

# Comportement à la fatigue des dalles de roulement en béton armé renforcées avec du béton fibré ultra-performant

Eugen Brühwiler, Tohru Makita, Maléna Bastien-Masse et Emmanuel Denarié, Lausanne

## 1 Introduction

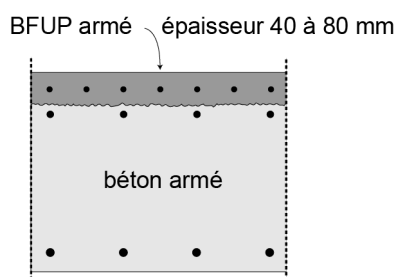
### 1.1 Motivation

Avec l'augmentation des charges d'essieu et du nombre de véhicules, les routes et plus particulièrement les dalles de ponts sont plus sollicitées. Cette augmentation des contraintes dans les structures pourrait entraîner un endommagement par fatigue. La sécurité à la fatigue des structures existantes ne peut pas toujours être facilement vérifiée, surtout dans le cas des dalles de roulement relativement minces et avec des barres d'armature soudées. Une résistance à la fatigue insuffisante peut rendre un renforcement de la dalle de roulement nécessaire.

Pour le renforcement d'une structure de béton armé par les méthodes classiques, il faut généralement ajouter une couche de béton d'environ 10 cm d'épaisseur. Cela augmente nettement le poids propre de la structure, ce qui conduit souvent à des mesures de renforcement: (1) de la dalle de roulement dans la direction longitudinale du pont, et (2) des fondations.

Ces opérations complexes peuvent être évitées en utilisant un matériau de construction plus performant tel que le béton fibré ultra-performant (BFUP) armé qui pourra être appliqué en couche mince sur la dalle de roulement et donc la renforcer sans augmenter les charges permanentes. Cela conduit à un élément composé BFUP armé – béton armé, tel qu'illustré à la figure 1, qui tire pleinement parti des propriétés mécaniques exceptionnelles du BFUP (résistance et déformabilité) et de son excellente synergie mécanique avec les barres d'armature passives.

Figure 1 Renforcement d'une dalle de roulement de pont en béton armé avec une couche de BFUP armé



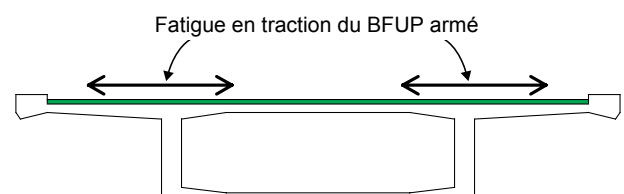
Dans le cadre du projet AGB 2005/004 *Utilisation des bétons fibrés hautes performances pour accroître l'efficacité de l'entretien des ouvrages d'art en béton armé* [1], les applications possibles du BFUP pour le renforcement des structures ont été identifiées. Les publications [2, 3, 4] donnent également un aperçu de l'utilisation des BFUP pour améliorer les structures existantes en béton.

### 1.2 Idée et objectifs

L'idée de base est d'augmenter la résistance à la fatigue d'une dalle de béton armé en augmentant sa capacité portante. Il s'agit d'enlever le béton de surface par hydrodémolition et ensuite d'ajouter une couche de BFUP armé de 40 à 80 mm d'épaisseur sur le tablier de pont avec ou sans armatures. Une section composée monolithique est ainsi créée.

Cette méthode de renforcement est particulièrement efficace dans les zones où la couche de BFUP armé est sollicitée en traction (figure 2). L'accent est mis sur le comportement à la fatigue du BFUP armé en traction. La contrainte de fatigue en compression dans le BFUP armé des sections composées est si faible qu'aucun endommagement significatif dû à la fatigue ne peut se produire dans le BFUP.

Figure 2 Représentation schématique d'une dalle renforcée avec une couche de BFUP armé



En outre, comme le BFUP est un matériau très compact, la couche de BFUP sert aussi d'étanchéité en empêchant l'eau et les chlorures de pénétrer dans le béton du tablier. La couche de BFUP combine donc les fonctions de protection et de renforcement du tablier. Ainsi, par rapport aux méthodes conventionnelles, la durée des chantiers est considérablement réduite, puisqu'aucune

membrane d'étanchéité ne doit être collée par la suite. Ceci permet donc de réduire l'impact et les coûts pour les utilisateurs.

Le renforcement au moyen de BFUP armé permet également une intervention relativement douce pour la structure existante, car les charges permanentes ne sont que peu ou pas du tout augmentées. Malgré le coût relativement élevé du BFUP, les coûts directs de construction sont du même ordre de grandeur que pour les méthodes conventionnelles. À long terme, et selon les connaissances d'aujourd'hui, le renforcement au moyen de BFUP devrait s'avérer rentable car plus durable et entraînant de faibles coûts pour les interventions de maintenance.

Ce document décrit les principales conclusions sur le comportement à la fatigue du BFUP, du BFUP armé et des structures composées BFUP – béton, qui ont été obtenues par des essais de fatigue. Ensuite, une méthode pour calculer la sécurité à la fatigue des sections composées BFUP armé – béton armé est proposée.

## 2 Essais de fatigue

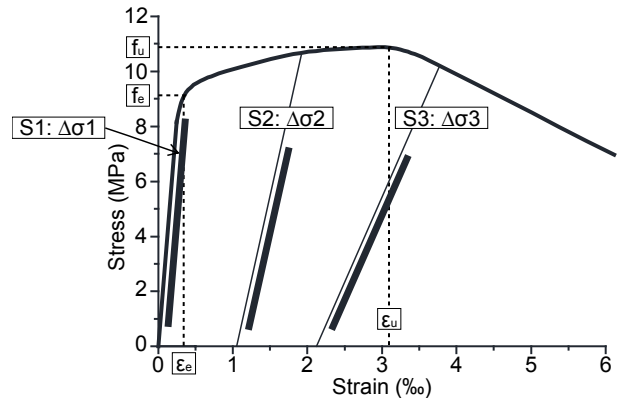
### 2.1 Fatigue du BFUP

Dans une première campagne expérimentale, le comportement à la fatigue du BFUP a été étudié [5]. Trois séries d'essais de fatigue en traction uniaxiale ont été effectués avec une amplitude de force constante pour un maximum de 10 millions de cycles.

Le comportement en traction uniaxiale du BFUP (figure 3) se divise en trois phases. D'abord le matériau est élastique jusqu'à sa limite élastique  $f_e$ . Ensuite, le BFUP montre un comportement écrouissant caractérisé par de grandes déformations allant jusqu'à  $\epsilon_u = 1$  à 3 ‰ et qui se termine quand la résistance à la traction  $f_u = 9$  à 15 MPa est atteinte. Suit la phase adoucissante, pendant laquelle les déformations se localisent au niveau d'une macro-fissure qui atteint une ouverture maximale égale à environ la moitié d'une longueur de fibre au moment où quasiment plus aucun effort n'est transmis par le matériau.

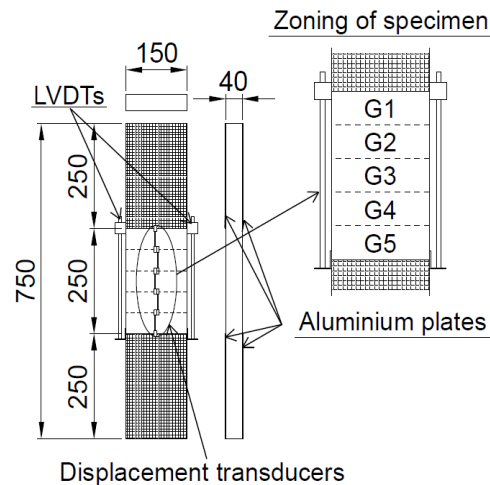
Les essais de fatigue réalisés couvrent les trois phases du comportement en traction du BFUP, comme le montre la figure 3. Pour les séries S2 et S3, l'essai est dans une première étape contrôlé en déplacement jusqu'à la phase écrouissante (S2) ou adoucissante (S3). L'éprouvette est ensuite déchargée et l'essai est repris et contrôlé en force afin d'appliquer les cycles de fatigue.

Figure 3 Représentation schématique du comportement en traction des BFUP avec trois domaines: élastique, écrouissant et adoucissant et la gamme des séries d'essais S1 à S3



Pendant l'essai, la déformation globale de la zone centrale de l'éprouvette est mesurée sur une base de 250 mm. Les déformations locales sont aussi enregistrées par les capteurs de déformation G1 à G5 (figure 4).

Figure 4 Géométrie de l'éprouvette et disposition des capteurs de déformation



À partir des résultats expérimentaux, on constate que la résistance à la fatigue des BFUP peut être décrite sur la base de la valeur caractéristique S définie comme le rapport de la contrainte de traction maximale en fatigue sur la résistance élastique en traction.

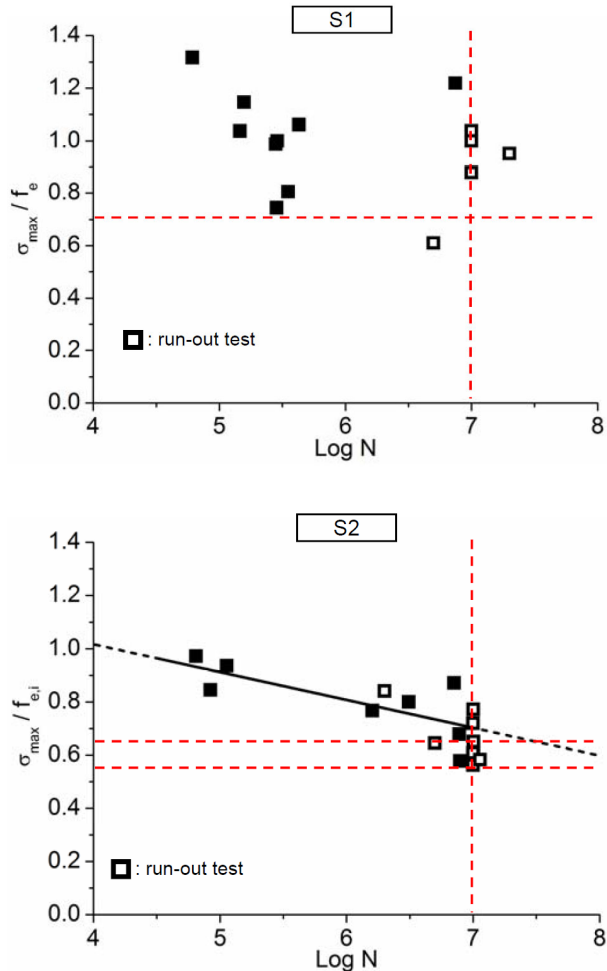
Les résultats expérimentaux présentés dans le diagramme S-N (figure 5) montrent que, pour les trois phases du comportement en traction des BFUP, la résistance à la fatigue pour 10 millions de cycles de contraintes vaut:

- pour la phase élastique (série S1),  $S = 0,7$ ,
- pour la phase écrouissante (série S2),  $S = 0,6$ .

Si ces limites de fatigue sont dépassées, un endommagement important est observé en raison de la croissance

des fissures de fatigue dans tout le volume du matériau d'abord, puis au niveau d'une macro-fissure discrète. Cet endommagement par fatigue entraîne une durée de vie relativement courte de l'éprouvette.

Figure 5 Courbes S-N pour les séries d'essai S1 et S2



Les mesures de déformation le long de l'éprouvette ont montré des valeurs parfois très différentes localement, ce qui peut s'expliquer par des variations locales des propriétés du matériau, telles que la résistance élastique et le comportement écrouissant. Cette capacité du BFUP à redistribuer les contraintes et les déformations peut avoir un effet bénéfique sur le comportement à la fatigue.

Les surfaces de rupture dues à la fatigue dans le BFUP ont montré des similarités avec les surfaces de rupture de fatigue de l'acier. Une partie de la surface est relativement lisse indiquant la zone de croissance de la fissure de fatigue dans le BFUP tandis qu'une autre partie de la surface est plutôt inégale là où la rupture finale se produit. Une étude détaillée des surfaces de rupture a mis en évidence les signes d'un mécanisme d'endommagement par frottement et abrasion de la surface des fibres d'acier. Des particules de rouille générées par des phénomènes de corrosion par frottement ont également été mises en évidence (tribo-corrosion).

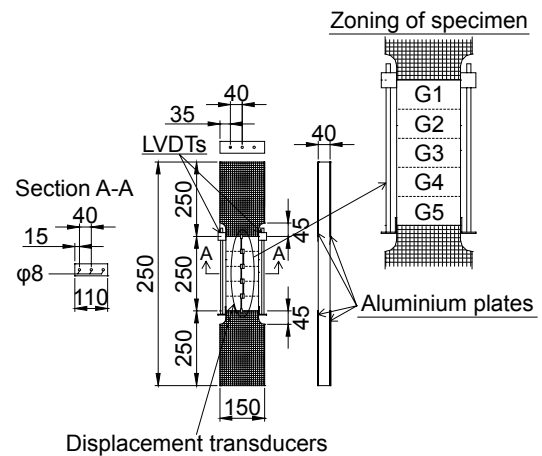
## 2.2 Fatigue du BFUP armé

Dans une seconde série d'essais, le comportement à la fatigue du BFUP armé a été étudié [6]. Les plaques de BFUP armé testées avaient une section de 110 mm x 40 mm contenant trois barres d'armatures de type B500 (figure 6). Les éprouvettes ont été testées en traction uniaxiale avec une amplitude de force constante jusqu'à un maximum de 10 millions de cycles. Les objectifs de ces essais étaient:

- (1) d'explorer la résistance à la fatigue du BFUP armé,
- (2) de rassembler des données sur le phénomène de redistribution des contraintes dans la section composée.

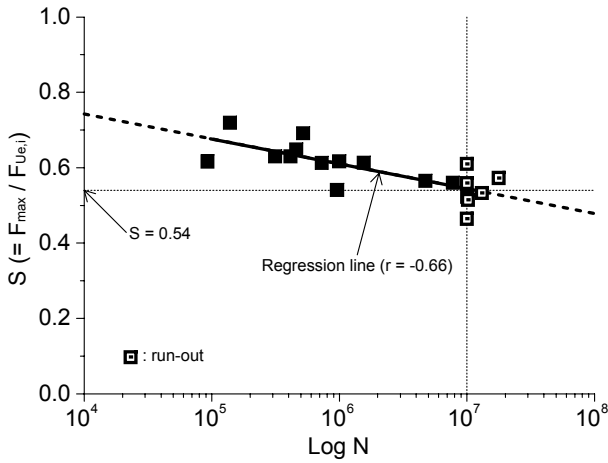
Des essais de traction quasi-statiques ont préalablement démontré que le comportement mécanique en traction du BFUP est amélioré par les barres d'armature qui réduisent la variabilité de ses propriétés due à la distribution et à l'orientation des fibres.

Figure 6 Dimensions de l'éprouvette de BFUP armé et agencement des capteurs



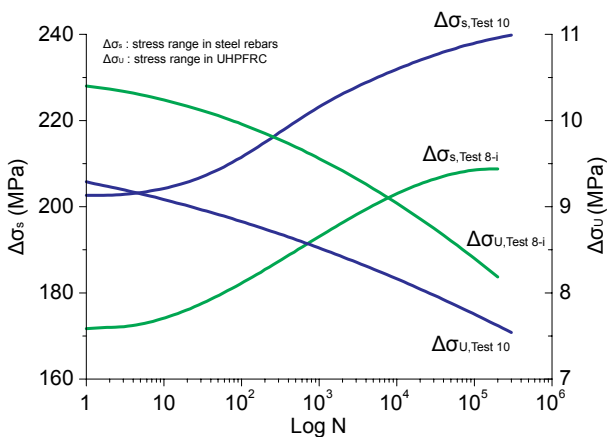
Les résultats expérimentaux ont montré une limite de fatigue de  $S = 0,54$ , où  $S$  est défini comme le rapport entre la contrainte maximale appliquée lors des cycles de fatigue et la résistance maximale à la traction de l'éprouvette, mesurée lors de l'essai quasi-statique (figure 7). Les mesures de déformation sur l'axe longitudinal des éprouvettes ont révélé une transmission des efforts aux barres d'armatures.

Figure 7 Résultats (diagramme S-N) des essais de fatigue en traction sur les éprouvettes en BFUP armé



Avec une valeur de  $S = 0,54$ , on peut conclure comme prévu que les barres d'armature, améliorent le comportement à la fatigue des BFUP. La répartition des contraintes dans la section transversale entre le BFUP et les barres d'armature est fonction de la contrainte de fatigue maximale. Le transfert des contraintes entre le BFUP et les barres d'armature permet d'améliorer la résistance à la fatigue des deux composants du BFUP armé.

Figure 8 Redistribution des contraintes de traction entre le BFUP et les barres d'armature lors de l'essai de fatigue, illustrée par les résultats de deux essais, avec respectivement 310'000 et 520'000 cycles de fatigue  
NB: Les valeurs des contraintes en traction ont été calculées sur la base des valeurs de déformation mesurées



Le comportement déformationnel d'une éprouvette en BFUP armé évolue au cours d'un essai de fatigue. Dans la première phase, le comportement à la fatigue est principalement déterminé par le BFUP qui reprend une part considérable des contraintes de traction en raison de sa rigidité. Avec l'endommagement à la fatigue, la rigidité de la composante BFUP de la section diminue, et

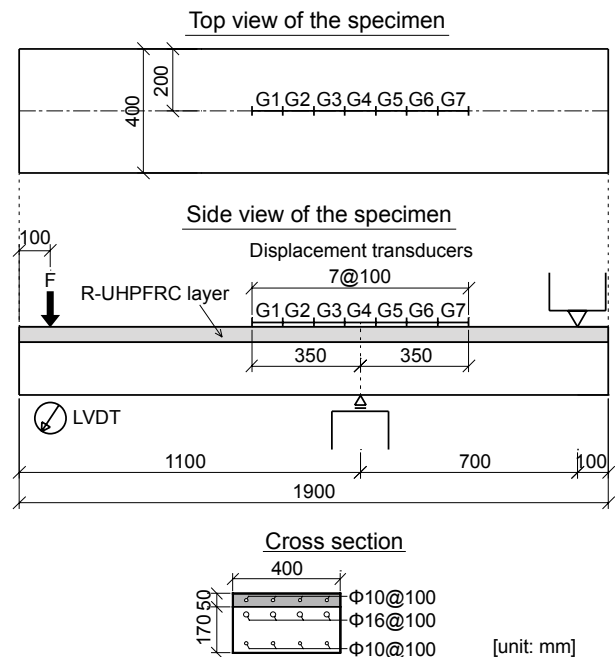
il y a un transfert des contraintes vers les barres d'armature. Enfin, dans les phases finales de l'essai de fatigue, les contraintes sont essentiellement reprises par les barres d'armature (figure 8). La rupture par fatigue de l'échantillon est toujours due à la rupture par fatigue des barres d'armature en acier.

Les surfaces de rupture par fatigue des éprouvettes de BFUP armé ont montré un faciès de rupture par fatigue typique des barres d'armature avec la surface lisse de la fissure de fatigue et la surface irrégulière de la rupture résiduelle avec faibles déformations. Ce sont donc les mêmes caractéristiques qui ont déjà été observées lors des essais sur les éprouvettes de BFUP. L'ordre chronologique des ruptures de fatigue des trois barres d'armatures a pu être clairement établi en observant les surfaces de rupture respectives.

### 2.3 Fatigue d'un élément composé BFUP – béton

Pour la troisième série d'essais, le comportement à la fatigue de bandes de dalles composées BFUP – béton a été étudié [7]. Les échantillons étaient composés d'une section en béton armé d'une épaisseur de 170 mm, sur laquelle est appliquée une couche de 50 mm d'épaisseur de BFUP armé. La surface du béton a été préalablement préparée par hydrodémolition (figure 9). L'essai représente une dalle en porte-à-faux soumise à des efforts de flexion. La couche de BFUP armé est sollicitée en traction.

Figure 9 Dimensions des corps d'essai, configuration de l'essai et disposition des capteurs de déformation

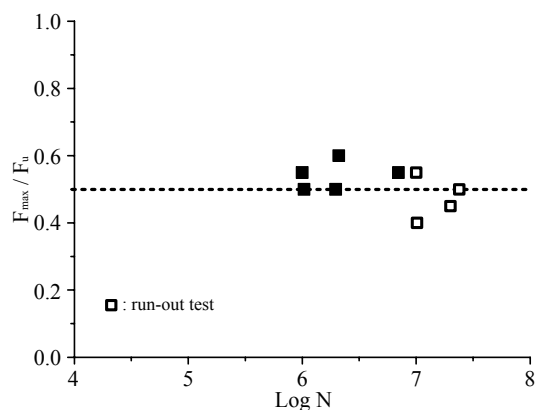


La résistance à la fatigue des éléments composés BFUP armé – béton armé est de nouveau présentée dans un diagramme S-N (figure 10), donnant la limite de fatigue pour 10 millions de cycles, à un niveau de contraintes d'environ 50% de la résistance de l'éprouvette, mesurée lors d'un essai quasi-statique.

Les essais de fatigue pour lesquels le corps d'essai a subi 10 millions de cycles de contraintes sans aucun endommagement apparent, ont été désignés comme «run-out». L'essai a ensuite été poursuivi à un niveau de contrainte plus élevé en supposant que les 10 millions de cycles appliqués précédemment n'avaient pas entraîné de dommages dus à la fatigue.

Pour les corps d'essai avec des endommagements dus à la fatigue, une augmentation des déformations dans la couche de BFUP armé avec une diminution correspondante de la rigidité ont été mesurées. Ceci pourrait être attribué au niveau de contrainte relativement élevé dans le BFUP dans sa phase écrouissante.

Figure 10 Résistance à la fatigue des corps d'essai composés BFUP armé – béton armé



La surface de rupture à la fatigue est de nouveau caractérisée par la rupture par fatigue des barres d'armature dans la couche de BFUP armé, tel que ce qui a été observé pour les essais de fatigue en traction sur les éprouvettes de BFUP armé. Encore une fois, le niveau de contrainte en traction dans l'armature est un bon paramètre pour décrire la résistance à la fatigue des éléments composés BFUP – béton.

## 2.4 Synthèse des résultats d'essai

Le comportement à la fatigue de BFUP, de BFUP armé et d'éléments composés BFUP armé – béton armé a été étudié au moyen de trois séries d'essais. Dans tous les cas, une variation constante de contraintes en traction a été appliquée jusqu'à un maximum de 10 millions de cycles:

- Pour les trois types d'essais, il y avait des indications claires d'une limite de fatigue à 10 millions de cycles de contraintes. La limite de fatigue était autour de  $S = 0,45$  à  $0,55$ , où  $S$  est défini comme le rapport entre la force maximale lors des cycles de fatigue et la résistance ultime de l'éprouvette, mesurée lors d'un essai quasi-statique. À une contrainte maximale inférieure à la limite de fatigue aucun endommagement lié à la fatigue n'a été observé.
- L'un des avantages du BFUP lorsqu'il est soumis à la fatigue est sa capacité à redistribuer les contraintes et déformations en volume, sans localisation. Le comportement à la fatigue du BFUP armé est caractérisé par la redistribution des contraintes du BFUP à l'acier d'armature et une rupture en fatigue qui se produit d'abord dans les barres d'armature.
- Les surfaces de rupture du BFUP et des barres d'armature ont montré des surfaces lisses, indiquant une croissance des fissures de fatigue, et une surface rugueuse, qui indique la rupture soudaine de la section restante avec plutôt de faibles déformations.

Pour la mise en pratique de ces résultats pour le dimensionnement de renforcements en BFUP armé, on en déduit de quantifier la résistance à la fatigue par la limite de fatigue et de vérifier la sécurité à la fatigue selon le critère de la limite de fatigue.

## 3 Vérification de la sécurité à la fatigue d'une section composée BFUP armé – béton

### 3.1 Introduction

Les règles de conception pour le renforcement à la fatigue des éléments en béton armé avec du BFUP armé soumis à des efforts de traction sont développés sur la base d'un critère de limite de fatigue. Pour l'analyse du comportement à la fatigue, le BFUP et l'acier d'armature sont en traction et le béton en compression. La résistance à la traction du béton est négligée. L'analyse vise à limiter la sollicitation des matériaux à un niveau de contraintes inférieur à la limite de fatigue.

### 3.2 Méthode

La vérification à la fatigue d'un élément composé BFUP armé – béton armé principalement soumis à la flexion comporte quatre étapes:

#### Étape 1: Détermination de l'effet des actions dû à la fatigue

L'effet des actions dû à la fatigue est déterminé en conformité avec les normes SIA 269 et SIA 269/1 pour

les structures existantes, avec l'action de fatigue selon SIA 269/1. Il peut toutefois être utile et économique de renforcer l'élément afin de permettre un niveau de charge de fatigue plus élevé. Dans ce cas, il est possible d'utiliser le modèle de charge pour la fatigue défini dans la nouvelle norme SIA 261.

Les valeurs suivantes doivent être déterminées:

- $M_{df,max} \{G_k; Q_{fat}\}$ : Valeur de dimensionnement du moment de flexion maximal dû à la fatigue (à savoir, dû à la valeur caractéristique de l'action de fatigue et à la valeur caractéristique des actions permanentes).
- $M_{df,min} \{G_k; Q_{fat}\}$ : Valeur de dimensionnement du moment de flexion minimal dû à la fatigue.
- $\Delta M_{df} = M_{df,max} - M_{df,min}$ : Valeur de dimensionnement de la variation du moment de flexion dû à la fatigue.

### Étape 2: Détermination de la résistance ultime à la flexion et à la fatigue

En premier lieu, la valeur caractéristique de la résistance à la flexion  $M_{Rk}$  est déterminée à l'aide des propriétés des matériaux, actualisées dans le cas de la section existante en béton armé. Le calcul se fait par une analyse sectionnelle, tel qu'illustré à la figure 11.

Puis la limite de fatigue  $M_{Rf,D}$  est déterminée comme suit:

$$M_{Rf,D} = 0,5 M_{Rk}$$

### Étape 3: Vérification de la résistance à la fatigue de l'élément

La vérification de la résistance à la fatigue d'un élément composé principalement soumis à des efforts de flexion se fait comme suit:

$$M_{df,max} \leq M_{RfD,d}$$

Ici, la valeur de dimensionnement de la résistance à la fatigue de l'élément composé BFUP armé – béton armé est:

$$M_{RfD,d} = \frac{M_{Rf,D}}{\gamma_{Mf}}$$

Le coefficient de résistance vaut:  $\gamma_{Mf} = 1,10$

### Étape 4: Vérification de la fatigue au niveau matériau

La seule vérification à la fatigue au niveau de l'élément composé ne suffit pas, et il est nécessaire de vérifier la contrainte de traction dans le BFUP et dans les barres d'armatures ainsi que la contrainte de compression dans le béton.

#### Pour le BFUP soumis à des contraintes de traction:

$$\sigma_{Ud,max} (M_{df,max}) \leq \Delta \sigma_{Ud,D}$$

avec:

$\sigma_{Ud,max} (M_{df,max})$ : contrainte de traction maximale dans le BFUP due au moment de flexion maximal de fatigue  $M_{df,max}$

$\Delta \sigma_{Ud,D} = 0,30 (f_e + f_U)$ : résistance à la fatigue du BFUP en traction soumis à des contraintes de traction

#### Pour l'acier d'armature:

$$\Delta \sigma_{sd} = (\Delta M_{df}) \leq \Delta \sigma_{sd,D}$$

avec:

$\Delta \sigma_{sd}$ : variation des contraintes de traction dues à la sollicitation de fatigue, calculée pour la variation de moment  $\Delta M_{df}$

$\Delta \sigma_{sd,D}$ : résistance à la fatigue (limite de fatigue) de l'acier d'armature; selon la norme SIA 262, pour les barres avec un diamètre inférieur à 20 mm,

$$\Delta \sigma_{sd,D} = 116 \text{ N/mm}^2$$

#### Pour le béton en compression:

$$\sigma_{cd,max} (M_{df,max}) \leq \Delta \sigma_{cd,D}$$

avec:

$\sigma_{cd,max} (M_{df,max})$ : contrainte de compression maximale dans le béton due au moment de flexion maximal de fatigue  $M_{df,max}$

$\Delta \sigma_{cd,D}$ : résistance à la fatigue du béton en compression; en approximation des prescriptions dans la norme SIA 262, on peut admettre:  $\Delta \sigma_{cd,D} = 0,5 f_{cd}$

Les contraintes dans la section dues à la fatigue sont déterminées avec une analyse sectionnelle tel qu'illustré à la figure 12.

Les autocontraintes de traction dans le BFUP (dues aux déformations entravées lors du coulage du BFUP sur le support) peuvent être négligées car le module d'élasticité apparent du BFUP écrouissant vaut environ un tiers de sa valeur initiale.

Figure 11 Résistance à la flexion à l'état limite ultime d'une section composée BFUP armé – béton armé

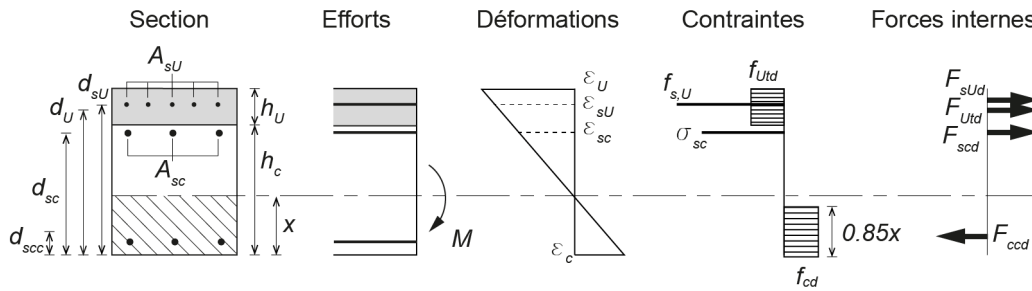
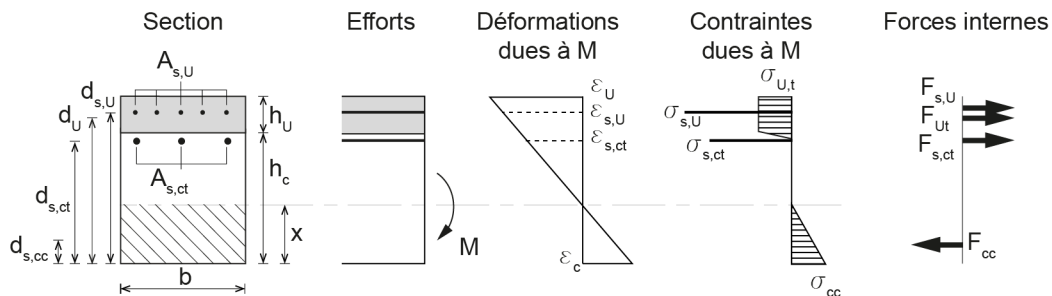


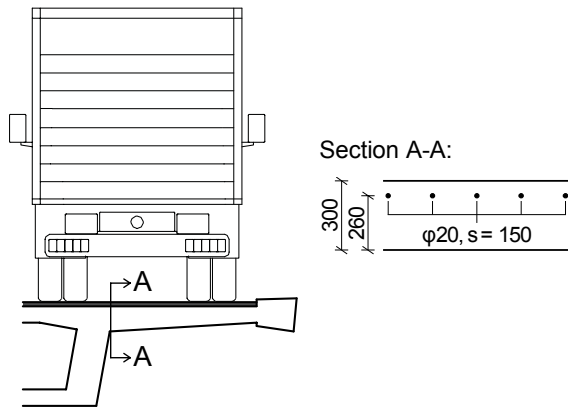
Figure 12 Détermination des contraintes sous sollicitation de fatigue dans la section composée



### 3.3 Exemple d'application

L'exemple concerne la dalle de roulement en porte-à-faux d'un pont (figure 13).

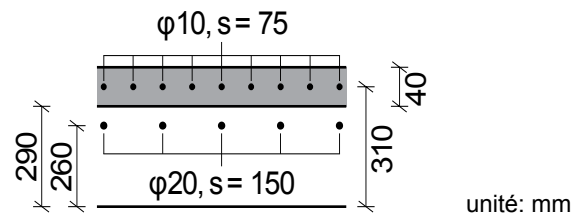
Figure 13 Dalle de pont à renforcer



La sollicitation calculée à la fatigue donne dans la section A-A un moment de flexion maximal et minimal respectivement de  $M_{df,max} = 150$  kNm/m et  $M_{df,min} = 20$  kNm/m. Il en résulte une différence de contraintes dans l'armature du béton armé de  $\Delta\sigma_{sd}(\Delta M_{df}) = 263$  MPa ce qui est une valeur nettement plus élevée que la valeur d'examen de la résistance à la fatigue de  $\Delta\sigma_{sd,D} = 115$  MPa (limite de fatigue) pour des barres d'armature droites.

Ce résultat justifie la nécessité de renforcer la dalle par l'ajout d'une couche de BFUP armé selon la figure 14.

Figure 14 Section A-A renforcée



La résistance ultime à la flexion de cette section renforcée, déterminée selon le modèle de la figure 11, vaut:  $M_R = 394$  kNm/m.

La vérification de la sécurité structurale au niveau de l'élément de structure est satisfaite puisque:

$$M_{df,max} = 150 \text{ kNm/m} < M_{RfD,d} = 179 \text{ kNm/m}$$

$$\text{avec: } M_{RfD,d} = \frac{0,5 \cdot M_{Rk}}{\gamma_{Mf}} = \frac{0,5 \cdot 394}{1,1} = 179 \text{ kNm/m}$$

L'endommagement à la fatigue dans la couche de BFUP armé est caractérisé par un transfert de contraintes du BFUP vers les barres d'armature. La ruine à la fatigue de la couche en BFUP armé est provoquée par la rupture à la fatigue des barres d'armature.

La vérification au niveau des matériaux est donc effectuée pour l'armature. La différence maximale des contraintes élastiques dues à la différence de moment de fatigue est calculée avec le modèle donné à la figure 12:

$$\Delta\sigma_{sd} = 97 \text{ MPa} < \Delta\sigma_{sd,D} = 115 \text{ MPa}$$

Ce calcul a été effectué en admettant un BFUP écrouissant avec un module d'élasticité apparent de 10 GPa pour une déformation de 0,56‰ [5]. (Cette déformation correspond à la contrainte de 115 MPa (limite de fatigue) dans l'acier d'armature). La contrainte maximale de fatigue dans le BFUP reste ainsi inférieure à la limite de fatigue car:

$$\sigma_{Ud,max} = 5,6 \text{ MPa} < \Delta\sigma_{Ud,D} = 6,6 \text{ MPa}$$

pour un BFUP avec une limite élastique moyenne  $f_e = 10 \text{ MPa}$  et une résistance à la traction moyenne  $f_u = 12 \text{ MPa}$ .

Ces vérifications montrent que la dalle renforcée est sollicitée à la fatigue à un niveau inférieure à la limite de fatigue.

#### 4 Conclusions

Les divers essais de fatigue sur des spécimens de BFUP, BFUP armé et sur des éléments composés BFUP – béton indiquent l'existence d'une limite de fatigue à 10 millions de cycles. La limite de fatigue a été constatée pour une sollicitation de fatigue maximale se trouvant à 45% – 55% de la résistance ultime de l'éprouvette.

Pour renforcer des éléments en béton armé au moyen d'une couche de BFUP armé, une méthode est proposée pour déterminer la résistance à la fatigue des éléments composés BFUP armé – béton armé en tenant compte d'un critère pour la limite de fatigue.

Cette méthode de renforcement permet d'améliorer la capacité portante (résistance à la fatigue, résistance ultime) tout en servant de couche de protection (étanchéité) des dalles de roulement. Ces fonctions sont obtenues en une seule étape de travail, ce qui permet une réduction significative de la durée des chantiers et donc des coûts indirects (coûts d'utilisateur).

#### Références

- [1] Brühwiler, E., Denarié, E., Oesterlee, C., *Hochleistungsfähiger Faserfeinkornbeton zur Effizienzsteigerung bei der Erhaltung von Kunstbauten aus Stahlbeton*, Forschungsauftrag AGB 2005/004, VSS Bericht Nr 644, VSS Zürich, Januar 2010
- [2] Brühwiler, E., Denarié, E., *Stahl-UHFB – Stahlbeton Verbundbauweise zur Verstärkung von bestehenden Stahlbetonbauteilen mit Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB)*, Beton- und Stahlbetonbau Nr 108, Heft 4, 2013, S.216–226
- [3] Brühwiler, E., Denarié, E., *Rehabilitation and strengthening of concrete structures using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete*, Structural Engineering International, 04/2013, pp.450–457
- [4] Brühwiler, E., Moreillon, L., Suter, R. (Herausgeber), *Ultra-Hochleistungs-Faserbeton – entwerfen, bemessen, bauen*, Tagungsband der 1. Schweizer UHFB Konferenz, Fachhochschule Fribourg vom 27. Oktober 2011, ISBN 978-2-8399-0951-8 (auf Deutsch und Französisch)
- [5] Makita, T., Brühwiler, E., *Tensile fatigue behaviour of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete*, Materials and Structures, published online, 23 April 2013
- [6] Makita, T., Brühwiler, E., *Tensile fatigue behaviour of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete combined with steel rebars (R-UHPFRC)*, International Journal of Fatigue, Vol. 59, (2014), pp. 145–152
- [7] Makita, T., Brühwiler, E., *Fatigue behaviour of bridge deck slab elements strengthened with reinforced UHPFRC*, Proceedings IABMAS 2012