joints de chaussée ou retombées en abouts de tabliers d'ouvrages non équipés de joint de chaussée ni de dalles de transition (par exemple cadres ou portiques en béton armé), ou lorsque cela est possible, transformation de l'ouvrage en ouvrage semi-intégral (suppression des joints de chaussée) (solution fortement recommandée).

Le projet doit également étudier les principes de phasage de réalisation de l'étanchéité BFUP, en tenant compte du phasage global de l'opération de travaux et de l'impératif de sécurité des ouvriers et usagers :

- phasage transversal en fonction de la largeur du tablier de l'ouvrage, du mode de mise en œuvre du BFUP envisagé, des possibilités des matériels de mise en œuvre existants, de l'éventuelle mise en œuvre d'un revêtement de protection en BFUP sur les longrines d'ancrage des dispositifs de retenue, etc. ;
- phasage longitudinal en fonction de la longueur du tablier de l'ouvrage existant, des capacités réalistes de fabrication (performances, nombre des centrales à BFUP foraines ou fixes alimentant le chantier) et de mise en œuvre dans le cas d'un BFUP coulé en place, de l'éventuel recours à la préfabrication d'éléments.

Le projet doit ensuite servir à la mise au point de pièces techniques d'un marché de travaux (CCTP, carnet de plans, schémas, détails) apportant des précisions sur le sujet de l'étanchéité, notamment concernant les dispositions constructives requises pour la réalisation des éventuels :

- joints de reprise de bétonnage longitudinaux, étanches ;
- joints de reprise de bétonnage transversaux, étanches ;
- clavages transversaux et fenêtres de connexion, étanches, dans le cas du recours à des éléments préfabriqués en béton, par exemple éléments de hourdis d'un pont mixte ;

- raccordements de toutes sortes (revêtement de protection des longrines d'ancrage des dispositifs de retenue, gargouilles, avaloirs, solins de joints de chaussée voire dalles de transition) ;
- retombées d'abouts de tablier ou conception semi-intégrale sans joint de chaussée, etc.

Même si l'anticipation au stade du projet (calepinage des joints et conception des détails, logistique...) a été de qualité, il est vivement recommandé à l'exécution de prévoir des joints de reprise de bétonnage « de secours », correspondant à des cadences d'application du BFUP « pessimistes » ou « optimistes » : dans le cas d'un revêtement sur tablier béton, il s'agit alors de préparer à chaque fois trois joints de reprise au lieu d'un seul (et donc trois engravures dans le béton existant), et de décider en fin de journée à quel endroit le coulage est arrêté, en fonction de l'avancement du travail. En l'absence de telles dispositions, le recouvrement horizontal en extrémité de la zone bétonnée ne peut être réalisé dans des conditions satisfaisantes [11].

Un exemple de joints « de secours » est donné à la figure suivante :

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

Outre l'application des règles de la norme NF P18-451 et l'exigence de dispositions constructives adaptées pour traiter toutes les discontinuités et points singuliers (cf. ci-avant), il est capital :

- d'anticiper, dans la mesure du possible, les aléas du chantier pour éviter notamment les arrêts de bétonnage accidentels ;
- de maîtriser la fabrication du matériau (matériel adapté, régularité de production, contrôle intérieur du BFUP frais, etc.) ;
- de respecter les règles de l'art dans sa mise en œuvre, notamment l'impératif d'éviter les joints « froids » (discontinuité des fibres métalliques correspondant à des reprises ou irrégularités d'apport du matériau non traitées) : mise en œuvre du BFUP à l'arrière du front de bétonnage, remariage mécanique des couches de BFUP ;
- de réaliser un contrôle renforcé après fabrication pour détecter la présence éventuelle d'oursins de fibres ou de mottes de BFUP mal hydratées, à éliminer.

La réalisation d'épreuves de convenance portant aussi bien sur le matériau BFUP que sur sa mise en œuvre doit être prévue au marché (points d'arrêt de l'exécution).

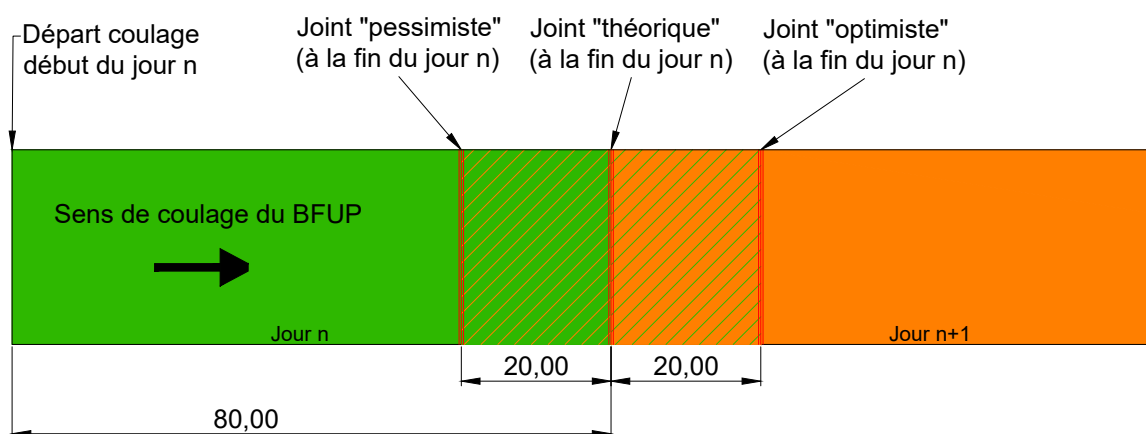


Figure 14 : vue en plan du tablier - Exemple de joints de secours.

L'épreuve de convenance de mise en œuvre, qu'il est recommandé de réaliser postérieurement à celle d'une épreuve de convenance matériau probante et dans des conditions météorologiques les plus représentatives possibles de celles attendues pour le chantier, doit comporter la réalisation d'un élément témoin représentatif des travaux à effectuer. **Cet élément témoin de convenance est alors une dalle de grandes dimensions**, avec en général la même largeur que celle de l'ouvrage réel, qui doit comporter les caractéristiques suivantes :

- largeur et pentes transversales identiques à celles du tablier ;
- dispositions constructives particulières : différents types de joints de reprise de bétonnage, divers raccordements prévus au projet... ;
- dispositions liées au phasage d'exécution transversal.

Outre la validation de la mise en œuvre correcte du BFUP, l'élément témoin doit permettre de :

- s'assurer de l'absence de fissuration traversante du BFUP durci (relevé exhaustif de la fissuration d'ouverture correspondant à la limite de détection visible – environ 50  $\mu\text{m}$  – à prévoir au marché) ;
- de s'assurer de la bonne adhérence du BFUP sur le support d'une part et de la couche de roulement sur le BFUP d'autre part (essais d'arrachement par traction directe par exemple) ;
- d'effectuer la mise en eau, sans pression, du BFUP pendant une durée suffisante à fixer au marché ;
- de s'assurer de l'absence de fuite, défaut d'étanchéité en zone courante et sur tous les points singuliers de l'élément, notamment au droit des joints de reprise de bétonnage, raccordements divers (aux gargouilles, avaloirs etc.), ce qui nécessite de pouvoir examiner la sous-face de l'élément témoin (il faut donc réaliser une dalle surélevée) et peut également être vérifié au moyen d'une instrumentation particulière (fibres optiques distribuées, tresses de cuivre), à prescrire au marché ;
- en fonction des enjeux des travaux (importance de l'ouvrage, contraintes d'exploitation etc.), l'élément témoin peut permettre, si prescrit au marché, de prélever des carottes du sandwich « BFUP / béton support » en section courante ainsi qu'au droit de joints de reprise de bétonnage, pouvant faire l'objet d'essais au perméamètre sous forte pression (jusqu'à 1,0 MPa) permettant de présumer du caractère intrinsèquement étanche du BFUP (détail de l'essai donné dans l'exemple de CCTP, en annexe de la présente note).

La période de préparation des travaux doit intégrer le temps nécessaire à la pré-validation du référentiel qualité du chantier (PAQ, demandes d'agrément fournitures, dossier d'étude et/ou carte d'identité

du BFUP, dossier technique des moyens de fabrication du BFUP, procédures d'exécution) et à la réalisation des épreuves de convenance (qui doivent être renouvelées en cas d'exécution non probante ou de modification conséquente des moyens matériels ou humains affectés au chantier), mais également un temps de mise au point pour le chantier, tenant compte des enseignements des épreuves de convenance.

L'attention est attirée sur le fait que ces 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.

### 3.3 Dossier de consultation des entreprises et analyse des offres

Le règlement de la consultation doit accorder une grande importance aux critères des moyens humains et techniques des entreprises.

La compétence des entreprises et de leur personnel, basée sur de précédentes expériences probantes de fabrication et de mise en œuvre de BFUP, *a fortiori* dans un contexte similaire de fonction recherchée d'étanchéité, ou sur des formations dédiées, est un élément très important de jugement de l'offre. L'examen des références des entreprises, des CV et qualifications des cadres proposés pour le chantier doit être réalisé avec rigueur.

**Note :** de façon réciproque, il est impératif que le maître d'œuvre « travaux » se soit approprié le projet et possède également une compétence sur le matériau BFUP reposant sur l'expérience de précédents chantiers ou sur des formations dédiées, et qu'il s'entoure d'un bureau d'études et d'un laboratoire de contrôle expérimentés sur le sujet.

Il en est de même de l'examen des mémoires techniques des entreprises, dont la teneur est à définir au CCAP.

Il est capital de s'assurer :

- que les difficultés organisationnelles, logistiques et techniques du chantier ont bien été identifiées et anticipées par les entreprises ;
- que la composition du BFUP proposé se conforme aux exigences contractuelles ;
- que les moyens proposés par les entreprises pour la fabrication et la mise en œuvre du BFUP sont adaptés aux prescriptions contractuelles et au planning prévisionnel des travaux ;
- que les cadences de production et de mise en œuvre du BFUP affichées sont réalistes ;



- que le phasage d'exécution se conforme aux exigences contractuelles ou reste pertinent en cas de proposition de modification ;
- que le système qualité des entreprises se conforme aux exigences contractuelles (exigence de traçabilité, plan de contrôles intérieurs, points d'arrêt...).

Il est recommandé de rendre le mémoire technique de l'entreprise retenue « unilatéralement contractuel » au moyen d'une clause du type ci-après inscrite dans le CCAP : « Les documents contenus dans l'offre technique du candidat (mémoire technique général et ses annexes, mémoires techniques et estimations des missions témoins)

*constituent des engagements unilatéraux de sa part vis-à-vis du représentant du pouvoir adjudicateur qui pourra par conséquent, à tout moment, exiger le strict respect des dispositions contenues dans cette offre technique. En revanche, le titulaire du marché ne peut se prévaloir de ces documents à l'appui d'une quelconque réclamation au motif notamment que les moyens mis en œuvre pour réaliser les prestations diffèrent de ceux décrits dans les documents de l'offre technique. »*

Il est également recommandé d'interdire le recours à une entreprise sous-traitante non déclarée au moment de l'offre pour les travaux relatifs au BFUP.

## 4 • EXEMPLES DE CLAUSES DE PIÈCES TECHNIQUES DE MARCHÉ

Un exemple de clauses de CCTP d'un projet avec du BFUP utilisé en tant qu'étanchéité est donné en annexe de la présente note, disponible sur [doc.cerema.fr](http://doc.cerema.fr).

L'exemple traite le cas d'un BFUP utilisé en réfection d'étanchéité d'un tablier béton existant, avec une couche de BFUP coulée en place par-dessus le béton d'origine rendu préalablement rugueux. Dans cet exemple, le BFUP n'a pas de rôle structural, il n'a qu'un rôle d'étanchéité.

Les clauses sont présentées pour chacun des chapitres « traditionnels » des CCTP d'ouvrage d'art (chapitres du logiciel Petra du Cerema). Il est néanmoins possible de reprendre ces clauses dans un CCTP présenté différemment.

Pour le projet traité, l'annexe de la présente note propose également des exemples de plans à joindre au marché, ainsi que des exemples de définitions de prix du bordereau des prix (BPU).

## 5 • CONDUITE ET EXÉCUTION DU PROJET

### 5.1 Généralités

Comme évoqué précédemment, l'exécution des travaux BFUP passe par la levée des différents points d'arrêt relatifs aux agréments de formule(s), centrale(s) de production, procédures d'exécution et bien évidemment acceptation des résultats des épreuves de convenance. De même, le visa des plans d'exécution est une étape préalable nécessaire en vue de valider certains points singuliers (plans de détails pour les reprises BFUP, traitement des avaloirs, descentes d'eau...) ou de phasage (incidence sur les plans de stockage des constituants du BFUP et d'organisation

de l'alimentation pour la production du BFUP, plan de calepinage de mise en œuvre des différentes gâchées de BFUP...).

Bien que la procédure d'exécution de fabrication et de mise en œuvre du BFUP, soumise au visa du maître d'œuvre, doive reprendre l'ensemble des dispositions validées à l'issue des épreuves de convenance de mise en œuvre sur élément témoin dans le respect de la norme d'exécution NF P18-451, certaines dispositions de la procédure devront être adaptées à la phase travaux.

Les points de contrôle essentiels permettant d'assurer la production et la mise en œuvre d'un BFUP étanche portent principalement sur les points suivants :

- homogénéité du matériau fabriqué puis mis en place ;
- respect de l'épaisseur contractuelle ;
- respect des dispositions constructives au niveau des joints de reprise (recouvrements).

De façon plus détaillée, une attention particulière est à porter sur les points ci-après, qui concernent les projets pour lesquels le BFUP est prévu coulé en place et fabriqué sur site. Pour les projets avec le recours à la préfabrication de BFUP, il convient de se reporter à l'Article 9 de la norme NF P18-451.

## 5.2 Installations / approvisionnements / effectifs

L'enjeu majeur est de garantir une mise en œuvre régulière du BFUP en place pour assurer la continuité du matériau (absence de joint froid). Il faut donc être capable d'assurer une production continue du BFUP :

- en fonction des volumes de BFUP à mettre en œuvre et des cadences de production réalistes envisagées, les installations de chantier nécessitent un stockage suffisant de matières sur site (prémix, fibres, adjuvants, eau, etc.), tout en assurant leur réapprovisionnement régulier le cas échéant. L'établissement d'un plan d'installation de chantier spécifique à l'activité BFUP indiquant les zones d'accès, de déchargement et de circulation est recommandé ;
- la protection des produits et constituants des conditions ambiantes comme le gel et/ou l'humidité (stockage sur palettes, à l'abri du soleil et des intempéries, protection plastique des big-bags de Prémix et de fibres, etc.) est essentielle ;
- les effectifs du poste d'alimentation doivent être suffisamment dimensionnés pour éviter tout retard de production (organisation en postes, effectifs de secours, etc.) ;
- le matériel de secours doit aussi être prévu et listé (pelle à pneus, chariot élévateur, etc.) ;
- la centrale de production du BFUP doit respecter les dispositions du chapitre 8 et de l'annexe B du fascicule 65 du CCTG [24] et permettre d'atteindre les objectifs de régularité de composition précisés

dans la norme NF P18-470. En particulier lorsqu'il s'agit d'une installation foraine, les délais nécessaires à un audit et aux éventuelles actions correctives doivent être anticipés ; la nécessité d'une installation de secours doit être évaluée ;

- la mise en place du BFUP et le réglage de l'épaisseur nécessitent des moyens mécanisés et humains adaptés aux cadences envisagées, à la largeur du tablier, à la nécessité de contrôler l'absence d'hétérogénéités avant et après réglage de l'épaisseur, aux nécessités éventuelles de vibration localisée au niveau des joints, à l'exigence d'une cure réalisée sans délai, au soin à apporter au nettoyage des outils, etc.

## 5.3 Préparation du support béton

Concernant la préparation du support béton, l'attention est attirée sur les points suivants :

- la méthode utilisée, validée lors des épreuves de convenance sur élément témoin, peut avoir un effet différent sur le béton de l'ouvrage (l'élément témoin aura forcément un béton beaucoup plus jeune que celui de l'ouvrage). La réception contradictoire de la surface préparée est donc primordiale à ce stade des travaux pour s'assurer de la rugosité nécessaire (cf. norme NF P18-451), et doit faire l'objet d'un point d'arrêt ;
- le support en béton doit être préalablement mouillé avec de l'eau et maintenu humide jusqu'à la pose du BFUP (humidification à refus). Il ne doit néanmoins pas y avoir de flaques d'eau ;
- la réception du support visera aussi à vérifier le respect des épaisseurs théoriques de BFUP permettant d'estimer une éventuelle surconsommation (impact sur les stocks et sur la cadence d'avancement).

## 5.4 Coffrages et points singuliers

Le contrôle portera principalement sur :

- le respect de l'épaisseur théorique de BFUP et la qualité de remplissage des parties difficiles d'accès ;
- le respect des dispositions constructives garantissant l'étanchéité au niveau des points singuliers (reprises de bétonnage, joints de secours, avaloirs, etc.).

## 5.5 Production du BFUP

Outre les dispositions minimales des normes NF P18-451 et NF P18-470 pour garantir une production conforme de BFUP, la nécessité d'un dosage élevé en fibres (classe de comportement en traction T2 ou T3) peut avoir un impact sur l'homogénéité des gâchées. Il conviendra donc de vérifier :

- le respect du protocole de dosage et de malaxage par l'examen de données de production (en temps réel par le producteur et a posteriori sur la base des enregistrements – traçabilité nécessaire – par le maître d'œuvre et son contrôle extérieur) ;
- le respect de la cadence de production ;
- le respect des protocoles en cas de panne (recours à une centrale de secours...) ;
- le contrôle de l'homogénéité des gâchées par essais sur béton frais et contrôles visuels notamment pour identifier la présence d'éventuels oursins de fibres (cf. figure 15).

Il est recommandé d'élaborer un schéma décisionnel précis relatif à l'acceptabilité des gâchées sur la base d'essais de consistance en sortie de malaxeur, avec une gamme resserrée « idéale » et une fourchette élargie où la gâchée reste acceptable mais où une correction d'adjuvantation s'impose pour revenir dans la plage « idéale » la mieux adaptée aux moyens de mise en œuvre. Un tel schéma doit permettre de s'adapter aux fluctuations quotidiennes des conditions de température et d'humidité, mais aussi aux autres sources de variabilité (lots de Prémix par exemple) [11].



Figure 15 : oursins de fibres.

## 5.6 Alimentation du chantier

Comme pour l'approvisionnement du poste de production, l'alimentation du chantier nécessite d'être vigilant sur les points suivants :

- alimentation continue pour éviter les attentes trop longues et les joints froids ;
- régularité de production (consistance conforme et adéquate en lien avec les variations de température et les adaptations autorisées du dosage en adjuvant superplastifiant, absence d'oursins) ;
- effectif et matériel de secours suffisants ;
- respect des protocoles en cas de panne (joints de secours...).

## 5.7 Mise en œuvre

Concernant la mise en œuvre du BFUP, l'attention est attirée sur les points suivants :

- pour garantir le remariage des couches et la continuité des fibres :
  - l'alimentation du BFUP en arrière du front de la gâchée précédente est primordiale,
  - une sollicitation manuelle (par piquage, au râteau, etc.), pouvant mobiliser une énergie humaine conséquente selon la consistance du BFUP, est obligatoire (y compris dans le cas d'utilisation d'une règle ou table vibrante). La photo de la figure 16 montre un exemple de mauvais remariage, dû a priori à un manque de piquage ;
- les éventuels oursins (agglomérats de fibres) doivent être détectés et évacués ;
- les protocoles en cas de panne (joints de secours...) doivent être appliqués ;
- le plan de calepinage de mise en œuvre des différentes gâchées de BFUP doit être actualisé suivant l'avancement réel des travaux.



Figure 16 : exemple d'un mauvais remariage des couches BFUP pouvant remettre en cause l'étanchéité.

## 5.8 Cure et montée en résistance du BFUP

Après le coulage du BFUP, il faut veiller :

- à l'application immédiate de la cure et à la mise en œuvre des protections (bâche ou film plastique devant être lesté) sans attente excessive ;
- au respect de la durée d'application de la cure : la norme NF P18-470 indique une durée de cure jusqu'à ce que la résistance moyenne en compression du BFUP dans la zone la plus critique atteigne au moins 30 % de la valeur  $f_{ck}$  ; il est recommandé, dans le cadre de la présente note, une cure au moins jusqu'à l'atteinte de 35 % de la valeur  $f_{ck}$  (au lieu de 30 %) en cohérence avec le fascicule 65 et la classe de cure 2 [24]. Ce critère conduit en général à une durée minimale de cure de quatre jours ;
- au respect du plan de contrôle pour d'éventuels essais de résistance mécanique à jeune âge.

## 5.9 Préparation de surface BFUP

Avant d'appliquer la couche de roulement, l'attention est attirée sur les éléments suivants :

- la réception contradictoire de l'état de surface du BFUP doit formaliser les éventuelles zones à traiter ou réparer (fissures, trous, défauts de planéité, oursins, traces de pas, empreintes de bastaings...). Le cas échéant, une fiche de non-conformité doit être établie pour proposer des solutions adaptées de réparation ;

- les protocoles de réparation, le cas échéant, doivent être détaillés et respectés après visa du maître d'œuvre ;
- l'état de surface après réparation devra faire l'objet d'une nouvelle réception contradictoire.

## 5.10 Contrôles

De façon générale, les contrôles doivent respecter le plan de contrôles validé préalablement. Les principaux points de contrôle sont les suivants :

- respect des fréquences d'essais sur BFUP frais (consistance, teneur en air occlus et masse volumique) aux postes de production ;
- contrôle visuel systématique des gâchées (présence d'oursins) au départ de la production et au poste de mise en œuvre ;
- respect des fréquences de prélèvement pour essais de résistance à la compression, à la traction par flexion et des critères de durabilité ;
- contrôle du remariage des couches pour éviter les joints froids et une mauvaise continuité des fibres ;
- respect des prélèvements pour éventuels essais de résistance mécanique à jeune âge ;
- contrôle de l'épaisseur théorique du BFUP (au moyen d'une pige par exemple, comme illustré sur les photos de la figure 17).



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



## 5.11 Essais

De nombreux essais sur le BFUP sont exigés par la norme NF P18-470. L'utilisation d'un BFUP fortement dosé en fibres métalliques pour une application étanchéité nécessite cependant quelques adaptations qu'il conviendra de valider avec l'ensemble des intervenants (maître d'œuvre, entreprise, contrôles interne, externe et extérieur) à l'issue des épreuves de convenance. Il est possible de citer principalement :

- l'utilisation d'un aéromètre à mortier pour mesurer la teneur en air entraîné (selon la norme NF EN 413-2) car l'utilisation d'un bol de 8 litres, courant pour les bétons, ne permet pas d'obtenir une répétabilité suffisante sur un BFUP fortement fibré ;
- la nécessité d'appliquer une sollicitation mécanique (vibration à la table par exemple) lors du remplissage des moules prismatiques pour favoriser l'écoulement « à partir de l'extrémité du moule » (pour les BFUP de consistance Ct « BFUP à seuil » principalement) ;
- pour les mêmes raisons, le remplissage des moules pour essais de flexion sur plaques minces doit se rapprocher du mode de mise en œuvre prévu pour la structure. L'utilisation de moyens adaptés à la consistance de type « plan incliné » sur lequel serait déversé le BFUP frais avant de se déverser dans le moule est fortement conseillée (voir photo de la figure 18).

Enfin, il est recommandé de retranscrire la plupart des points de la présente partie 5 dans le CCTP du projet (voir exemple donné en annexe).



Figure 18 : exemple d'une façon correcte de déverser le BFUP dans les moules pour les essais de plaques minces.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] NF P18-470 Bétons - Bétons fibrés à Ultra Hautes performances – Spécification, performance, production et conformité, Afnor, La-Plaine-Saint-Denis, 2016.
- [2] NF P18-710 Complément national à l'Eurocode 2 – Calcul des structures en béton : règles spécifiques pour les Bétons Fibrés à Ultra Hautes performances (BFUP), Afnor, La-Plaine-Saint-Denis, 2016.
- [3] NF P18-451 Bétons – Exécution des structures en béton – Règles spécifiques pour les BFUP, Afnor, La-Plaine-Saint-Denis, 2018.
- [4] TOUTLEMONDE F., BOUTEILLER V., PLATRET G., CARCASSES M., LION M. (2010), *Field demonstration of UHPFRC Durability. Girders shown to perform well in a cooling tower*, Concrete International, November, pp. 39-45.
- [5] *Recommandations Bétons fibrés à ultra hautes performances* de l'AFGC de 2013.
- [6] PAILLE L., SIMON A., DAVID D., MARCEL R., N'GYEN J.-L. (2024), *UHPFRC used for the heavy restructuring of the 40 piers of the Spélugues complex in Monaco*, UHPFRC 2024, Menton (France), oct. 21-23.
- [7] DENARIE E., SOFIA L., RUDAZ J. (2024), *Cast on-site UHPFRC for the rehabilitation of existing structures - Feedback over 20 years of exposure to chlorides*, UHPFRC 2024, Menton (France).
- [8] BRÜHWILER E., BASTIEN-MASSE M., MÜHLBERG H., HOURIET B., FLEURY B., CUENNET S., SCHÄR P., BOUDRY F., MAURER M. (2015), *Strengthening the Chillon viaducts deck slabs with reinforced UHPFRC*, IABSE Symposium Report, 105 (24) 1-8.
- [9] HARDEGGER D., BOIRON L. (2024), *Major European UHPC overlay projects*, UHPFRC 2024, Menton (France), oct. 21-23.
- [10] TOUTLEMONDE F., AUBAGNAC C., CLEMENT B., TERRADE B., PITTET R., (2023), *UHPC Bridge Deck Overlays: Feedback of Two Realizations on French Motorways*, Third International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete, Wilmington (DE), USA, June 4-7, iastatedigitalpress, paper # 94, pp.1-8.
- [11] TOUTLEMONDE F., PITTET R., SIMIAN B., MARCHAND P., AUBAGNAC C. (2024), *Feedback on the implementation of UHPFRC as overlay on two French highway bridges: recommendations for a correct UHPFRC execution*, UHPFRC 2024, Menton (France), oct. 21-23.
- [12] PONS T., TERRADE B., GUEGUEN-MINERBE M., OMIKRINE-METALSSI O., NAUDAN M., TOUTLEMONDE F. (2024), *18-years field durability experience of a non-protected UHPFRC bridge segment*, UHPFRC 2024, Menton (France), oct. 21-23.
- [13] BOIRON L., HARDEGGER D., MOREILLON L. (2024), *Major UHPC project – The Riddes Viaduct*, UHPFRC 2024, Menton (France), oct. 21-23.
- [14] Norme SIA 2052, *Béton fibré ultra-performant (BFUP) – Matériaux, dimensionnement et exécution*, SIA Zurich, 2016.
- [15] CHARRON J.-P., DENARIE E., BRÜHWILER E. (2007), *Permeability of ultra-high-performance fiber-reinforced concretes (UHPFRC) under high stresses*, Materials and Structures, 40, 269-277.
- [16] GENEUX G., NAUDAN M., PITTET R., CROZE A., SIMIAN B. (2024), *Study of UHPFRC waterproofing performance on two French bridges*, UHPFRC 2024, Menton (France), oct. 21-23.
- [17] Documentation CFUP pour la maintenance et la construction d'ouvrages d'art de l'infrastructure routière, Édition 2023 V1.01 ASTRA 82022.
- [18] MC DONAGH M., BOUKARAM S., SCINDIA S., TEWELDE A., FODEN A. (2024), *Completion of first UHPC rehabilitation of entire suspension bridge deck*, UHPFRC 2024, Menton (France), oct. 21-23.
- [19] Document technique *Experiences from Early Implementations of UHPC Overlays*, FHWA, décembre 2024.
- [20] Cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés publics de travaux de génie civil. Fascicule n° 67 – Titre I – Étanchéité des ponts routes et des passerelles, support en béton et support métallique, Version 1.0, décembre 2017.
- [21] DIENG L., MARCHAND P., GOMES F., TESSIER C., TOUTLEMONDE F. (2013), *Use of UHPFRC overlay to reduce stresses in orthotropic steel decks*, Journal of Constructional Steel Research, 89 (2013), pp. 30-41.

[22] Bulletin Ouvrages d'Art du Cerema n° 69 –  
Le projet ANR « Orthoplus », 2014.

[23] SEIBERT P. S., BRINDLEY G. S. (2024), *Delaware Memorial Bridge – The largest UHPC overlay deck rehabilitation project in the United States*, UHPFRC 2024, Menton (France), oct. 21-23.

[24] Cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés publics de travaux de génie civil. Fascicule n° 65 – Exécution des ouvrages de génie civil en béton, version 1.0, décembre 2017

[25] KRETZ T. et al. (1995), *Ponts mixtes – Recommandations pour maîtriser la fissuration des dalles*, Sétra.

## GLOSSAIRE

- **Bétons Fibrés à Ultra-Hautes Performances (BFUP) :** béton caractérisé par une résistance à la compression élevée, supérieure à 130 MPa, au-delà du domaine d'application de la norme NF EN 206/CN, par une résistance en traction postfissuration importante permettant d'obtenir un comportement ductile en traction et dont la non-fragilité permet de calculer et de réaliser des structures et éléments de structure sans utiliser d'armatures de béton armé. Pour la réalisation de certaines structures, le BFUP peut néanmoins contenir des armatures de béton armé (on parle alors de BFUP armé) ou des armatures de précontrainte (BFUP précontraint). (Source : norme NF P18-470)
- **BFUP couverts par la norme NF P18-710 :** ce sont les BFUP-S décrits dans la norme NF P18-470.
- **Carte d'identité d'un BFUP :** document associé à une composition nominale de BFUP, à son principe de fabrication et aux traitements pouvant suivre sa mise en œuvre, indiquant l'ensemble des caractéristiques du matériau sur lesquelles s'engage le producteur, en termes de performances atteintes par le BFUP lorsque les dispositions données dans la carte d'identité sont rigoureusement appliquées.  
**Note 1** - Disponible avant l'épreuve de convenance du projet, la carte d'identité, si elle existe, se substitue en tout ou partie aux résultats d'épreuves d'étude. Elle permet de présumer favorablement de l'atteinte par le matériau des exigences spécifiées au projet et de gagner du temps sur les études détaillées.  
**Note 2** - Les BFUP obtenus à partir d'un prémix disposent d'une carte d'identité. (Source : norme NF P18-470)
- **Étanchéité de tabliers de pont :** l'étanchéité d'un tablier de pont est assurée par l'ensemble des dispositifs et matériaux mis en œuvre sur la surface supérieure du tablier pour empêcher la pénétration de l'eau et des agents agressifs (sels de déverglaçage, hydrocarbures, etc.) dans la structure du tablier.
- **Éléments minces / éléments épais :** un élément mince en BFUP est un élément dont l'épaisseur est telle que  $e \leq 3 L_f$  où  $L_f$  est la longueur des plus longues fibres contribuant à assurer la non-fragilité. Les autres éléments sont considérés comme des éléments épais. (Source : norme NF P18-710)
- **Prémix (prémélange de constituants) :** mélange homogène de constituants, de composition déterminée et constante, réalisé en usine, destiné à la production de BFUP, et mis sur le marché accompagné d'une carte d'identité. (Source : norme NF P18-470)
- **Protection :** la protection est une opération qui consiste :
  - à traiter la surface du béton ou de façon localisée les fissures du béton pour éviter ou limiter la pénétration de l'eau et des agents agressifs dans le but d'augmenter la durabilité du béton et des structures en béton armé ou précontraint ;
  - à traiter la surface du béton pour augmenter sa résistance à des actions mécaniques (chocs, abrasion...) ou agressions chimiques.La protection peut être assurée par l'application d'un revêtement.

## AGIR POUR DES TERRITOIRES ADAPTÉS AU DÉFI CLIMATIQUE

Le Cerema, établissement public à la fois national et local, accompagne l'État, les collectivités et les entreprises pour adapter les territoires au défi climatique, dans 6 domaines d'activité : aménagement et stratégies territoriales, bâtiment, mobilités, infrastructures de transport, environnement et risques, mer et littoral. Il relève des ministères chargés de l'Aménagement du territoire et de la Transition écologique.

Téléchargez nos publications sur [doc.cerema.fr](https://doc.cerema.fr)

# OBTENIR LA FONCTION D'ÉTANCHÉITÉ SUR OUVRAGES D'ART PAR L'UTILISATION DU BFUP



APRR

## CONTRIBUTEURS

L'élaboration de cette note a été pilotée par Grégory Généreux (Cerema). Elle a été rédigée avec des contributions du Cerema, de l'Université Gustave Eiffel et de la Direction générale des infrastructures, des transports et des mobilités (DGITM)/Direction des mobilités routières (DMR) au sein du ministère de la Transition écologique.

Christophe Aubagnac, Benoît Clément, Grégory Généreux, Philippe Jandin, Pierre Marchand, Laurent Sauger (Cerema), Didier Germain (DGITM - FCA), François Toutlemonde (université Gustave Eiffel)

La plupart des schémas de cette note ont été réalisés par Jean-Philippe Bisogno (Cerema).

## RELECTEURS

Pierre Corfdir (Cerema), Pierre Peyrac (DGITM-TEDET) et Romain Pittet (APRR)

## CONTACTS

<https://www.cerema.fr/fr/contact>



AMÉNAGEMENT & STRATÉGIES TERRITORIALES | BÂTIMENT  
| MOBILITÉS | **INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT** |  
ENVIRONNEMENT & RISQUES | MER & LITTORAL