

Un nouveau pont ferroviaire entièrement en CFUP – Pont de l’Aiguillon

Ngoc Thanh Trinh
Dr. Ingénieur civil
Chef du Département
Ouvrages d’Art Léman,
Gruner SA, Renens,
Suisse

Eugen Brühwiler
Prof. Dr. Ingénieur civil
Ecole Polytechnique
Fédérale de Lausanne
(EPFL), Lausanne,
Suisse

Enrique Garcia
Ingénieur civil
Chef de projets
TRAVYS SA,
Yverdon-les-Bains,
Suisse

Numa Bertola
Dr. Ingénieur civil
Postdoctorant
Ecole Polytechnique
Fédérale de Lausanne,
Lausanne Suisse

Résumé

Pont de l'Aiguillon, le premier pont ferroviaire avec une auge et à voie étroite du monde entièrement en composite cimentaire fibré ultra performance (CFUP), selon les connaissances des auteurs, a été réalisé et mis en service en 2021 sur la ligne ferroviaire TRAVYS entre Yverdon et St-Croix. Cet article présente la conception et la construction du pont. Il a remplacé un pont en béton armé qui n'avait ni dégagements de service, ni garde-corps et avec des rails directement fixés sur le tablier (voie sans ballast). Le pont est constitué d'un tablier en auge, portant une voie métrique ballastée et de deux passerelles (dégagements de service), posé sur deux bancs d'appui préfabriqués en béton armé, eux-mêmes mis en place sur des culées existantes datant de 1893. L'auge est composée de deux éléments préfabriqués en CFUP armé. Ces éléments sont préparés en usine, puis assemblés in-situ via un joint longitudinal coulé sur place également en CFUP. Grâce à la haute résistance du CFUP, le tablier du pont a une faible épaisseur de 6 cm à 24 cm ce qui a permis de limiter le rehaussement de la voie et ainsi les ouvrages de soutènement de part et d'autre du pont, car le gabarit routier devait être maintenu (contrainte principale du projet) et ceci sans toucher à la route. La précision de la pose des éléments préfabriqués est respectée au millimètre. Les défis techniques et le retour d'expériences de ce projet sont discutés et analysés. En outre, les essais de conformité à taille réelle en laboratoire dans le but de valider le comportement statique du joint entre les deux éléments préfabriqués sont présentés. Les résultats des tests de résistance structurelle des joints concordent avec les résultats analytiques. L'aspect économique de l'ensemble du projet est examiné afin de mieux comprendre les avantages et les opportunités de l'utilisation de CFUP pour construire de nouvelles structures dans le futur.

Mots clés : Composite Cimentaire Fibré Ultra-Performant, CFUP armé, pont ferroviaire, UHPFRC, structure légère

1. Introduction

Le pont de l'Aiguillon fait partie d'une ligne ferroviaire à voie étroite en Suisse. Le pont existant, construit en 1978, doit être remplacé car il ne répondait plus aux exigences normatives pour l'exploitation d'une ligne de chemin de fer, les rails existants ayant été fixés directement sur le tablier du pont, sans ballast ni traverse. Le nouvel ouvrage en CFUP a une portée unique de 6,10 m. Les culées en maçonnerie, construites lors de la création de la ligne de chemin de fer en 1893, ont été rehaussées lors de la reconstruction du pont existant en 1978. Lors de la construction cet ouvrage, la voie ferrée a également été rénovée et surélevée de 50 cm afin d'obtenir la hauteur nécessaire pour construire l'auge du nouvel ouvrage et de rajouter une couche de ballast requise d'au moins 30 cm sous les traverses. De plus, les ailes de l'auge permettent d'inclure deux passerelles pour l'évacuation des passagers en cas d'accident.

L'une des principales contraintes de ce projet était que le gabarit routier sous le pont devait être maintenu. En raison de cette contrainte, la hauteur maximale disponible pour l'épaisseur du nouveau tablier était limitée à 24 cm. Un tablier conventionnel en béton armé nécessite une hauteur plus importante que celle disponible. Le pont étant situé dans une zone montagnaise à l'accès limité, un tablier mince en acier aurait posé des problèmes de transport. Par conséquent, un nouveau tablier mince constitué de deux éléments préfabriqués en CFUP armé s'est avéré être la solution la plus appropriée dans cette situation.

Le nouveau pont, construit en 2021 [1], est conçu pour accueillir une voie ferrée à voie étroite et deux passerelles (Figure 3). L'auge a une longueur totale de 6,6 m et une largeur totale de 5,7 m. La structure est composée de deux éléments préfabriqués en CFUP armé dont l'épaisseur varie de 60 mm à 240 mm (Figure 4). Ces éléments ont d'abord été construits en atelier, puis assemblés sur le site par un joint de clavage longitudinal coulé sur place, également en CFUP armé (Figure 8). La connexion entre les éléments préfabriqués est donc un point clé de la fabrication du tablier du pont. C'est pourquoi, des essais en laboratoire sur les poutres transversales à taille réelle ont été réalisés afin de valider le comportement du joint de clavage et déterminer sa résistance maximale et son comportement en flexion (Figure 6).

Le CFUP est utilisé dans les structures du monde entier depuis plus de vingt ans, avec plus de 350 applications rien qu'en Suisse [2, 3]. Le CFUP est un composite cimentaire comprenant une grande quantité de ciment (700 à 1000 kg/m³), de particules fines (d'une taille maximale de 1 mm), d'eau (rapport eau/liant 0.13-0.17), d'adjuvants, d'additifs et d'une grande quantité de fines fibres d'acier élancées [4]. Les fibres d'acier doivent représenter au moins 3 % du volume du matériau. Cette composition unique lui procurant des propriétés mécaniques spécifiques ainsi qu'une grande durabilité dû à son imperméabilité à l'état de service [5].

Le CFUP possède une importante résistance à la traction (jusqu'à 16 MPa) ainsi qu'à la compression (jusqu'à 150 MPa) [6]. Son module d'élasticité varie entre 45 et 50 GPa, Sa grande durabilité vient notamment du comportement écrouissant du matériau en traction jusqu'à une déformation de 2 ‰, qui permet d'éviter sa fissuration dans des conditions de service. De plus, la résistance à la traction est améliorée de manière significative en ajoutant des barres de renforcement (CFUP armé), à l'instar des structures en béton armé [7]. Le cahier technique SIA 2052 [8] permet de dimensionner des éléments en CFUP et CFUP armé, mais aussi des structures composites béton armé-CFUP armé.



Figure 1. Le nouveau pont ferroviaire Aiguillon en CFUP armé

L'utilisation dans la nouvelle construction permet à la fois de construire des structures légères avec une esthétique unique (comme par passerelle de Chaumény [9]), un usage proportionné des ressources avec un impact environnemental réduit (comme pour le pont du Fruttli [10]), ou un usage de la préfabrication afin de répondre aux contraintes du projet (comme pour le passage inférieur d'Unterwalden [11]). De plus l'imperméabilité de sa matrice [12] lui confère une grande durabilité qui permet d'éviter des dégradations importantes comme constaté pour le béton armé [13, 14].

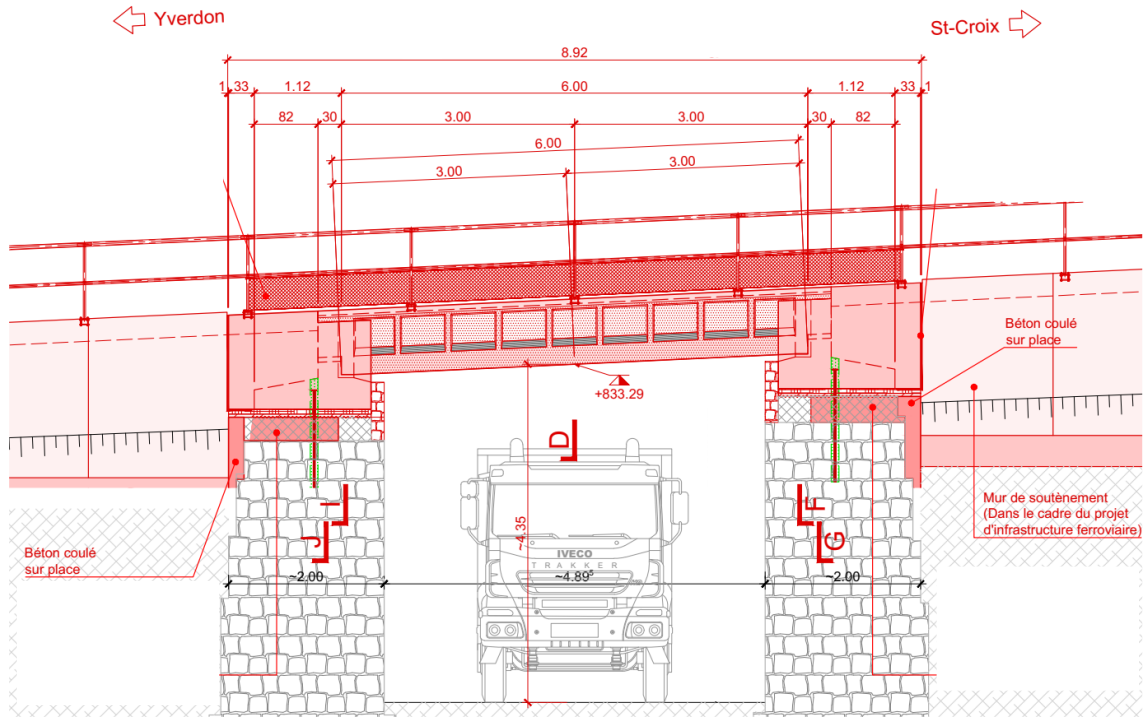


Figure 2. Elévation du nouveau pont

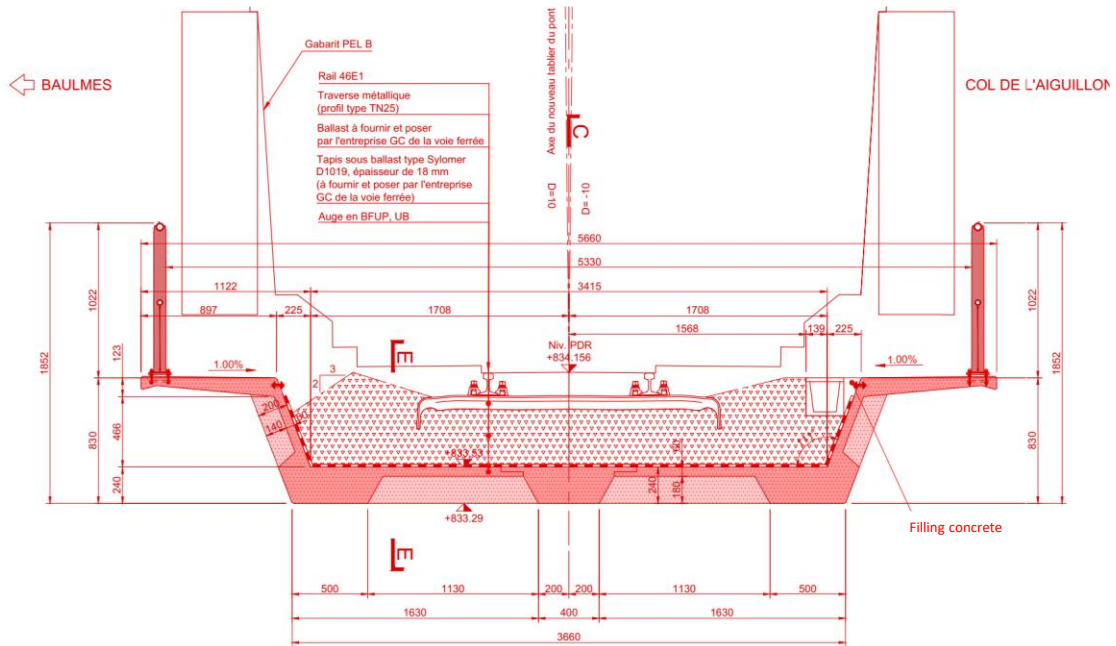


Figure 3. Coupe transversale du tablier en CFUP

2. Conception et dimensionnement de l'ouvrage

2.1. Matériaux de construction

L'auge du pont est composée de CFUP Type UB conformément aux exigences définies dans [9], et de barres d'armature en acier dont les propriétés mécaniques sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1. Propriétés des matériaux CFUP et acier d'armature

Matériau	Propriété	Valeur de dimensionnement	Valeur caractéristique
CFUP, sorte UB	Résistance à la compression (f_{Uc})	68 MPa	120 MPa
	Résistance à la traction (f_{Ut})	6.4 MPa	12 MPa
	Module d'élasticité (E_U)	50 MPa	50 MPa
	Déformation d'écroutissage (ϵ_{Ut})	-	2 ‰
	Masse volumique		26 kN/m ³
Acier d'armature (B500B)	Limite d'écoulement (f_s)	435 MPa	500 MPa

2.2. Actions

Les charges permanentes sont constituées du poids propre de l'élément structurel (auge) et des éléments non structurels (ballast de la voie, traverses, rails, barrières).

Le pont est conçu pour supporter les charges déterminantes du trafic ferroviaire suivantes :

- Charges dues au trafic ferroviaire à voie étroite, le modèle de charge 7 selon les normes suisses (SIA 261) est appliqué pour la conception de l'auge. Ce modèle de charge se compose de quatre charges d'essieu avec une valeur caractéristique de 200 kN.
- Les charges sur les passerelles ont une valeur caractéristique de 2,5 kN/m².

Les charges causées par les véhicules déraillés sont également prises en compte en utilisant les modèles de charges de déraillement 6 et 7 de la norme suisse SIA 261 pour prévenir les défaillances structurelles et pour retenir le véhicule déraillé en cas de déraillement.

2.3. Concept structural et dimensionnement

L'ensemble de l'auge du pont est composé de deux poutres principales, de deux passerelles, de poutres transversales, de raidisseurs d'âme et de plaques minces de 60 mm entre les poutres transversales. Tous ces éléments, présentés dans la Figure 4, fonctionnent ensemble comme un élément structurel monolithique. Les dimensions de ces composants sont indiquées dans la section transversale du tablier du pont de la Figure 3.

L'auge est dimensionnée à l'aide d'un modèle éléments finis en 3D pour l'analyse structurelle. Les poutres principales travaillent ensemble avec la passerelle pour créer une poutre en "Z" dans laquelle la passerelle est considérée comme l'aile supérieure en compression et la poutre principale comme l'aile inférieure en tension. Quatre barres d'armature en acier de 20 mm de diamètre sont placées dans la poutre principale pour renforcer la résistance à la traction. La résistance à la traction du CFUP est également prise en compte dans la détermination de la résistance ultime de la poutre principale. La vérification de la fatigue de l'acier d'armature et du CFUP est également effectuée.

Les poutres transversales entre les deux éléments préfabriqués sont reliées par un joint CFUP coulé sur place. En raison de la discontinuité des fibres d'acier au niveau des surfaces de contact entre deux étapes de fabrication, la résistance à la traction du CFUP est négligée pour la vérification structurelle au niveau de ces surfaces. Cette hypothèse est validée par l'expérience en laboratoire présentée dans le chapitre suivant. La poutre longitudinale centrale, en plus de son rôle de clavage des poutres transversales, participe également au fonctionnement statique longitudinal de l'auge.

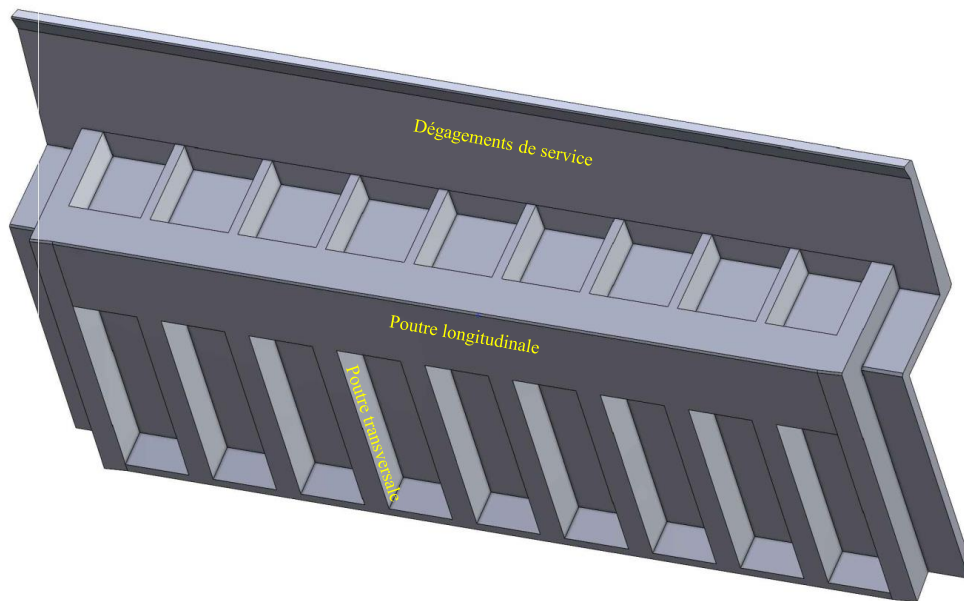


Figure 4. Modèle 3D d'un élément préfabriqué du nouveau tablier (Element SA)

Étant donné que l'auge en CFUP supporte une voie ballastée lourde et que la vitesse de service des trains est relativement faible ($V_{max} = 45 \text{ km/h}$), il n'y a pas de problème concernant le comportement dynamique. Dans les projets avec des voies ferrées fixes et des trains à grande vitesse, le comportement dynamique devrait être analysé à l'aide de modèles dynamiques utilisés pour les structures de pont.

3. Expérience au laboratoire

En raison de la difficulté d'accès à l'emplacement du pont, le tablier a été divisé en deux demi-auge préfabriqués et un joint de clavage a été coulé en place. Ainsi, les poutres transversales du pont sont constituées de deux éléments préfabriqués et du joint de clavage. Cette conception conduit à des propriétés structurelles particulières car les fibres ne sont pas continuées dans la poutre transversale en CFUP aux interfaces entre les éléments préfabriqués et le joint.

La capacité portante de la poutre devrait être différentes de celles d'une poutre conventionnelle coulée en un seul élément puisque que la résistance à la traction du CFUP devrait être nulle à ces interfaces. Deux poutres transversales à taille réelle ont été préparées pour être testées en laboratoire. Un compte rendu détaillé de l'expérience est présenté dans un article spécifique [15].

La poutre transversale a une longueur totale de 3 mètres (Figure 5) avec une section en T. L'âme a une surface carrée de $180 \times 180 \text{ mm}^2$ tandis que l'aile a une hauteur de 60 mm et une largeur de 650 mm. Dans chaque élément préfabriqué, le renforcement comprend quatre barres d'armature d'un diamètre de 26 mm. Les armatures des deux éléments préfabriqués se recouvrent dans le joint de clavage.

Un calcul analytique du comportement à l'état ultime de la poutre a été développé en se basant sur le cahier technique sur le CFUP (SIA 2052) [9]. Comme la résistance à la traction du CFUP est nulle à ces joints, le calcul devient similaire que pour une section fléchie en béton armé avec uniquement le CFUP comprimé et les armatures tendues. La résistance maximale de la poutre a été estimée à 204 kN en utilisant les valeurs moyennes des propriétés mécaniques du CFUP. La section critique est évidemment à l'interface entre les éléments préfabriqués et le joint, car la résistance à la traction de CFUP est admise comme nulle due à la discontinuité des fibres. Ces poutres ont été testées au sein de la halle d'essai de génie civil à l'EPFL. Concernant la résistance à l'effort tranchant, le joint peut également réduire la résistance à l'effort tranchant. Cependant, ils sont situés dans la première bielle, l'effort tranchant est donc transmis uniquement par compression à travers les joints.

Deux vérins hydrauliques (capacité de 1000 kN chacun) sont utilisés pour appliquer une déformation progressive aux deux extrémités de la poutre (vitesse de 0,02 mm/s). Les mesures sont effectuées à l'aide de capteurs de déplacement (LVDT), d'extensomètres. Un système de détection des fissures

basé sur la corrélation d'images numérique (DIC) a été également installé pour localiser la section critique et le mode de rupture.

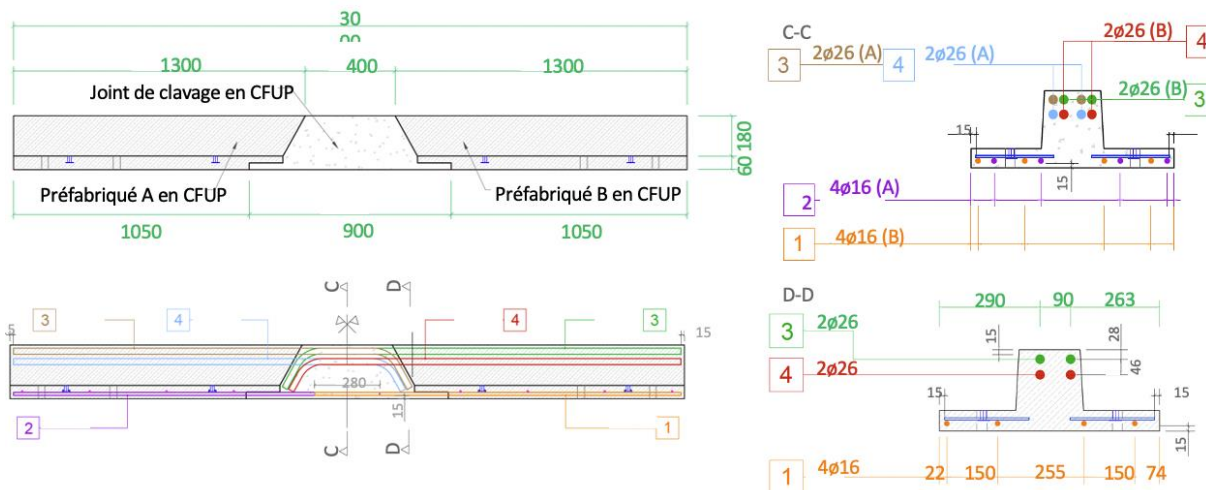
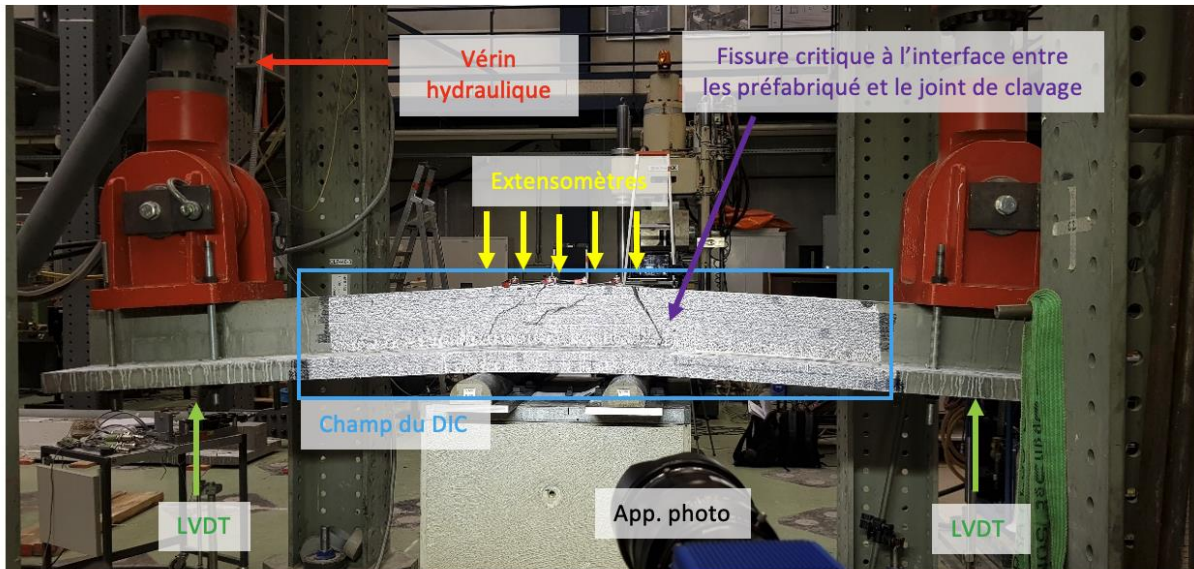


Figure 5. Installation pour les expériences en laboratoire sur les poutres transversales à taille réelle.

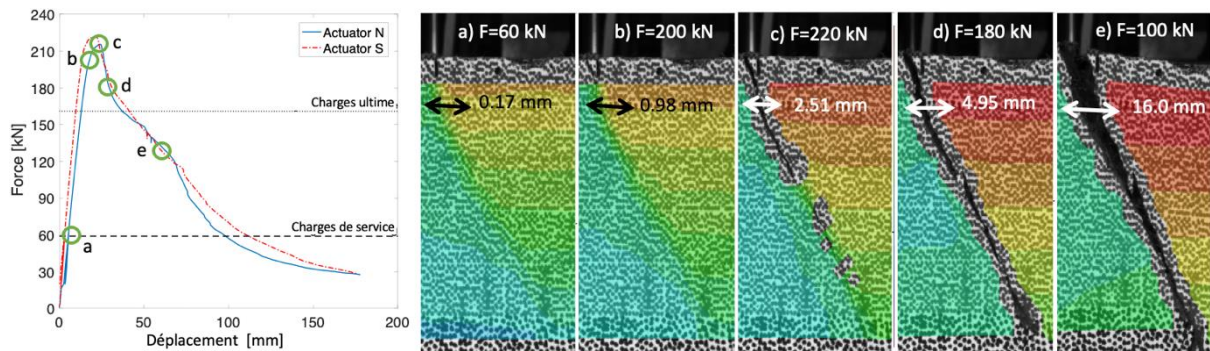


Figure 6. Comportement Force-déplacement mesuré pendant l'expérience et mesures de l'ouverture de la fissure critique par le DIC.

Les courbes force-déplacement pour chaque poutre sont présentées à la Figure 6. Comme l'expérience est contrôlée par un déplacement imposé, la force mesurée par la cellule de charge de chaque vérin

varie légèrement pour le même déplacement en raison de la variabilité des propriétés des matériaux dans la poutre et d'une légère asymétrie dans les positions d'introduction de la charge. La résistance maximale moyenne obtenue avec les deux vérins et pour chaque poutre se situait entre 218 et 234 kN, ce qui concorde bien avec les prédictions du modèle analytique.

Le deuxième objectif de l'essai est d'observer le mécanisme de rupture. Les deux poutres ont montré une importante capacité de déformation dans le domaine plastique. Bien que la ductilité soit réduite par rapport à une poutre en CFUP armé conventionnel, ce résultat confirme qu'une rupture fragile de la poutre n'est pas plausible. La fissure critique, monitorée grâce au DIC (Figure 6) est bien située à l'interface entre les éléments préfabriqués et le joint de clavage. On constate que cette fissure commence à s'ouvrir exactement au pic des forces appliquées, montrant que la durabilité de l'élément ne devrait pas être affectée par rapport à une poutre conventionnelle en CFUP.

En examinant les poutres d'essai après l'expérience, il a été observé que le mécanisme de rupture s'est produit par arrachement des barres d'armature sans affecter significativement la ductilité du mécanisme de rupture. Ce type de rupture peut être expliqué par le fait que l'ancrage des barres d'armature est parallèle à l'interface entre le préfabriqué et le joint de clavetage (Figure 5).

Dans l'ensemble, les résultats de la campagne expérimentale ont permis de valider la conception de la poutre transversale. Les résultats expérimentaux montrent un comportement élastique dans des conditions de charges de service et un mécanisme de rupture non fragile. En outre, la résistance maximale prévue (capacité portante) basée sur le modèle analytique adapté du CT2052 a été confirmée par la charge maximale observée pendant l'expérience. La résistance à l'effort tranchant a été prédite comme étant significativement plus grande que la résistance à la flexion par le modèle analytique, et cette prédiction a également été validée par les résultats expérimentaux.

4. Exécution et installation du pont

Les deux éléments en CFUP du tablier du pont sont préfabriqués en usine (Figure 7) avant d'être transportés sur le chantier pour être assemblés (Figure 8). Le joint entre les deux éléments est coulé à l'aide du CFUP fabriqué sur place par un mélangeur spécial. La précision de l'assemblage de ces deux éléments est de l'ordre de quelques millimètres. Les résultats des tests effectués sur les échantillons prélevés en usine et sur le chantier indiquent que la valeur caractéristique de la résistance à la compression du CFUP à 28 jours est supérieure à 150 MPa. Il s'avère que la résistance effective à la compression du CFUP de type UB est beaucoup plus élevée que la valeur nominale indiquée dans le Tableau 1.

L'auge du pont a été installée de nuit à l'aide d'une grue mobile (Figure 9). Ce travail a duré environ 3 heures, avec une précision d'installation de 3 mm.

Les coûts de réalisation des deux éléments préfabriqués du tablier, y compris le système de la mise à terre et le transport au chantier, sont environ 56'000 CHF.



Figure 7. Fabrication d'un élément du tablier en CFUP en usine



Figure 8. Clavetage de deux éléments préfabriqués du tablier par le CFUP coulé sur place



Figure 9. Pose du nouveau tablier pendant travaux de nuit

5. Conclusions

Le pont ferroviaire de l'Aiguillon a été construit avec succès en CFUP armé en 2021, confirmant le potentiel et la perspective d'application du matériau CFUP pour construire de nouveaux éléments structurels pour les projets d'infrastructure. Quelques discussions et conclusions sont tirées de ce projet "pilote" :

- Les épaisseurs de l'auge variaient de 60 mm à 240 mm, ce qui représente des épaisseurs relativement fines. L'utilisation du CFUP permet de réduire considérablement le poids des éléments du pont, par rapport aux éléments construits en béton armé.
- Les éléments minces permettent de respecter plus facilement l'espace disponible limité et les contraintes géométriques qui apparaissent souvent dans les projets de réhabilitation des ponts ferroviaires.
- La résistance élevée à la compression (plus de 150 MPa) et à la traction (plus de 10 MPa) permet de concevoir des éléments légers. Ceci est particulièrement avantageux en cas d'accès difficile et d'espace limité sur le site de construction.
- L'expérience en laboratoire montre que la résistance à la flexion observée des traverses correspond à la valeur analytique dans laquelle la résistance à la traction aux interfaces entre l'étape de bétonnage du CFUP n'est pas prise en compte.

- Le choix du CFUP permet également de garantir une très longue durabilité de l'ouvrage et de minimiser la maintenance prévue pour un pont rail et d'ainsi réduire l'impact environnemental comparé à un ouvrage conventionnel.

6. Remerciement

Les auteurs tiennent de remercier sincèrement les collègues de Gruner SA et de TRAVYS SA pour leur précieuse contribution à ce projet ambitieux. Nous aimerions également remercier l'excellent travail réalisé avec succès par les deux entreprises de construction : WALO SA et Element SA.

7. Références

- [1] TRINH, N.T., BERTOLA, N.J., GARCIA, E., *et al.*, “Short Span UHPFRC Railway Bridge in Switzerland-From Design to Implementation,” in IABSE Symposium Prague 2022, 2022, n. CONF, pp. 277–284. <https://doi.org/10.2749/prague.2022.0277>
- [2] 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.
- [3] 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>
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] OESTERLEE, C., *Structural response of reinforced UHPFRC and RC composite members*, EPFL, Lausanne, Switzerland, 2010.
- [8] “Technical Leaflet on UHPFRC: Materials, Design and Application,” p. 48, 2016.
- [9] GÉHIN, D., BRÜHWILER, E., BERTOLA, N.J., *et al.*, “Design and Construction of the "Chaumény" Footbridge in Posttensioned UHPFRC,” in IABSE Symposium Prague 2022, 2022, n. CONF, pp. 285–292. <https://doi.org/10.2749/prague.2022.0285>
- [10] 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>
- [11] BRÜHWILER, E., “UHPFRC is Ready to Revolutionize Existing and New Structures,” in IABSE Symposium Prague 2022, 2022, n. CONF, pp. 67–79.
- [12] DENARIÉ, E., MAÎTRE, M., CONCIATORI, D., *et al.*, “Air permeability measurements for the assessment of the in situ permeability of cover concrete,” presented at the International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Cape Town, South Africa, 2005, pp. 475–481.
- [13] 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.
- [14] 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>
- [15] BERTOLA, N., TRINH, N.T., GARCIA, E., *et al.*, *Experimental investigation of a keying joint cast in UHPFRC between precast UHPFRC bridge elements*, Materials and Structures, v. 55, n. 3, p. 86, Mar. 2022. <https://doi.org/10.1617/s11527-022-01931-x>