

Pont de Zollhaus

Autor(en): **Menétrey, Philippe / Phytton, Jean-François**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **125 (1999)**

Heft 6

PDF erstellt am: **21.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-79618>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Pont de Zollhaus

Par Ph. Menétrey,
Dr. sc. tech.
Emch + Berger SA
Gartenstrasse 1,
3001 Berne, et
J.-F. Python
ing. dipl. ETSISTE
Département des
Ponts et Chaussées
Rue des Chanoines 17,
1700 Fribourg

Etudes et réalisation

Généralités

Centre touristique important du canton de Fribourg, la région du Lac Noir est reliée au chef-lieu par une route cantonale qui absorbe un trafic considérable lors des périodes de vacances. Le long de cet axe, la route franchit la Singine chaude – un cours d'eau qui se mue en torrent de montagne en période de crues – au lieu dit Zollhaus sur le territoire de la commune de Planfayon. Construit au début du siècle et figurant parmi les premiers ouvrages en béton armé du canton, le pont de Zollhaus présentait un état dégradé accusant huitante années de service. De plus, il avait été jeté perpendiculairement à l'axe de la rivière afin d'en réduire la portée, si

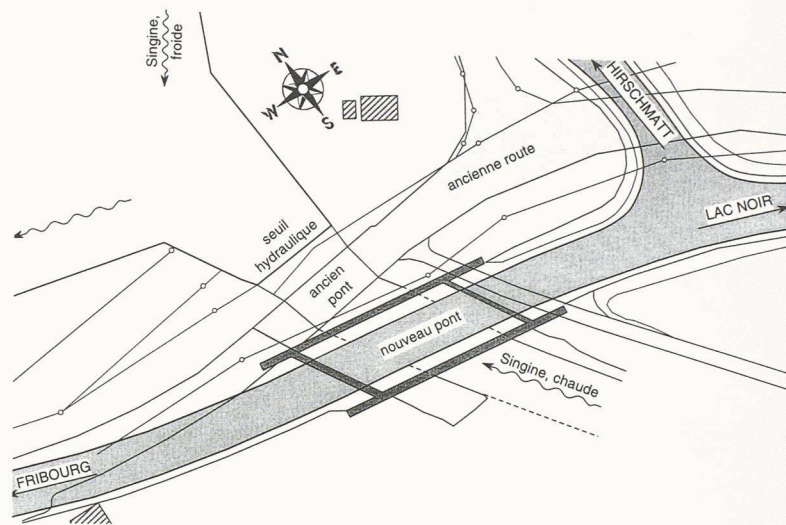


Fig. 1. - Vue d'ensemble du projet d'aménagement

bien que la route décrivait un virage serré à chaque extrémité du pont, limitant d'autant la vitesse de circulation. Enfin, le faible gabarit d'espace libre sous l'ouvrage n'était pas en mesure d'accommo-

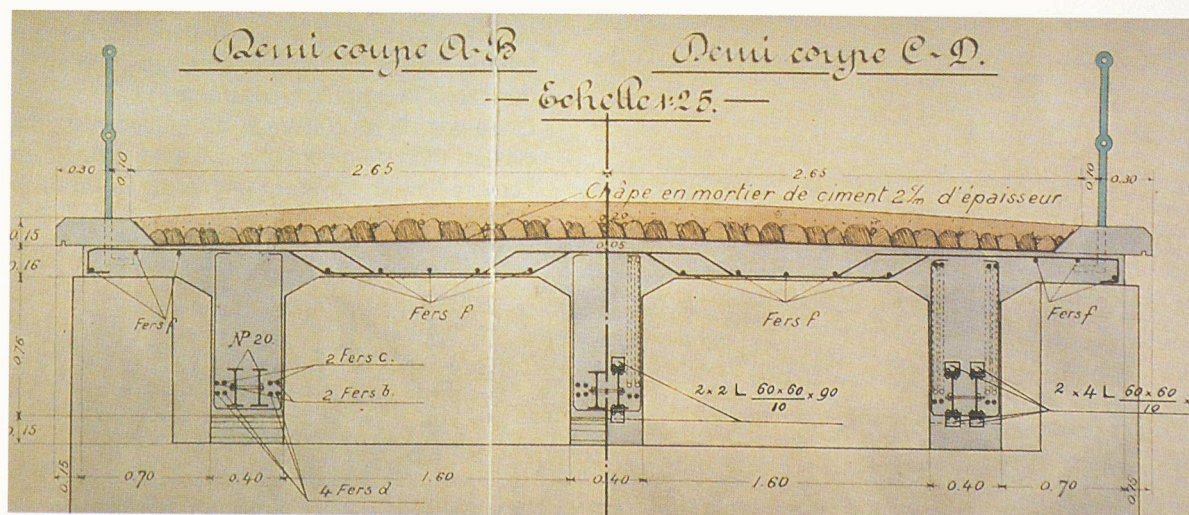
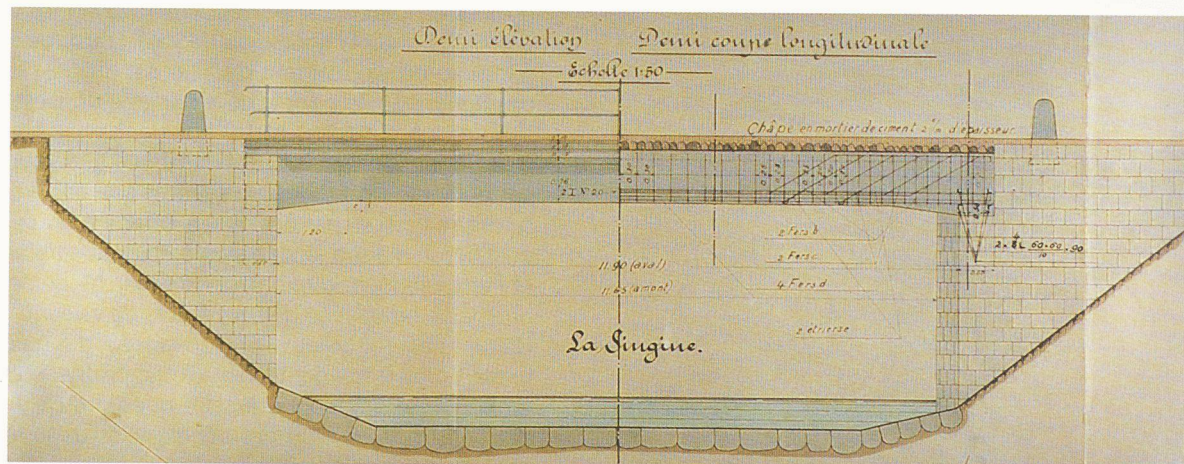


Fig. 2. - Elévation et coupe du pont datant de 1917

der un débit de crue centennale de la Singine ($Q_{100}=130 \text{ m}^3/\text{s}$) sans risque d'inondation. En 1995, le maître de l'ouvrage a donc pris la décision de remplacer ce pont par une nouvelle structure.

La géométrie du nouveau tracé routier, illustrée en plan à la figure 1, est caractérisée par une vitesse de projet de 70 km/h, une largeur de base de la chaussée de 6 m et deux accotements de 1 m chacun augmentés à 1,65 m sur le pont. La route cantonale est en outre déplacée en amont de l'ancien tracé, afin d'améliorer celui-ci et d'assurer une meilleure visibilité au carrefour de la route vers Hirschmatt.

Pont datant de 1917

Franchissant la Singine avec une portée de 11,65 / 11,90 m pour une largeur de 6,10 m (fig. 2), l'ancien pont de Zollhaus avait été conçu par l'ingénieur cantonal de l'époque, M. Lehmann, et répondait aux caractéristiques suivantes : dimensionné pour une charge de 18 t avec des charges exceptionnelles de 30 t, le tablier – comportant une dalle de seulement 16 cm d'épaisseur et trois sommiers – avait été réalisé en béton CP 300 armé de fers ronds en acier doux, tandis que les INP 200 qui soutenaient le platelage du pont précédent avaient été réutilisés comme armatures inférieures dans les trois sommiers supportant la dalle de roulement. Une chape en mortier de ciment de 2 cm d'épaisseur faisait office d'étanchéité et un macadam traditionnel de 20 cm, avec un profil en toit, servait de revêtement. Quant aux culées de l'ouvrage, constituées de moellons empilés et cimentés, elles réutilisaient partiellement les culées du pont antérieur.

Le Conseil d'Etat de l'époque avait adjugé la construction de l'ouvrage à l'entreprise Fischer-Reydellet de Fribourg pour un montant de 5975 francs. La durée des travaux était limitée à huit semaines et en cas de non achèvement dans

le délai fixé, l'entrepreneur pouvait être astreint au paiement d'une pénalité équivalant au 5 % du montant de son adjudication par semaine de retard. Pendant la durée des travaux, le trafic fut dévié sur un pont provisoire en bois en amont de l'ouvrage à transformer, qui fut achevé à la fin du mois d'août 1917.

Bien que le pont de Zollhaus ait compté parmi les premiers ouvrages en béton armé du canton, un contrôle de la qualité du béton avait déjà été appliqué à sa réalisation. Avant l'ouverture du chantier, l'entreprise a en effet dû prouver que le gravier était exempt de toute impureté et que le ciment correspondait aux normes suisses. De plus, des cubes ont été prélevés lors du bétonnage pour être testés au Laboratoire fédéral d'essais à Zurich. Enfin, les étapes de bétonnage avaient été planifiées selon une mise en place par couches de 10 cm au maximum, qui étaient ensuite damées à la main.

Durant ses huitante années de service, le pont a subi divers travaux d'entretien, l'intervention la plus importante ayant eu lieu à la fin des années soixante, lorsque le macadam a été remplacé par une nouvelle chape de 6 cm et par un revêtement hydrocarboné de 5 cm. Cette chape avait été disposée directement sur la dalle de roulement en béton, sans étanchéité. L'inspection spéciale, complétée d'essais, qui a été effectuée en 1988 a révélé que :

- 1) la résistance à la compression du béton sur cube variait de 24 à 30 N/mm² pour la dalle de roulement et les sommiers, et s'élevait jusqu'à 49 N/mm² pour les porte-à-faux ;
- 2) la densité du béton, comprise entre 2250 et 2370 kg/m³, était faible ;
- 3) la profondeur de carbonatation atteignant 30 à 40 mm dans le béton du tablier s'avérait importante ;
- 4) le taux de chlorures sur la dalle de roulement révélait des pour-

centages élevés se montant à 1,3 % du poids du ciment dans les 16 premiers mm et à 0,8 % pour une profondeur de 20 à 40 mm ; quant aux autres parties du pont, elles présentaient un taux de chlorures supérieur à 0,4 % dans les premiers 16 mm ;

- 5) de nombreuses armatures étaient affleurantes et rouillées ;
- 6) certaines parties inférieures de la dalle de roulement étaient recouvertes d'importantes efflorescences blanches légèrement humides.

Autrement dit, les dégradations du tablier du pont étaient telles qu'une reconstruction s'imposait.

Projet du nouveau pont

L'étude du projet de reconstruction du pont de Zollhaus a débuté en 1995 par l'attribution du mandat d'ingénieur. A la suite de l'appel d'offres lancé par le Département des Ponts et Chaussées selon la procédure sélective pour les études et la direction des travaux du futur ouvrage, quatre bureaux d'ingénieurs parmi les dix-sept ayant déposé un dossier de préqualification ont été invités à soumettre une offre de prestations et d'honoraires. Les quatre offres préqualifiées ont ensuite été ouvertes publiquement et chacune a fait l'objet d'une analyse et d'une évaluation selon le système de qualité « Choix du mandataire, critères d'adjudication ». A l'issue de cette procédure appliquée pour la première fois depuis l'introduction du système qualité élaboré en 1995, le Département des Ponts et Chaussées a retenu l'offre qui s'est avérée la plus avantageuse, compte tenu des impératifs aussi bien qualitatifs qu'économiques. L'implantation du nouveau pont, quelque 20 m en amont de l'ancien (fig.1), a été fixée par le Département des Ponts et Chaussées à l'issue d'études préliminaires effectuées en 1991. Outre l'amélioration qu'il apporte au tracé routier, ce déplacement a libéré le

chantier de l'emprise de l'ancien pont, tandis que le trafic continuait à y être assuré durant les travaux. Enfin, l'emplacement du nouvel ouvrage l'éloigne du confluent des Singine chaude et froide, qui constitue non seulement une zone géologique plus sensible (zone alluviale), mais encore un milieu protégé. Son implantation est caractérisée par un biais important, puisqu'il atteint presque 52°, et il est intéressant de noter que selon la définition proposée par Carbajal et Walther [1]¹ une telle dalle est à la limite d'une dalle très biaise. Cette caractéristique aurait pu être réduite, voir éliminée, en rallongeant le pont derrière les culées, mais cela aurait abouti à un ouvrage d'une portée de plus de 40 m, difficilement intégrable dans le site et entraînant de substantiels coûts supplémentaires.

La première variante de projet envisagée portait sur un pont en béton d'une hauteur statique de un mètre. Mais outre son conventionalisme, un tel ouvrage n'aurait pas répondu au désir du maître de l'ouvrage de favoriser l'utilisation du bois. La deuxième variante considérée, soit la réalisation d'un pont entièrement en bois, s'est heurtée à la volonté du maître de l'ouvrage, qui a exigé que les porteurs en bois situés au-dessus du tablier du pont soient repoussés à l'extérieur de l'accotement afin de limiter les risques d'impacts de véhicules. Or, alliée à la flexion et à la torsion induites par le biais, l'importante portée transversale (près de 12 m) résultant de cette exigence aurait appelé des porteurs en bois très massifs et débouché sur un ouvrage peu économique. Ces considérations ont donc amené à envisager une solution combinant le bois et le béton. Après plusieurs développements, on a opté pour un tablier en béton armé de 50 cm d'épaisseur flanqué de deux arcs en bois lamellé-collé qui y sont reliés par des sus-

pentés en acier. Encadrant le pont et reposant sur des bossages en béton solidaires liés au tablier, les arcs sont stabilisés aux bossages et à l'aide de suspentes inclinées dans le plan transversal. Une esquisse du concept développé est présentée à la figure 3. La vue latérale de la figure 4 donne les dimensions principales de l'ouvrage, calculé selon les normes SIA, et la figure 5 en présente deux coupes transversales, l'une au droit du bossage et l'autre au milieu de l'arc. La disposition des suspentes dans le plan transversal, initialement prévue en V a été modifiée pour une solution en A, qui augmente la stabilité transversale, comme détaillé au chapitre suivant (« Stabilité de l'ouvrage »). La structure fait interagir divers éléments (dalle, arcs et suspentes) composés de différents matériaux (béton, bois et acier) de la manière suivante :

- 1) Le tablier en béton supporte les charges de trafic et diffuse les charges concentrées. De plus, il reprend la flexion et la torsion résultant du biais.
- 2) Les arcs en bois agissent comme des porteurs longitudinaux sollicitant la dalle transversalement, ce qui a permis d'en réduire la portée de 25 à 12 m en activant la portée transversale. Ils compriment en outre les angles de la dalle de roulement (au droit des bossages), ce qui évite le soulèvement des angles aigus (un phénomène caractéristique du comportement des dalles biaises, comme le montrent Timoshenko et Woinowsky-Krieger [7]).
- 3) Les suspentes en acier transmettent les charges de la dalle de roulement aux arcs de bois, tout en assurant la stabilité de ces derniers par leur disposition en A dans le plan transversal (voir le chapitre sur la stabilité).

Outre qu'elle s'avère donc bénéfique du point de vue mécanique, cette combinaison d'éléments

structuraux se défend aussi très bien face à une solution traditionnelle en béton ou en bois sur le plan économique, si l'on considère les points ci-après.

- 1) La hauteur statique du pont a pu être réduite de 1 m (pour la variante traditionnelle) à 50 cm, ce qui représente une diminution notable de la quantité de béton et permet une réduction directe des coûts de l'ouvrage. De même, elle entraîne une diminution du poids propre du pont autorisant une réduction des dimensions des fondations. Enfin, cet affinement du tablier permet d'implanter la route à un niveau légèrement plus bas tout en respectant le gabarit d'espace libre au dessus de la rivière, ce qui se traduit encore par une diminution des coûts du remblayage derrière les culées.
- 2) Le choix d'un tablier en béton armé supprime le recours aux grosses poutres de bois qui auraient été indispensables à un ouvrage entièrement réalisé dans cette matière. Outre leur coût propre, celles-ci auraient encore nécessité le relèvement du profil routier afin de satisfaire le gabarit d'espace libre de la rivière, entraînant du même coup une nette augmentation des coûts de remblayage derrière les culées.
- 3) La disposition inclinée des suspentes aboutit à une auto-stabilité des arcs de bois en l'absence de toute structure les reliant et recouvrant le pont (contreventement), si bien que les coûts d'une telle structure de liaison et de stabilisation se trouvent supprimés.

Le coût de la variante développée s'est finalement révélé comparable à celui d'un pont traditionnel en béton, tout en répondant aux désirs particuliers émis par le maître de l'ouvrage.

Le sol de fondation est caractérisé par un remblai dans la partie supérieure reposant sur des alluvions

¹Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article

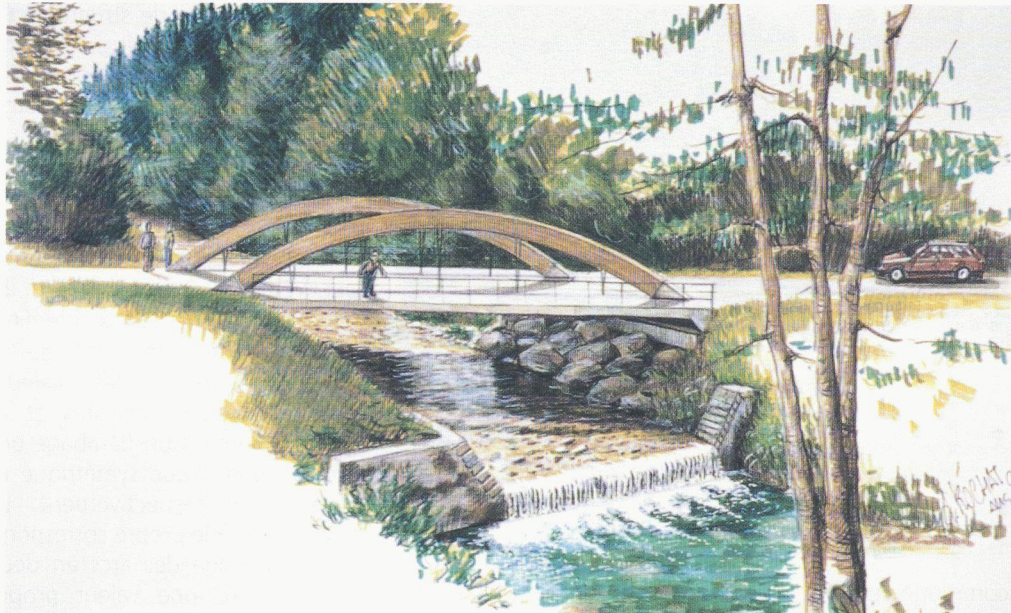


Fig. 3.- Esquisse d'avant projet

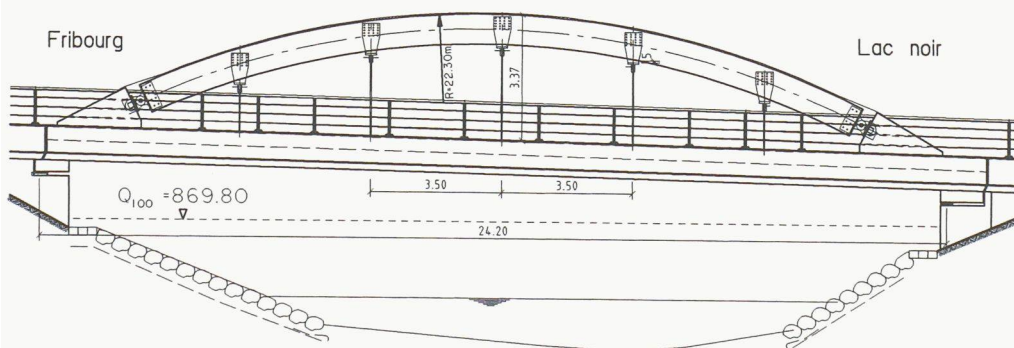


Fig. 4.- Elévation

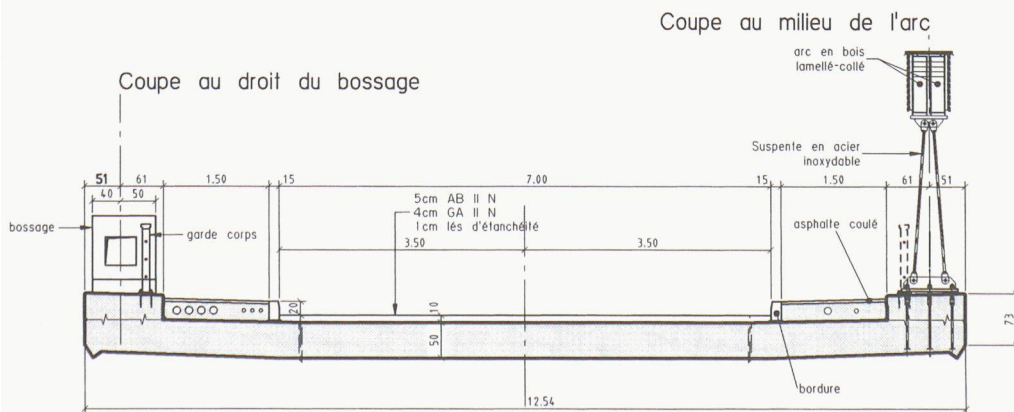


Fig. 5.- Coupes transversales

fluviatiles postglaciaires et de la moraine à partir d'une profondeur de 8 m environ. Au vu de la capacité portante assez faible des alluvions, il a été décidé d'appuyer l'ouvrage sur des pieux forés dans la moraine, ce type de fondation permettant à la fois de réduire les risques de tassements, de limiter les impacts sur le cours d'eau pendant la construction en exécutant le forage à partir de remblai et d'éliminer les risques d'affouillement des fondations lors de crues importantes.

Plan d'utilisation

Pour l'essentiel, l'utilisation normale de l'ouvrage doit lui permettre de supporter les charges définies dans la norme SIA 160. L'utilisation exceptionnelle doit prendre en compte la suppression d'une paire de suspentes, à la suite d'un accident de la circulation par exemple. Quant à l'aptitude au service, elle a été basée sur les critères de déformation du tablier contenus dans la norme SIA 160. Les exigences complémentaires appliquées à la durabilité de l'ouvrage sont décrites en détail au chapitre consacré à cet aspect.

Construction de l'ouvrage

L'adjudication à l'entreprise de construction a eu lieu en décembre 1997 et les travaux ont commencé au printemps 1998 par le forage des pieux, suivi du bétonnage des culées. Le tablier a été bétonné sur cintre fixe en été 1998, les arcs étant ensuite mis en place à l'aide d'un camion-grue (fig. 6). Puis, une fois achevés la pose et l'ajustement des suspentes, celles-ci ont été mises en tension avec le décoffrage du tablier. Enfin, la réalisation du revêtement et des équipements a eu lieu en automne 1998, précédant la mise en service du pont en octobre 1998.

Comme le souhaitait le maître de l'ouvrage, le bois utilisé pour la fabrication des arcs provient des forêts du canton de Fribourg et c'est un lot de mélèzes de la forêt du



Fig. 6. – Montage des arcs à l'aide d'un camion-grue

Bellmont sur la commune de Domdidier, conforme aux exigences définies pour la classe A par la norme SIA 164, qui a été choisi par le charpentier. Ce bois a été transporté et conditionné jusqu'aux planches brutes, prêtes pour l'usage en lamelles, qui ont été collées et mises en forme à la fin du printemps 1998.

Stabilité de l'ouvrage

La stabilité de l'ouvrage est tributaire de celle des arcs, puisque ce sont les seules parties de la structure soumises à de hautes sollicitations de compression et que celle-ci peut générer l'instabilité par flambage ou par déversement. Le comportement global de l'ouvrage a été analysé à l'aide d'un calcul par éléments finis tridimensionnels (dont le maillage est présenté à la figure 7) avec le programme Flash [3].

Le tablier a été modélisé par des éléments finis de coques de type plaque-membrane, car contrairement aux éléments finis de plaques, ceux-ci permettent – outre la prise en compte des effets flexionnels – de considérer également les effets membranaires comme le mentionne Frey [4]. Et dans le cas du pont de Zollhaus, les effets membranaires à l'intérieur du tablier sont importants puisqu'ils résultent de la poussée horizontale des arcs.

Les arcs et les suspentes ont été modélisés à l'aide d'éléments de poutre. Chaque couple de suspentes a été modélisé par un seul élément fini vertical, l'inclinaison du tirant étant ignorée dans le calcul numérique car elle n'a pas d'influence sur les déplacements et les efforts intérieurs de l'ouvrage.

Les modes propres d'instabilité de l'ouvrage ont été déterminés par une analyse d'instabilité linéaire. Cette méthode est basée sur l'hypothèse d'un comportement linéaire de la structure avant l'instabilité qui se manifeste par bifurcation, et s'avère judicieuse dans le

cas de flambage de structures de poutres comme décrit par Felippa [2]. Les trois premiers modes propres d'instabilité sous charge de poids propre sont présentés à la figure 8. Ils illustrent un flambage des arcs en dehors de leur plan. Les valeurs propres d'instabilité (multiplicateurs critiques) sont respectivement: $\lambda_1=5,25$, $\lambda_2=5,26$ et $\lambda_3=7,99$. Les deux premiers modes propres de flambage se produisent pour des valeurs propres presque similaires et ils correspondent à un flambage des arcs en une vague symétrique et asymétrique respectivement. Le troisième mode propre correspond à un flambage des arcs en deux vagues pour une valeur propre plus haute et donc un niveau de charge plus élevé. De ce fait, et sous l'hypothèse d'un comportement élastique linéaire du bois, le flambage des arcs se produit pour une charge correspondant à 5,25 fois le poids propre de l'ouvrage. L'analyse d'instabilité effectuée ne tient pas compte du comportement des matériaux (si ce n'est le module d'élasticité) et des tolérances de construction. C'est pourquoi les arcs en bois ont été dimensionnés contre le flambage à l'aide de la norme SIA 164. Le flambage dans le plan de l'arc a

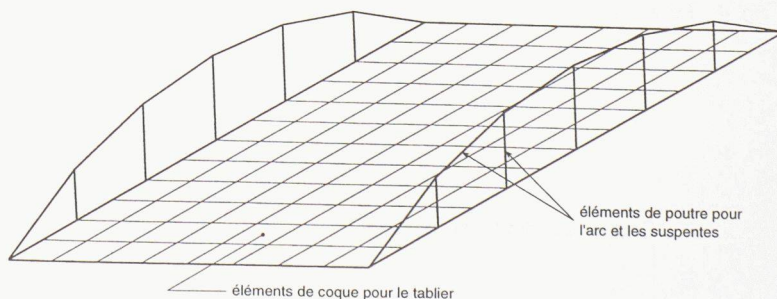


Fig. 7. – Maillage d'éléments finis utilisé pour la simulation du comportement de l'ouvrage

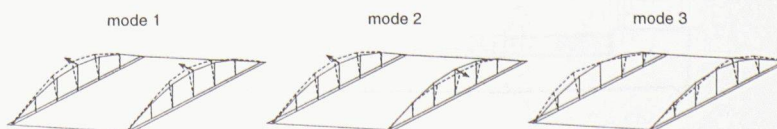


Fig. 8. – Trois premiers modes propres d'instabilité du pont (sous charge de poids propre)

été contrôlé selon le § 3.32.12 en retenant l'hypothèse d'une colonne rectiligne comprimée dont la longueur de flambage vaut la demi-longueur de l'arc; l'effort normal de compression considéré correspond à l'effort normal au quart de l'arc. Cette vérification a permis de démontrer que le flambage de l'arc dans son plan n'est pas critique.

Le flambage de l'arc en bois en dehors de son plan a également été contrôlé selon la norme SIA 164. La longueur de flambage a été déduite du calcul d'instabilité et elle correspond également à la demi-longueur des arcs en raison de leur encastrement aux bossages en béton. Or avec cette longueur, la sécurité contre le flambage des arcs ne satisfait pas la norme SIA 164. De ce fait et comme prévu initialement dans le projet, les arcs ont été stabilisés à l'aide de suspentes inclinées. Celles-ci sont disposées en forme de A transversalement au plan des arcs comme le montre la figure 9, créant ainsi un point fixe fictif sous l'arc. La force de rappel agissant sur l'arc lorsque le point fixe fictif est déplacé correspond à la projection horizontale des forces de tension supplémen-

taire dans une suspente et de détente de l'autre. Ce point fixe fictif peut être considéré comme point d'appui selon la norme SIA 164 § 3.36.21, dans le cas où la force de rappel correspond à 2% de la force de compression dans l'arc. Ce critère a donc été utilisé comme critère de dimensionnement pour déterminer l'inclinaison des suspentes.

L'inclinaison de chaque suspente est variable car les pièces métalliques de fixation supérieures et inférieures sont similaires par souci de standardisation. Des rotules ont été utilisées afin de permettre cette variation d'inclinaison mais également afin de faciliter l'entretien et le changement éventuel de suspentes.

Durabilité de l'ouvrage

L'ouvrage est prévu pour une durée de service de quatre-vingts ans et des travaux de maintenance, notamment pour la protection du bois des arcs, ne sont pas envisagés avant trente ans. Afin de garantir ces exigences, différentes mesures spécifiques à chaque partie de l'ouvrage ont été prises: pour le tablier en béton, les arcs en bois et les pièces métalliques.

La durabilité du tablier en béton est principalement influencée par la fissuration. De ce fait, l'ouverture des fissures a été limitée en disposant une armature minimale satisfaisant les exigences élevées de la norme SIA 162 et les contraintes dans l'acier ont été limitées à l'état permanent. De plus, le risque de fissuration a été diminué en réduisant la déshydratation du béton après le bétonnage par la pose d'une couche isolante sur le tablier et en maintenant le coffrage. Finalement, afin de protéger les armatures du tablier contre les chlorures, celui-ci a été recouvert d'un lé de bitume polymère.

La durabilité des arcs en bois est déterminante et plusieurs moyens ont été mis en œuvre afin de l'assurer. Tout d'abord, les arcs ont été disposés 30 cm plus haut que le trottoir afin de limiter les éclaboussures d'eau, de même que les risques liés aux impacts de véhicules. Ensuite, on a opté pour le mélèze, plus résistant que le sapin, et on l'a traité à l'aide d'une couche de fond de protection préventive contre le bleuissement et les champignons lignivores et assurant une régulation hygroscopique.

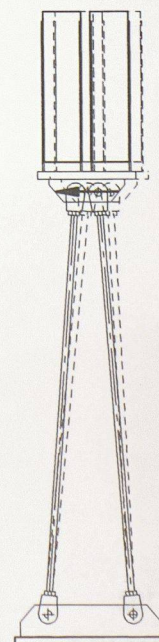


Fig. 9. – a) suspentes, b) suspentes et force de rappel

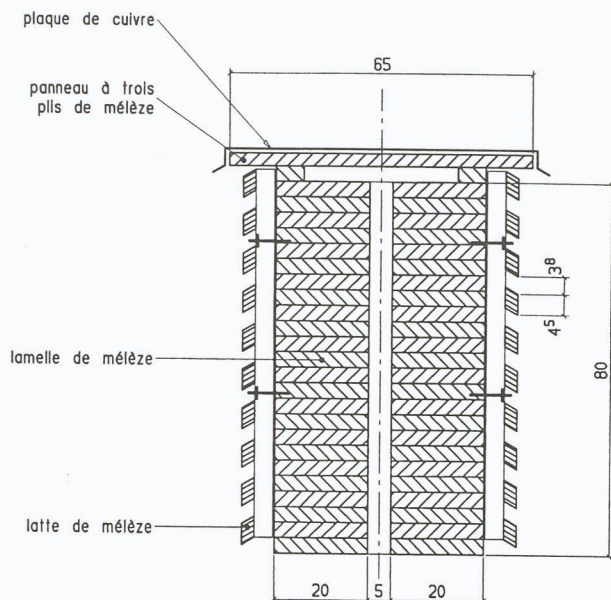


Fig. 10. - Détail de la protection des arcs de bois

pique. Par dessus cette couche, les arcs ont été imprégnés de deux couches de glacis pigmenté et une protection mécanique a encore été disposée autour du bois lamellé-collé. La partie supérieure des arcs est protégée des intempéries par une plaque de cuivre fixée sur un support en bois (fig.10) et des lamelles en mélèze ont été disposées sur les faces latérales afin de réduire les influences néfastes des rayons ultraviolets sur le bois lamellé-collé. La découpe en biais des lamelles et leur disposition ménagent un espacement entre lamelles pour les contrôles visuels et la ventilation, tout en assurant une bonne protection contre les rayons ultraviolets. Fixées en suivant la courbure de l'arc afin d'en conserver l'aspect architectural, les lamelles ont reçu deux couches de glacis pigmenté qui leur confère la même coloration que le bois lamellé-collé et elles ont été prolongées jusqu'aux bossages en béton pour conserver l'image des poutres maîtresses qui y ramènent l'ensemble des forces. Les pièces métalliques sont ainsi protégées et le lamellé-collé prend naissance directement aux bossages en béton. Les suspentes sont en acier inoxydable (N° de matériau 1.4429) et les pièces métalliques ont été sablées (SA 3) et traitées comme suit contre la corrosion :

- une couche métallisée en zinc par projection 80 my
- une couche intermédiaire faite de composants 40 my
- une couche de finition en polyuréthane teint RAL 40 my.

Une couche supplémentaire de finition a encore été apportée une fois les travaux terminés.

Contrôles de la qualité

Contrôles de la qualité des matériaux

En raison de son caractère novateur, le nouveau pont de Zollhaus (fig. 11) a fait l'objet d'une attention toute particulière en matière de contrôles de la qualité. Comme pour chaque chantier, le Département des Ponts et Chaussées a défini et appliqué un plan qualité adapté au degré de difficulté et à l'importance des travaux à réaliser. Les différentes vérifications prescrites ont d'abord été consignées dans le plan de contrôle [6], puis reprises dans le plan qualité de l'ouvrage [5]. Les contrôles portant sur la qualité des matériaux (béton, aciers et bois) ont notamment été nombreux lors de la réalisation de l'ouvrage.

En ce qui concerne la qualité du bois destiné aux arcs, les contrôles ont débuté au moment du choix des billes. Le charpentier étant difficilement en mesure de garantir la qualité requise sur la base du choix des grumes en forêt, une plus grande quantité de bois rond a été coupée afin de permettre un tri ultérieur entre les planches de menuiserie et de charpenterie. Cela a en outre permis de procéder à un classement des lames selon les critères de résistance L1 de la norme SIA 164 § 4 25 2, soit dans notre cas, des planches de 220 / 40 mm sans aubier et sans moelle. Pour l'exécution, un plan de contrôle a été établi sur la base des directives de collage du groupe suisse

d'étude pour le bois lamellé-collé (SSH). Après débitage des grumes, les planches ont été conditionnées à l'air puis séchées au four. Avant de réaliser les joints à entures multiples, la teneur en eau des lames a été contrôlée. De même, les critères de classement pour les lames servant à la fabrication du lamellé-collé de classe A ont été vérifiés. Lors du collage, les paramètres suivants ont encore été contrôlés et consignés : la teneur en eau des lames, l'heure du début du collage, la température ambiante, la fin de la mise sous presse et la pression de collage. Après le collage, des essais de flexion sur les entures et de cisaillement des plans de collage ont été exécutés à satisfaction. Finalement, la géométrie de chaque arc a été contrôlée ainsi que le respect des tolérances de fabrication de la norme SIA 164.

Mesures des déplacements du tablier lors de l'abaissement du cintre

Lors du bétonnage, le pont était appuyé sur un cintre fixe composé de huit poutres à treillis métallique et celui-ci est resté en place durant le montage des arcs en bois et des suspentes. Avant l'abaissement du cintre, les boulons de la plaque d'ancrage ont été vissés de telle manière que les suspentes soient ajustées. La mise en tension de ces dernières a eu lieu lors de cet abaissement, car le cintre utilisé avait été pourvu d'une contre-fleche.

Mesurés lors de l'abaissement du cintre, les déplacements de l'ouvrage s'élevèrent à 2,3 cm sous l'arc côté Lac Noir et à 2,1 cm sous l'arc

Participants

Maître de l'ouvrage et direction générale des travaux :
 Département des Ponts et Chaussées du Canton de Fribourg
 Projet et direction locale des travaux : Emch+Berger SA à Berne
 Entreprise de construction : Consortium Stug SA et Schmalz SA à Fribourg
 Charpente en bois : Vial SA au Muret
 Suspentes et barrières : Pflüger + Partner SA à Zollikofen
 Assemblages métalliques : Morand SA à la Tour-de-Trême
 Appuis : Rowatec SA à Volketswil

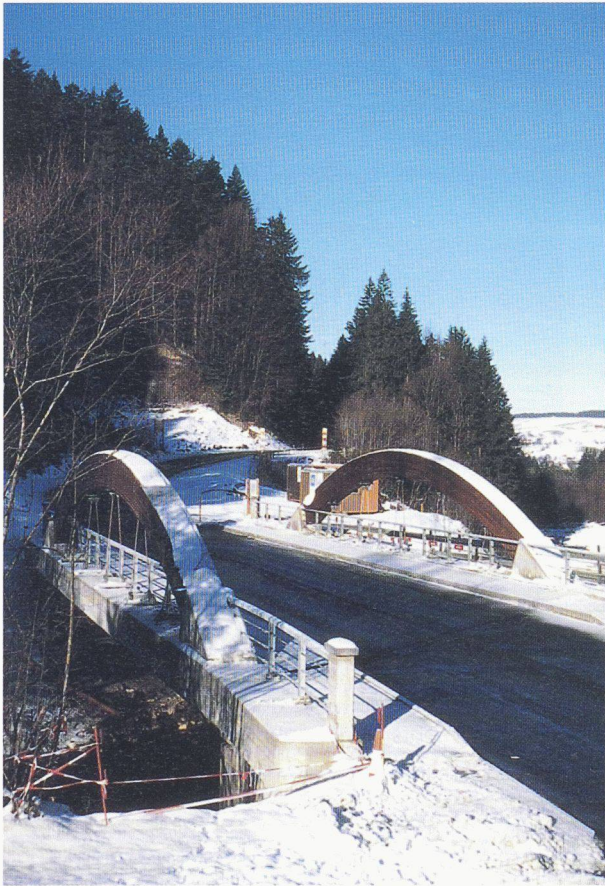


Fig. 11. – Vue d'ensemble du nouvel ouvrage

côté Fribourg. Ces tassements légèrement plus élevés que les déplacements calculés de 2 cm sont dus à l'influence concomitante des ajustements à l'intérieur des assemblages (chevilles en acier appuyées sur arc en bois, rondelles en élastomère, etc.).

Essai de charge

Comme ce pont représente une innovation technique, le Département des Ponts et Chaussées a commandé l'exécution d'un essai de charge. Celui-ci a été effectué avec deux camions à trois essieux chargés à 25 t chacun, dans trois dispositions différentes: deux camions au centre, deux camions côté Lac Noir et deux camions côté Fribourg, ces trois variantes permettant de solliciter le tablier en son milieu, puis chacun des arcs directement et de manière asymétrique. Les points de mesure ont

été répartis sur le tablier et les arcs. La précision des mesures des déplacements a été de l'ordre de demi-millimètre.

Une simulation numérique de l'essai de charge a été effectuée sur la base d'un calcul élastique linéaire en stade non fissuré, soit sans tenir compte de la fissuration. L'essai de charge du pont de Zollhaus montre que les déplacements du tablier (2,6 mm sous chaque arc) sont de l'ordre de 70 % plus faibles que ceux calculés, un résultat principalement dû à l'effet bénéfique des trottoirs qui n'a pas été pris en compte dans le calcul numérique. Quant aux déplacements mesurés des arcs, ils correspondent aux valeurs calculées. L'essai de charge a ainsi pleinement confirmé que l'ouvrage se comporte de manière conforme au calcul et ne révèle aucune anomalie.

Conclusions

La construction du pont de Zollhaus a permis la réalisation d'un nouveau type d'ouvrage, constitué d'un tablier en béton, de deux arcs en bois autostables et de tirants en acier. Les études de stabilité et la durabilité, de même que les diverses mesures de contrôle évoquées ci-dessus montrent que la conception et la réalisation d'un ouvrage novateur exigent une grande variété de connaissances techniques et que l'élaboration d'une conception globale pour la structure porteuse appelle une solide volonté commune de la part du maître de l'ouvrage, de l'ingénieur et des entreprises. Or si le surplus de travail lié à une telle démarche n'est pas négligeable, le résultat est en revanche aussi économique qu'esthétique, puisqu'un usage optimal des matériaux a été trouvé et que l'ouvrage s'intègre de manière remarquable dans le site montagneux de la région du lac Noir.

Bibliographie

- [1] J. CARBAJAL ET R. WALTHER : « Ponts-dalle biais : sécurité

structurale des ponts-dalle biais en béton armé et précontraint », rapport IBAP-EPFL 77.12.02, 1993

- [2] C. FELIPPA : « Non-linear finite element analysis », University of Colorado at Boulder, 1988
 [3] *Flash 5*; Dr. Walder & Partner AG, Bern, 1994
 [4] F. FREY ET J. JIROUSEK : « Structures tridimensionnelles à parois minces », cours EPFL, 1986
 [5] « Plan qualité du pont de Zollhaus », Département des Ponts et Chaussées du Canton de Fribourg, 1998
 [6] « Route cantonale Fribourg-Schwarzsee, pont de Zollhaus, plans d'utilisation de sécurité et de contrôle », rapport Emch+Berger AG, 3001 Berne, octobre 1997
 [7] S.P. TIMOSHENKO ET S. WOJNOWSKY-KRIEGER : « Theory of plates and shells », McGraw-Hill, 1959

Remerciements

Les auteurs tiennent à exprimer ici leur reconnaissance au Département des Ponts et Chaussées du Canton de Fribourg pour le soutien qui leur a été apporté tout au long de la conception et de la réalisation de l'ouvrage, notamment par l'ingénieur cantonal M. C. Morzier, ainsi que par MM. J.-B. Tissot, K. Sunier, M. Schmid et D. Macheret. Leur gratitude va également à MM. F. Walther, M. Wyss, F. Ruchti, H. Wildberger, F. Scheuner, W. Leijczk, G. Blaser, D. Rochat et S. Nydegger du bureau Emch+Berger SA pour leur contribution à l'élaboration du projet. Enfin, ils souhaitent encore remercier le professeur F. Frey de l'EPFL pour ses réflexions sur la stabilité de l'ouvrage, M. F. Kropf du LFEM/EMPA pour ses commentaires concernant la durabilité du bois, MM. J. Wirz de Worb pour certains apports en matière de construction en bois, ainsi que J.-Cl. Reymond pour la réalisation des figures.