Le pont en bois des frères Grubenmann aurait pu être réalisé

Autor(en): **Weinand, Yves**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Tracés : bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **132 (2006)**

Heft 17: **Assemblages inédits**

PDF erstellt am: **01.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-99492

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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

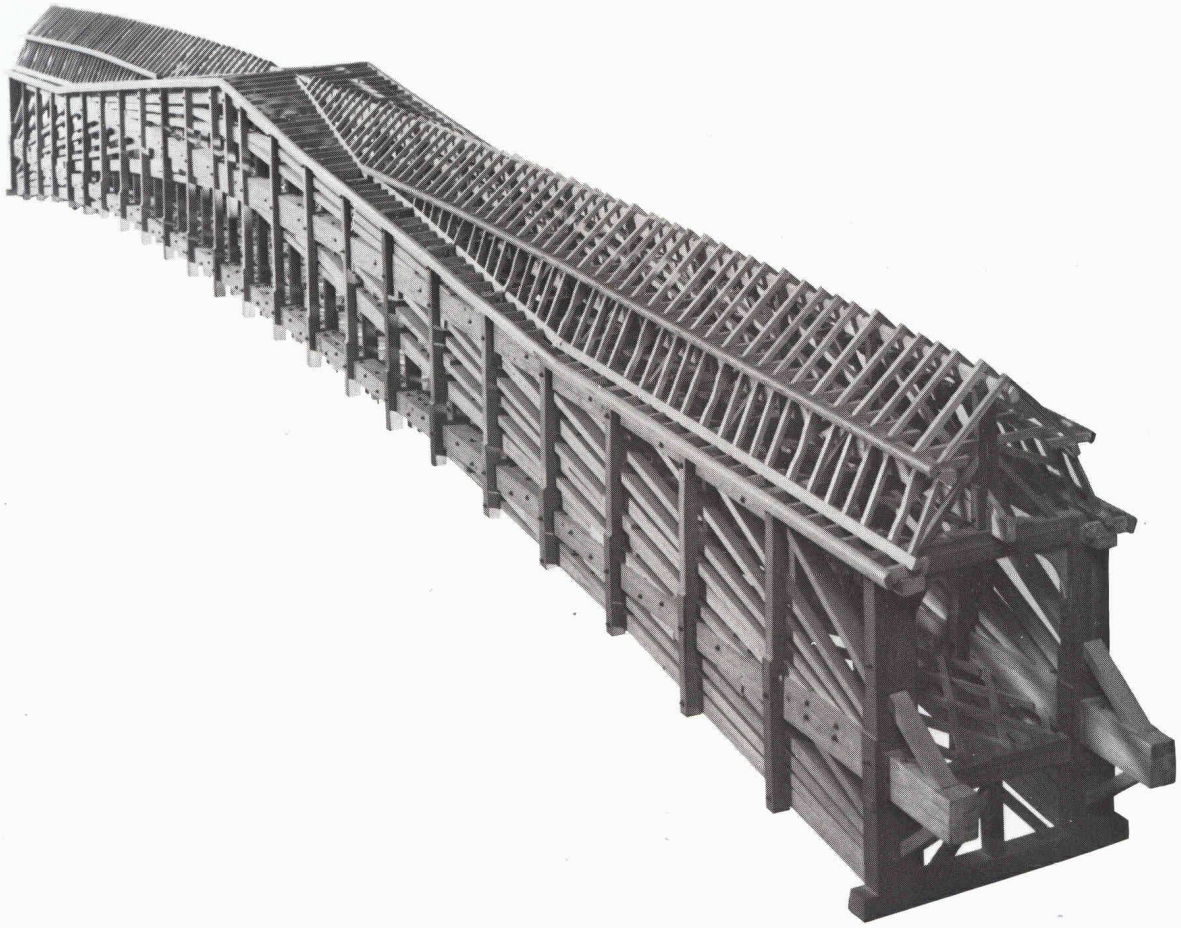
Yves Weinand

Le **pont en bois** des frères Grubenmann aurait pu être réalisé

Une étude récente réalisée par le Laboratoire des constructions en bois (IBOIS) de l'EPFL montre que le projet initial proposé à Schaffhouse par les frères Grubenmann pour un pont en bois d'une seule portée de près de 120 m aurait pu être réalisé[1].

Le charpentier et constructeur de ponts suisse Hans Ulrich Grubemann a dessiné vers 1755 un pont en bois d'une portée de 119 mètres qui devait traverser le Rhin à hauteur de la ville de Schaffhouse (voir article ci-contre). Initialement, le pont devait franchir le fleuve d'un seul arc (fig. 1). En plan, cette variante décrit une droite. Plus tard, deux changements sont intervenus : l'arc a été dédoublé par l'introduction d'une pile à mi-portée dans le Rhin, et le dessin du pont a subi une cassure en plan, avec l'apparition d'un angle à l'endroit de la pile. Ce second changement est sans doute dû à des questions en rapport avec le raccord du pont aux rives et son intégration au dessin urbain existant.

[1] Il s'agit d'une étude réalisée par les étudiants en génie civil Martino Avilés et Roberto Guidotti, et les étudiants en architecture Nicolas Lemmin et Moritz Profitlich, dans le cadre du cours de construction en bois donné par Hans Ulrich Buri et Yves Weinand.



1

Fig. 1 : Maquette du premier projet de Grubenmann pour un pont de 119 mètres de portée à Schaffhouse (Source : Lignum [1])

Fig. 2 : Mise en évidence des différents éléments porteurs : 2a) l'arc théorique, 2b) le contreventement horizontal au niveau du tablier, 2c) le contreventement horizontal en toiture, 2d) la « poutre / arc » en toiture

Grubenmann n'a pas pu construire la variante initiale du pont car les autorités locales ne lui ont pas fait confiance, ce qui nous ramène à une problématique bien connue et toujours d'actualité : lorsque des architectes ou des ingénieurs proposent de nouvelles solutions, il leur est souvent difficile de convaincre les milieux conservateurs de soutenir ces projets innovateurs pour pouvoir les concrétiser. Une situation qui perdure en dépit du fait que tout le monde prétend s'accorder sur le principe de vouloir appuyer le développement de solutions techniques innovatrices...

Un ouvrage significatif et exemplaire

La variante initiale du pont proposée par Grubenmann nous semble doublement significative et exemplaire : d'une part d'un point de vue relatif à l'histoire de la construction des ponts en bois ; de l'autre, par la proposition d'avoir recours à un système de construction pouvant être qualifié d'hybride et qui consiste à superposer plusieurs systèmes porteurs.

L'expérience acquise lors de la réalisation de nombreuses charpentes d'église a permis à Grubenmann d'affiner sa technique : son savoir faire intuitif en matière de charpentes en bois n'est d'ailleurs plus à démontrer. Par la suite, il l'a appliqué à de nombreux ouvrages d'art, surtout des ponts en bois. On se situe alors à la fin du XVIIIe siècle, une époque à laquelle les bases de la mécanique et de la résistance des matériaux ne sont pas encore bien établies. Le début du XIXe siècle est marqué par trois éléments appelés à jouer un rôle déterminant dans la construction : l'apparition d'ingénieurs ayant reçu leur formation dans des écoles polytechniques, la mise en place des fondements théoriques du calcul des structures – notamment par Navier et Cauchy – et l'émergence d'un nouveau matériau de construction, l'acier. La construction de ponts en bois subira dès lors un recul permanent pour quasiment disparaître à la fin du XIXe, l'acier, puis le béton armé, s'imposant progressivement comme les matériaux privilégiés de la nouvelle génération d'ingénieurs.

De ce fait, la construction de charpentes en bois – notamment pour des ouvrages d'art – n'a pas été l'objet d'une réelle approche théorique. Ces charpentes ont été systématiquement réalisées de manière artisanale, par des menuisiers ou des charpentiers qui s'appuyaient essentiellement sur des connaissances intuitives. En fait, l'ingénierie de la construction en bois ne s'est développée que dans la seconde moitié du XXe siècle, tout particulièrement à partir des années 80.

Ceci dit, il semble évident qu'une proposition pour un pont en bois d'une seule portée de 119 mètres ne trouverait probablement pas beaucoup d'appui du côté des décideurs aujourd'hui non plus...

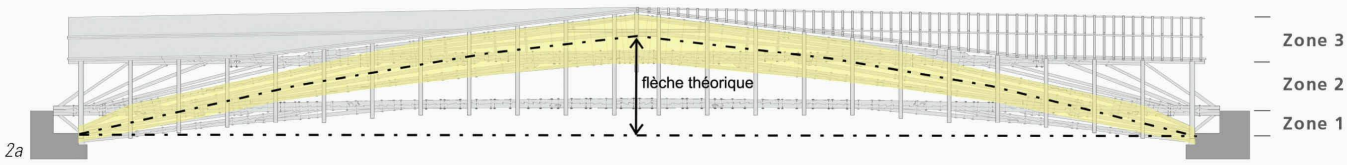
Le second élément qui confère une valeur particulière à la variante initiale du pont tient à son design, qui se caractérise par un système constructif que nous avons qualifié d'hybride : Grubenmann a en effet recours à plusieurs systèmes structurels qui se superposent au sein d'une seule conception. Cette superposition lui permet de tirer un profit maximal du bois et de surmonter bon nombre de difficultés locales. Il arrive par exemple à réaliser un pont de grande portée en utilisant des pièces en bois de faibles longueurs (une caractéristique spécifique au bois). En démultipliant les couches structurales, il aboutit à des solutions d'assemblages permettant d'éviter un affaiblissement local des sections.

Un exemple célèbre d'un système hybride est le pont de Brooklyn, à New York, pour lequel une démarche analogue consistant à superposer deux systèmes statiques – un système de pont suspendu et un système de pont haubané – a permis à l'ingénieur constructeur John Roebling de réaliser une construction remarquable.

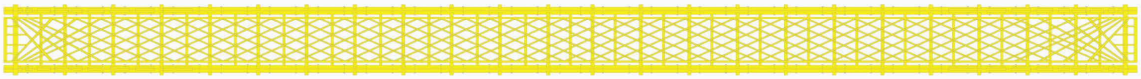
Géométrie du pont

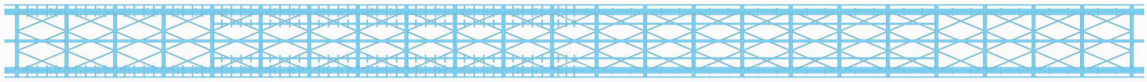
La première étape de l'étude de l'IBOIS a consisté à élaborer, à partir de dessins réalisés par Christian von Mechel [1][2] et John Soane [2] (fig. 4 et 8), une série de plans

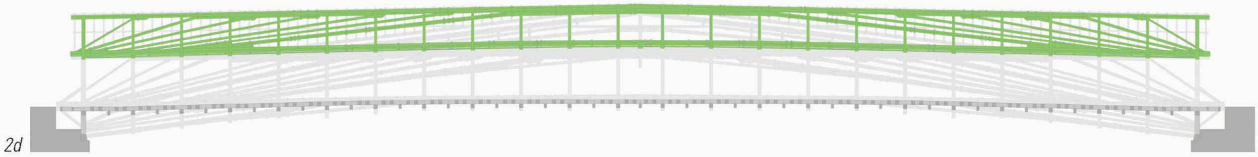
[2] Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.



2a


2b


2c


2d

d'architecture en apportant un soin tout particulier à la représentation correcte des aspects techniques et géométriques de l'ouvrage (fig. 3 et 9). Les plans historiques publiés ne montrent en effet souvent que des vues partielles, qu'il a fallu alors compléter et, dans une certaine mesure, interpréter à l'aide des dessins.

L'élévation montre d'abord une sorte d'arc continu qui subit diverses cassures[3] : il s'agit en fait d'une construction où des bois sont orientés de façon à plus ou moins s'aligner sur la ligne de force théorique d'un arc, en faisant varier le nombre de pièces y participant, selon l'intensité des efforts.

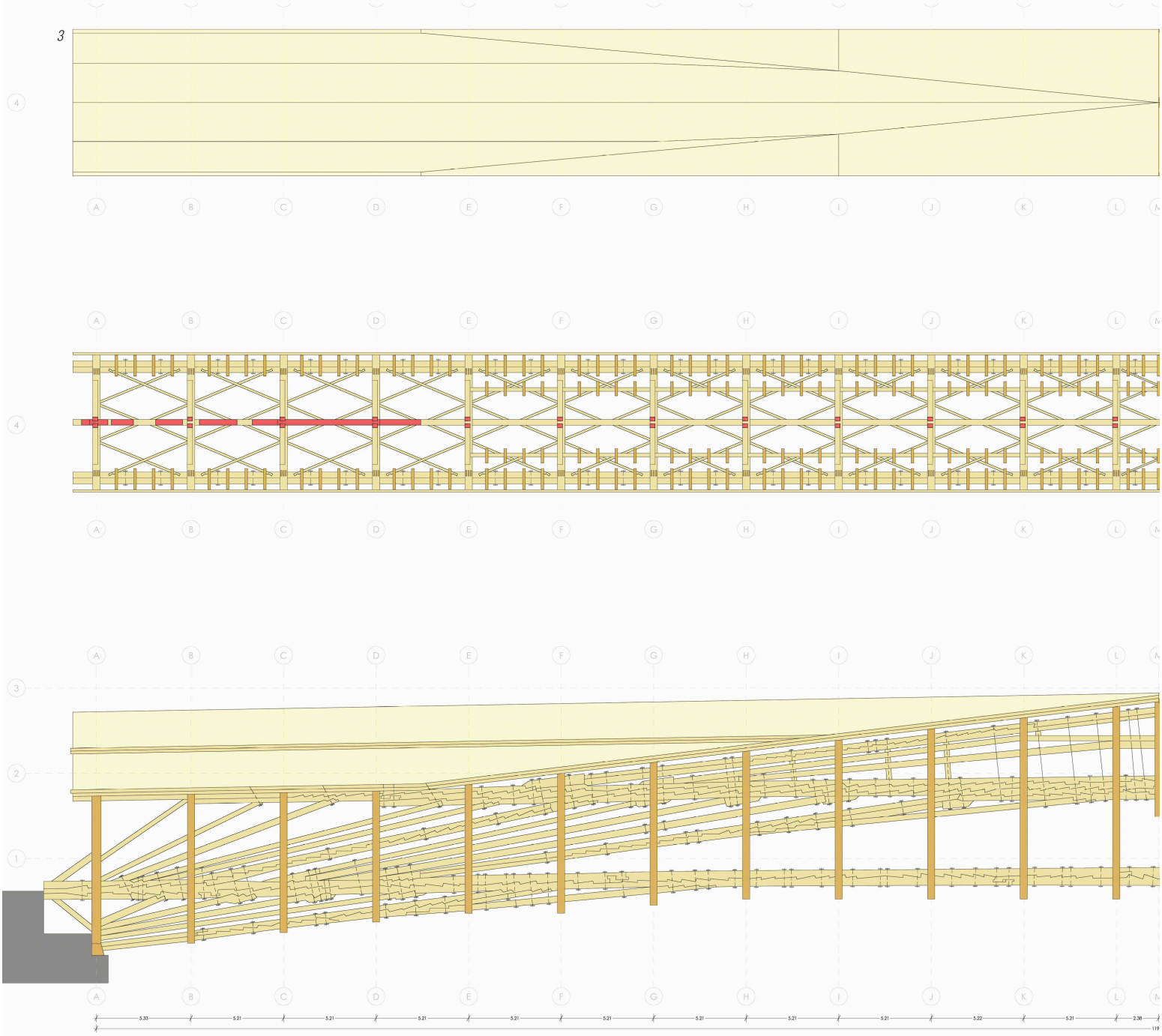
Il est alors possible de définir trois zones distinctes superposées verticalement (fig. 2a) : une première en dessous du tablier (zone 1), une deuxième entre le tablier et la base de la toiture (zone 2) ainsi qu'une troisième correspondant à la hauteur de cette dernière (zone 3). Grubenmann propose effectivement d'avoir recours à un arc surbaissé, situé essentiellement dans la zone 2. Dans la région des culées du pont, l'arc est renforcé par une série de pièces de bois, en dessous du tablier (zone 1). Au milieu du pont, l'arc sort dans le toit, pour atteindre son faîte (zone 3). En additionnant les trois zones de l'arc, on peut considérer que Grubenmann arrive à augmenter la flèche du pont quasiment du double de sa hauteur initiale ![4]

Parallèlement, le système utilise aussi la poutre de rive du tablier qui est fixée à l'arc dans la zone 2 par des montants. Ce faisant, il crée une sorte de structure en treillis, un treillis réellement triangulé uniquement dans certaines zones[5].

Les deux « poutres/arcs » ainsi crées le long du pont sont connectées à trois éléments structurels supplémentaires, formant autant de systèmes statiques distincts : le tablier (fig. 2b), la base de la charpente de la toiture (fig. 2c) et les deux plans inclinés de cette dernière (fig. 2d). Chacun de ces éléments constitue une poutre offrant une certaine rigidité flexionnelle dans son plan, participant ainsi à la stabilisation des arcs.

[2] Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.
[3] Il y a en fait deux arcs, un sur chacun des flancs du pont.
[4] On considère la distance entre la ligne moyenne de l'arc avec la ligne d'un tirant théorique.
[5] Cette structure tend éventuellement vers un comportement en poutre Vierendeel, peu probable cependant en raison d'une rigidité flexionnelle insuffisante des nœuds.

Fig. 3 : Plans d'architecture établis à partir de dessins réalisés par Christian von Mechel et par John Soane



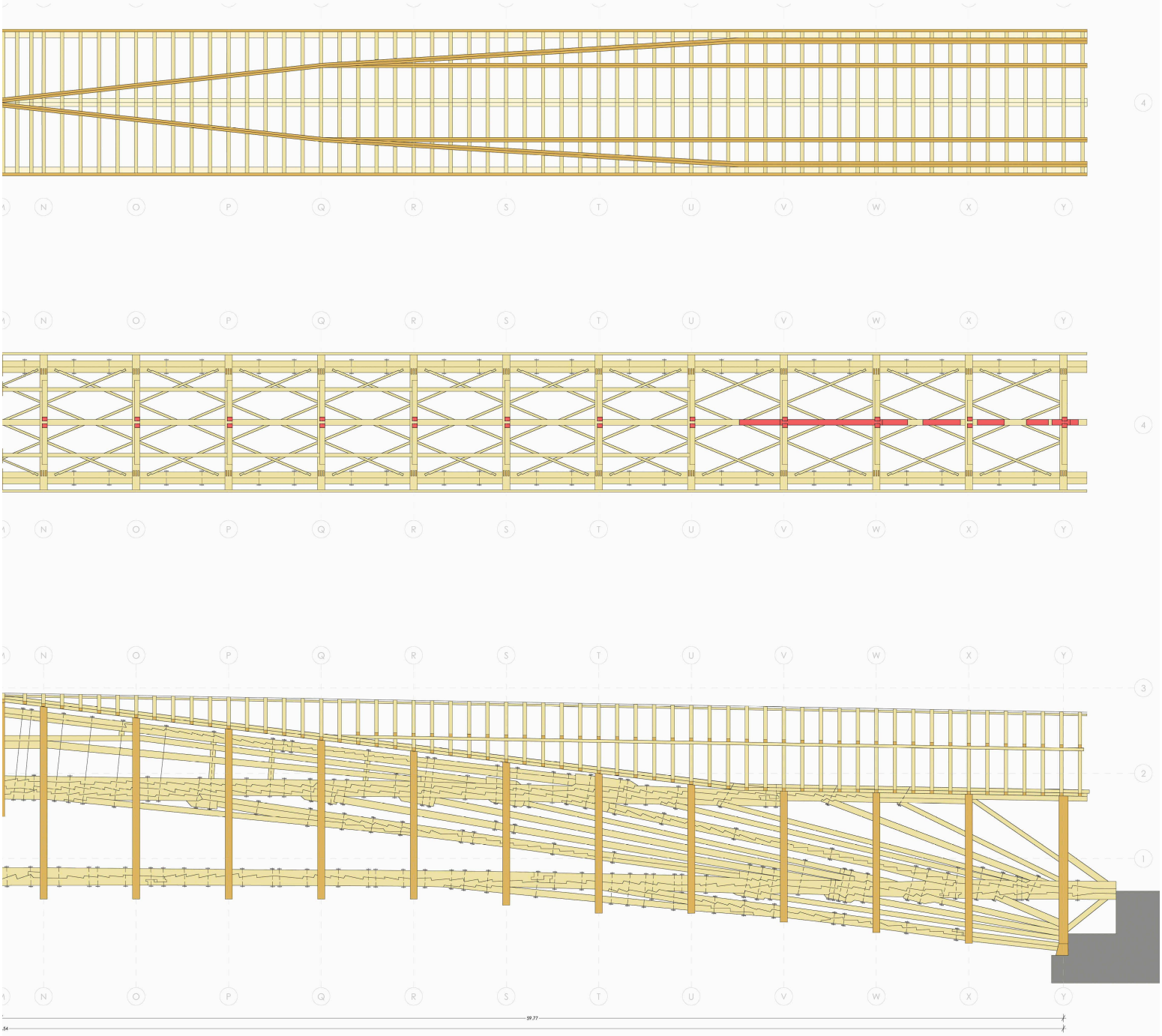
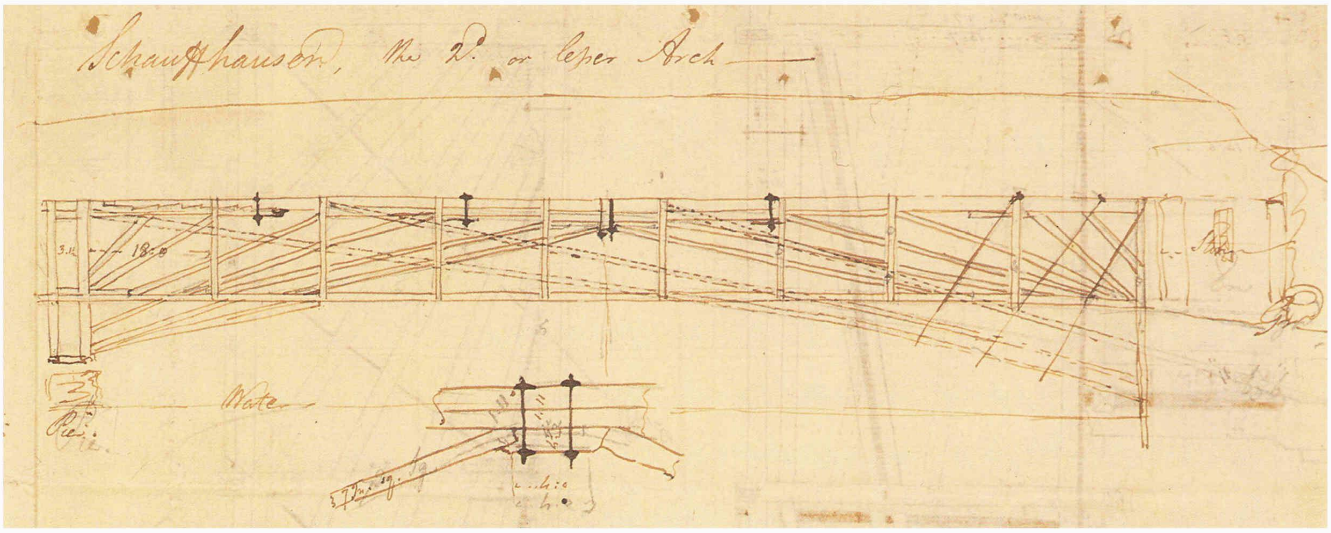

M N O P Q R S T U V W X Y
4
3
2
1
59.77

Fig. 4 : John Soane, dessin de la structure du pont réalisé à Schaffhouse par Grubenmann, 1780 (Source : détail, cat. no. 19, London, Sir John Soane's Museum [2])

Fig. 5 : Déformations d'ensemble pour deux conditions d'appui différentes : avec reprise de la poussée horizontale de l'arc par les fondations (a) ou par le tablier (b)

Fig. 6 : Modèle par éléments finis des poutres

Fig. 7 : Mise en évidence des points critiques où des dépassements de contraintes ont été observées



4

Grubenmann ajoute encore un troisième élément porteur longitudinal, situé dans un plan vertical passant par l'axe du faîte : il s'agit d'une « poutre/arc » hybride, similaire à celle qui vient d'être présenté, à la différence près que sa hauteur est réduite à celle de la toiture en projection verticale. Curieusement, cette poutre n'est pas directement appuyée dans son plan vertical, puisque les ouvertures aux extrémités du pont empêchent la mise en place de poteaux verticaux (fig. 8 et 9). Le cadre existant n'étant pas en mesure de reprendre leurs réactions verticales par flexion, cette troisième « poutre/arc » doit donc reposer sur des plans inclinés de la toiture, qui transmettent ensuite les efforts aux fondations, via les arcs latéraux.

Modélisation numérique

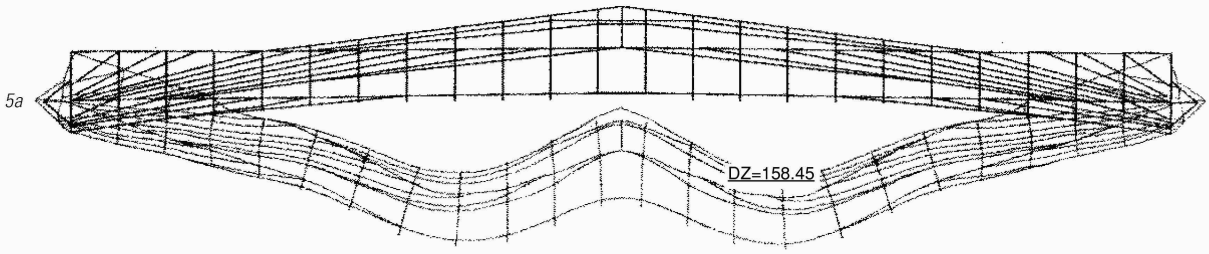
L'analyse des « poutres/arcs » latérales a été faite avec un modèle de calcul simplifié permettant d'effectuer un calcul en deux dimensions (fig. 6). Ce modèle ne tient compte que de la moitié du pont, plus précisément d'un seul plan vertical en profitant de la symétrie transversale de la structure, les charges étant bien entendu divisées par deux. Le choix d'effectuer un calcul dans un plan implique d'admettre une autre simplification locale : traditionnellement, afin d'éviter un affaiblissement trop important des sections, la jonction entre deux pièces de bois n'est pas réalisée dans un seul plan. Le modèle utilisé s'est donc servi des axes des pièces prismatiques pour les ramener dans un seul plan. Tous les nœuds ont été considérés comme parfaitement articulés.

Les poutres sont faites de plusieurs pièces prismatiques fixées entre elles par des tiges métalliques, constituant une sorte de « lamellé-vissé ». A certains endroits, les liaisons sont renforcées par un assemblage en dent de scie (fig. 3). Il est très délicat d'estimer la rigidité de ces poutres composées, qui varie selon leur sollicitation flexionnelle. En effet, leurs inerties totales étant variables selon la qualité de leur liaison, la répartition des efforts flexionnels se fera au prorata des variations de ces inerties. Ceci est le cas notamment pour les poutres du tablier.

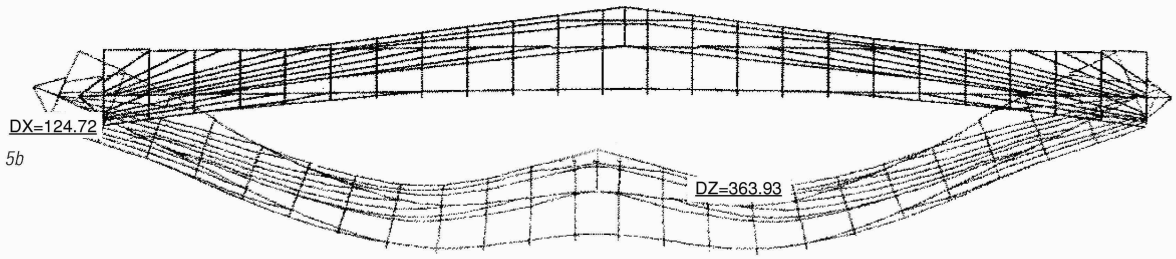
Un calcul ultérieur a montré que le découplage des éléments prismatiques assemblées n'avait que peu d'effet sur les déformations d'ensemble de l'ouvrage. Ceci signifie que les poutres latérales du tablier sont peu sollicitées en flexion, et que la conception de base d'un arc renforcé par des systèmes en treillis fonctionne bien.

Résultats

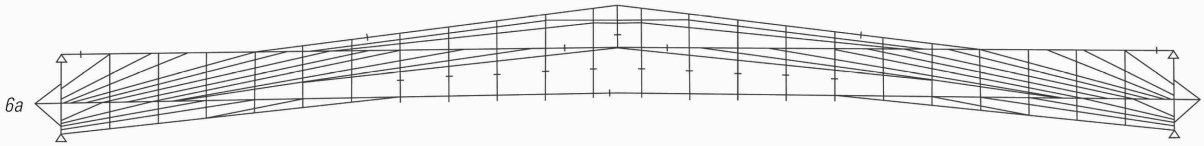
Le bon fonctionnement du système a été démontré en envisageant deux cas de figure. Dans un premier temps, les deux appuis ont été bloqués et reprennent l'effort horizontal de l'arc (fig. 5a), puis, un des appuis a été libéré horizontalement (fig. 5b). La première situation a permis de prouver que l'arc seul aurait pu soutenir le pont dans



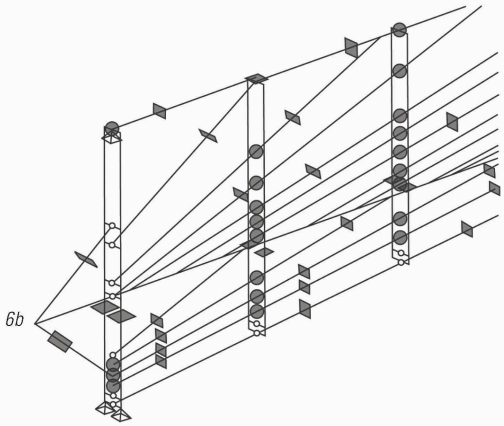
5a



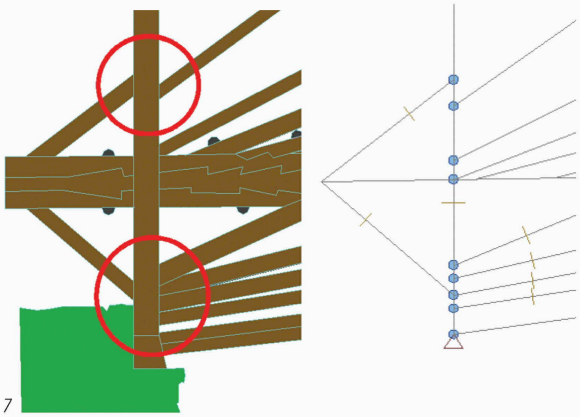
5b



6a



6b



7

son ensemble, ceci pour autant bien sûr qu'on garantisse la qualité de ses appuis horizontaux. La seconde variante a quant à elle pu montrer que la poutre du tablier aurait été en mesure de reprendre la poussée horizontale des arcs principaux, jouant ainsi le rôle d'un tirant. Il convient toutefois de souligner que le fait de libérer les appuis horizontaux assouplit considérablement l'ensemble de la structure, conduisant à un doublement des déformations.

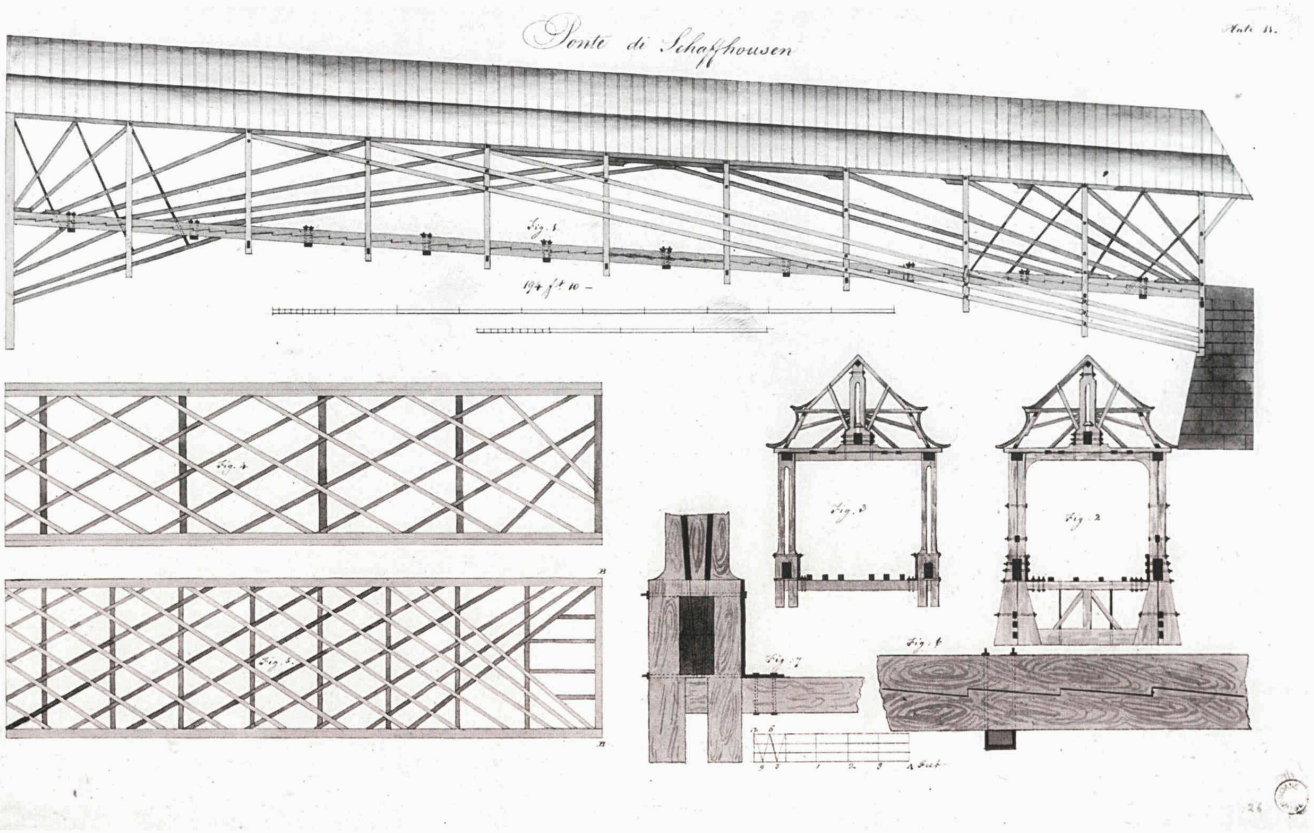
Grubenmann était probablement conscient des difficultés qu'il y aurait à réaliser des fondations capables de reprendre la poussée de l'arc et c'est probablement pour cela que sa conception incluait la participation de la poutre du tablier. Il est évidemment impossible de savoir aujourd'hui dans quelle mesure les fondations étaient censées reprendre la poussée de l'arc. Mais nos calculs montrent que, même sans aucune participation des fondations à la reprise des efforts horizontaux, la structure envisagée pour le pont était à même de fonctionner.

Notre modèle a aussi montré que le projet initial de Grubenmann – moyennant quelques renforcements locaux des montants des extrémités, qui auraient été soumis à des efforts de flexion très importants engendrés par les charges des obliques (fig. 7) – serait réalisable

Fig. 8 : John Soane Office : élévation, plans et coupes d'une travée du pont réalisé de Grubenmann, copie de Cristoforo Dell'Acqua and Michael Shanahan, env. 1792-3 (Source : cat. no. 27, London, Sir John Soane's Museum [2])

Fig. 9 : Plans d'architecture établis à partir de dessins réalisés par Christian von Mechel et par John Soane

(Sauf mention, tous les documents illustrant cet article ont été fournis par l'auteur)



8

avec du bois de classe C24, une qualité qui suffirait pour reprendre les efforts correspondant à l'état limite ultime. Il est en outre probable qu'on aurait eu recours à un bois de meilleure qualité, compte tenu qu'à cette époque, les charpentiers avaient systématiquement recours à des bois de qualité supérieure pour la construction des ouvrages d'art. La résistance et le module de ces bois peuvent être jusqu'à cinq fois plus importants que ceux des bois de la classe C24.

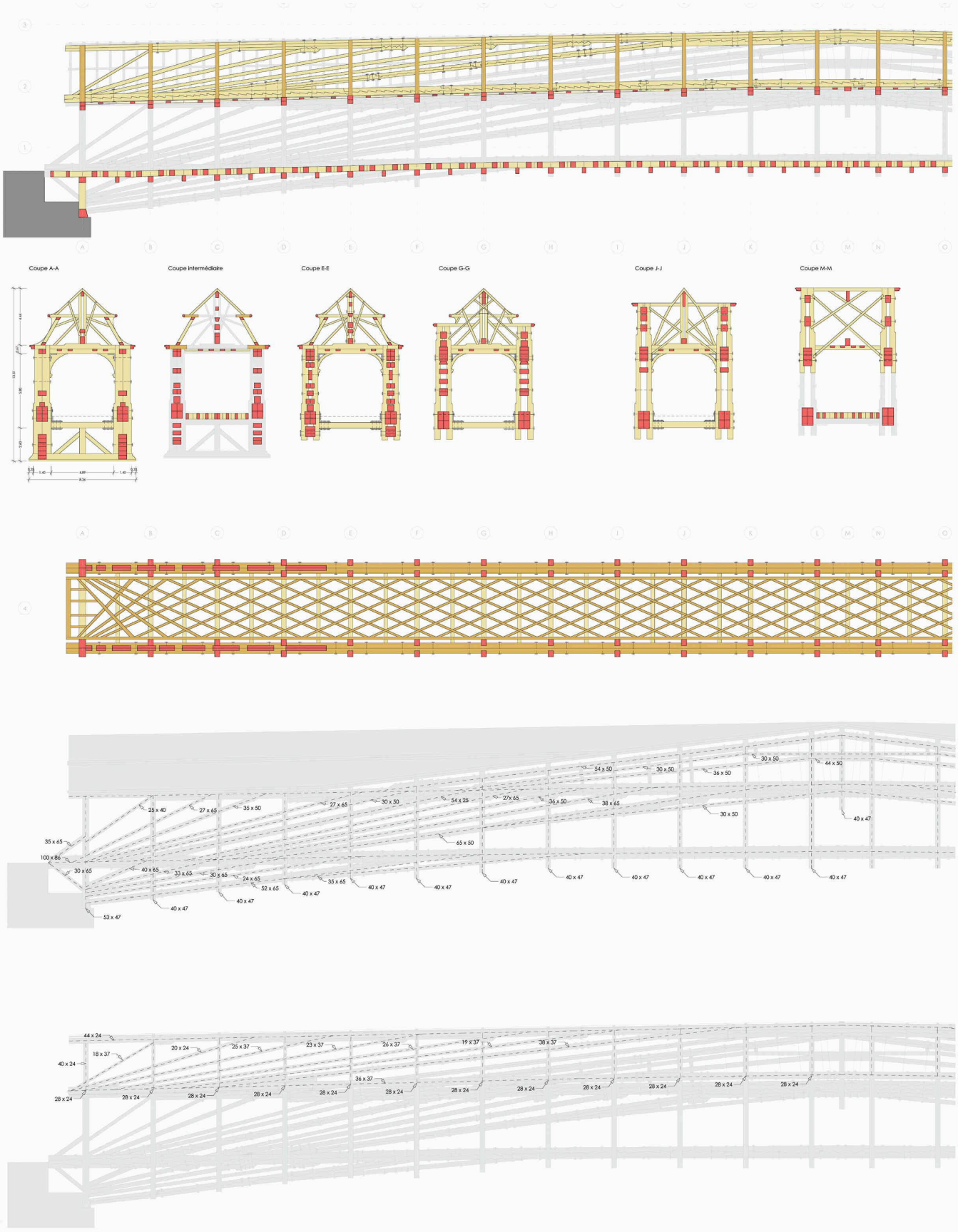
Une logique intuitive hors du commun

En plus de prouver la faisabilité du projet initial de Grubenmann, notre étude est aussi l'occasion de souligner l'évolution enregistrée en matière de construction d'ouvrages d'art. En effet, le recours à l'utilisation d'un système hybride contraste fortement avec une logique contemporaine adoptée par de nombreux concepteurs, qui consiste à privilégier des solutions donnant une vision claire et sans équivoque du système statique retenu. Si cette démarche se justifie aux yeux de certains, le fantastique exemple offert par Grubenmann – résultat d'un savoir-faire empirique et d'une compréhension intuitive hors du commun d'interactions complexes entre plusieurs systèmes – devrait nous encourager à explorer d'autres solutions. D'autant plus que, contrairement à notre glorieux prédécesseur, nous disposons aujourd'hui d'outils de calcul et de réalisation qui rendraient de telles explorations beaucoup moins périlleuses.

Yves Weinand, prof. EPFL, architecte ISA, dr ing. civil EPF
EPFL–ENAC–IS–IBOIS
GC H2 711 (Bâtiment GC), Station 18, CH–1015 Lausanne

Bibliograpie

[1] Joseph Killer : « Die Werke der Baumeister Grubenmann », Baufachverlag Lignum, 1998
[2] Angelo Maggi et Nicola Navone (éd.) : « John Soane and the wooden bridges of Switzerland. Architecture and the culture of technology from Palladio to the Grubenmanns », Accademia di architettura, Mendrisio, 2003


Coupe A-A
Coupe intermédiaire
Coupe E-E
Coupe G-G
Coupe J-J
Coupe M-M
25 x 40
27 x 65
35 x 50
27 x 65
30 x 50
54 x 25
27x 65
36 x 50
38 x 65
54 x 50
30 x 50
36 x 50
30 x 50
44 x 50
30 x 50
40 x 47
35 x 65
100 x 86
30 x 65
40 x 65
33 x 65
30 x 65
24 x 65
52 x 65
35 x 65
40 x 47
65 x 50
53 x 47
44 x 24
18 x 37
40 x 24
20 x 24
25 x 37
23 x 37
26 x 37
19 x 37
38 x 37
36 x 37
28 x 24

9