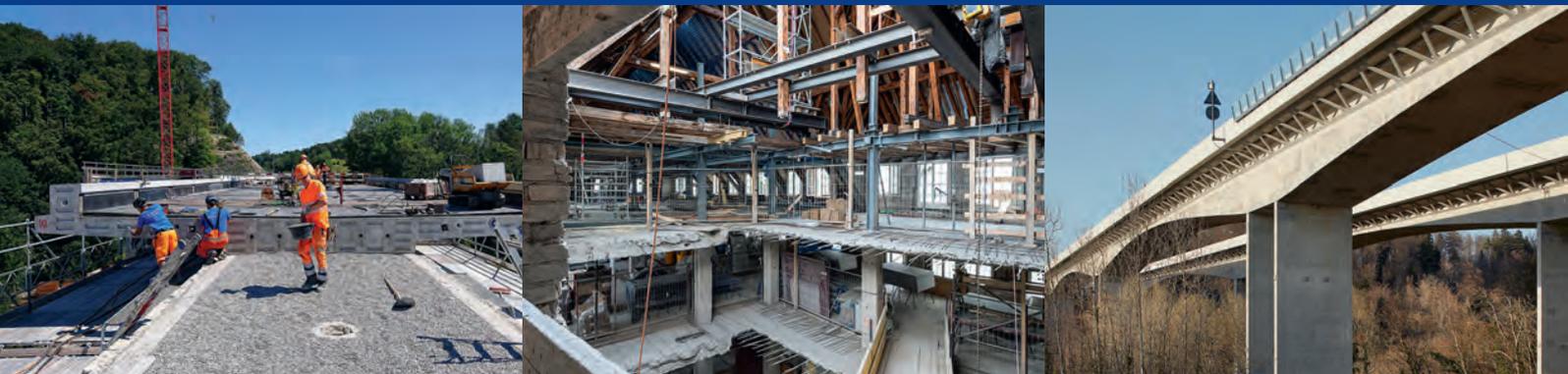


Bauwerkserhaltung

Conservation des ouvrages

Conservation of Structures



Modernisation des ponts sur la Paudèze

Modernisation of the bridges over the Paudèze

Philippe Menétrey, Lionel Moreillon

Introduction

La modernisation des ponts sur la Paudèze illustre l'importance de la problématique liée au maintien des infrastructures de communication et particulièrement celui de notre réseau autoroutier qui se dégrade avec le temps et les sollicitations.

Les ponts sur la Paudèze sont des ponts en béton précontraint construits en encorbellement dans les années 1970. Après plus de 40 ans de service, les ouvrages étaient en mauvais état. Il a fallu les renforcer, corriger leur géométrie et les remettre en état. La taille des ouvrages, les dégradations observées ainsi que la contrainte de maintenir le trafic autoroutier avec deux voies dans chaque sens durant les travaux ont rendu nécessaire l'utilisation de techniques de construction particulières. De plus, ces ouvrages étant particulièrement visibles, il s'est agi de développer un projet en considérant leur valeur patrimoniale, donc d'appréhender le projet comme une modernisation d'ouvrage.

Introduction

The modernisation of the bridges over the Paudèze illustrates the importance of the problem of maintaining communication infrastructures and particularly that of our motorway network, which is deteriorating with time and stress.

The bridges over the Paudèze are prestressed concrete bridges built in the 1970s. After more than 40 years of service, the structures were in poor condition. They had to be reinforced, their geometry corrected and had to be rehabilitated. The size of the structures, the deterioration observed and the need to maintain two lanes of motorway traffic in each direction during the works made it necessary to use special construction techniques. Furthermore, as these structures are particularly visible, the project had to be developed taking into account their heritage value, and therefore the project had to be seen as a modernisation of the structure.

État de l'ouvrage

Les ponts sur la Paudèze sont deux ponts indépendants conçus par le bureau Piguët ingénieurs conseils [1]. Le pont Montagne a une longueur de 404 m et le pont Lac une longueur de 422 m. Chaque pont comprend 5 travées d'une portée maximale de 104 m avec un tablier en caisson à hauteur variable. Les ponts ont été construits par encorbellements successifs avec des câbles de précontrainte d'encorbellement disposés à chaque étape et des câbles de continuité disposés au centre des travées. Les piles du versant droit de la Paudèze se trouvent dans une zone de glissements profonds et de failles qui ont nécessité la mise en place de tirants d'ancrage lors de leur construction.

Dès leur mise en service en 1974, il a été observé que les flèches du tablier augmentaient continuellement. Ces flèches ont été mesurées à mi-travée du pont Montagne seulement à partir de 1988, soit après 18 années d'exploitation, à l'aide de pots hydrostatiques, tel que décrit en [5].

Des analyses numériques en prenant en compte le comportement viscoélastique du béton selon l'Eurocode 2 ont été effectuées. Les flèches de l'essai de charge [2] ont été reproduites, mais le comportement du pont à long terme n'a pas pu être modélisé, comme décrit en [7].

Les inspections et les investigations réalisées ont mis en évidence des défauts d'étanchéité provoquant l'éclatement du béton, des armatures corrodées aux extrémités de la dalle de roulement avec des chutes de béton d'enrobage, des fissures longitudinales entre la dalle inférieure et les âmes situées au bord des goussets, des fissures dans la dalle inférieure et des fissures inclinées dans les âmes,

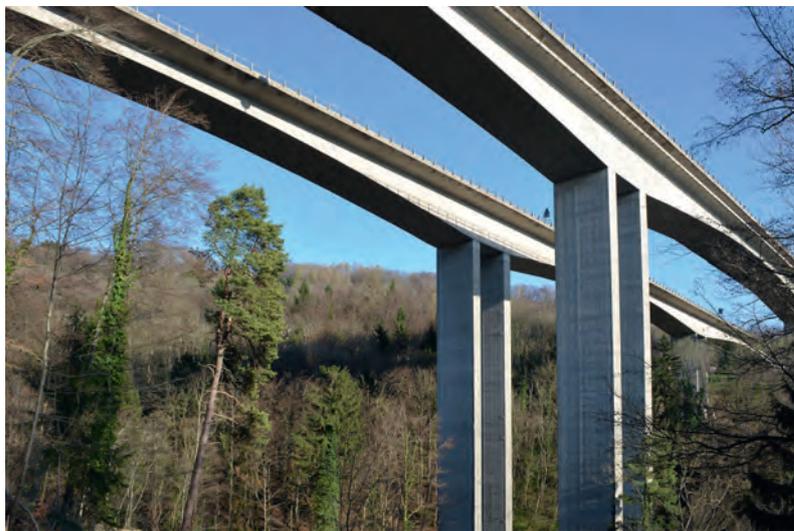


Fig.1
Vue des ponts avant travaux.
View of the bridges before the works.

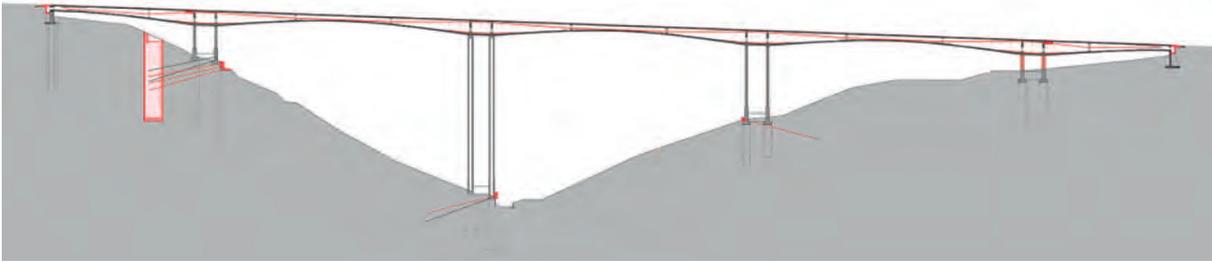


Fig. 2
Coupe longitudinale des interventions (rouge) sur le pont Lac.
Longitudinal section of the interventions (red) on the lake side bridge.

Condition of the structure

The bridges over the Paudèze are two independent bridges designed by Piguet ingénieurs conseils [1]. The bridge on the mountain side is 404 m long and the one on the lake side is 422 m long. Each bridge has 5 spans with a maximum span of 104 m and a variable-height box-section deck. The bridges were constructed by successive cantilevering with cantilever prestressing cables placed at each stage and continuity cables placed in the centre of the spans. The piers on the right-hand side of the Paudèze valley are located in a zone of deep landslides and faults, which required the installation of tie rods during their construction.

As soon as they were put into service in 1974, it was observed that the deflections of the deck were continuously increasing. These deflections were measured at mid-span of the mountain side bridge only from 1988 onwards, i.e. after 18 years of operation, using hydrostatic pots, as described in [5].

Numerical analyses taking into account the viscoelastic behaviour of concrete according to Eurocode 2 were performed. The deflections of the load test [2] were reproduced, but the long-term behaviour of the bridge could not be modelled, as described in [7].

The inspections and investigations carried out revealed waterproofing defects causing concrete spalling, corroded reinforcement at the ends of the deck slab with concrete cover falling off, longitudinal cracks between the bot-

tom slab and the webs at the edge of the gussets, cracks in the bottom slab and inclined cracks in the webs behind the prestressing bosses. In addition, tie rod failures at the foundation level were observed.

Projet d'intervention

Les ponts ont été remis en état avec une adaptation de la chaussée de 11,90 m à 12,70 m afin de permettre le passage de 4 voies de circulation sur un seul pont, le remplacement des glissières par un parapet de béton armé et l'ajout de parois anti-bruit. De plus, des corrections d'alignement avec les portails de tunnels élargis pour de futures exploitations étaient nécessaires.

Un projet de remise en état de pont est une tâche de conception qu'il s'agit de développer autour d'une réflexion globale. Ici, comme les ouvrages sont particulièrement visibles, il s'est agi de développer un projet en considérant leur valeur patrimoniale, donc d'appréhender le projet comme une modernisation d'ouvrage. Dans ce sens, un concept – un ensemble d'idées qui contient le principe du projet – est établi au début de la phase de conception, de sorte qu'il sert de guide durant les phases de projet et de réalisation comme décrit en [8]. Le concept développé est de renforcer chaque tablier avec des béquilles qui appuient la dalle de roulement de part et d'autre, en formant une structure élégante et rythmée et en intégrant les renforts structurels et les techniques à l'intérieur des caissons.

Ainsi, le renforcement du tablier des ponts a été réalisé avec des

tom slab and the webs at the edge of the gussets, cracks in the bottom slab and inclined cracks in the webs behind the prestressing bosses. In addition, tie rod failures at the foundation level were observed.

Intervention project

The bridges were rehabilitated with an adaptation of the roadway from 11.90 m to 12.70 m in order to allow the passage of 4 lanes of traffic on a single bridge, the replacement of the guardrails by a reinforced concrete parapet and the addition of noise barriers. In addition, alignment corrections with widened tunnel portals for future operations were required. A bridge rehabilitation project is a design task that has to be developed around a holistic approach. Since the structures are particularly visible, the project had to be developed with a view to their heritage value, i.e. the project had to be seen as a modernisation of the structure. In this sense, a concept – a set of ideas that contains the principle of the project – is established at the beginning of the design phase, so that it serves as a guide during the project and implementation phases as described in [8]. The concept developed is to reinforce each deck with struts that support the deck slab on both sides, forming an elegant and rhythmic structure and integrating the structural reinforcements and techniques inside the boxes.

Thus, the reinforcement of the bridge deck was carried out with ultra high-performance fibre-rein-

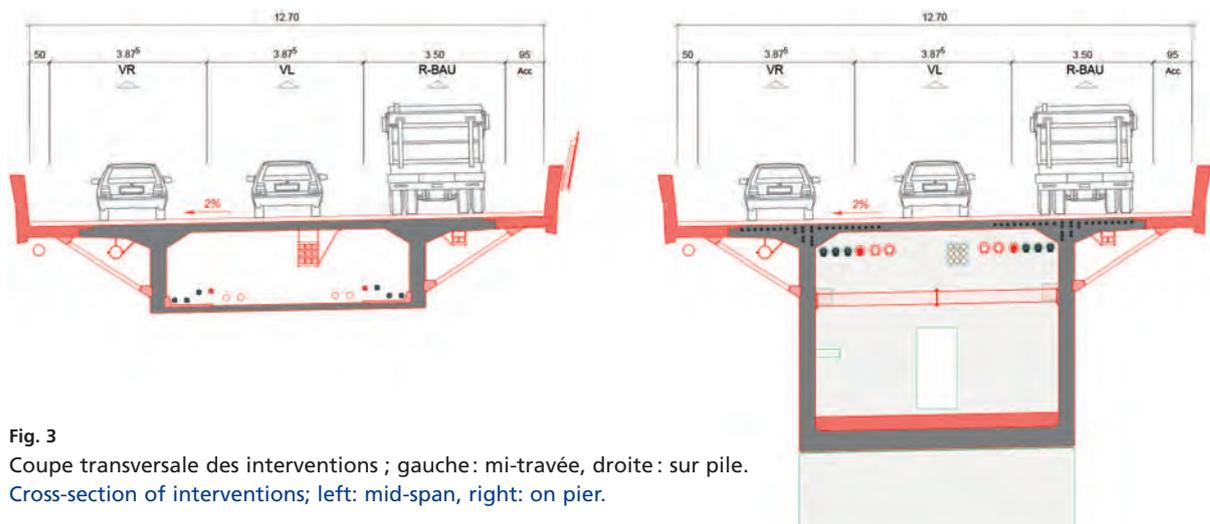


Fig. 3
Coupe transversale des interventions ; gauche : mi-travée, droite : sur pile.
Cross-section of interventions; left: mid-span, right: on pier.

béquilles en béton fibré ultra-performant (BFUP). L'appui créé par les béquilles réduit le moment négatif dans la dalle et donc permet de conserver l'armature supérieure existante. Les béquilles préfabriquées sont arrangées selon une disposition en treillis de type Warren pour aussi répartir

forced concrete (UHPFRC) struts. The support created by the struts reduces the negative moment in the slab and therefore allows the existing upper reinforcement to be retained. The prefabricated supports are arranged in a Warren-type lattice to distribute the forces longitudinally. The struts are made of UHPFRC, in order to keep the whole bridge in cementitious material.

Both structures were rehabilitated and reinforced in their entirety as illustrated for the lake side bridge in Figure 2 with the construction of 30 m deep stabilisation and drainage shafts in the ground to reduce landslide thrusts on the piers, the replacement of tie rods in the pier foundations, the rehabilitation of the concrete and reinforcement of the deck and piers, the demolition of the degraded deck ends and the reconstruction of the reinforced deck with UHPFRC struts, the replacement of the existing guardrails with reinforced concrete parapets, the reconstruction of the upper part of the abutments, the replacement of the waterproofing and the deck covering as well as the replacement of the noise barriers and equipment (expansion joints, pipes, water drainage system, signalling).

In addition, in order to compensate for the long-term deflections of the deck and the increased weight of the struts, additional prestressing cables were laid out

les efforts longitudinalement. Les béquilles sont réalisées en BFUP, afin de conserver pour l'ensemble du pont un matériel cimentaire.

Les deux ouvrages ont été remis en état et renforcés dans leur entier comme illustré pour le pont Lac sur la Figure 2 avec la réalisation de puits de 30 m de profondeur de stabilisation et de drainage dans le terrain pour réduire les poussées d'un glissement de terrain sur les piles, le remplacement de tirants d'ancrages dans les fondations des piles, la remise en état du béton et des armatures du tablier et des piles, la démolition des extrémités du tablier dégradées et la reconstruction du tablier renforcé avec des béquilles en BFUP, le remplacement des bordures existantes par des parapets en béton armé, la reconstruction de la partie supérieure des culées, le remplacement de l'étanchéité et du revêtement du tablier ainsi que le remplacement des parois anti-bruit et des équipements (joints de chaussée, conduites, système d'évacuation des eaux, signalisation).

En plus, afin de compenser les flèches à long terme du tablier et l'augmentation de poids liée aux béquilles, des câbles de précontrainte additionnelle ont été disposés à l'intérieur des caissons selon un tracé trapézoïdal. Ils ont été mis en tension après que la construction des extrémités de la dalle.

Références/References

- [1] Ponts sur la Paudèze, Plans et note de calcul ; Piguët Ingénieurs-Conseils, 1974.
- [2] Pont sur la Paudèze amont – Essai de charges ; EPFL, 1974.
- [3] Menétrey Ph. et Willam K.J., A triaxial failure criterion for concrete and its generalization. *ACI Structural Journal*, 92(2):311-318, 1995.
- [4] Menétrey Ph. et Brühwiler E., Design and experimental Investigation of the joints of inclined struts for the widening of bridge deck slabs, *Structural Engineering International*, 4, 2008.
- [5] Burdet O. et Guignet G., Ponts sur la Paudèze amont et aval : Mesures des flèches à long terme par nivellement hydrostatique – Rapport annuel, EPFL, 2013.
- [6] ATENA version 5.4. Cervenka Consulting, 2014.
- [7] Menétrey Ph., Pires F. et Moreillon L., Long term deflections of Paudèze Bridges, *IABSE Symposium – Engineering the Future*, pp.1895-1902, Vancouver, 2017.
- [8] Menétrey Ph., The Integrated Design Method for Bridges, *Structural Engineering International*, 28:3, 2018.
- [9] Menétrey Ph., Moreillon L. et Bastien-Masse M., Strengthening Paudèze bridges decks using UHPFRC struts, *IABSE Congress*, New York, 2019.
- [10] Moreillon L., Menétrey Ph. et Bastien-Masse M., Renforcement de tablier de ponts à l'aide de béquilles en BFUP, 3e journée d'étude sur le BFUP, Fribourg 2019.

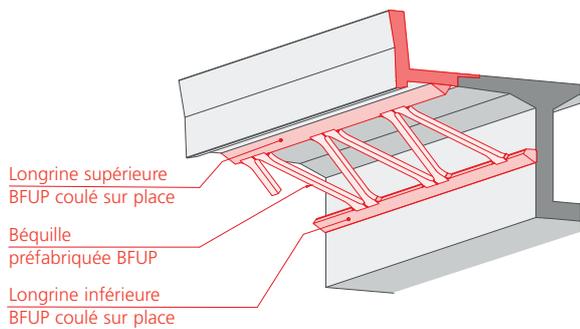


Fig. 4
 Vue 3D d'une partie du caisson renforcé avec les béquilles.
 3D view of a part of the reinforced box with struts (upper beam, struts, lower beam, all elements in UHPFRC).

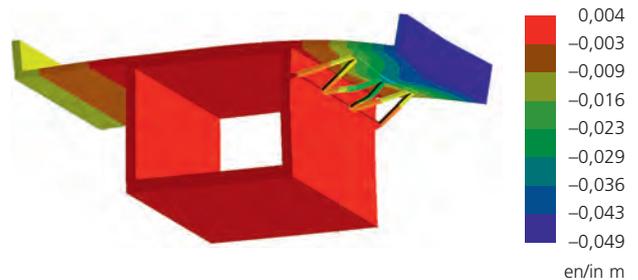


Fig. 5
 Déformée du modèle d'éléments finis d'un tronçon de caisson (modèle ATENA).
 Deformation of the finite element model of a box segment (ATENA model).

inside the boxes in a trapezoidal pattern. This makes the cables accessible for maintenance purposes.

The bridge box was reinforced with sloped UHPFRC struts between the box and the slab, as shown in Figure 3.

The struts are prefabricated and, thanks to the use of UHPFRC, the dimensions are reduced to a rectangular section of 300 x 110 mm, limiting their weight. The shape of the struts and their connection with the slab and the box are worked out to offer a unitary and monolithic image of the box, like a perforated reinforcing veil, as seen in Figure 4.

The struts are attached to the web by means of a cast-in-place UHPFRC beam. It is continuous and allows the introduction of forces by compression and friction, as described in [9]. This technique makes it possible to attach the struts to the box without piercing the webs and thus to limit the risks of damage to the prestressed cantilever cables used during construction.

The upper connection of the struts to the deck slab is made with reinforcement in the struts, which are connected to the deck slab by means of an upper beam during concreting of the latter.

The struts bend the webs in the transverse direction, which requires reinforcement in the high areas. This is done with steel stays through the box. In order for the

caisson est renforcé avec des béquilles en BFUP inclinées entre le caisson et la dalle, comme illustré à la Figure 3.

Les béquilles sont préfabriquées et, grâce à l'utilisation du BFUP, les dimensions sont réduites à une section rectangulaire de 300 x 110 mm, limitant leur poids. La forme des béquilles et leur connexion avec la dalle et le caisson sont travaillées afin d'offrir une image unitaire et monolithique du caisson, comme un voile perforé de renfort, une dentelle, tel que visible à la Figure 4.

L'accroche des béquilles sur l'âme est réalisée au moyen d'une longrine en BFUP coulée en place. Elle est continue et elle permet d'introduire les efforts par compression et frottement, tel que décrit en [9]. Cette technique permet de fixer les béquilles sur le caisson sans percement des âmes et donc de limiter les risques d'endommagement des câbles de précontrainte d'encorbellement utilisés lors de la construction.

La liaison supérieure des béquilles avec la dalle de roulement est réalisée avec des armatures en attente disposées dans les béquilles qui viennent se lier par l'intermédiaire d'une longrine supérieure avec la dalle de roulement lors du bétonnage de cette dernière.

Les béquilles fléchissent les âmes dans le sens transversal, ce qui nécessite un renforcement dans les zones de grande hauteur. Il est

stays to take up the forces and to be wedged, they will be compressed by means of flat jacks.

Tests and simulation of the behaviour of the struts

The first thoughts on the reinforcement of a bridge deck with the help of struts began with connection tests carried out by Menétrey and Brühwiler [4]. Then, in the context of the bridges over the Paudèze, a new test campaign was carried out as described in [9] and [10]. The first two series of tests concerned the frictional connections between the prefabricated struts and the bridge box, and a third series of tests concerned the buckling of the struts under compression and bending loads. Then, the behaviour of the struts in the complete deck structure is analysed on a deck segment with a truss consisting of 6 struts connected by two stringers. The deck is fully modelled with volume elements (brick) and a non-linear behaviour law for the UHPFRC according to the Menétrey and

Maître d'ouvrage/Owner
 OFROU, Estavayer-le-Lac
Ingénieurs civils/Civil engineers
 (2020)
 INGPHI SA dans le cadre du groupement LIG-A (Lombardi, INGPHI, IJA, GVH, GGT)
Ingénieur civil/Civil engineer (1970)
 Piguët Ingénieurs Conseils
Entreprises de construction/
Construction companies
 Frutiger Vaud et Jean Weibel

réalisé avec des butons en acier au travers du caisson. Afin que les butons reprennent les efforts et soient calés, ceux-ci sont mis en compression au moyen de vérins plats.

Essais et simulation du comportement des béquilles

Les premières réflexions sur le renforcement d'un tablier de pont à l'aide de béquilles ont débuté avec des essais de connexions effectués par Menétrey et Brühwiler [4]. Puis dans le cadre des ponts sur la Paudèze, une nouvelle campagne d'essais a été réalisée comme décrit en [9] et [10]. Deux premières séries concernent les connexions par frottement entre la béquille préfabriquée et le caisson du pont et une troisième série d'essais concerne le flambage des béquilles sollicitées en compression et en flexion. Puis, le comportement des béquilles dans la structure complète du tablier est analysé sur un tronçon de tablier avec un treillis constitué de 6 béquilles reliées par deux longrines. Le tablier est entièrement modélisé avec des éléments volumiques (brick) et une loi de comportement non linéaire pour le BFUP selon le modèle Menétrey et Willam [3] comme décrit en [9] et [10].

Le modèle numérique d'un tronçon du tablier a permis de montrer que le flambement des béquilles se produit pour un effort de compression nettement plus élevé que celui mesuré dans les essais. En fait, le modèle du tronçon du tablier a intégré l'effet d'encastrement partiel des béquilles dans le tablier et dans le caisson, ce que l'essai, réalisé sans encastrement, ne permettait pas. Le modèle numérique a ensuite été utilisé pour fixer les tolérances de construction afin d'éviter tout problème de flambage.

Exécution

Les travaux de remise en état et de renforcement de chaque tablier ont été réalisés sur 3 années; une première année pour les infrastructures et les culées, une deuxième année pour les travaux sur les

Willam model [3] as described in [9] and [10].

The numerical model of a segment of the deck showed that the buckling of the struts occurs at a much higher compressive stress than that measured in the tests. In fact, the model of the deck segment incorporated the effect of partial embedding of the struts in the deck and in the box, which was not possible in the test without embedding. The numerical model was then used to set the construction tolerances to avoid any buckling problems.

Implementation

The rehabilitation and reinforcement work on each bridge deck was carried out over three years; a first year for the infrastructure and abutments, a second year for the work on the two bridges on the upstream side and a third year for the two bridges on the downstream side, always maintaining two lanes of traffic in each direction during the work. For the work on the abutments, the use of two flyovers was necessary to demolish and rebuild the upper part of the abutments.

The severely degraded heads of the cantilevers were sawn off and hydrodemolished. A hanger was developed for concreting the deck. It served as formwork for the slab but also as a support for the prefabricated struts. The lower UHPFRC beam was concreted first, followed by the upper beam, then the reinforced concrete slab and finally the parapets.

Conclusion

The modernisation consisted of working with the existing structure, inspecting, testing, instrumenting and analysing it to plan its rehabilitation, applying new technologies. The concept developed is to reinforce each deck with struts that support the deck slab on both sides, forming an elegant and rhythmic structure and integrating the structural reinforcements and techniques inside the boxes.

The reinforcement of the deck with UHPFRC struts was develop-

Le projet en chiffres

Longueur des ponts : 404 m et 422 m
Portée maximale : 104 m
Coût des travaux : 35 millions CHF
Années du projet : 2012–2017 ; réalisation : 2017–2020
Nombre de béquilles en BFUP : 816 pcs
Volume de BFUP : 600 m³
Volume de béton : 2500 m³
Longueur des câbles de précontrainte : 4200 m
Surface étanchéité : 11 000 m²

The project in figures

Length of the bridges: 404 m and 422 m
Maximum span: 104 m
Construction cost: CHF 35 million
Project years: 2012–2017; completion: 2017–2020
Number of UHPFRC supports: 816 pcs
Volume of UHPFRC: 600 m³
Volume of concrete: 2500 m³
Length of prestressed cables: 4200 m
Waterproofing surface: 11,000 m²

deux ponts du côté amont et une troisième année sur les deux ponts du côté aval, toujours en maintenant deux voies de circulation dans chaque sens durant le chantier. Pour les travaux sur les culées, l'utilisation de deux flyovers a été nécessaire afin de démolir et reconstruire la partie supérieure des culées.

Les têtes des porte-à-faux fortement dégradées ont été sciées puis hydrodémolies. Un cintre a été développé pour le bétonnage du tablier. Il servait de coffrage pour la dalle mais également de support pour les béquilles préfabriquées. La longrine inférieure en BFUP a été bétonnée en premier lieu, suivie par la longrine supérieure, puis la dalle en béton armé et finalement les parapets.

Conclusion

La modernisation a consisté à travailler avec l'ouvrage existant, à l'inspecter, le tester, l'instrumenter et l'analyser pour planifier sa remise en état, en appliquant des nouvelles technologies. Le concept développé est de renforcer chaque tablier avec des béquilles qui appuient la dalle de roulement de part et d'autre, en formant une structure élégante et rythmée et en intégrant les renforts structurels et les techniques à l'intérieur des caissons.



Fig. 6
 Vue des ponts modernisés.
 View of the modernised bridges.

ed through several laboratory tests on connections and buckling. By correlating the tests with numerical simulations, it was possible to limit the risk of buckling by considering the effect of the embedding of the struts and setting the permissible imperfections. This reinforcement of a concrete deck with UHPFRC struts is an innovation, a world first: a new application for UHPFRC, a new minimally intrusive reinforcement technique, a fine example of the modernisation of our structures and infrastructures.

Le renforcement du tablier avec des béquilles en BFUP a été développé à l'aide de plusieurs essais en laboratoire au niveau des connexions et du flambage. Grâce à une corrélation avec des simulations numériques, les essais ont permis de limiter le risque de flambage en considérant l'effet d'encastrement des béquilles et fixant les imperfections admissibles.

Ce renforcement de tablier en béton avec des béquilles en BFUP est une innovation, une première mondiale: une nouvelle application pour le BFUP, une nouvelle technique de renforcement peu intrusive, un bel exemple de la modernisation de nos ouvrages et de nos infrastructures.

Auteurs/Authors
Philippe Menétréy
 Dr ès techn., MSc, ing. dipl. EPFL
 phm@ingphi.ch

Lionel Moreillon
 Dr Université Paris Est
 lionel.moreillon@ingphi.ch

INGPHI SA
 Concepteurs d'ouvrages d'art
 CH-1003 Lausanne