

Renforcement et élargissement du Pont de Ferpècle via un clavage des culées en CFUP armé

Numa Bertola

Postdoctorant
Laboratoire de maintenance,
construction et sécurité des
ouvrages
Ecole Polytechnique Fédérale
de Lausanne (EPFL)
Lausanne, VD, Suisse

Eugen Brühwiler

Professeur ordinaire
Laboratoire de maintenance,
construction et sécurité des
ouvrages
Ecole Polytechnique Fédérale
de Lausanne (EPFL)
Lausanne, VD, Suisse

Jean-François Favre

Directeur
Guillaume Favre Ingénieurs
SA
Rue du Manège 60
1950 Sion
Suisse

Résumé

Le Pont de Ferpècle, situé aux Haudères (Valais, Suisse), est un des premiers ponts en béton précontraint de Suisse. Datant de 1958 et construit par l'ingénieur Pierre Tremblet, l'ouvrage est constitué d'une poutre simple avec une portée de 34.5 mètres qui repose sur des culées sous forme de piliers en béton armé. La chaussée actuelle faisant 5.3 mètres, il a été jugé nécessaire de l'élargir à 7.9 mètres. Ainsi, le pont qui est en bon état, nécessite une intervention de renforcement pour permettre cet élargissement. Afin d'augmenter sa capacité portante tout en élargissant la chaussée, une intervention au CFUP armé est réalisée. La solution innovante proposée est un clavage monolithique des culées au CFUP armé afin de modifier le système statique pour obtenir un semi-cadre et de réduire ainsi les sollicitations en travée de la poutre. Cet article présente la conception et le dimensionnement de cette intervention qui permet d'augmenter significativement la capacité portante de l'ouvrage malgré l'élargissement, grâce à une utilisation judicieuse du CFUP armé.

Mots clés: Composite Cimentaire Fibré Ultra-Performant, CFUP armé, pont existant, béton armé précontraint, UHPFRC, UHPC.

1. Introduction

Le composite cimentaire fibré ultra performant (CFUP) est utilisé dans les structures du monde entier depuis plus de vingt ans [1]. Le CFUP est généralement constitué d'un mélange de ciment, de particules fines (habituellement d'une taille maximale de 1 mm), d'eau, d'adjuvants, d'additifs et d'une grande quantité de fibres d'acier courtes et élancées [2]. Les fibres d'acier représentent au moins 3 % du volume du matériau [3], lui procurant des propriétés mécaniques spécifiques ainsi qu'une grande durabilité dû à son imperméabilité à l'état de service.

Les propriétés mécaniques du CFUP sont résumées par Brühwiler [4]. Le CFUP possède des propriétés mécaniques importantes, tant en termes de résistance à la traction (jusqu'à une valeur caractéristique maximale de 16 MPa) que de résistance à la compression (jusqu'à une valeur caractéristique maximale de 150 MPa). Le module d'élasticité est de 45 à 50 GPa, et le matériau a un comportement écrouissant en traction avec une déformation plus grande que 2 %. La résistance à la traction est considérablement améliorée par l'ajout de barres d'armature (CFUP armé), à l'instar des structures en béton armé [5]. Le cahier technique SIA 2052 [6] permet de dimensionner des éléments en CFUP et CFUP armé, ainsi que les éléments composés béton armé-CFUP armé.

Avec plus de 350 projets avec utilisations du CFUP armé, la Suisse est précurseur dans l'utilisation de ce matériau à la fois pour la construction de nouvelles structures ou pour le renforcement de structures existantes [7, 8]. le CFUP armé a été utilisé à de nombreuses reprises pour améliorer la capacité portante de ponts existants comme pour les Viaduc de Chillon [9], le Pont de Guillermaux [10] ou plus récemment le Viaduc de Riddes [11].

Le renforcement typique de ce type de viaduc est présenté à la Figure 1. Ce renforcement comporte principalement une couche de CFUP (entre 50 et 120 mm) coulée sur le tablier du pont. Dans les

zones sur appuis, ce renforcement inclut également des barres d'armatures afin d'augmenter de manière significative la capacité portante par une redistribution des résistance ultimes à la flexion à l'Etat Limite Ultime (ELU). Transversalement, le renforcement comporte également une nappe d'armature afin d'améliorer la capacité portante et de mieux répartir les efforts.

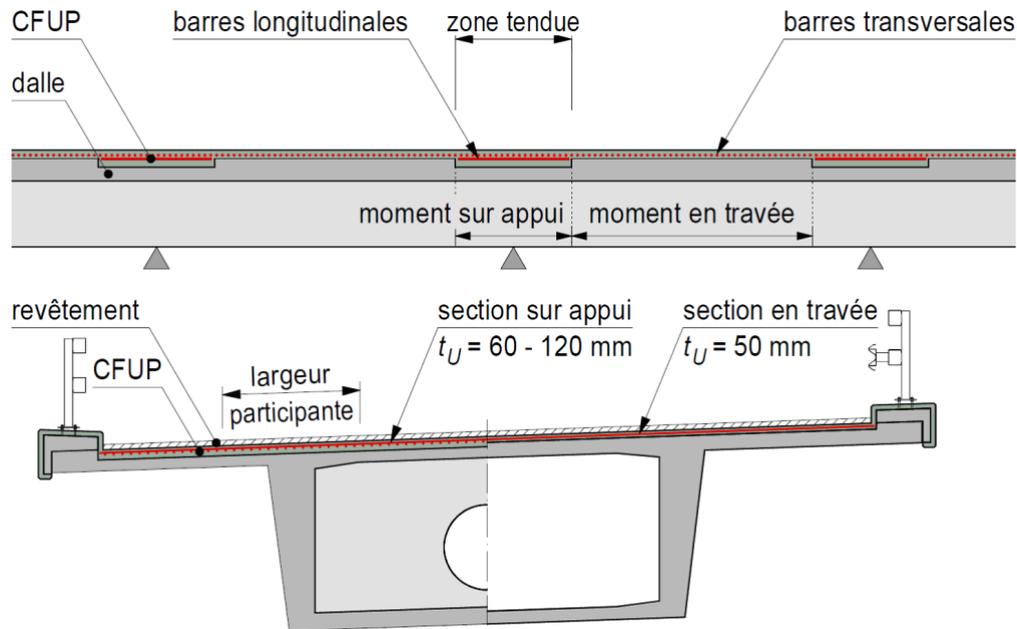


Fig. 1 Concept de renforcement typique de structures existantes, tiré de la Documentation OFROU 82022 CFUP [14].

Cet article présente une nouvelle application du CFUP armé pour le renforcement d'un pont en béton armé précontraint de 1958. L'intervention comporte un élargissement de la dalle de roulement de 5.3 m à 7.9 m (+50%) afin de répondre aux exigences du futur trafic routier. L'idée du renforcement vise un changement du système statique via le clavage des culées. Cette intervention élégante permet de renforcer de manière significative la structure porteuse grâce à une utilisation parcimonieuse du CFUP armé, tout en préservant largement la structure existante.

2. Évaluation de la structure existante

2.1. Présentation de l'ouvrage

Le Pont sur la Borgne de Ferpècle est une structure bipoutre (section en TT) en béton armé précontraint situé aux Haudères (VS). Le système statique est une poutre simple d'une portée de 34.5 mètres, posée sur des culées avec des murs latéraux d'une longueur d'environ 7 mètres (Fig. 2). La longueur totale de l'ouvrage est environ 50 mètres. Avec une hauteur de poutre de 1.75 mètre, l'élancement de 1/20 est audacieux pour une poutre simple. L'inspection visuelle de l'ouvrage via l'approche risque [12] a démontré que l'ouvrage était en état « satisfaisant » (note de 2 sur 5).

Le pont a été construit en 1958 selon les plans établis par le bureau d'ingénieurs B.Deléglise – P.Tremblet à Sion. L'ingénieur Pierre Tremblet a réalisé plusieurs ponts remarquables en béton précontraint en Valais, p.ex. le Pont St-Michel à Stalden. Pierre Tremblet avait repris le bureau d'ingénieur de Robert Maillart à Genève, pour devenir le bureau Tremblet, aujourd'hui T Groupe à Genève.

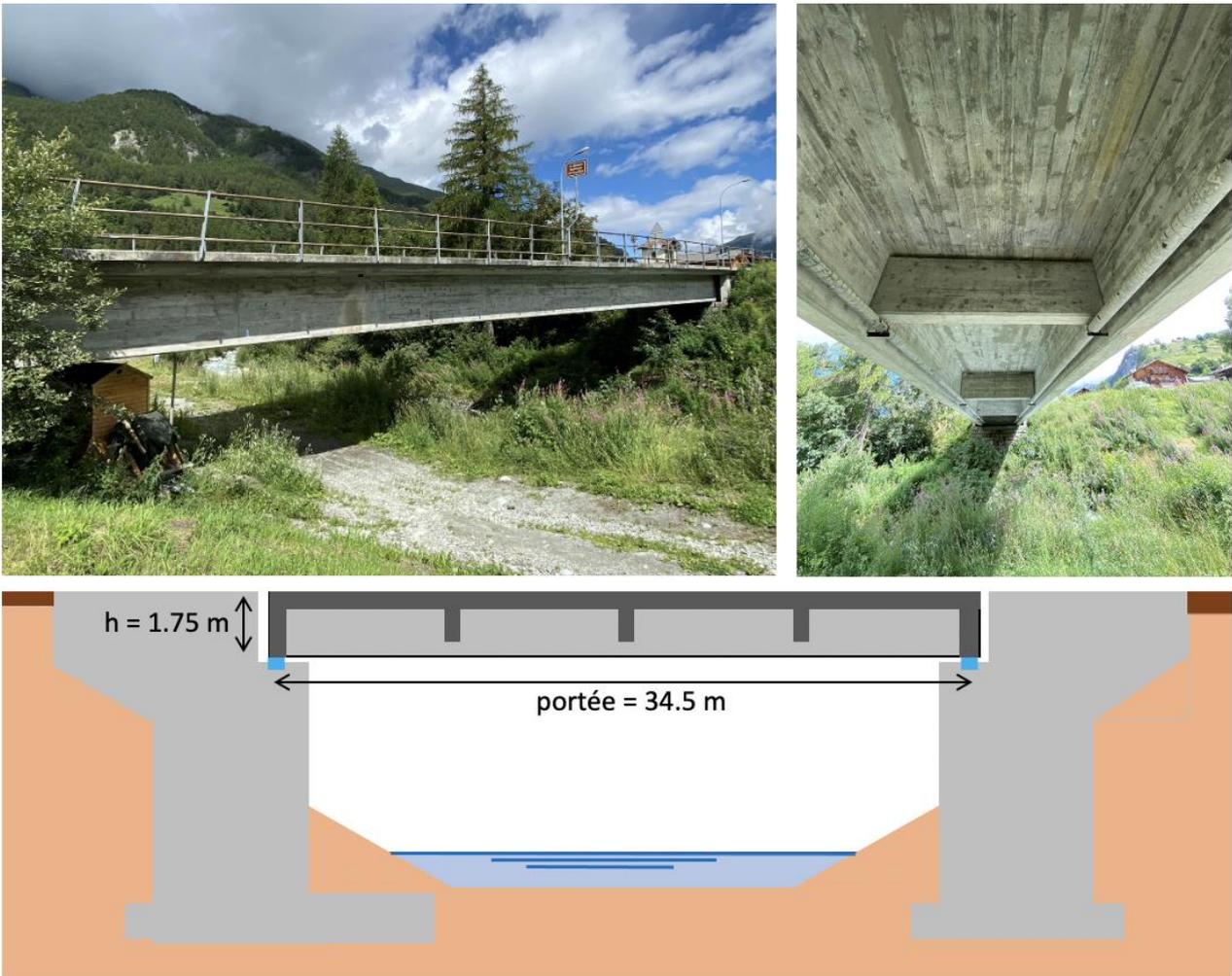


Fig. 2 Présentation du Pont de Ferpecte.

2.2. Base du projet

La structure du pont a été examinée selon la norme SIA 269 [13]. Comme la largeur de la chaussée est uniquement de 5.3 m, une seule voie de circulation est considérée avec les charges suivantes :

$$Q_{k1,act} = Q_{k1} * \alpha_{Q1,act} = 0.7 * 300 = 210 \text{ kN} \quad (1)$$

$$q_{k1,act} = q_{k1} * \alpha_{q1,act} = 0.4 * 9 = 3.6 \text{ kN/m}^2 \quad (2)$$

La situation d'examen pour la sécurité structurale est la suivante : $E_d = E\{\gamma_G * G_k; \gamma_G * Q_{k1}; \gamma_P * P_k\}$, avec : $\gamma_G = 1.2$, $\gamma_Q = 1.5$, $\gamma_P = 1.0$. Le poids du revêtement bitumineux et des barrières est considéré comme surcharge permanente.

Concernant la résistance des matériaux, un béton de classe C45/55 (actualisé depuis le C30/37 requis à la construction de l'ouvrage) a été admis sur la base d'essais non-destructifs. La résistance des aciers d'armature « Box-Tor-Caron » a été admise à $f_{sd} = 300 \text{ MPa}$. Concernant les barres précontraintes, une résistance ultime $f_{pd} = 730 \text{ MPa}$ a été considérée.

2.3. Évaluation de la sécurité structurale

Afin d'évaluer la sécurité structurale de l'ouvrage existant, un modèle numérique en trois dimensions par éléments coques a été créé dans le logiciel DIANA. Cette modélisation a été effectuée de la manière la plus réaliste possible et tient compte des éléments non-structuraux tels que les bordures et le revêtement. De plus, chaque barre d'armature et chaque câble de précontrainte sont inclus dans le modèle. La précontrainte est prise du côté de la résistance.

Cette modélisation permet de calculer les efforts directement dans les barres d'armatures et câbles de précontrainte (Fig 3). Pour l'état limite ultime (ELU), les charges de trafic sont placées de la manière la plus défavorable possible (à mi-portée pour la vérification à la flexion et proche des appuis pour la vérification à l'effort tranchant). Les contraintes dans les câbles de précontrainte les plus sollicités sont égales à leur limite d'écoulement ($f_{pd} = 730 \text{ MPa}$). Grâce au modèle numérique, il est possible de déterminer le degré de conformité global en augmentant progressivement le chargement jusqu'à la rupture (augmentation uniquement de la valeur de charge). Un degré de conformité pour la vérification de la flexion à mi-portée n_M égal à 1.05 est obtenu, montrant que la sécurité structurale de l'ouvrage dans son état actuel était garantie. En revanche, il est évident qu'une fois l'élargissement voulu (de 5.3 m à 7.9 m), cette sécurité structurale ne sera plus garantie et qu'un renforcement longitudinal est nécessaire. Calculé de manière analogue, le degré de conformité pour la vérification à l'effort tranchant n_V est égal à 1.10.

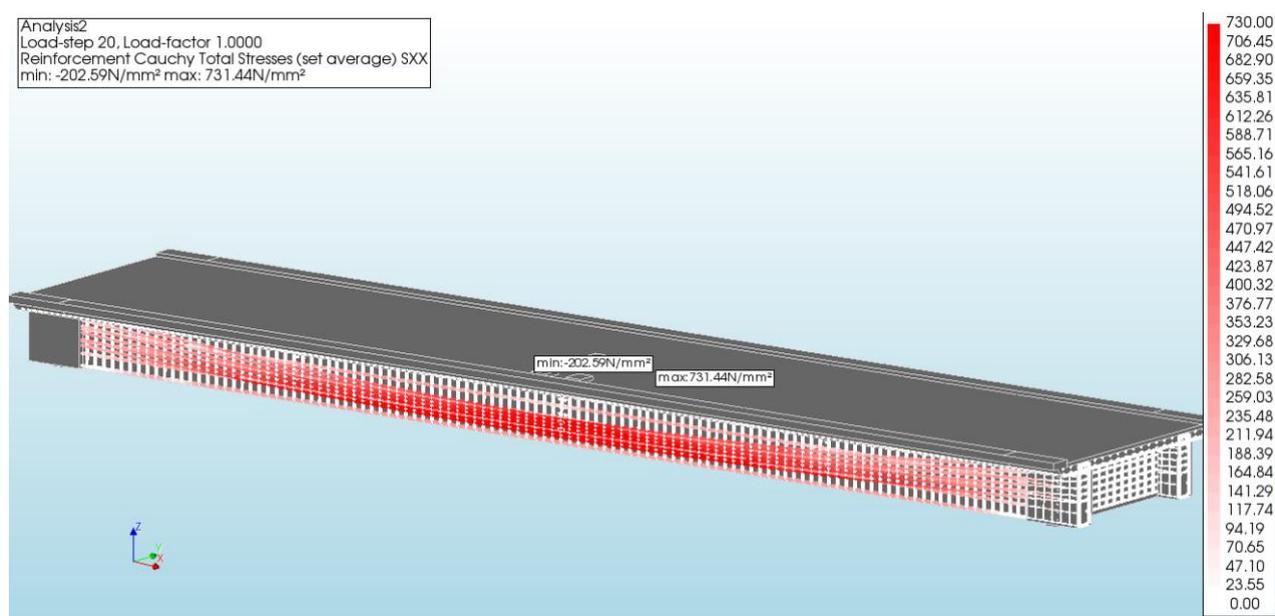


Fig. 3 Modèle élément finis et contrainte dans les câbles de précontrainte à l'ELU 2.

3. Conception et dimensionnement de l'intervention au CFUP armé

3.1. Élargissement

Afin d'élargir la chaussée de 5.3 m à 7.9 m, la dalle de roulement est élargie par une dalle pleine en porte-à-faux et à épaisseur variable, en CFUP armé (type UB ; $f_{Utud} = 6.9 \text{ MPa}$), ancrée dans la structure existante. En travée, l'épaisseur de la dalle de roulement est augmentée de 25 à 27.5 cm (Fig. 4), étant donné que 20 mm de béton de la dalle existante sont hydro-démolis, et la couche de CFUP en section mixte avec la dalle existante a une épaisseur de 45 mm, pourvue de barres d'armatures transversales ($\phi 14 @ 150 \text{ mm}$).

Au droit des appuis des poutres, une couche plus épaisse de CFUP armé (70 mm) est disposée pour augmenter de manière significative la résistance à la flexion sur appuis ($\phi 22 @ 100 \text{ mm}$). Afin d'obtenir une structure monolithique, un clavage des culées est effectué avec du CFUP armé et du béton armé permettant de lier les deux poutres précontraintes avec la dalle de roulement ainsi qu'avec l'entretoise, le mur de fond de la zone d'appui et les murs latéraux de la culée. Ainsi, les joints de dilatation sont supprimés. Ce clavage modifie le système statique dans le sens longitudinal.

Le concept de l'intervention dans le sens longitudinale consiste (1) à réaliser une structure semi-intégrale (par clavage des joints) au droit des culées afin (2) d'encastrier (partiellement) la poutre dans les culées. Ces culées sont relativement conséquentes dans le présent cas et servent ainsi également

comme « contreponds » permettant de reprendre le moment d'encastrement, selon le schéma présenté à la Figure 5.

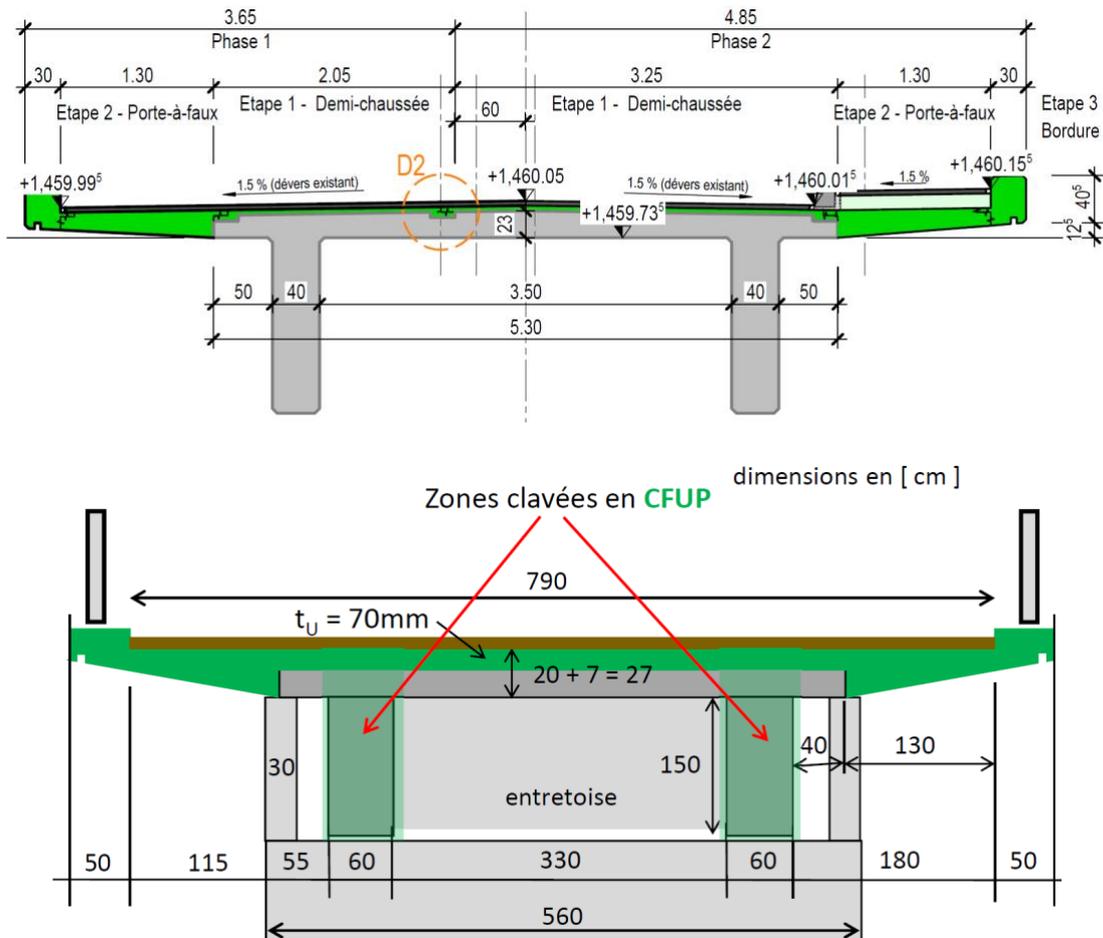


Fig. 4 Coupes transversales (en travée et sur appuis) avec le CFUP indiquée en vert.

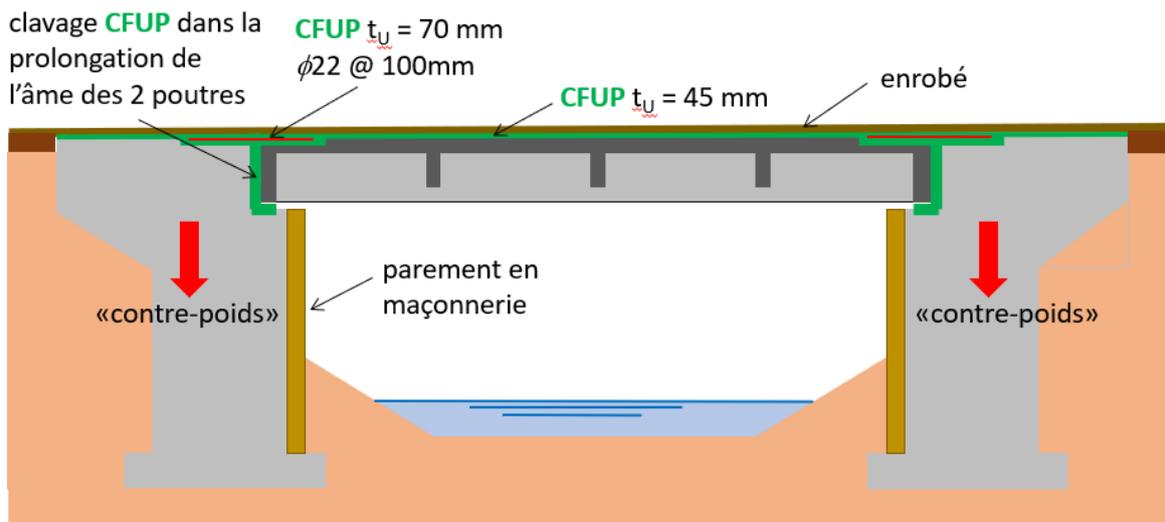


Fig. 5 Schéma de l'intervention (renforcement longitudinal).

Le projet est réalisé en maintenant une voie de circulation (à largeur réduite de 2.8 m) en service. Pendant le chantier, le trafic bidirectionnel est géré par un feu de circulation. Les travaux ont été réalisés en deux phases dans le courant de l'été 2023.

3.2. Dimensionnement du renforcement

Le concept de l'intervention est de redistribuer le déficit de résistance en flexion à mi-portée sur les appuis (Fig. 6). Ainsi, le système statique est modifié (pont intégral) et la structure de pont obtient une rigidité flexionnelle sur appuis, qui permet de reprendre cette sollicitation. Le moment résistant sur appuis est obtenu grâce à la nouvelle couche de CFUP armé.

Le pont ayant une largeur de 7.9 m après intervention, une deuxième voie de circulation du trafic routier est ajoutée ($Q_{k2,act} = 140 \text{ kN}$; $q_{k2,act} = 1.0 \text{ kN/m}^2$). De plus, le poids propre est légèrement augmenté par la nouvelle couche et l'élargissement en CFUP. Le moment de flexion total agissant est ainsi de $M_{Ed,+} = 17,8 \text{ MNm}$ (avec environ 55 % provenant du poids propre après intervention de l'ouvrage et 45 % provenant des charges utiles). Comme la résistance des poutres vaut $M_{Rd,+} = 12,4 \text{ MNm}$, il est donc nécessaire de redistribuer sur appuis :

$$M_{Ed,-} = 17,8 - 12,4 = 5,4 \text{ MNm} \quad (3)$$

A noter, que l'ensemble des effets des actions du poids propre (8,7 MNm) est inférieur à la résistance des poutres $M_{Rd,+}$. Uniquement une partie de l'effet des actions des charges utiles est donc redistribué aux culées. Pour reprendre ce moment négatif, une nappe d'armature ($\phi 22 @ 100 \text{ mm}$) dans la couche de 70 mm de CFUP est disposée ($M_{Rd,-} = 5,6 \text{ MNm}$; $n_{M-} = 1.04$). Afin d'effectuer ce type de redistribution, il est nécessaire de s'assurer que les sections ont une ductilité suffisante :

$$\frac{x_c}{d} = \frac{0.28}{1.55} = 0.18 < 0.25 \quad (4)$$

La capacité de déformation de la section est donc suffisante pour redistribuer les efforts aux appuis. Grâce à cette intervention, la capacité portante à la flexion de l'ouvrage est augmentée de 44 %, uniquement grâce à un renforcement au CFUP armé sur la face supérieure du tablier. L'augmentation de la résistance à l'effort tranchant est quant à lui de 35 %.

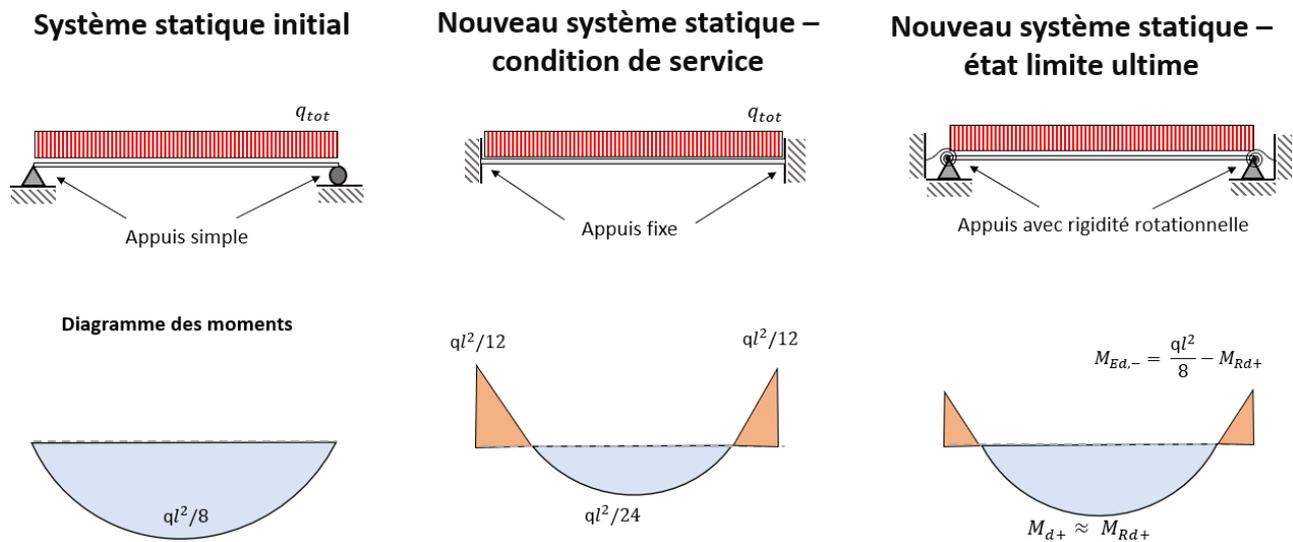


Fig. 6 Modification du système statique et du comportement structural de la structure de pont grâce à l'intervention.

Le détail constructif de l'élargissement est présenté à la Figure 7. Un porte-à-faux via une dalle pleine en CFUP armé ($\phi 14 @ 150 \text{ mm}$). Cette dalle a été coulée sur place en 3 étapes de CFUPage de chaque côté. La bordure a également été réalisée sur place en CFUP armé. Une couche de roulement de 4 cm d'enrobé bitumineux a été finalement disposée.

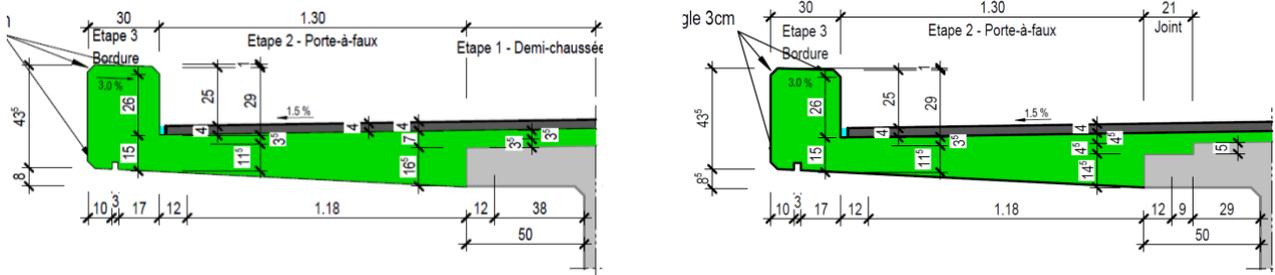


Fig. 7 Détails de la dalle élargie sur appuis (gauche) et en travée (droite) par un porte-à-faux en CFUP armé.

Le modèle numérique a été modifié afin de pouvoir prédire le comportement structural après le renforcement (Fig. 8). Afin d'avoir des prédictions fiables, les culées ont été modélisées et liées à la superstructure via le CFUP armé. Le comportement de la superstructure et de la culée est ainsi monolithique. Ce modèle permet de vérifier les contraintes dans le CFUP ainsi que dans les armatures du tablier et des culées.

On constate que les contraintes maximales dans les nouvelles barres d'armatures est d'environ 280 MPa, soit bien inférieur à la limite d'écoulement. Cependant, certaines barres d'armatures dans la culée sont sollicitées jusqu'à l'écoulement à l'ELU, montrant qu'il s'agit d'un élément déterminant du dimensionnement. De plus, les contraintes dans le CFUP (traction) et dans le béton armé (compression) sont inférieures à leur résistance respective. Cette différence vient notamment d'une plus grande largeur participante selon le modèle numérique que selon un modèle analytique. Le degré de conformité global obtenu avec le modèle numérique est de 1.15.

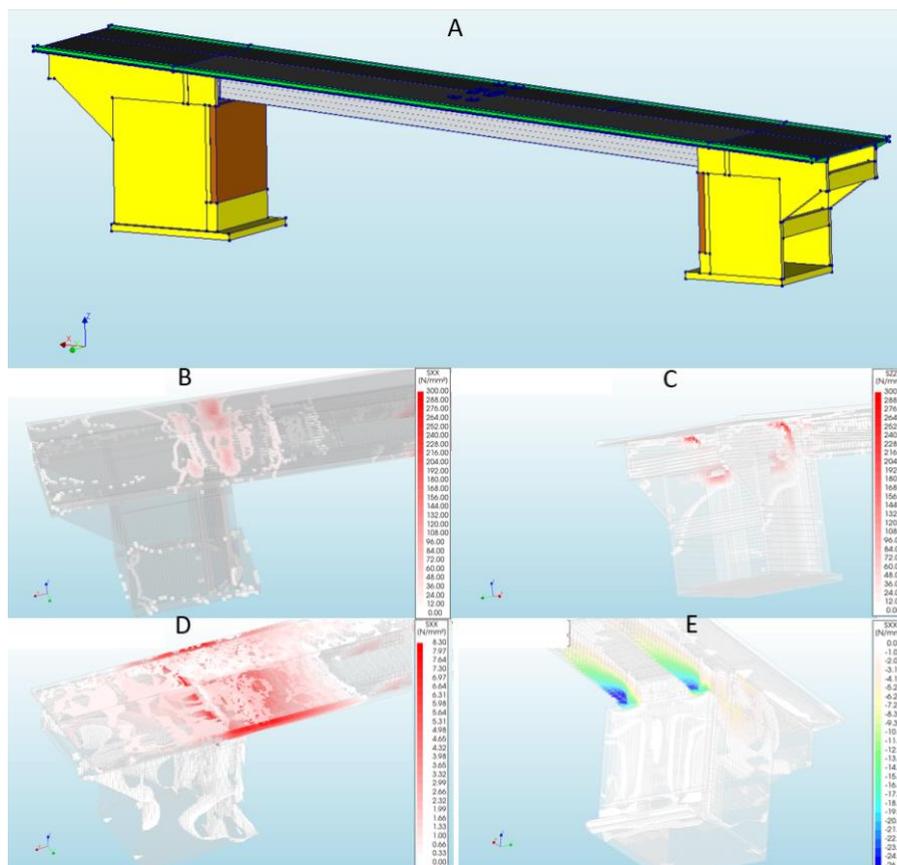


Fig. 8 A) Modèle par éléments finis de la structure de pont après intervention; B) Contraintes de traction dans les barres d'armatures de la dalle; C) contraintes de traction dans les barres d'armatures des culées; D) Contraintes de traction dans le CFUP; D) Compression dans les poutres en béton armé précontraint.

Le modèle est également utilisé pour vérifier que les déformations du CFUP restaient inférieures au critère d'étanchéité de 1‰ à l'état limite de service (ELS). Ce modèle numérique permet également de calculer la flèche de la poutre (cas de charge fréquent : uniquement charge utile avec $\Psi_1 = 0.75$), ainsi que de démontrer le comportement bi-encasté à l'ELS (Fig. 9). La flèche ainsi calculée est de 6.3 mm ce qui est bien inférieure à la valeur maximale tolérée ($\frac{l}{350} = \frac{34500}{350} = 98 \text{ mm}$). Donc, la structure renforcée est très rigide.

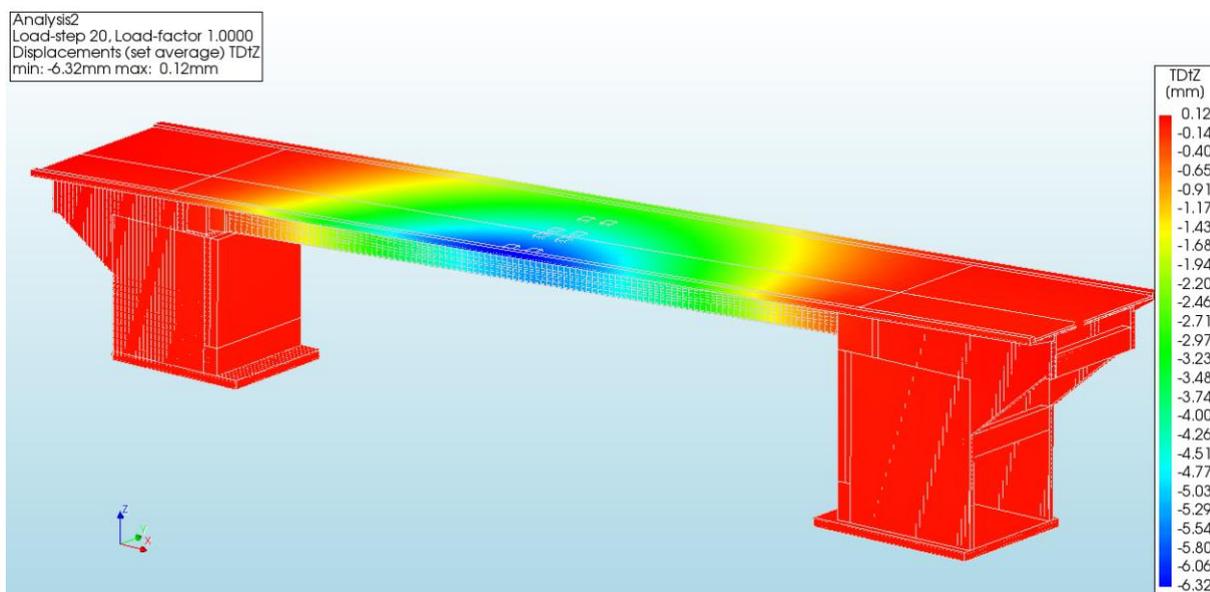


Fig. 9 Comportement à l'état limite de service de l'ouvrage après l'intervention.

4. Exécution des travaux

Les travaux ont été réalisés en 2023. Ils sont supervisés par le bureau Favre Ingénieurs et réalisés par l'entreprise Losinger Prader. Les travaux ont été effectués en deux phases (amont et aval) afin de permettre la circulation alternée pendant l'ensemble des travaux.

Dans une première étape qui a débuté en avril 2023, un échafaudage a été installé et le revêtement bitumineux a été enlevé sur l'ensemble du tablier (Fig. 10). Puis la circulation alternée a été mise en place et la bordure amont a été découpée. Le coffrage du porte-à-faux et de la nouvelle bordure a été installé et une nouvelle dalle de transition en béton armé a été coulée.



Fig. 10 Installation de chantier et échafaudage pour soutenir le coffrage du porte-à-faux (Photos du 1^{er} mai 2023).

Le CFUPage a commencé en juin 2023. Le CFUP est préparé directement sur place. 3 étapes de CFUPage ont été réalisées pour sur le tablier et le nouveau porte-à-faux (entre 5 et 9 m³ par étape), puis la bordure a été coulée en une seule étape (Fig. 11 et 12). Finalement les culées ont été clavées. Les travaux ont ensuite été répétés en septembre 2023 sur la partie aval de l'ouvrage.

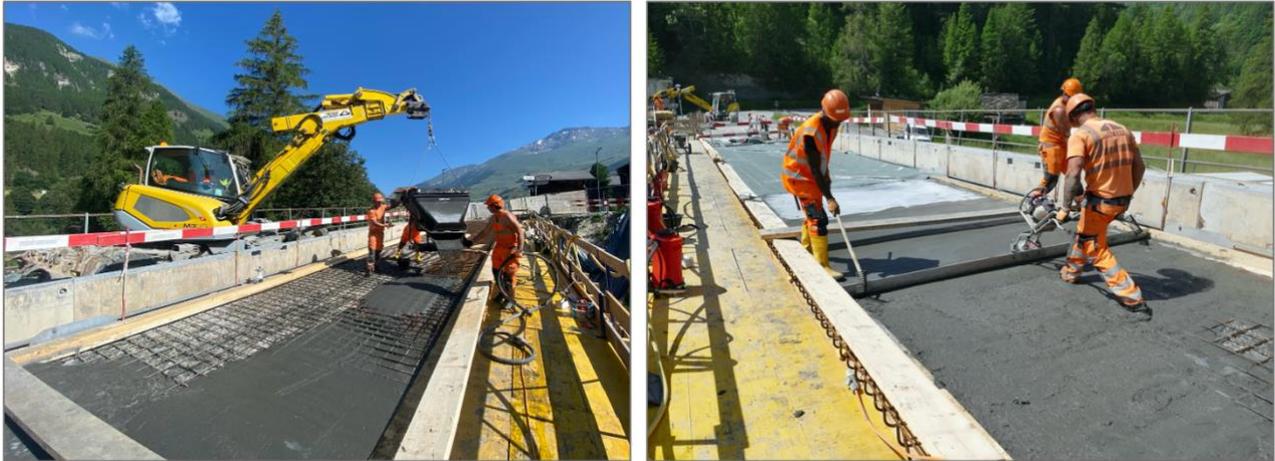


Fig. 11 CFUPage du porte-à-faux et de la couche sur le tablier dans la partie amont de l'ouvrage (Photos du 1^{er} juillet 2023).



Fig. 12 Résultat final de l'intervention au CFUP (Photos du 7 août 2023).

5. Conclusions

Cet article présente la conception, le dimensionnement et l'exécution de l'intervention au CFUP armé sur le pont de Ferpècle, un des premiers ponts en béton précontraint de Suisse. Cette intervention consiste à élargir le tablier du pont de 5.3 à 7.9 m. Le besoin de renforcement qui en résulte, est comblé par une redistribution des efforts (de la travée aux appuis) en se basant sur la théorie de la plasticité à l'ELU. Un renforcement uniquement sur la face supérieure du tablier permet ainsi d'augmenter la capacité portante à la flexion de l'ouvrage de 44 % ainsi que l'élargissement et la réhabilitation d'un pont de 1958. Cette étude de cas démontre que le CFUP permet de renforcer efficacement les structures existantes par un changement du système statique. Le clavage des culées et la redistribution des efforts sur appuis est une stratégie d'intervention élégante. En plus, la durée d'utilisation a été prolongée.

Comparé à une démolition-reconstruction initialement envisagée, le projet réalisé est largement moins coûteux et présente un bilan écologique bien meilleur.

Références

- [1] GRAYBEAL, B., BRÜHWILER, E., KIM, B.-S., *et al.*, *International Perspective on UHPC in Bridge Engineering*, Journal of Bridge Engineering, v. 25, n. 11, p. 04020094, Nov. 2020.
- [2] BRÜHWILER, E., DENARIÉ, E., *Rehabilitation and Strengthening of Concrete Structures Using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete*, Structural Engineering International, v. 23, n. 4, pp. 450–457, Nov. 2013.
- [3] BRÜHWILER, E., “Structural UHPFRC’: Welcome to the post-concrete era !,” in International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete, Des Moines, Iowa, USA, 2016, pp. 1–16.
- [4] BRÜHWILER, E., *UHPFRC technology to enhance the performance of existing concrete bridges*, Structure and Infrastructure Engineering, v. 16, n. 1, pp. 94–105, Jan. 2020.
- [5] OESTERLEE, C., *Structural response of reinforced UHPFRC and RC composite members*, EPFL, Lausanne, Switzerland, 2010.
- [6] Cahier Technique SIA 2052 CFUP: Matériaux, dimensionnement et exécution, Version révisée du 24 décembre 2021, approuvée par le Groupe de travail.
- [7] BERTOLA, N., SCHILTZ, P., DENARIÉ, E., *et al.*, *A Review of the Use of UHPFRC in Bridge Rehabilitation and New Construction in Switzerland*, Frontiers in Built Environment, v. 7, p. 155, 2021. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.769686>
- [8] BERTOLA, N., KÜPFER, C., KÄLIN, E., *et al.*, *Assessment of the Environmental Impacts of Bridge Designs Involving UHPFRC*, Sustainability, v. 13, n. 22, p. 12399, Jan. 2021. <https://doi.org/10.3390/su132212399>
- [9] BRÜHWILER, E., BASTIEN MASSE, M., “Strengthening the Chillon viaducts deck slabs with reinforced UHPFRC,” *IABSE Conference Geneva 2015 “Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges,”* 2015 <http://infoscience.epfl.ch/record/212773>. Accessed in December 2020.
- [10] HAJIESMAEILI, A., PITTAU, F., DENARIÉ, E., *et al.*, *Life Cycle Analysis of Strengthening Existing RC Structures with R-PE-UHPFRC*, Sustainability, v. 11, n. 24, p. 6923, Jan. 2019.
- [11] EL JISR, H., MOREILLON, L., MENÉTREY, P., *Strengthening of the Riddes Viaduct Through UHPFRC-Based Rehabilitation*, Structural Engineering International, v. 0, n. 0, pp. 1–9, May 2023.
- [12] BERTOLA, N.J., BRÜHWILER, E., *Risk-based methodology to assess bridge condition based on visual inspection*, Structure and Infrastructure Engineering, v. 0, n. 0, pp. 1–14, Aug. 2021. <https://doi.org/10.1080/15732479.2021.1959621>
- [13] BRÜHWILER, E., VOGEL, T., LANG, T., *et al.*, *Swiss standards for existing structures*, Structural Engineering International, v. 22, n. 2, pp. 275–280, 2012.
- [14] Documentation OFROU 82022 CFUP pour la maintenance et la construction d'ouvrages d'art de l'infrastructure routière, Auteurs/Groupe de travail: Prof. E.Brühwiler (auteur) EPFL, Dr. Dimitrios Papastergiou (présidence) und Walter Waldis OFROU N-SSI, Édition 2023 V1.01, 2023.