

Pont autoroutier sur le Rhin à Shaffhouse

Autor(en): **Boskovitz, Pierre**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **123 (1997)**

Heft 4

PDF erstellt am: **11.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-79100>

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.

Par Pierre Boskovitz,
rédacteur

Pont autoroutier sur le Rhin à Schaffhouse

Un peu d'histoire

Les villes de Bâle et de Schaffhouse, distantes d'une centaine de kilomètres l'une de l'autre, constituent des têtes de pont sur le Rhin. L'une et l'autre ont rejoint la Confédération en 1501, après la période troublée des guerres de Souabe. Le canton de Schaffhouse, qui s'étend sur 298 km² situés presque entièrement sur la rive droite du Rhin, est composé de trois entités séparées par des territoires appartenant à l'Allemagne et, sur la rive gauche, il fait face aux cantons de Zurich et de Thurgovie. Cette situation « géopolitique » explique aisément l'importance qu'ont toujours eue, au cours de l'histoire, les lieux de traversée du Rhin. L'ouvrage édité – et hélas déjà épuisé ! – par le bureau des autoroutes à l'occasion de l'achèvement du pont sur l'autoroute N4 [1]¹, relate sur plus de cinquante pages richement illustrées, l'histoire de la quinzaine de ponts jetés à travers le fleuve sur un tronçon d'une quarantaine de kilomètres entre Stein am Rhein (rattaché à Schaffhouse depuis 1803), en amont, et Eglisau, en aval de Schaffhouse. L'occasion est appropriée, car l'inauguration du pont haubané clôt vraisemblablement une période de plusieurs décennies particulièrement fertiles en constructions de ponts dans la région. Nous en donnons ici un résumé.

La traversée du Rhin entre Stein am Rhein et Eglisau

L'histoire des ouvrages d'art de la région fut influencée par le développement de la navigation fluviale et par celui du trafic routier, par l'apparition du chemin de fer, enfin, plus récemment, par la création du réseau autoroutier, mais aussi par des crues et des guerres, celle de Trente Ans (1618-1648) et celle de la deuxième coalition contre la France (1799-1801). Les premiers ouvrages étaient en bois,

parfois couverts, et reposaient sur des palées de bois plus tard remplacées par des piles massives. Outre la dizaine de ponts routiers, quatre ponts de chemin de fer, dont trois métalliques, ont été lancés. Au XX^e siècle, le matériau préféré des bâtisseurs sera le béton armé, puis précontraint.

Trois bacs sont par ailleurs encore en fonction actuellement : à Paradis (TG/D), Ellikon (ZH/D) depuis 1904 et Tössegg (ZH/SH) ; les piétons peuvent également traverser le Rhin en passant par les centrales électriques de Schaffhouse et de Rheinau.

Pont de Stein am Rhein (SH)

Un premier ouvrage romain, construit en l'an 82, traversait le fleuve en amont de la localité, mettant à profit l'île de Werd. Le premier pont à Stein, un pont en bois sur pieux, fut construit au XIII^e siècle. Témoin de la guerre de Trente Ans comme aussi des guerres de coalition, fortifié et muni de tours et de portails à ses extrémités, il fit l'objet de nombreuses réparations au cours des siècles. Au XIX^e, il fut expertisé par le général Dufour, puis, en 1857-1858, remplacé par un ouvrage plus large et plus haut, pour permettre le passage des bateaux à vapeur. Vingt ans plus tard, ses poutres en bois furent remplacées par des poutres métalliques. Réparé en 1922, rénové encore en 1955, il fut démoli en 1971-1972. Le nouvel ouvrage, construit de 1972 à 1974, est un pont poutre à caisson à deux cellules en béton précontraint.

Pont routier de Hemishofen (TG/SH)

Une nouvelle traversée du fleuve était destinée à canaliser le trafic régional et décharger Stein am Rhein, dont le caractère médiéval devait être protégé. L'ouvrage terminé en 1980 est un pont poutre continue en béton précontraint, parallèle à l'ancien pont de chemin de fer à treillis et situé en amont de celui-ci.

Pont ferroviaire de Hemishofen (TG/SH)

L'ouvrage, long de 254 m, donne passage au train à 25 m au-dessus du Rhin. Il a été conçu et réalisé par l'entreprise parisienne Cail & Cie en 1875. Sa structure est constituée de poutres à membrures parallèles et à treillis double portant une voie supérieure unique. Après l'effondrement sous un train de voyageurs, en 1891, du pont ferroviaire sur la Birse près de Münchenstein, une première ordonnance fédérale sur le calcul et la vérification des ponts métalliques du réseau ferré a vu le jour en 1892. Celle-ci prescrivait la vérification de l'ensemble des ponts existants et, le cas échéant, leur renforcement. A la suite de cette démarche, le pont de Hemishofen fut renforcé entre 1894 et 1901, puis en 1936 et en 1964, et il présentait encore, au début des années 1990, une durée de service restante estimée à 20 ans [2]. Le pont fut pourtant mis hors service, pour d'autres raisons, en 1995.

Pont de Diessenhofen (TG/D)

Un premier pont en bois fut probablement construit vers 1180 et détruit par les crues de 1480, puis un nouveau pont, documenté aux XVI^e et XVII^e siècles, a connu de nombreuses réparations pour être finalement démoli. En 1667-1668, on a construit un nouvel ouvrage demeuré en service jusqu'en 1799, année où il fut incendié par les troupes russes en guerre contre l'armée française. Une passerelle est ensuite édiflée en 1801 et, en 1816, on put inaugurer un nouveau pont couvert en bois, qui fut élevé de 78 cm en 1865 pour augmenter la passe de navigation et permettre le passage de bateaux à vapeur. Après avoir été rénové en 1924, puis endommagé par un bombardement pendant la guerre, il fut réparé aux frais des Etats-Unis. Avec une limitation des charges et une largeur de la chaussée n'offrant qu'une seule voie, l'ouvrage remplit cependant toujours sa fonction et, en 1972, il a été classé monument protégé.

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

Pont ferroviaire de Feuerthalen (ZH/SH)

Ce pont à voie unique, situé sur la ligne Kreuzlingen – Schaffhouse, a été construit en 1894-1895. Long de 260 m, il comprend deux viaducs en maçonnerie sur les rives et présente une portée centrale de 112 m en treillis métallique riveté, renforcé par la suite. Cet ouvrage est toujours en service et le train y passe à 27 m au-dessus du fleuve.

Pont de Schaffhouse – Feuerthalen (ZH/SH)

Le premier pont sur le Rhin à Schaffhouse était un ouvrage en bois, étroit et couvert, documenté dès le XIII^e siècle. Il est resté en service pendant plus de 200 ans jusqu'à la crue de 1480, à laquelle il ne put résister. En 1489, un nouveau pont est déjà mentionné. Entre 1550 et 1611, l'ouvrage en bois fut transformé en un pont de pierre. Toutefois, ce dernier montra tôt des déficiences techniques et, après de nombreux dégâts et réparations – en bois! – s'effondra en 1754. L'année suivante, H. U. Grubenmann soumit son projet célèbre d'un pont en bois de plus de 100 mètres de portée sans appui intermédiaire dans le lit du fleuve. Sa proposition fut rejetée mais il fut chargé de construire le nouveau pont avec appui sur une pile centrale. Le nouveau pont couvert, long de 110 m, fut terminé en 1758, mais ne jouit pas d'une longue existence: en 1799, les Français défaits incendièrent en effet le chef d'œuvre de Grubenmann. En 1805, un nouveau pont en bois, l'œuvre d'Andreas Widtmer, fut mis en service: reposant sur six rangées de pieux, l'ouvrage fit l'objet de divers travaux de rénovation jusqu'en 1950. Une nouvelle traversée, à quelque 50 m en aval de l'ancienne, fut réalisée entre 1962 et 1965: cet ouvrage à trois travées en béton précontraint est une poutre continue à caisson à trois cellules et il a été rénové en 1986-1987.

Pont de Schaffhouse – Flurlingen (SH/ZH)

La première traversée à Flurlingen fut une passerelle construite en 1860. En 1942, on la remplaça par un pont en béton armé situé en amont. Cet ouvrage ne satisfaisait toutefois plus aux exigences actuelles du trafic, – en particulier dans le nouveau contexte créé par la construction de la route nationale N4 et du pont autoroutier qui en fait partie –, son remplacement s'imposait. Le nouveau pont est constitué d'une dalle continue à trois travées en béton précontraint, reposant sur deux piles placées dans le lit du fleuve. Terminé en 1990, il a coûté 14,6 millions de francs.

Passerelle de Neuhausen – Flurlingen (SH/ZH)

Construit en 1921, cet ouvrage long d'une centaine de mètres est supporté par des poutres en treillis d'acier avec tablier inférieur. Rénové en 1949, renforcé et élargi en 1957, il a été assaini en 1992. Il est ouvert au trafic léger en sens alternant.

Pont ferroviaire de Laufen, près des chutes du Rhin (ZH/SH)

La traversée est située légèrement en amont des chutes du Rhin et relie les deux berges du fleuve à une hauteur de 10 m, sous un angle de 55 degrés. Un premier projet prévoyait la construction d'un pont métallique à trois travées. Au cours des travaux préparatoires, ce projet fut toutefois abandonné, car on découvrit que le sol rocheux permettait l'implantation de piles en plus grand nombre. Ainsi naquit, en 1857, un viaduc en maçonnerie à dix arcs, de portées variant entre 12 et 16 mètres pour tenir compte de la configuration du sol. Entre 1957 et 1959, le pont fit l'objet de travaux d'assainissement. A cette occasion, des trottoirs en porte à faux furent ajoutés afin de permettre aux randonneurs de relier les chemins pédestres sis sur les deux rives du Rhin.

Passerelle de Nohl (ZH/D)

Cette passerelle pour piétons et cyclistes fut construite en 1955-1956. Il s'agit d'un pont poutre à trois travées en béton précontraint.

Pont de Rheinau – Altenburg (ZH/D)

La première mention d'un pont à cet endroit date de 1247. Il devait s'agir d'une traversée couverte en bois. L'ouvrage eut à souffrir des diverses guerres qui se sont succédées dans la région et un nouveau pont couvert en bois fut construit en 1804. Sur les deux rives, les culées se prolongent par des ponts arcs en pierre. Objet de divers travaux de réparation et d'assainissements dont les derniers datent de 1988, l'ouvrage est toujours en service.

Pont de Flaach – Rüdlingen (ZH/SH)

Un premier pont poutre sur quatre travées, achevé en 1873, présentait une superstructure en treillis métallique qui dut être remplacée en 1929 par une structure plus large avec des poutres à âme pleine. L'ouvrage fut rénové et élargi en 1950-1951, puis assaini encore en 1987-1988.

Pont d'Eglisau (ZH)

Sur la route de Zurich à Schaffhouse, en passant par Klotten et Eglisau, le premier pont fut construit vers 1240. C'était un ouvrage en bois qui fut emporté par les eaux en 1542 et remplacé par un pont couvert la même année. Durant la guerre de Trente Ans, une de ses travées fut munie d'un pont-levis. Durant la guerre contre les Coalisés, les Français, en se retirant, mirent l'ouvrage hors d'usage. Ce sont les Autrichiens qui le remirent en état par la suite, créant également une traversée supplémentaire sur pontons en aval d'Eglisau. Après la défaite des Coalisés à Zurich en 1799, l'ouvrage fut détruit par les Russes en retraite. Puis, l'érection d'un pont provisoire par les Français, en 1800, fut suivie de la construction

d'une nouvelle traversée en 1811 : un pont couvert en bois, à deux travées inégales avec une pile dans le lit du fleuve. Les autorités ont en effet considéré que si l'ouvrage ne comprenait qu'une seule grande travée, la destruction volontaire de la liaison entre les deux rives en cas de guerre conduirait nécessairement à la destruction totale du pont. Au début du XX^e siècle, la construction d'une centrale hydro-électrique à Rheinfelden eut pour conséquence une élévation de 8 m du niveau du Rhin à Eglisau, ce qui obligea à démolir le pont érigé un siècle auparavant. Un nouvel ouvrage fut construit pendant la Première Guerre mondiale et inauguré en 1919. Il comprend trois arcs de 40,7 m en béton, protégés par des plaques de granite. Après le rejet par le peuple d'un projet de contournement de la ville comprenant la construction d'un viaduc, la chaussée du pont existant a été élargie en 1987.

Pont ferroviaire d'Eglisau (ZH)

La première et principale ligne ferroviaire entre Zurich et Schaffhouse traverse la large et profonde vallée du Rhin à l'ouest d'Eglisau sur un pont construit en 1897. Long de 455 m, l'ouvrage présente deux viaducs d'accès en maçonnerie et une travée centrale de 90 m en treillis métallique.

Les deux viaducs comprennent chacun une série d'arcs. Or, les deux piles centrales sur lesquelles repose la charpente métallique, sont sollicitées de façon asymétrique et la poussée horizontale des arcs adjacents a provoqué des déformations inquiétantes sur ces piles qui, en 25 ans, se sont rapprochées de 240 mm. Pour parer à cette situation, on a construit, en 1921, un dispositif complexe de mise sous tension horizontale des piles concernées en reportant ces efforts sur la structure métallique renforcée à cet effet.

L'ouvrage fut assaini dans les années 1960 et 1980 et sa durée de service restante est estimée à trois ou quatre décennies.

Le nouveau pont autoroutier à Schaffhouse

Le 15 août 1996, un nouveau tronçon de l'autoroute N4 a été ouvert au trafic. Il comprend un pont haubané en courbe pour le franchissement du Rhin, entre deux tunnels traversant les hauteurs sur les rives.

En fait, les premières études pour cette traversée remontent aux années 1960. Le canton de Schaffhouse était, dès le début, en faveur d'un passage en tunnel de l'autoroute et d'une traversée du Rhin proche de l'eau. Le canton de Zurich, de son côté, envisageait le passage de l'autoroute en surface avec une traversée du fleuve à environ vingt mètres au-dessus de l'eau. En 1971, le Conseil fédéral a tranché en faveur de la première conception.

Selon un projet initial, aboutissement de près de vingt ans d'études de diverses variantes et déjà approuvé par les autorités fédérales, la traversée devait prendre la forme d'un pont poutre continu à trois travées reposant sur deux piles plongées dans le lit du fleuve. Les grandes portées et la forte courbure de l'axe imposaient cependant des hauteurs de poutre importantes qui se sont révélées peu esthétiques. Pas satisfait de cette solution, en 1991, le maître d'ouvrage a mis un terme à cinq années de démarches et a requis une reprise des études à partir de zéro, sans pour autant différer la réalisation de l'ouvrage.

Le projet aujourd'hui exécuté est le résultat de cette nouvelle réflexion, laquelle s'est orientée vers un pont haubané. L'équipe, chargée de trouver une solution satisfaisante dans un très bref délai, a tenu de longues séances sur le site même de l'ouvrage et envisagé de nombreuses variantes sous l'angle de la conception structurale, constructive et esthétique, compte tenu des critères déjà établis. En particulier, divers emplacements, formes et inclinaisons du pylône et des haubans ont été étudiés.

Pont haubané en courbe

En définitive, le pont, long de 151,76 m, ne comprend aucune pile dans le lit du fleuve et son tablier mince est suspendu, à environ dix mètres au-dessus de l'eau, à deux nappes de six haubans en éventail, soutenues par un pylône unique sur la rive gauche du Rhin, lui-même retenu par seize câbles parallèles ancrés dans le rocher (fig. 1 à 3).

Les fondations du pylône et des culées reposent sur le calcaire du malm rencontré en faible profondeur, dans lequel sont également ancrés les câbles de retenue.

Pylône

Le pylône, de la forme d'un portique légèrement asymétrique et encastré à sa base, a une hauteur d'environ 52 m et il s'incline, à environ 70 degrés, vers le fleuve. Il est renforcé par un contreventement métallique en forme de « Z ». Pièce maîtresse de l'ouvrage, le pylône devait répondre à des exigences strictes, particulièrement en matière de tolérances et de qualité du matériau. Il a été réalisé à l'aide de coffrages grimpants, par étapes de 3,80 m, et maintenu dans sa position inclinée par un ancrage provisoire. Le matériau, un béton à haute performance B 55/45 à 325 kg/m³ de ciment Portland contenant 7 % de fumée de silice, exigeait une mise en place par du personnel expérimenté, étant donné l'importance du traitement de cure pour la durabilité d'un tel béton. L'armature dispose d'une couverture de 4 cm de béton dont la surface exposée aux intempéries a reçu un traitement hydrophobe.

Haubans

Les haubans consistent en câbles à fils parallèles de 7 mm de diamètre, dont le nombre par câble varie entre 175 et 367, le diamètre de ces derniers variant, lui-même, de 160 à 180 mm. Les fils sont recouverts d'une couche de zinc et les câbles sont protégés contre les agressions mécaniques et chimi-

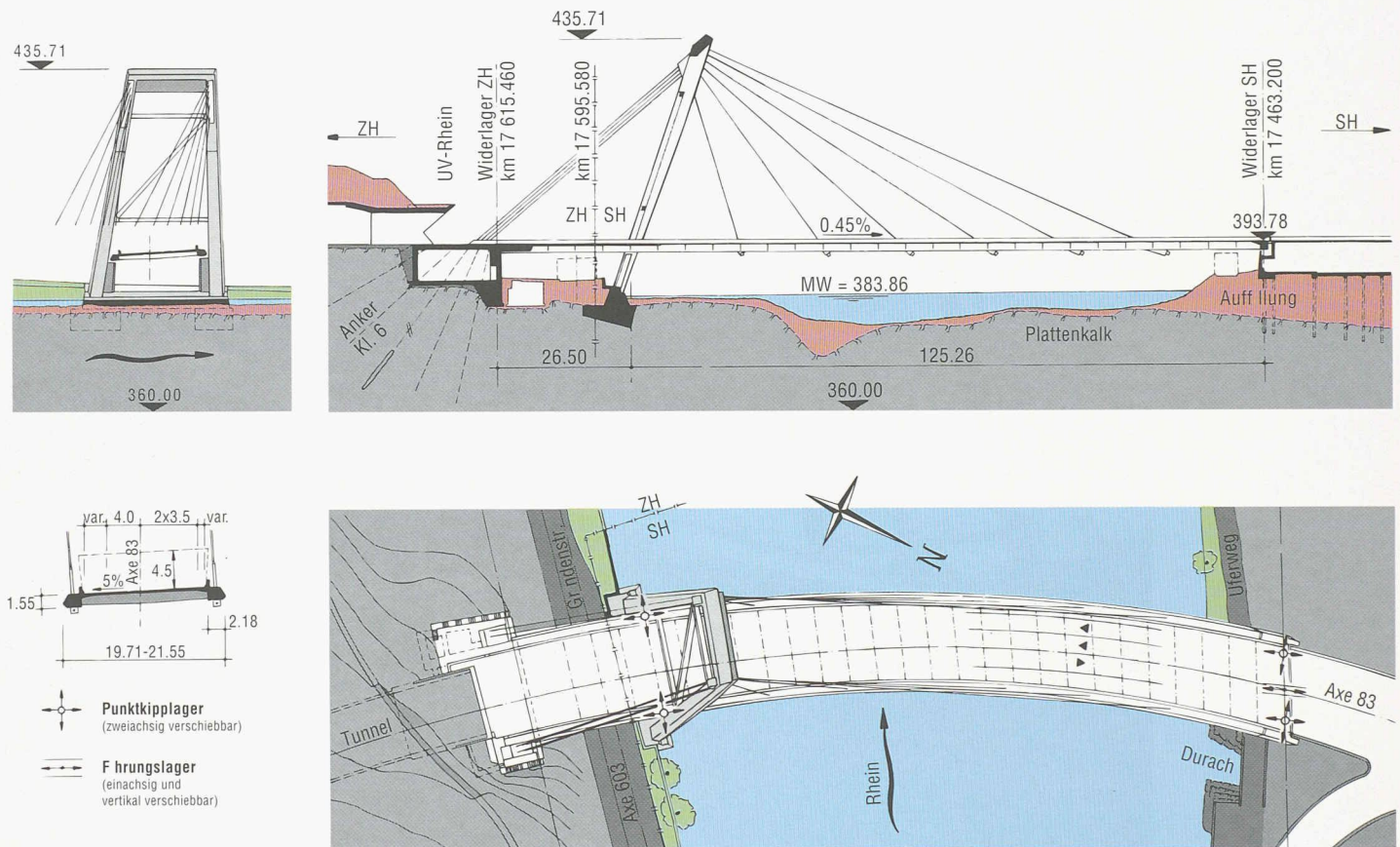


Fig. 1. - Le nouveau pont autoroutier de Schaffhouse: plan, élévation et coupe.

ques par une masse anti-corrosive à plasticité permanente et un tube en polyéthylène. Les câbles sont sollicités jusqu'à une contrainte correspondant à $0,45 f_{tk}$ et leur ancrage doit répondre à des exigences élevées en matière de résistance à des sollicitations dynamiques: 2 millions de cycles d'une variation de contrainte $\Delta\sigma$ égale à 200 N/mm^2 .

Tablier

Le tablier, d'une largeur variant de 19,55 à 21,55 m et en courbe ($r = 280 \text{ m}$), accuse en outre une inclinaison transversale de 5 % et une pente longitudinale de 0,45 %. Il offre trois voies de circulation et une bande d'arrêt. La structure à deux travées, l'une de 26,50 m et l'autre de 125,26 m, est constituée d'une dalle de 28 cm d'épaisseur avec des entretoises en acier distantes de 5,5 m et deux poutres maîtresses de 1,55 m de hauteur,

situées aux bords et suspendues aux haubans. Ces derniers se succèdent à 16,5 m d'intervalle mais, dans les calculs statiques, la déflexion d'un hauban a également été envisagée. Au sud, le tablier est encastré dans la culée et ne dispose donc que d'un seul joint de dilatation situé à son extrémité nord qui repose sur des appuis biaisés. Au droit des pylônes, le tablier est soutenu par des appuis glissants. L'élancement est de 1/80.

Etudes sur modèle réduit

De nos jours, les ponts haubanés à tablier mince sont souvent choisis pour le franchissement de portées moyennes et grandes et leur comportement est aujourd'hui suffisamment connu. L'ouvrage de Schaffhouse constitue cependant une nouveauté par la complexité de sa géométrie: forte courbure du tablier, pylône incliné et asymé-

trique, appui biaisé. Si le calcul de telles structures complexes est certes possible grâce aux outils informatiques dont on dispose, il demeurerait néanmoins nécessaire de s'assurer de la conformité des calculs théoriques au comportement réel de l'ouvrage, tant dans le domaine statique que dynamique. C'était le but de l'étude sur modèle réduit, à l'échelle 1:20, réalisée par la chaire de béton armé et précontraint de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne sous la direction du professeur René Walther [4]. Ce modèle, exposé depuis lors dans les locaux de l'EPFL, a été réalisé en microbéton et pas moins de 12 tonnes de plomb en lingots ont dû être suspendues au tablier pour rendre son comportement comparable à celui de l'ouvrage réel (charges de similitude). Les haubans étaient en acier à haute résistance. Dans un premier temps,



Fig. 2. – Le nouveau pont autoroutier de Schaffhouse: vue partielle avant la finition de l'ouvrage (photo: Rolf Wessendorf).

on a cherché à connaître le mode et la fréquence des vibrations libres de la structure, en flexion et en torsion, les deux étant liées en raison de la courbure du pont. Puis, on a étudié l'effet du passage d'un camion à des vitesses différentes, sur une chaussée plane en bon état et sur une chaussée endommagée simulée par une planche en bois posée en travers de la dalle. Parmi les résultats obtenus, on peut signaler la différence de tension entre les haubans et les câbles placés à l'intérieur et à l'extérieur de la courbure, ces derniers étant plus fortement sollicités. Les essais effectués avec certains haubans détendus ont montré que la rupture d'un hauban ne constitue pas un état critique pour la structure. Les fréquences de vibration ont été obtenues par trois types

d'essais différents donnant des valeurs comparables. La forme et l'amortissement des vibrations en mode de flexion et en mode de torsion ont été déterminés. La courbure du tablier et le biais de l'appui provoquent chacun un couplage entre ces deux modes; leur effet conjugué se trouve cependant atténué par le sens opposé de leur action. Les déformations dynamiques mesurées ne dépassaient que de peu les déformations obtenues sous charges statiques, et cela dans une mesure bien moindre que celle prévue par le coefficient dynamique de 1,8 de la norme SIA. Les essais ont montré que, du point de vue de la sécurité structurale, l'ouvrage disposait de réserves suffisantes, même en cas de défection d'un des haubans, que ce soit en vue de son

remplacement, ou à la suite d'un improbable accident.

Essais de charge

Les essais de charge ont été réalisés en septembre 1995 par l'Institut de statique et structures: béton armé et précontraint (IBAP) de l'EPFL sous la direction du professeur Renaud Favre [5, 6]. Le but de ces essais était l'examen du comportement de l'ouvrage sous des charges statiques et dynamiques. En particulier, on cherchait à obtenir des renseignements sur le comportement élastique de la structure par l'observation de la réversibilité des déformations, sur la concordance entre les valeurs calculées et le résultat des mesures et sur la formation de fissures par l'inspection visuelle avant et après les essais. Pour les essais sta-



Fig. 3. – Le nouveau pont autoroutier de Schaffhouse: vue partielle de l'ouvrage équipé (photo: Rolf Wessendorf).

tiques, on a utilisé neuf camions de 250 kN chacun. Outre les déformations verticales, on a mesuré les déplacements du sommet du pylône ainsi que les déplacements latéraux entre le pylône et le tablier. Pour les essais dynamiques, on a eu recours à deux camions de 250 kN passant à des vitesses variant de 5 à 60 km/h. L'effet d'une chaussée défectueuse a été simulé par une planche en Néoprène. On a enfin également mesuré l'effet de choc provoqué par le tir d'une fusée à eau surchauffée exerçant une charge de 50 kN durant un laps de temps limité à 0,2 s, selon un modèle développé par l'École d'ingénieurs (EINEV) à Yverdon-les-Bains. Les observations ont porté sur les fréquences et modes propres ainsi que sur l'amplification dynamique et l'amortisse-

ment. Les essais ont abouti aux constatations suivantes: le rapport entre déformation et portée étant de 1/1050, le pont de Schaffhouse a, comme d'autres ponts haubanés, un comportement souple; la concordance entre valeurs calculées et mesurées est bonne et le comportement du pont est linéaire; la fréquence propre de l'ouvrage est basse (0,63 Hz); l'amortissement est important pour un ouvrage de ce type; le coefficient dynamique maximal mesuré est de $F = 1,07$, ce qui est sensiblement inférieur à la valeur retenue par la norme SIA 160. Les figures 4 et 5 permettent de procéder à des comparaisons intéressantes entre différents types d'ouvrages testés en Suisse, parmi lesquels cinq autres ponts haubanés testés par l'IBAP. Le

pont de Schaffhouse s'inscrit dans la continuité de ceux-ci et présente une grande souplesse d'ensemble sous des charges statiques, une fréquence fondamentale plutôt basse par rapport à sa portée, un coefficient d'amplification dynamique assez faible et un amortissement relativement important. Ces tests indiquent que les ponts haubanés à tablier mince, malgré leur grande souplesse et leur légèreté, ne sont pas particulièrement sensibles aux vibrations dont ils dissipent efficacement l'énergie. Dans le cas du pont de Schaffhouse, bien que mis en évidence par les calculs et les essais sur le modèle, le couplage entre flexion et torsion n'a pas d'effet important, en partie parce que le biais de la culée s'y oppose.

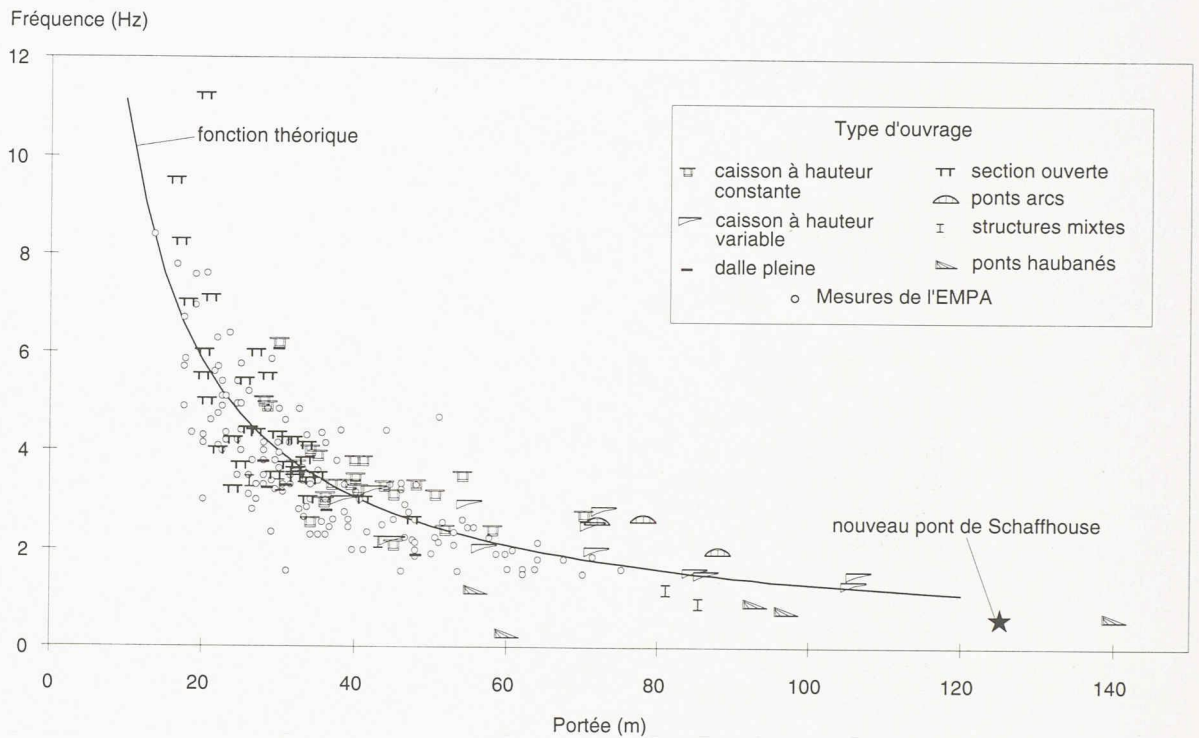


Fig. 4. – Classement d'environ deux cents ponts en fonction de leur type, de leur portée et de leur fréquence propre: le nouveau pont de Schaffhouse a une fréquence propre basse.

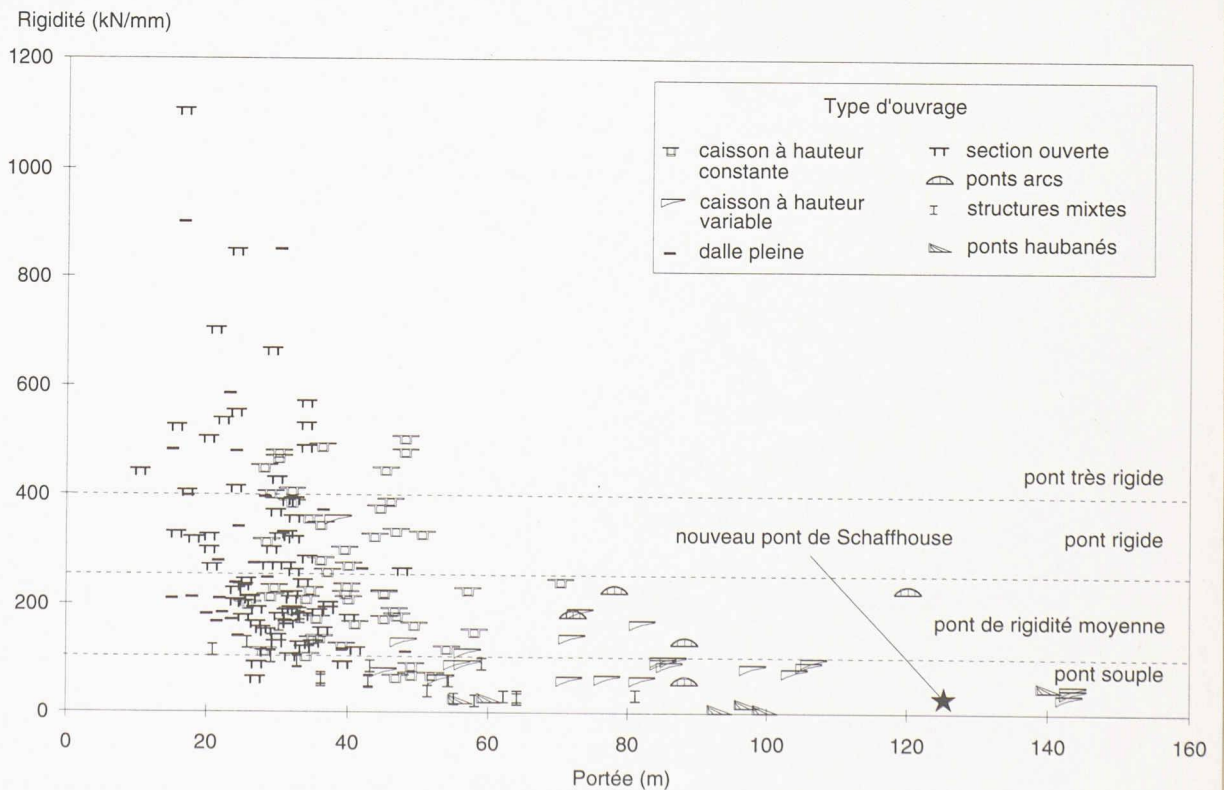


Fig. 5. – Une comparaison d'environ deux cents ponts en fonction de leur rigidité, de leur portée et de leur type, permet de classer le nouveau pont de Schaffhouse parmi les ouvrages souples.

Analyse des vibrations ambiantes

Les ouvrages d'art sont exposés en permanence à des vibrations dites ambiantes dues au milieu environnant: un léger vent, des micro-séismes, le passage de véhicules sous un pont, etc. Comme ces sollicitations, de faible amplitude, constituent un « bruit blanc » où toutes les fréquences sont présentes avec une magnitude plus ou moins égale, les structures y réagissent en fonction de leurs propres caractéristiques naturelles. Il en serait tout autrement si les sollicitations étaient de type harmonique. L'intérêt de l'étude des vibrations ambiantes réside dans le fait qu'elle permet, à peu de frais, de recueillir des informations sur les caractéristiques du comportement dynamique des ouvrages. Le Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche (LFEM/EMPA) à Dübendorf dispose depuis quelque temps d'un système pouvant traiter simultanément un grand nombre de signaux. Associé à des instruments de mesure d'une grande sensibilité, celui-ci permet d'identifier les fréquences propres et les modes de vibration des structures soumises à des sollicitations même faibles. Dans le cadre de la campagne de validation de son système, l'EMPA a procédé à une série de tests sur différents ouvrages. Une des premières structures ainsi testées était la passerelle d'Itenhard près de Bremgarten (Argovie) dont l'étude a révélé l'importance que pouvait avoir l'influence des vibrations harmoniques induites par les câbles sur les mouvements d'ensemble d'une structure haubanée. Dès lors, on a décidé de mener une étude plus poussée de cette influence sur un pont routier d'envergure. Le nouveau pont de

Schaffhouse présentait un intérêt particulier pour une telle étude en raison de sa géométrie fort complexe [7, 8]. Le but de l'analyse était de déterminer les modes de vibration fondamentaux des câbles individuels d'une part, les fréquences naturelles primaires et les formes des modes propres de la superstructure d'autre part, en isolant l'influence de la vibration des câbles sur le comportement d'ensemble de l'ouvrage. Les mesures furent effectuées en 138 points. Dans la réponse de la superstructure, 35 fréquences ont été identifiées, dont 24 comme étant les fréquences naturelles des câbles. L'analyse a permis de conclure à la nécessité de déterminer les modes de vibration des principaux haubans pour l'identification claire des modes de vibration de la superstructure. La fréquence naturelle des premiers modes déterminés étaient toutes en-dessous de 4 Hz.

Réalisation

Pour pouvoir tenir les délais courts exigés, on a renoncé à une progression en encorbellement, si bien que les travaux ont pu avancer simultanément en trois points. Le tablier fut construit sur des cintres conventionnels, puis arraché de son coffrage par la mise sous tension des haubans. Commencés en 1993, les travaux ont duré deux ans et demi. Les coûts du nouveau pont s'élèvent à 15,5 millions de francs, soit à 4700 francs par m². La durée de service de l'ouvrage a été fixée à 70 ans.

Remerciements

L'auteur du présent article se plaît à remercier MM. Olivier Burdet (IBAP/EPFL) et Reto Cantieni (EMPA) de leurs précieux conseils et remarques.

Bibliographie

- [1] Rheinbrücke N4, Nationalstrassenbüro des Kantons Schaffhausen, Schaffhouse, 1995, 241 p. (épuisé)
- [2] KUNZ, P., BEZ, R. & HIRT, M. A.: L'évaluation des structures existantes: un nouveau défi pour l'ingénieur civil, *in IAS* 120 (1994) 5: 66-73
- [3] KOLLER, H. et WÜST, P.: « Rheinbrücke N4 Schaffhausen » *in S/A* 113 (1995) 49: 1134-1137
- [4] WALTER, R. *et al.*: « Pont haubané courbe sur le Rhin à Schaffhouse: essai sur modèle réduit: rapport des essais », Lausanne, EPFL/IBAP, 1995 (Rapport non publié)
- [5] BURDET, O. L.: « Propriétés dynamiques du pont haubané de Schaffhouse » *in Problèmes dynamiques des ponts et des charpentes: exposés de la journée d'étude commune GPC/SSPD des 27-28 septembre 1996*, Zurich, Documentation SIA D 0138, pp. 35-40
- [6] « Rheinbrücke N4 (SH): Bericht über den statischen und dynamischen Belastungsversuch », Lausanne, EPFL/IBAP, 1996, 29 p. et annexes – Berichtsnummer 92.05.06 (Rapport non publié)
- [7] SMET, C. A. M. DE, *et al.*: « Ambient vibration study of the new Rheinbridge for highway N4 » *in Proceedings of the 14th International Modal Analysis Conference*, Dearborn MI, 1996, pp. 63-69
- [8] « Rheinbridge » *in* FELBER, A. et CANTIENI, R.: « Introduction of a new ambient vibration testing system: description of the system and seven bridge tests », Dübendorf, EMPA, 1996, EMPA Report-No 156'521, 15 p.