

POLITECNICO DI MILANO

Dottorato di Ricerca in **Conservazione dei Beni Architettonici**

XXIV Ciclo

DALLA *RULE OF THUMB* AGLI INIZI DELLA SCIENZA DEL COSTRUIRE IN FRANCIA

1716-1841

I PONTI IN LEGNO

Relatore | Prof. **Claudio CHESI**
Coordinatore del Dottorato | Prof. **Carolina DI BIASE**

Dottoranda

Chiara TARDINI

matr. 738515

INDICE:

INTRODUZIONE	p. I
--------------------	------

1. Tradizione e innovazione: i ponti in legno tra XVIII e XIX secolo.

1.0	Premessa	p.1
1.1	L'inizio di un nuovo corso	p. 2
1.1.1	L'esigenza di criteri dimostrabili	p. 3
1.1.2	La ricerca di corrette proporzioni	p. 5
1.2	La sistematizzazione del sapere	p. 9
1.2.1	L' <i>Encyclopédie ou Dictionnaire Raisoné des Sciences, des Arts et des Métiers</i> ..	p. 10
1.3	Calcolo di portata di un arco in legno secondo la <i>règle</i> di Galileo	p. 20
1.4	La dimensione trasversale del ponte e della trave	p. 23
1.5	Dalla trave all'arco: i <i>Concours des ponts</i> all' <i>École des Ponts et Chaussées</i>	p. 28
1.6	Jean Grubenmann: una nuova concezione dell'arco in legno	p. 38
1.7	Karl Friedrick von Wiebeking: "un nuovo modo di costruire i ponti in legno"	p. 51

2. Teoria e sperimentazione di elementi in legno nei trattati ottocenteschi francesi di architettura e ingegneria.

2.0	Premessa	p. 63
2.1	La resistenza del materiale: prime prove sperimentali	p. 64
2.2	L'eredità dello strumento matematico	p. 68
2.3	La verifica della teoria nell'esperienza	p. 81
2.4	Basi sperimentali della meccanica	p. 89
2.5	La proposta di un approccio rigoroso	p. 96
2.6	Il dimensionamento in funzione dei carichi	p. 106
2.7	Un apparato scientifico rigoroso reso facilmente accessibile	p. 111

3. La ricaduta delle nuove teorie nella pratica costruttiva dei ponti in legno.

3.0	Premessa	p. 121
3.1	Convenienza economica, resistenza e durabilità del Sistema Town	p. 122
3.2	L'evoluzione del sistema Town	p. 127
3.3	Prime relazioni di calcolo di ponti in legno secondo la teoria della trave inflessa di Navier	p. 139
3.3.1	Calcolo di portata di una passerella di servizio a Lione	p. 139
3.3.2	Calcolo di portata di un ponte provvisorio a Lozanne	p. 144
3.3.3	Verifica di resistenza della nuova campata del ponte di Vaudreuil	p. 149

Conclusioni	p. 155
--------------------------	--------

BIBLIOGRAFIA	p. 159
---------------------------	--------

ELENCO DELLE FIGURE	p. 167
----------------------------------	--------

Ringraziamenti	p. 171
-----------------------------	--------

APPENDICI:

A. Tabella conversione unità di misura	p. 173
B. Brevetto Sistema Town n° 3169X del 28 Gennaio 1820	p. 175
C. Brevetto Sistema Town n° 8743X del 3 Aprile 1835	p. 181
D. Manoscritto MS 2613 École des Ponts et Chaussées	p. 187
E. Manoscritto MS 233 École des Ponts et Chaussées	p. 199

ATLANTE ICONOGRAFICO

INTRODUZIONE

“... La filosofia è scritta in questo grandissimo libro
che continuamente ci sta aperto innanzi gli occhi
(io dico l'universo),
ma non si può intendere
se prima non s'impara intender la lingua,
e conoscer i caratteri, ne' quali è scritto.
Egli è scritto in lingua matematica
e i caratteri son triangoli, cerchi
ed altre figure geometriche,
senza i quali mezzi è impossibile
a intenderne umanamente parola;
senza questi è un aggirarsi vanamente
per un oscuro laberinto ...”

(G. Galilei, “Il Saggiatore”, 1623)

La comprensione della concezione strutturale delle opere realizzate fra il Settecento e l'Ottocento è un tema particolarmente delicato; in questo periodo, infatti, per effetto della progressiva affermazione del metodo galileiano, avviene il passaggio dall'approccio empirico alla progettazione delle strutture, basato sulla tradizione e l'esperienza, a quello scientifico, basato sul calcolo. Questo lavoro si propone di esaminare gli effetti che il processo di razionalizzazione delle conoscenze empiriche ha prodotto nella pratica costruttiva, analizzando il caso particolare dell'evoluzione nella concezione dei ponti in legno fra la seconda metà del XVIII secolo e la prima metà del XIX secolo. Lo studio mette in luce l'affermarsi di una nuova mentalità progettuale, assai diversa dalla precedente, sviluppando in questo modo strumenti utili per la corretta comprensione dell'impostazione strutturale delle opere concepite in quel periodo.

Le problematiche alla base di questo processo di avanzamento conoscitivo trovano fondamento nelle opere di Galileo, dalla cui vastità emergono, particolarmente cariche di significato, le discussioni relative ad alcune questioni di importanza critica: il ricorso alla matematica come linguaggio di descrizione dei fenomeni fisici, il corretto rapporto fra teoria e sperimentazione nella formulazione delle teorie scientifiche, il superamento di “forme strutturali corrette” a favore del concetto di dimensionamento in relazione alla resistenza dei materiali.

Il pensiero di Galileo, inserendosi in un contesto ancora fortemente influenzato dalla tradizione aristotelica, aveva messo in discussione il sapere tradizionale e dato l'avvio al superamento di una

cultura fondata su regole basate sull'esperienza. Si era così affermato il nuovo metodo della ricerca scientifica, che introduce una conoscenza basata sulla mutua influenza di teoria e sperimentazione.

Rispetto al mondo delle costruzioni la questione che Galileo ha il merito di introdurre e che costituisce una novità sostanziale, riguarda i due problemi interconnessi del rapporto di scala e della resistenza dei materiali. Strettamente collegato a quest'ultimo è quello della ricerca di coerenza fra le dimensioni longitudinali e trasversali degli elementi strutturali. Si incomincia ad intravedere una relazione tra la resistenza del materiale e le dimensioni delle strutture: "il modello ideale, schiettamente "matematico", come dice Galileo, che gli antichi utilizzavano per mutare una costruzione fatta di pietra, di calce e di rena, in purissima forma, in involucro di superficie e di volumi, non è sufficiente; deve essere arricchito di nuovi aspetti attinenti alla "materia" e alle sue capacità di resistenza"¹. Proprio seguendo il metodo galileiano, a partire da prove sperimentali di resistenza, hanno inizio i primi tentativi per determinare una legge che descriva il comportamento meccanico del materiale.

Rispetto a queste problematiche, il progresso nella concezione dei ponti in legno da metà '700 a metà '800 si presenta ricco di significato dal punto di vista sia della tipologia strutturale del ponte sia del materiale, il legno.

La scelta del ponte come tipologia strutturale di indagine ha un duplice motivo: da una parte essa è particolarmente impegnativa e costituisce un buon banco di prova per l'applicazione delle nuove teorie; dall'altra risulta particolarmente esemplificativa in virtù della coincidenza tra schema statico e disegno dell'architettura.

Quanto al materiale, il legno è presente da sempre nella storia dell'architettura, frequentemente impiegato in ogni genere di costruzione e per questo costituisce un riferimento privilegiato per osservare le innovazioni formali. Su di esso, nel periodo storico preso in esame, viene compiuta un'ampia serie di indagini ed esperimenti. Queste attività si inseriscono nel più ampio quadro dei numerosi studi sperimentali dell'epoca, svolti anche su altri materiali da costruzione e finalizzati alla caratterizzazione delle proprietà meccaniche.

Gli studi e l'esperienza costruttiva mettono in luce che, se è possibile sottoporre il legno a stati di flessione e di trazione, non è possibile fare altrettanto con la pietra, che possiede invece un buon comportamento a compressione. Si deduce pertanto che non è possibile, in generale, estendere ad altri materiali il modello che descrive il comportamento di un materiale specifico. Lo studio delle proprietà meccaniche del legno, fondamentale per la conoscenza degli stati di sollecitazione a trazione e a flessione, aprirà la strada all'impiego del ferro per la realizzazione come materiale strutturale.

¹ Edoardo Benvenuto, *La Scienza delle Costruzioni ed il suo sviluppo storico*, Roma, Edizioni di Storia e Letteratura, 2006, p. 107

Nel periodo di tempo analizzato, il fatto che il legno fosse preferibile ad altri materiali per la realizzazione di opere importanti e strutturalmente impegnative come i ponti è legato anche, in alcune zone, alla reperibilità del materiale a breve distanza ed a costo contenuto. Inoltre, la facilità di lavorazione rispetto alla pietra ed al mattone ha permesso di sperimentare forme strutturali molto diverse e anche molto complesse, costituite da un elevato numero di elementi differenti per forma e finalità.

Fra la metà del '700 e la metà dell'800, il tema dei ponti in legno si colloca al centro del vivace dibattito europeo che mira alla progressiva razionalizzazione delle tradizioni empiriche ereditate dal passato. Si affermano luoghi privilegiati di sviluppo della ricerca, tra loro interconnessi da una serie di legami; al dibattito contribuiscono, al tempo stesso, aspetti della cultura del tempo che svolgono un prezioso ruolo di veicolo e diffusione delle conoscenze; è il caso, per esempio, dei viaggi di formazione e dell'*Encyclopédie*.

I viaggi di formazione, concepiti con finalità del tutto estranee a quella della progettazione, contribuiscono tuttavia ad arricchire in maniera significativa la documentazione grafica sui ponti in legno dell'epoca. La lettura critica di questi disegni consente di ottenere informazioni preziose riguardo alle modalità di realizzazione degli elementi strutturali ed alle loro dimensioni. In parallelo, l'*Encyclopédie* di Diderot e D'Alembert, dettata dal desiderio di sistematizzazione e diffusione della sapienza ad un pubblico vasto, introduce una nuova modalità di divulgazione del sapere e di creazione di un linguaggio comune.

La sede privilegiata di avvio del processo di razionalizzazione delle conoscenze è la Francia, cui spetta un indiscusso primato, ben testimoniato dalle sue nuove istituzioni culturali; si distingue, in particolare, il ruolo dominante nel campo delle costruzioni civili assunto e riconosciuto all'*École des Ponts et Chaussées*, la più grande scuola di ingegneria dell'epoca, e quello della formazione accademica, svolto dall'*Académie d'Architecture*, dall'*Académie des Sciences* e successivamente dall'*École Polytechnique*, luoghi prestigiosi di formazione degli allievi e di dibattito scientifico e culturale. Sul modello di queste scuole nel giro di qualche anno vengono fondate analoghe Accademie: nel 1751 la *Wiener Neustadt Akademie*, nel 1787 la Reale Accademia Militare di Napoli e nel 1824 la Scuola dei Cadetti Matematici Pionieri di Modena.

I trattati di architettura ed ingegneria, per lo più concepiti e sviluppati nell'ambito di queste istituzioni culturali, rivestono un ruolo determinante per la comprensione del mutamento della mentalità dell'epoca ed è dalla lettura attenta di alcuni di essi che è possibile cogliere, attraverso il progressivo affermarsi del metodo scientifico galileiano, la formazione di una nuova concezione nella progettazione delle costruzioni.

In questo processo di studio e di ricerca, la Francia è aperta al mondo circostante dimostrando interesse verso altre realtà che, pur senza essere coinvolte nel medesimo processo di razionalizzazione

delle conoscenze, meritano tuttavia attenzione. Proprio in virtù della mentalità fortemente razionale, gli studiosi francesi sono in grado di cogliere l'interesse ed il carattere di novità insiti nell'arditezza di certe soluzioni. Nasce così una rete di scambi e interazioni con Svizzera, Italia del nord, Germania, Irlanda e Gran Bretagna; una rete che, nel XIX secolo, arriva ad estendersi anche agli Stati Uniti d'America.

In riferimento a questo quadro di interessi culturali, la ricerca svolta si è proposta di ricostruire e discutere l'affermarsi dell'approccio scientifico basato sul calcolo per la determinazione delle dimensioni degli elementi dei ponti in legno all'interno dell'arco di tempo compreso tra il 1716 ed il 1841. Il 1716 è l'anno della pubblicazione del *Traité des ponts* di Henri Gautier, primo trattato francese sui ponti, che contiene *in nuce* lo spirito che dà origine al fermento delle idee. La data del 1841 è quella in cui viene documentata per la prima volta l'applicazione della formula della trave inflessa di Navier come calcolo di un elemento strutturale. La circostanza è quella della verifica di un ponte in legno costruito in Francia secondo lo schema strutturale brevettato negli Stati Uniti d'America da Ithiel Town.

Il lavoro svolto si sviluppa attraverso tre fasi di studio successive.

La prima, che riguarda il periodo precedente all'avvio di questo processo di profondo rinnovamento, documenta lo stato delle conoscenze di tipo euristico ereditate dal passato e basate sull'esperienza attraverso l'esame di alcuni esempi appartenenti alla tradizione costruttiva dei ponti in legno in area alpina e francese. Al tempo stesso, cerca di mettere in luce i primi tentativi di transizione verso nuove forme della conoscenza e i primi sforzi di sistematizzazione del sapere. Ne è un esempio la redazione dell'*Encyclopédie* a cura di Diderot e D'Alembert; lo studio di alcune parole chiave pertinenti all'argomento di questo lavoro (*bois* – il materiale, *charpente/charpentier* – l'arte del costruire in legno, *pont* – la tipologia strutturale) aiuta a delineare il quadro delle conoscenze dell'epoca. In generale, la prima metà del XVIII secolo è caratterizzata da una forte esigenza di rinnovamento in ambito scientifico e dalla necessità di adozione di criteri scientificamente dimostrabili. Ne danno chiara dimostrazione alcuni isolati tentativi di dimensionamento degli elementi dei ponti in legno, riportati in documenti conservati presso il *Fonds Ancien* dell'*École des Ponts et Chaussées*, tra i quali sono stati selezionati quelli più significativi, presentati e discussi in questo lavoro.

La seconda fase di studio si riferisce allo sviluppo, nei primi decenni del XIX secolo, delle nuove teorie che fondano la progettazione e la verifica degli elementi strutturali su criteri razionalmente dimostrabili. Lo studio di questo periodo rimanda necessariamente alla lettura dei trattati di architettura ed ingegneria dell'epoca, che costituiscono lo strumento principale di presentazione e divulgazione degli sviluppi teorici. Nella trattatistica confluiscono gli studi matematici e i risultati della sperimentazione, egualmente essenziali alle nuove formulazioni. Particolarmente interessanti

sono i lavori che riguardano entrambi gli aspetti, quello della formulazione teorica e quello della sperimentazione; in essi il dato sperimentale è utilizzato in un primo tempo per la deduzione di una legge e successivamente come verifica della teoria; tra questi testi è stata operata la selezione presentata e discussa in questo lavoro.

La terza fase di studio, infine, intende documentare le effettive ricadute nella pratica costruttiva dei nuovi strumenti di calcolo della meccanica delle strutture. La scoperta di soluzioni progettuali meritevoli di interesse operata dagli studiosi francesi è ben documentata nello strumento prezioso degli *Annales dell'École des Ponts et Chaussées* che da subito rivolgono la loro attenzione al di fuori del territorio francese. Dal 1837 fanno la prima comparsa anche i riferimenti agli Stati Uniti; in quell'anno in particolare viene descritto il sistema brevettato da Ithiel Town e nel 1839 quello proposto da Stephan Harriman Long. È nelle note allegate al primo volume del 1841 che si incomincia ad intravedere l'applicazione della teoria della trave inflessa di Navier ad alcuni semplici esempi: la campata del ponte di Vaudreuil crollata a causa di un'inondazione viene ricostruita in legno, utilizzando lo schema strutturale Town. Le nuove possibilità offerte dal calcolo vengono applicate alla verifica di opere concepite ancora sulla base di criteri intuitivi e dell'esperienza. È l'inizio di un nuovo processo: quello della diffusione della nuova scienza, che razionalizza e quindi rivaluta i prodotti delle tradizioni costruttive.

Questo lavoro si articola in tre capitoli, corrispondenti alle tre fasi di studio delineate: quella della transizione verso un approccio scientifico alla progettazione, quella della formulazione delle nuove teorie, infine quella delle prime applicazioni concrete al calcolo delle strutture a cui si aggiunge un atlante iconografico che raccoglie una serie di disegni relativi ad esempi significativi selezionati dall'archivio del *Fonds ancien dell'École des Ponts et Chaussées* e della sezione *Early works* della biblioteca del *Royal Institute of British Architects*. Con costante riferimento al caso specifico ma significativo dei ponti in legno, ciascuna delle tre fasi di studio si basa su una selezione di documenti dell'epoca che dalla ricerca sono emersi come particolarmente efficaci nel descrivere gli aspetti caratteristici.

Capitolo 1

Tradizione e innovazione: i ponti in legno tra XVIII e XIX secolo

“E ancora che la natura cominci
dalla ragione
e termini nella speranza,
a noi bisogna seguire il contrario,
cioè cominciando [...]
dalla speranza, e
con quella investire
la ragione”
(Leonardo, Ms 55 recto – I.d.F.)

1.0 Premessa

Il quadro delle realizzazioni dei ponti in legno nella seconda metà del XIX secolo risulta molto frammentato e di non semplice ricostruzione; pertanto gli esempi presentati in questo capitolo non hanno la pretesa di esaurire la casistica. La selezione è stata effettuata in base all'interesse che questi hanno suscitato nell'ambito delle istituzioni culturali dell'epoca, nei luoghi di ricerca e di studio attenti a quanto di nuovo ed interessante accade.

In questo periodo iniziano anche ad emergere segnali di esigenza di rinnovamento dei criteri delle regole di progetto: uno di questi può essere identificato con il *Traité des ponts* di Gautier, primo trattato francese dedicato esclusivamente ai ponti. È particolarmente significativo che questa esigenza si manifesti in un trattato sui ponti e non altrove, segno che la tipologia strutturale del ponte, singolarmente impegnativa, più delle altre è adatta a far emergere il problema. L'esigenza, però, una volta espressa, non ha risposta immediata.

Più in generale, lo stato delle conoscenze dell'epoca è ben testimoniato dall'*Encyclopédie* di Diderot e D'Alembert, che riveste un ruolo significativo nella caratterizzazione della cultura dell'epoca. La semplice lettura di alcune parole chiave riferite alle tematiche dei ponti e del legno fornisce una chiara immagine di quale fosse il livello aggiornato delle conoscenze, compatibile con le esigenze della divulgazione ad un ampio pubblico.

Una ricerca approfondita presso il *Fonds Ancien* dell'*École des Ponts et Chaussées* ha portato ad individuare un paio di documenti significativi, scritti rispettivamente nel 1793 e nel 1798, che sono testimonianza dell'inizio di un nuovo approccio: nel primo, utilizzando la regola di Galileo per il calcolo di portata di una trave, l'autore si rende conto che il risultato ottenuto si discosta dalla realtà ed esprime quindi la necessità di inserire un coefficiente riduttivo; nel secondo, invece, si propone di

trovare una giustificazione teorica alla regola che stabilisce le proporzioni ideali per la sezione rettangolare, problema in realtà già dimostrato per via analitica da Parent molti anni prima, estendendo il quesito agli ingegneri dei *Ponts et Chaussées*.

Viene quindi dato spazio alla vicenda, molto significativa, dei *Concours de pont* all'interno dei *Concours d'architecture* dell'*École des Ponts et Chaussées*; attraverso una rassegna di esempi si possono riconoscere tre distinti stadi di sviluppo della concezione strutturale. I *Concours* documentano con ricchezza di esempi quali siano gli orientamenti e le tipologie strutturali di ponti in legno più diffuse. Una serie selezionata di esempi è presentata e discussa in questo capitolo. Una rassegna più ampia è contenuta nell'Atlante iconografico allegato.

Un ruolo fondamentale nel promuovere, generare e diffondere il sapere in una molteplicità di forme è svolto da alcune istituzioni dell'epoca. L'*Académie Royale des Sciences*, incuriosita dalle realizzazioni di ponti in legno dei fratelli Grubenmann (in particolare dei ponti di Wettingen e di Schaffhausen), crea l'occasione per avere una copia dei disegni e stende una relazione (incompleta), del ponte di Schaffhausen¹. Questi disegni e la relazione manoscritta, attualmente conservati presso il *Fonds Ancien* dell'*École des Ponts et Chaussées* costituiscono, insieme alle incisioni realizzate da Michael Shanahan e Cristoforo Dell'Acqua nel 1770 e da Joane Soane nel 1780, gli unici documenti di tipo grafico dell'epoca di cui oggi disponiamo relativamente ai due ponti citati. La curiosità accademica (e degli ingegneri *des Ponts et Chaussées*) verso questi esempi ha avuto il merito di avviare un processo di studio e di sviluppo, i cui esiti cambieranno radicalmente l'approccio nei confronti delle strutture.

In conclusione di capitolo vengono presentate alcune opere di Karl Friederick von Wiebeking, che, benché realizzate nei primi anni del XIX secolo, sono state trattate in questo capitolo in quanto concepite e realizzate in base a conoscenze di carattere pre-scientifico.

1.1 L'inizio di un nuovo corso

Nella prima metà del '700 si comincia ad avvertire un'esigenza sempre più forte di razionalizzazione delle conoscenze: non bastano più le regole empiriche della tradizione impiegate nei procedimenti di progetto; occorre, secondo l'insegnamento di Galileo, saper calcolare le corrette dimensioni da assegnare agli elementi strutturali in relazione ai carichi che devono sostenere. È inoltre necessario che le nuove regole derivino e siano confermate dalla sperimentazione, cioè da un costante confronto con la realtà fisica.

I trattati di Gautier e Bélidor sono uno specchio significativo di queste nuove istanze e del vivace confronto del periodo.

¹ MS 2611. © Collection École Nationale des Ponts et Chaussées

1.1.1 L'esigenza di criteri dimostrabili

Il *Traité des Ponts* di Henri Gautier (1660-1737) pubblicato nel 1716, è il primo trattato in lingua francese dedicato esclusivamente ai ponti. Dopo una rapida rassegna sui ponti romani e medievali, Gautier commenta i ponti di Palladio, individuando le caratteristiche che devono possedere i ponti: devono essere *dressés*, protetti, *commodes*, con accessi non eccessivamente ripidi, *durables*, costruiti secondo l'Arte del costruire, con materiali di buona qualità, ed infine *bien ornés*, realizzati secondo le regole del buon gusto dell'Architettura. Nel primo capitolo l'autore riporta e commenta alcune parti dei trattati di Leon Battista Alberti² e di Sebastiano Serlio³ riguardanti i ponti dai quali risulta evidente che l'approccio al dimensionamento degli elementi che costituiscono la struttura del ponte si basa su regole geometriche. Riferendosi all'opera di François Blondel, Gautier afferma che i migliori architetti hanno lasciato indicazioni scritte in merito al dimensionamento basato su proporzioni, ma la dimostrazione razionale di queste regole, non è ancora stata fornita⁴. Questa affermazione è di straordinaria importanza perché costituisce uno dei primi momenti di presa di coscienza dell'esigenza che l'Arte del costruire sia basata su regole razionalmente dimostrabili e non più su regole tramandate da figure pur autorevoli, la cui veridicità ed efficacia non può essere dimostrata. Inoltre, aggiunge Gautier, su questo argomento anche i migliori architetti non concordano non solo sulle proporzioni che vanno assegnate alle costruzioni, ma anche sull'aspetto della decorazione, infatti le Arti e le Scienze sono ancora imperfette. Ciascun architetto, prosegue l'autore, ha opinioni diverse sia in merito all'aspetto strutturale che a quello estetico. Se si chiedesse la ragione di un certo spessore dell'arco o di una certa larghezza delle spalle a coloro che l'hanno progettato secondo l'insegnamento degli antichi, non saprebbero rendere le ragioni di ciò che li ha guidati nel dimensionamento degli elementi. I criteri di dimensionamento in uso, dice Gautier, non sono in grado di giustificare razionalmente le scelte⁵ ma allo stesso tempo sembrano abbastanza affidabili da poter essere impiegati nella pratica costruttiva. Questa posizione è altrettanto diffusa quanto quella contraria: gli architetti giudicano un'opera bella e resistente solo se è stata dimensionata in base alle proporzioni tra gli elementi. Gautier sottopone i suoi quesiti ad alcuni uomini di scienza in modo che, quando sarà terminata la stesura del *Traité*, tutti potranno conoscere la soluzione corretta basata su criteri scientifici che sarà

² Leon Battista Alberti, *De Re Aedificatoria*, Venezia, Francesco Franceschi, 1450

³ Sebastiano Serlio, *I sette libri dell'Architettura*, Venezia, 1584

⁴ "C'est-là tout ce que les plus habiles Architectes nous ont donné par écrit de la proportion des Ponts; mais pour nous donner des raisons démonstratives, personne ne l'a fait encore" in Henri Gautier, *Traité des ponts*, Paris, 1716 (consultata la quarta edizione: Parigi, Duchesne, 1765), p. 20

⁵ "On le voit par rapport à tout ce que j'ai rapporté ci-devant d'eux; ils ne nous donnent aucune raison pourquoi ils sont les piles, les culées, les arches, & c. d'une telle largeur, ou d'une telle épaisseur, & ceux qui travaillent aujourd'hui sur les exemples des Anciens, ne savent pas non plus pour quelle raison ces Auteurs ont travaillé ainsi. On se conduit seulement par des idées qu'on ne peut pas démontrer, mais qui paroissent assez vrai semblables pour pouvoir être suivies, à l'exemple de tant d'autres qui ont réussi ailleurs, & l'on dit que l'ouvrage est beau & solide, parce que les proportions entre les parties qui le composent, y sont obserées.", ibidem, p. 21

pubblicata sul *Journal des Savans*⁶ dell'agosto 1715. Infine Gautier esprime perplessità riguardo alla modalità con cui De la Hire ha affrontato questi argomenti: chi non conosce l'algebra, sostiene Gautier, non è in grado di comprendere i risultati del suo lavoro e di altri, poiché espresso nei termini astratti di una Scienza che coloro che realizzano le opere e coloro che hanno studiato solo in parte non conoscono, e non sono in grado di applicare nella pratica costruttiva.

Gautier dedica il capitolo X all'impiego del legno, premettendo che nel corso del tempo l'Arte della Carpenteria ha subito continui miglioramenti: a differenza di periodi precedenti, il legno viene solitamente squadrato e i giunti sono realizzati con tenone e mortasa in sostituzione di fori e perni. Tutti questi progressi, prosegue Gautier, sono dovuti ai contributi offerti dalla Meccanica, grazie alla quale è possibile assegnare le giuste dimensioni allo spessore e alla lunghezza degli elementi. Gautier è convinto che sia dannoso tanto un sovradimensionamento quanto un sottodimensionamento degli elementi; il primo perché aumenta inutilmente il carico, il secondo per evidenti ragioni di resistenza insufficiente. È solo la pratica, conclude Gautier, che può insegnare la procedura corretta⁷, e propone l'utilizzo di una tabella, rappresentata in figura 2, già riportata nel testo di Bullet⁸ (rappresentata in figura 1) e De La Hire⁹, in cui sono indicati i rapporti di lunghezza, larghezza ed altezza di undici travi, a partire da 12 piedi di lunghezza¹⁰, fino ad arrivare a 42 piedi di lunghezza, secondo multipli di tre piedi.

In questa tabella vengono forniti gli stessi rapporti di lunghezza, larghezza, altezza a partire da elementi di 15 piedi di lunghezza; non sono ancora maturi i tempi per registrare un cambiamento vero e proprio nella soluzione del problema.

Longueur des Poutres Un poutre de 12 pieds anta	leur Largeur 10 pouces sur	leur hauteur 12 pouces
15 pieds.	11	13
18 p.	12	15
21 p.	13	16
24 p.	13 $\frac{1}{2}$	18
27 p.	15	19
30 p.	16	21
33 p.	17	22
36 p.	18	23
39 p.	19	24
42 p.	20	25

Figura 1: Pierre Bullet. Tabella.

Longueur.	Largeur.	Hauteur.
12 Pieds.	10 Pouces.	12 Pouc.
15	11	13
18	12	15
21	13	16
24	13 $\frac{1}{2}$	18
27	15	19
30	16	21
33	17	22
36	18	23
39	19	24
42	20	25

Figura 2: Henri Gautier. Tabella.

⁶ Il *Journal de Savans* è il primo giornale scientifico pubblicato in Europa a partire dal 1665.

⁷ "Il n'y a que la pratique qui nous enseigne la bonne manière de la faire". In Henri Gautier, *Traité des ponts*, Paris, 1716 (consultata la quarta edizione: Parigi, Duchesne, 1765), p.52

⁸ Pierre Bullet, *L'architecture pratique*, Paris, Michallet, 1691 (Consultata edizione: Pierre Bullet, *L'architecture pratique*, Paris, Libraires Associées, 1788)

⁹ Gabriel Philippe De La Hire, *L'art de charpenterie* de Mathurin Jousse. Corrigé & augmenté de ce qu'il y a de plus curieux dans cet Art, & des machines les plus nécessaires à un Charpentier, Paris, Thomas Muette, 1702

¹⁰ Per la conversione delle unità di misura vedi tabella allegata.

Nel caso in cui non vengano utilizzati elementi in legno squadrato, Gautier propone di utilizzare una tabella riportata da Le Blanc e indicata in figura 3, in cui sono indicati i valori della circonferenza e della superficie espressi rispettivamente in pollici ed in pollici quadrati in funzione del diametro del tronco¹¹. I valori indicati da Gautier arrivano fino ad un diametro di 20 pollici, valore limite oltre il quale l'autore ritiene difficile riuscire a reperire la materia prima.

Circonferenza Pouces.	Diametro		Superficie Pouces
	Pouces.	Lignes.	
18	5	8	27
19	5	10	29
20	6	0	31
21	6	2	33
22	7	0	35
23	7	2	38
24	7	4	40
25	7	6	43
26	7	8	45
27	8	0	48
28	8	2	50
29	8	4	53
30	8	6	55
31	9	0	58
32	9	2	60
33	9	4	63
34	9	6	65
35	10	0	68
36	10	2	70
37	10	4	73
38	10	6	75
39	11	0	78
40	11	2	80
41	11	4	83
42	11	6	85
43	12	0	88
44	12	2	90
45	12	4	93
46	12	6	95
47	13	0	98
48	13	2	100
49	13	4	103
50	13	6	105
51	14	0	108
52	14	2	110
53	14	4	113
54	14	6	115

Figura 3: Diametri, circonferenze e superfici di tronchi.

1.1.2 La ricerca di corrette proporzioni

Bernard Forest de Bélidor (1698-1761) pubblica nel 1729 *La Science des ingénieurs dans la conduite des travaux de fortification et d'architecture civile*, trattato successivamente tradotto e pubblicato in tedesco a Vienna nel 1757. Nel 1737 pubblica *L'Architecture hydraulique*, in cui per la prima volta si fa riferimento all'uso del calcolo integrale per la soluzione di problemi pratici. Nel 1755 pubblica il *Dictionnaire portatif de l'ingénieur*, sintesi del *Dictionnaire d'architecture* di Augustin-Charles D'Aviler. Le numerose traduzioni e ristampe che accompagnano la pubblicazione de *La Science des ingénieurs* testimoniano la sua fortuna editoriale, confermata anche dall'edizione del 1813 arricchita delle "note del signor Navier"; il 1832 è la data dell'edizione italiana pubblicata da Gaspare Truffi.

¹¹ Per la conversione delle unità di misura vedi tabella allegata.

Il trattato è diviso in sei libri: il primo fornisce indicazioni per il dimensionamento dei rivestimenti delle opere di fortificazione, il secondo affronta il tema della meccanica delle volte e del dimensionamento dei piedritti. Il terzo libro si occupa dei materiali da costruzione, delle loro proprietà e della relativa posa in opera. Il quarto è dedicato alla costruzione di edifici militari e civili; il quinto alla decorazione degli edifici ed alla spiegazione di alcuni termini degli Ordini architettonici. Il sesto infine tratta della modalità di stima di fortificazioni di opere civili. Per l'ampia diffusione di questo testo (seguono ristampe per circa cento anni) è importante sottolineare alcune osservazioni contenute nel secondo capitolo del quarto libro *Principi generali su la resistenza del legno* e le note relative apposte da Navier. L'approccio di Bélidor nell'affrontare l'argomento è principalmente pratico: l'esempio di una trave appoggiata in mezzeria e caricata agli estremi con due forze rivolte verso il basso come rappresentato in figura 4: questo costituisce il punto di partenza per le sue osservazioni. L'allungamento delle fibre superiori, afferma Bélidor, sarà direttamente proporzionale alla distanza dal punto di appoggio.

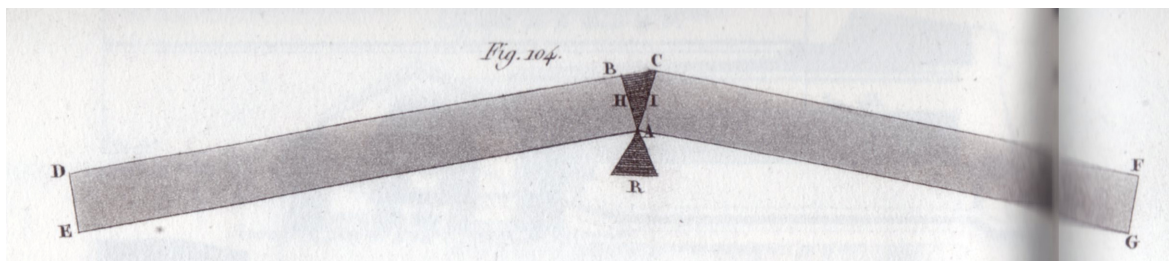


Figura 4. Deformazione trave caricata agli estremi.

L'osservazione del fenomeno lo porta ad affermare che l'andamento della deformazione delle fibre in mezzeria è lineare¹² e diminuisce progressivamente fino ad azzerarsi in corrispondenza del punto posto al bordo inferiore in mezzeria (punto A). Questo fa riferimento alla formula proposta da Galileo nei *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*¹³, in cui le dimostrazioni matematiche sono basate su similitudini geometriche.

Viene affrontato successivamente il tema della determinazione della resistenza delle travi di legno, a partire da un caso sperimentale di una trave di legno appoggiata agli estremi e caricata in mezzeria. La deformazione del campione, che precede la rottura, si manifesta con l'accorciamento delle fibre superiori e l'allungamento di quelle inferiori, secondo una legge di variazione lineare in funzione della distanza dal bordo superiore EF come rappresentato in figura 5.

¹² “tutte queste (fibre) saranno in progressione aritmetica poiché formano tutte unite gli elementi di un triangolo” in Bernard Forest de Bélidor, *La Scienza degli ingegneri*, Milano, Gaspere Truffi, 1832, p. 191

¹³ Galileo Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, Leida, Elsevirii, 1638

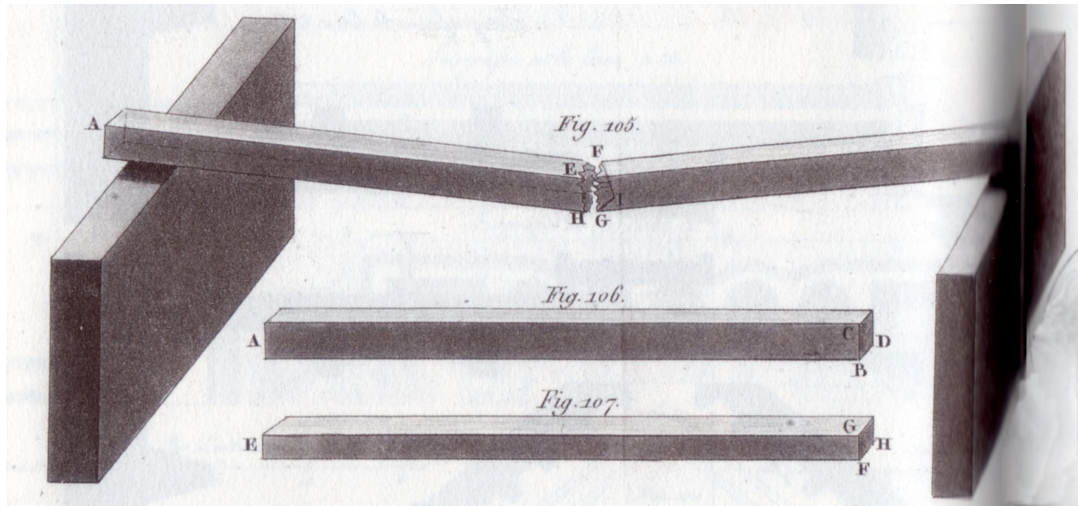


Figura 5. Prova di resistenza di campione su due appoggi.

La conclusione riguardo alla resistenza di una trave è che questa diminuisce all'aumentare della sua lunghezza, in quanto aumenta il "braccio di leva". Per ovviare a questa riduzione è possibile aumentare la sezione trasversale¹⁴, se invece si raddoppia la lunghezza della trave sarà sufficiente, secondo Bédidor, la metà della forza precedentemente necessaria per la rottura del campione. Da questa affermazione si deduce che la forza è direttamente proporzionale alla resistenza, mentre la lunghezza della trave è inversamente proporzionale. Si vuole infine calcolare la resistenza di due travi aventi lunghezze e sezioni trasversali differenti e rappresentate in figura 6: «se si volesse conoscere la forza di queste travi posate sui lati LM PQ, bisognerebbe moltiplicare il quadrato dell'altezza KL della prima per la lunghezza LM della sua base, e dividere il prodotto per la lunghezza IK»¹⁵: il riferimento al testo di Galileo¹⁶ della seconda giornata è diretto.

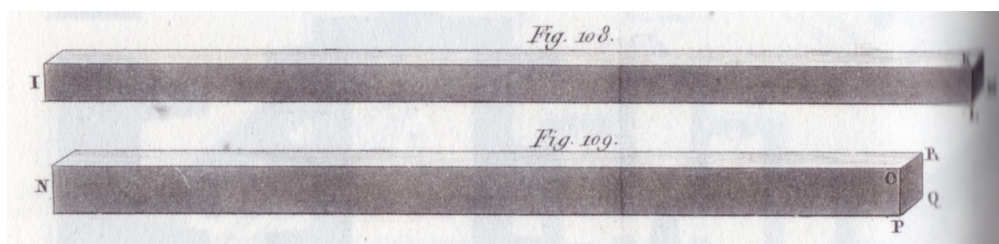


Figura 6. Travi di diversa lunghezza oggetto del confronto tra le resistenze.

¹⁴ “Può dunque esprimersi la resistenza di questa trave col prodotto della linea EG pel terzo della base GEFI. Per applicare questa teorica a qualche nozion conosciuta, si osservi che più un trave è lungo, più facilmente si rompe; e la ragion sta in ciò senza dubbio che avendo un braccio di leva più lungo questa forza deve necessariamente prevalere, ammenoché si potessero cangiare le dimensioni della base.” In Bernard Forest de Bédidor, *La Scienza degli ingegneri*, Milano, Gaspare Truffi, 1832, p. 192.

¹⁵ Bernard Forest de Bédidor, *La Scienza degli ingegneri*, Milano, Gaspare Truffi, 1832 p. 193

¹⁶ Galileo Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, Leida, Elsevirii, 1638, Giornata seconda, prop. V, (consultata edizione Galileo Galilei, Opere, Milano Rizzoli & C. Editori, 1938), p. 216)

La resistenza è calcolata mediante la nota formula di Galileo:

$$R = k \frac{b \cdot h^2}{l} \quad (1)$$

dove:

b indica la base della sezione trasversale

h la sua altezza

l la lunghezza della trave

k è una costante dipendente dalla resistenza del materiale.

Il paragrafo termina con alcune indicazioni pratiche, utili ad ottimizzare lo sfruttamento dei tronchi per ricavarne travi. Bélidor considera anche l'aspetto economico del problema: dalle informazioni fornite nel testo si desume che il prezzo del legname fosse calcolato in funzione dell'area della sezione trasversale¹⁷, Bélidor indica, sulla base dell'esperienza, un criterio da utilizzare per determinare le dimensioni della sezione trasversale della trave: l'esperienza suggerisce che il rapporto tra base ed altezza della sezione trasversale di una trave sia di 5 a 7, ovvero che il quadrato dell'altezza sia pari al doppio del quadrato della base¹⁸:

$$h^2 = 2b^2 \quad (2)$$

dove:

h rappresenta l'altezza della sezione trasversale e

b la sua base.

Questa indicazione sul rapporto ottimale tra base e altezza deriva da Antoine Parent, che ha dimostrato che questo rapporto di 5 a 7 tra i lati della sezione trasversale consente di ricavare dal tronco la trave più resistente ed a minor costo¹⁹. La nota (40)²⁰ apposta da Navier al testo di Bélidor rimanda al testo

¹⁷ “una trave di 10 sopra 14 è preferibile ad un'altra di stessa lunghezza di 12 sopra 12. La prima contiene meno travicelli della seconda, ed è nello stesso tempo più forte; di prezzo stan tra loro come 140 a 144, mentre il rapporto della loro forza è di 245 a 216, vantaggi considerevolissimi” in Bernard Forest de Bélidor, *La Scienza degli ingegneri*, Milano, Gaspare Truffi, 1832, p. 194

¹⁸ “E l'esperienza che va molte volte innanzi alla teorica, ha da lungo tempo mostrato che le dimensioni da darsi alla base d'una trave doveano essere nel rapporto di 5 a 7; o, ciò che torna lo stesso, doveasi fare in modo che il quadrato dell'altezza verticale fosse doppio del quadrato della grossezza orizzontale” in Bernard Forest de Bélidor, *ibidem*, p. 194

¹⁹ “Parent ha dimostrato che la base della più forte trave che trar si potesse dal cilindro d'un albero era quella in fatti, in cui il quadrato del massimo lato sarebbe doppio del quadrato minimo”. In Bernard Forest de Bélidor, *ibidem*, p. 194

²⁰ (40) Questa dimostrazione trovasi nelle Memorie dell'Accademia pel 1708. Ecco in che cosa consiste; immaginiamoci un rettangolo iscritto nel circolo, e a lui concentrico; chiamato r il raggio del circolo ed x la semilarghezza del rettangolo, la sua semialtezza sarà $\sqrt{(r^2 - x^2)}$; sicché, supposta la forza del tronco proporzionale alla sua larghezza ed al quadrato della sua altezza, questa forza si troverà espressa da $8x \cdot (r^2 - x^2)$ o da $8 \cdot (r^2x - x^3)$, formola nella quale x deve essere determinata dalla condizione che il valore ne sia un massimo.

Eguagliando a zero il suo differenziale, si ha $r^2 - 3x^2 = 0$, da cui $x^2 = \frac{r^2}{3}$, che dà pel quadrato della semialtezza

di Parent, che contiene la dimostrazione analitica del problema. Parent che padroneggia il calcolo infinitesimale è perfettamente in grado di trovare la corretta soluzione per via analitica al problema di massimo posto. Di seguito Bélidor suggerisce una procedura pratica per ricavare dal tronco una trave avente le proporzioni sopra indicate. Infine viene descritto il comportamento di una trave in legno incastrata agli estremi e caricata in mezzeria. Il capitolo successivo riguarda otto serie di prove sperimentali condotte per determinare l'effetto dei vincoli sulla resistenza delle travi, per individuare le diverse modalità di rottura e per calcolare i valori della resistenza meccanica. Le prove sono, condotte su campioni in legno di rovere non stagionato; per ciascuna serie sono state effettuate tre prove ed è stato calcolato il valore medio del carico massimo supportato.

1.2 La sistematizzazione del sapere

Il est difficile,
pour ne pas dire impossible,
de pousser loin la pratique
sans la spéculation, & réciproquement
de bien posséder la spéculation
sans la pratique.
(Diderot, voce *Art*, *Encyclopédie*)

L'organizzazione e la sistematizzazione del sapere per poi diffonderlo risale ai tempi più remoti. Nel corso della storia ed in varie aree geografiche e culturali sono stati fatti numerosi tentativi in questa direzione, per lungo tempo per argomenti, successivamente in ordine alfabetico.

La seconda metà del XVIII secolo in Francia, periodo di grande fermento sotto diversi aspetti, vede la grande impresa della realizzazione dell'*Encyclopédie*, che ha avuto il merito, in primo luogo, di descrivere e diffondere ad un vasto pubblico lo stato dell'arte delle conoscenze nei più svariati campi; rispetto allo specifico di questo studio, anche nel settore della carpenteria e della costruzione dei ponti in legno o del calcolo della resistenza.

La promozione e la diffusione delle conoscenze tecniche tra gli artigiani e la proposta di un linguaggio tecnico preciso e ben definito hanno svolto un ruolo di unificazione all'interno dei singoli settori, con il vantaggio di creare un linguaggio comune. Infine, ma non da ultimo, un merito importante è stato senz'altro quello di aver contribuito a promuovere la necessità di "collaborazione" tra pratica e teoria, più volte sottolineato anche all'interno delle voci stesse, nella certezza della difficoltà, se non

della base, $\frac{2r^2}{3}$. Dunque l'altezza del rettangolo sta alla sua base come $\sqrt{2}:1$. In Bernard Forest de Bélidor, ibidem, p. 33 delle Note del Signor Navier.

dell'impossibilità, di far avanzare la pratica senza la teoria e, vice versa, di comprendere pienamente la teoria senza l'esercizio della pratica.

In quest'ottica verranno analizzate e discusse alcune voci tra le circa 70.000 dell'*Encyclopédie*, si farà riferimento in particolare a quelle che hanno più stretta attinenza con il tema di questa ricerca (*bois, charpente/charpenterie, pont, résistance*), con la consapevolezza che il contributo più significativo di questo vastissimo lavoro non derivi tanto dall'efficacia della singola voce, quanto piuttosto dall'idea che sta alla base di tutta l'opera e sul rapporto tra teoria e pratica, tema di fondo di questo lavoro di ricerca.

1.2.1 *L'Encyclopédie ou Dictionnaire Raisonné des Sciences, des Arts et des Métiers*

La prima voce presa in esame, *charpente/charpenterie*, curata da Jean-François Blondel, è strutturata in tre parti, precedute dalla definizione: origine, applicazione all'arte del costruire e difetti.

Per carpenteria Blondel intende l'arte di assemblare differenti elementi di legno per la costruzione di edifici in luoghi in cui la pietra è poco disponibile²¹.

Tra tutti gli edifici, quelli di legno hanno origini più remote; Blondel accenna alla costruzione delle prime capanne, seguite poi da edifici strutturalmente più impegnativi. L'architettura è debitrice nei confronti del legno per l'analogia con i tronchi degli alberi nella rastremazione delle colonne.

Per quello che riguarda l'applicazione nelle costruzioni, Blondel elenca una serie di strutture tradizionalmente realizzate in legno: le coperture, sia di edifici comuni che di edifici sacri e monumentali, il *pan de bois*, le scale, e le macchine che sollevano grandi carichi come ponti, dighe, moli. Non viene fatto nessun riferimento ai ponti in legno.

Il difetto principale del legno è la combustibilità, caratteristica che lo rende meno adatto di altri all'impiego come materiale da costruzione.

Blondel sottolinea che da quando la maggior parte delle imprese e degli operai hanno potuto ricevere un'istruzione di base in matematica, sono stati registrati notevoli progressi in Francia nell'arte della carpenteria²². Tuttavia, prosegue Blondel, sarebbe auspicabile che qualche abile maestro scrivesse in maniera soddisfacente su questa materia: Mathurin Jousse, Pierre Lemuet, Augustin Charles Daviller

²¹ “Charpente ou Charpenterie, s.f. (Art. Mécan.) on appelle ainsi l'art d'assembler différentes pièces de bois pour la construction des bâtiments élevés dans les lieux où la pierre est peu commune” in Denis Diderot, Jean le Rond D'Alembert, *Encyclopédie, ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, Paris, 1751-1777 (edizione consultata *Encyclopédie, ou dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, ed. Denis Diderot and Jean le Rond D'Alembert, University of Chicago: ARTFL Encyclopédie Projet, Robert Morrissey, 2010), vol. 3, p. 214

²² “Au reste il faut convenir que l'art de la *Charpenterie* a fait de très - grands progrès en France, depuis que la plupart des entrepreneurs & les ouvriers ont sù s'instruire de la partie des Mathématiques qui leur étoit nécessaire”, ibidem, vol. 3, p. 214

& Blanchard sono gli unici che ad allora avevano affrontato l'aspetto della pratica²³. Molti altri aspetti rimangono ancora da approfondire, precisa Blondel: le connessioni tra gli elementi, il taglio del legno, la sua natura, la durata e altre qualità fisiche. Blondel successivamente auspica che l'esperienza, la meccanica e la fisica si uniscano per occuparsi insieme di questa materia importante²⁴. Nel tentativo di unire queste discipline con l'esperienza, Blondel cita il *Mémoire* presentato da Georges Leclerc Comte de Buffon (di seguito Buffon) all'*Académie Royale des Sciences* dal quale sono state estratte molte informazioni ed una serie di dati sperimentali utili alla redazione della voce *bois* e rappresentati nella tabella di figura 9.

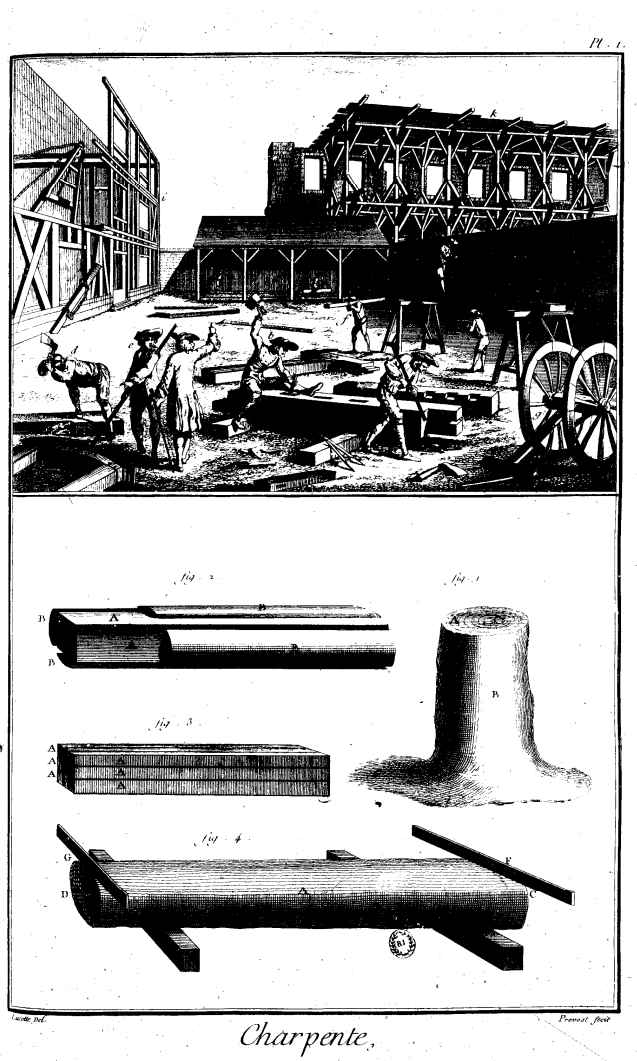


Figura 7. *Encyclopédie*, Carpentaria Tavola I.

²³ “néanmoins il seroit à desirer que quelques - uns de ces habiles maîtres écrivissent sur cette matiere d'une maniere satisfaisante. Mathurin Jousse, Lemuet, Tiercelet, Daviller & Blanchard sont les seuls jusqu'à présent qui en ayent dit quelque chose relativement à la pratique.”, *ibidem*, vol. 3, p. 214

²⁴ “Il seroit à souhaiter que l'expérience, la Méchanique & la Physique se réunissent pour s'occuper ensemble de cette matiere importante. Nous avons déjà dans les mémoires de M. de Buffon dont nous avons donné des extraits à l'article Bois, d'excellens matériaux.”, *ibidem*, vol. 3, p. 214

Bois de charpente è la voce successiva ed è curata da Diderot e indica il nome che viene attribuito al legno da costruzione di cui sono definite le dimensioni minime dell'elemento: sezione trasversale di 6 o più pollici di lato e due differenti modalità di taglio, squadrato o segato.

Da un tronco si possono ricavare travi o travetti e le travi squadrate di grandi dimensioni. Il legno non stagionato, nel tempo, presenta fessure e spaccature. Riguardo alla scelta della specie legnosa in relazione all'uso il rovere è il legno più indicato per costruzioni su terra e in acqua, il castagno ha buona resistenza all'umidità, l'abete fornisce buoni travetti. Viene suggerito di non utilizzare legno fresco insieme a legno stagionato.

Per evitare imbrogli nell'acquisto del legname, viene suggerito di comprare il legno secondo l'unità di misura: il *cent de bois*, che corrisponde a cento pezzi di legno lunghi 72 piedi ciascuno, con lato della sezione trasversale di 6 pollici. Comprando il legno a blocchi, anziché a *cent*, il venditore cercherà di guadagnare sulle dimensioni e sulle quantità. In cantiere sarà vantaggioso sapere che gli elementi hanno tutti la stessa dimensione: in questo modo sarà immediato il calcolo della parte eccedente da tagliare²⁵.

²⁵ “BOIS, un cent de bois; c'est, en terme de Charpentier, soixante-douze pouces de longueur sur six pouces d'équarrissage. Tout le bois de charpente se réduit à cette mesure, & une seule poutre est comptée pour autant d'autres, qu'elle contient de fois cette mesure, soit pour la vente, soit pour la voiture, soit pour le toisé.”, ibidem, vol. 2, p. 305

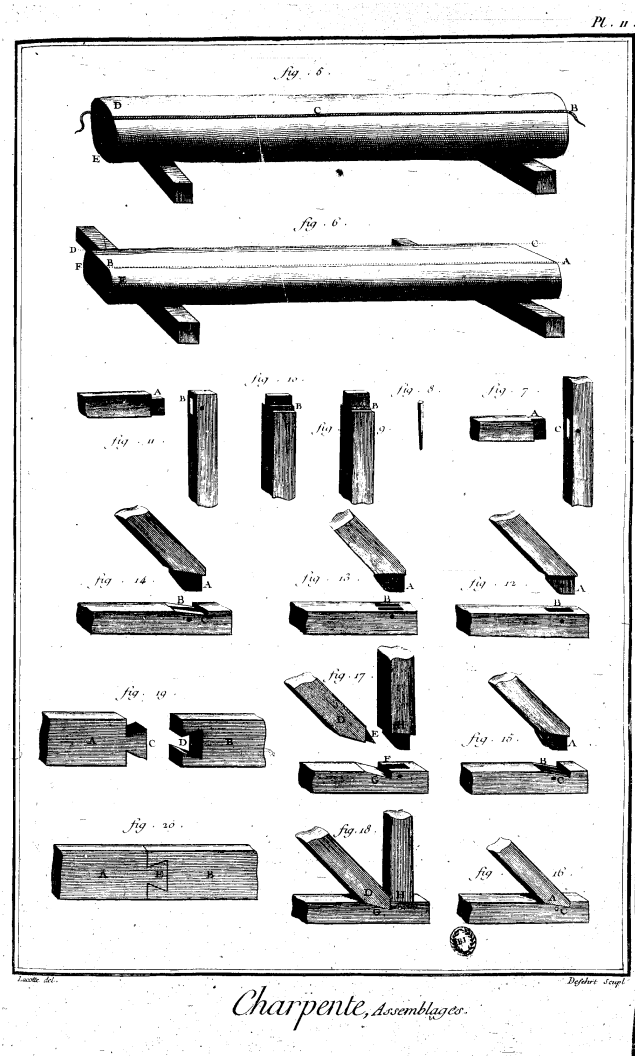


Figura 8. *Encyclopédie*, Carpenteria Tavola II.

La voce *bois*, curata da Diderot, è dedicata principalmente all'aspetto botanico del legno; vengono presentate le modalità di accrescimento degli alberi e le caratteristiche fisiche del materiale, infine viene affrontato il tema della resistenza. Come già anticipato, le informazioni contenute in questa voce riguardo alla resistenza sono tratte dai *Mémoire* dell'*Académie des Sciences* di Buffon presentati e discussi nel paragrafo 2.1.

Alcune considerazioni riguardo alla resistenza meritano qualche riflessione. Diderot riferisce che tutti gli autori che hanno scritto della resistenza dei solidi in generale, e del legno in particolare, si sono riconosciuti nella regola proposta da Galileo, secondo la quale la resistenza di un elemento inflesso è direttamente proporzionale alla base ed al quadrato dell'altezza della sezione trasversale e inversamente proporzionale alla sua lunghezza²⁶. Diderot prosegue dicendo che questa regola, adottata

²⁶ "Tous les auteurs qui ont écrit sur la résistance des solides en général, & du *bois* en particulier, ont donné comme fondamentale la règle suivante: *la résistance est en raison inverse de la longueur, en raison directe de la largeur, & en raison doublée de la hauteur*. Cette règle est celle de Galilée, adoptée par tous les Mathématiciens,

da tutti i matematici, si è dimostrata valida per i solidi assolutamente indeformabili e fragili, ma per i solidi che presentano comportamento elastico, come il legno, è necessario apportare modifiche. Queste due affermazioni ci delineano chiaramente la sintesi del pensiero dell'epoca, dominato pressoché completamente, dalla teoria sulla resistenza dei solidi di Galileo, che inizia ad essere messa in discussione quando il confronto con il dato sperimentale non conferma le ipotesi.

Diderot infine riporta una tabella contenente i risultati delle prove sperimentali condotte da Buffon su campioni di piccole dimensioni; la tabella sette, rappresentata in figura 9, riporta il confronto tra i dati sperimentali e quelli attesi secondo la teoria di Galileo.

L'osservazione finale mette in risalto che è che più sono ridotte le dimensioni dei campioni, più la regola di Galileo si avvicina al dato sperimentale; tuttavia, prosegue Diderot, modificando in modo opportuno la formula, sarà possibile utilizzare la regola di Galileo²⁷ per calcolare correttamente la resistenza di elementi di dimensione qualsiasi.

La lettura della voce *résistance*, curata da D'Alembert, è di grande interesse perché riflette lo stato delle conoscenze dell'epoca in merito alla resistenza dei materiali. In primo luogo viene presentata la nota regola²⁸ in forma di esempio: se si aumenta l'area della sezione trasversale di un elemento senza aumentare la sua lunghezza, la resistenza aumenterà in relazione all'aumento dell'area trasversale. Se invece si aumenta la lunghezza dell'elemento senza aumentare la sezione trasversale, il peso proprio crescerà, ma non aumenterà la resistenza e di conseguenza l'incremento di lunghezza renderà l'elemento più debole²⁹.

& elle seroit vraie pour tous les solides qui feroient absolument inflexibles & qui romproient tout - à - coup: mais dans les solides élastiques, tels que le *bois*, il est aisé d'appercevoir que cette regle doit être modifiée à plusieurs égards." Ibidem, vol. 2, p. 302

²⁷ "On peut observer sur cette table, que plus les pièces sont courtes, & plus la règle approche de la vérité; & que dans les plus longues pièces, comme celles de 18 & de 20 piés, elle s'en éloigne; cependant à tout prendre, on peut se servir de la règle générale avec les modifications nécessaires pour calculer la résistance des pièces de *bois* plus grosses & plus longues que celles dont M. de Buffon a éprouvé la résistance; car en jettant les yeux sur cette septième table, on voit un grand accord entre la règle & les expériences pour les différentes grosseurs, & il regne un ordre assez constant dans les différences par rapport aux longueurs & aux grosseurs, pour juger de la modification qu'on doit faire à cette règle." Ibidem, vol. 2, p. 302

$$^{28} R = k \cdot \frac{bh^2}{l}$$

²⁹ "Si on augmente la base du cylindre sans augmenter sa longueur, il est évident que la *résistance* augmentera à raison de la base, mais le poids augmentera aussi en même raison. Si on augmente la longueur du cylindre sans augmenter la base, le poids augmentera, mais la *résistance* n'augmentera pas, conséquemment sa longueur le rendra plus foible." Ibidem, vol. 14, p. 174

304 **BOI**

Septieme Table. Comparaison de la résistance du bois, trouvées par les expériences précédentes, & de la résistance du bois suivant la règle que cette résistance est comme la largeur de la pièce, multipliée par le carré de sa hauteur, en supposant la même longueur.

Nota. Les astérisques marquent que les expériences n'ont pas été faites.

		GROSSEURS.				
		4 pouces.	5 pouces.	6 pouces.	7 pouces.	8 pouces.
Poids des pièces		Livres.	Livres.	Livres.	Livres.	Livres.
	7	5312	11525	18950	32200	48100
5901		19915 $\frac{2}{3}$		31624 $\frac{1}{2}$	47198 $\frac{1}{2}$	
8	4550	9787 $\frac{1}{2}$	15525	26050	39750	
	5011 $\frac{1}{2}$		16912 $\frac{4}{5}$	26836 $\frac{9}{10}$	40089 $\frac{1}{2}$	
9	4025	8308 $\frac{1}{2}$	13150	22350	32800	
	4253 $\frac{23}{15}$		14356 $\frac{4}{5}$	22798 $\frac{1}{2}$	34031	
10	3612	7125	11250	19475	27750	
	3648		12312	19551	29181	
12	2987 $\frac{1}{2}$	6075	9100	16175	23150	
	3110 $\frac{2}{3}$		10497 $\frac{1}{3}$	16669 $\frac{4}{5}$	24883 $\frac{1}{2}$	
14	.....	5100	7475	13225	19775
			8812 $\frac{4}{5}$	13995 $\frac{1}{2}$	20889 $\frac{1}{2}$	
16	.....	4350	6362 $\frac{1}{2}$	11000	16375
			7516 $\frac{4}{5}$	11936 $\frac{1}{2}$	17817 $\frac{1}{2}$	
18	.....	3700	5562 $\frac{1}{2}$	9425	13200
			6393 $\frac{1}{3}$	10152 $\frac{4}{5}$	15155 $\frac{1}{2}$	
20	.....	3225	4950	8275	11487 $\frac{1}{4}$
			5572 $\frac{2}{3}$	8849 $\frac{1}{2}$	13209 $\frac{1}{2}$	

Figura 9. G. L. Leclerc Comte de Buffon, Tabella VII.

D'Alembert afferma che la teoria della resistenza è utile perché non si limita alla speculazione teorica ma è interessante nell'applicazione all'Architettura e alle altre arti³⁰.

La voce *pont* è curata da Louis de Jaucourt (1704-1779) e inizia con la definizione: costruzione di pietra o di legno costruita su un fiume, un ruscello o un fosso per facilitare il passaggio³¹.

Segue la sotto-voce *Pont (Charpenterie)* nella quale il ponte è indicato come l'opera più importante di carpenteria e l'autore intende colmare la lacuna della voce *Charpenterie* in cui non è stato fatto nessun cenno ai ponti.

Le opere di carpenteria sono divise in quattro gruppi: edifici, ponti, macchine, barche e vascelli.

La categoria dei ponti a sua volta si divide in tre: ponti di pietra, di legno e di barche.

³⁰ "La théorie de la *résistance* que nous venons de donner d'après Galilée, n'est donc point bornée à la simple spéculation, mais elle est applicable à l'Architecture & aux autres arts." Ibidem, vol. 14 p. 174

³¹ "C'est un bâtiment de pierre ou de bois, élevé au-dessus d'une rivière, d'un ruisseau ou d'un fosse pour la facilité du passage." Ibidem, vol. 13, p. 26

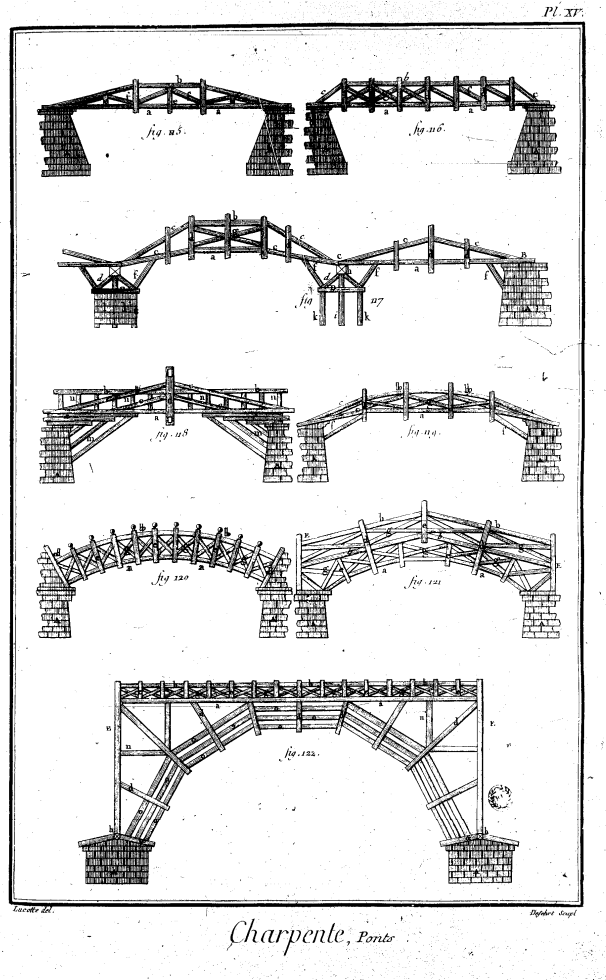


Figura 10. *Encyclopédie*, Carpentaria Tavola XV.

In base alla definizione fornita, per carpenteria si intende l'arte di tagliare e connettere in modo solido legni di differenti dimensioni per realizzare grandi opere: edifici, coperture, tavolati, *pan de bois*, scale, ponti, impalcature, barche, mulini a vento e ad acqua, presse e tutte le macchine che servono per sollevare carichi, per le quali la conoscenza della geometria e soprattutto della meccanica è assolutamente necessaria³².

I ponti di legno, osserva Jaucourt, non sono altrettanto solidi come quelli in pietra, ma offrono altri vantaggi, quali la rapidità di realizzazione e la convenienza economica, soprattutto nei Paesi in cui il legno è abbondante.

La tavola relativa ai ponti in legno, riportata in figura 10, illustra una serie di esempi: quella indicata come fig. 115 si riferisce al ponte sul Cismone di Palladio riportato in figura 11, descritto come ponte

³² "Pont, (Charpenterie) Cet ouvrage est le plus important de la Charpenterie: nous allons donc suppléer ici tout ce qu'on auroit dû placer à l'article CHARPENTE. De la Charpenterie en général. Par le mot de Charpenterie l'on entend l'art de tailler & assembler avec justesse & solidité des bois de différente grosseur pour la construction des grands ouvrages,...pour lesquels la connoissance de la géométrie, & sur-tout des méchaniques, est absolument nécessaire." Ibidem, vol. 13, p. 26

di 16 o 17 tese³³ di luce, che corrisponde all'incirca ai 100 piedi vicentini indicati da Palladio³⁴, formato da un corrente inferiore di circa 12 pollici di lato, da un corrente superiore e da due montanti.

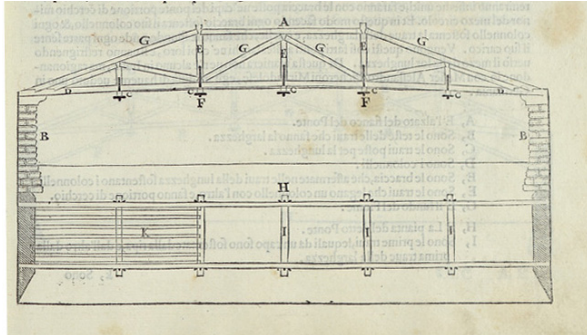


Figura 11. Andrea Palladio. Ponte sul Cismone.

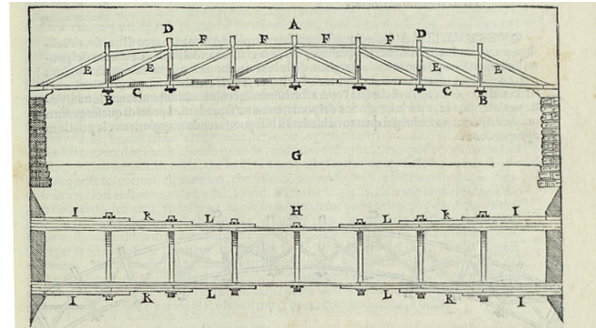


Figura 12. Andrea Palladio. "Invenzione".

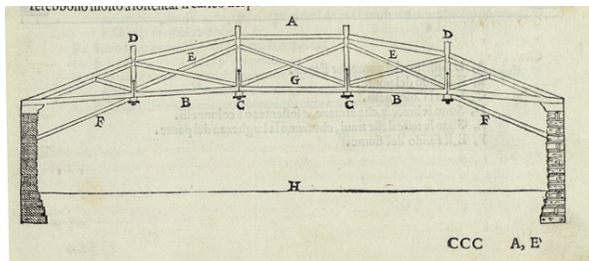


Figura 13. Andrea Palladio. "Invenzione".

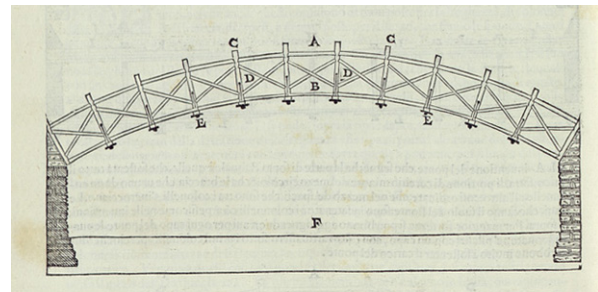


Figura 14. Andrea Palladio. "Invenzione".

In fig. 116 è rappresentato un secondo ponte ripreso da *I Quattro Libri dell'Architettura* di Palladio e molto simile ad una delle "invenzioni" indicata in figura 12, eccetto che per la presenza di croci di Sant'Andrea anziché di singole diagonali.

In fig. 117 il ponte di Saumur, realizzato a Lione, si sviluppa su tre campate con due schemi diversi; la luce centrale misura 15 tese, quelle laterali 12.

In fig. 118 viene riportato un ponte il cui schema strutturale è formato dalla sovrapposizione di due schemi: un impalcato sorretto da puntoni ed una struttura analoga a quella delle campate laterali del ponte precedente, avente luce pari a 10 tese.

In fig. 119 ed in fig. 120 sono riprese le ultime due "invenzioni" di Palladio rappresentate in figura 13 e 14. Anche in questo caso le luci indicate sono di 6 o 7 tese. In fig. 119, lo schema risulta dalla sovrapposizione di due strutture: un impalcato sorretto da puntoni e una struttura reticolare; lo schema di fig. 120 è costituito invece da una struttura reticolare ad arco.

³³ Per la conversione delle unità di misura vedi tabella allegata.

³⁴ Andrea Palladio, *I Quattro Libri dell'Architettura*, 1570, Libro III, Capo VII

La fig. 121 riporta un ponte il cui schema strutturale, molto complesso, risulta dalla sovrapposizione di più schemi: ad un arco reticolare ribassato si aggiunge uno schema analogo a quello della campata laterale del ponte di Saumur.

In fig. 122 infine è riprodotto un ponte di circa 25 tese di luce formato da un impalcato sorretto da un arco poligonale, i cui componenti sono vincolati alle spalle laterali mediante bielle. L'affiancamento di tre elementi nell'arco poligonale risulta vantaggioso perché facilita il mantenimento della curva delle pressioni all'interno del terzo medio e quindi la pura compressione dell'arco. In questo fatto e nel collocamento dell'arco sotto la trave di impalcato è evidente il richiamo ai ponti in pietra.

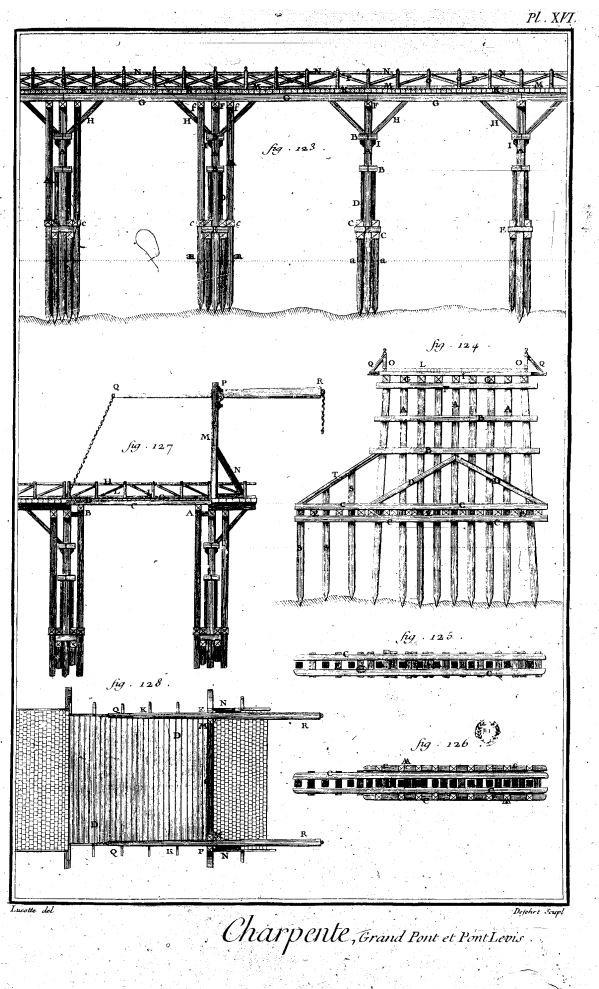


Figura 15. Encyclopédie, Carpentaria Tavola XVI.

L'indicazione del testo di Palladio a proposito delle dimensioni degli elementi delle sue "invenzioni" è che "i ponti di queste quattro maniere si potranno fare lunghi quanto richiederà il bisogno, facendo maggiori tutte le parti loro à proporzione"³⁵, sottolineando quale fosse il modo per adattare le dimensioni degli elementi ad una lunghezza diversa: una semplice proporzione.

³⁵ Andrea Palladio, *I Quattro Libri dell'Architettura*, 1570, Libro III, Capo VII

La struttura del ponte raffigurata in figura 15 rappresenta, secondo Jaucourt, un ponte più solido, in grado di sopportare carichi notevoli. Lo schema è quello di un impalcato appoggiato su pali in legno, sorretto da due elementi diagonali supplementari. L'analogia con il ponte di Bassano di Palladio, riportato in figura 16 e con altri esempi francesi dei *concouers d'architecture* indica che probabilmente si trattava di tipologia piuttosto comune e diffusa (cfr. paragrafo 1.5).

Dopo aver brevemente presentato questi ponti, seguono indicazioni dettagliate sulla modalità di realizzazione di pile e ponteggi, e la descrizione dei mezzi impiegati per la realizzazione delle pile del ponte di Saumur, dettagli costruttivi, e la descrizione della macchina per tagliare i pali.

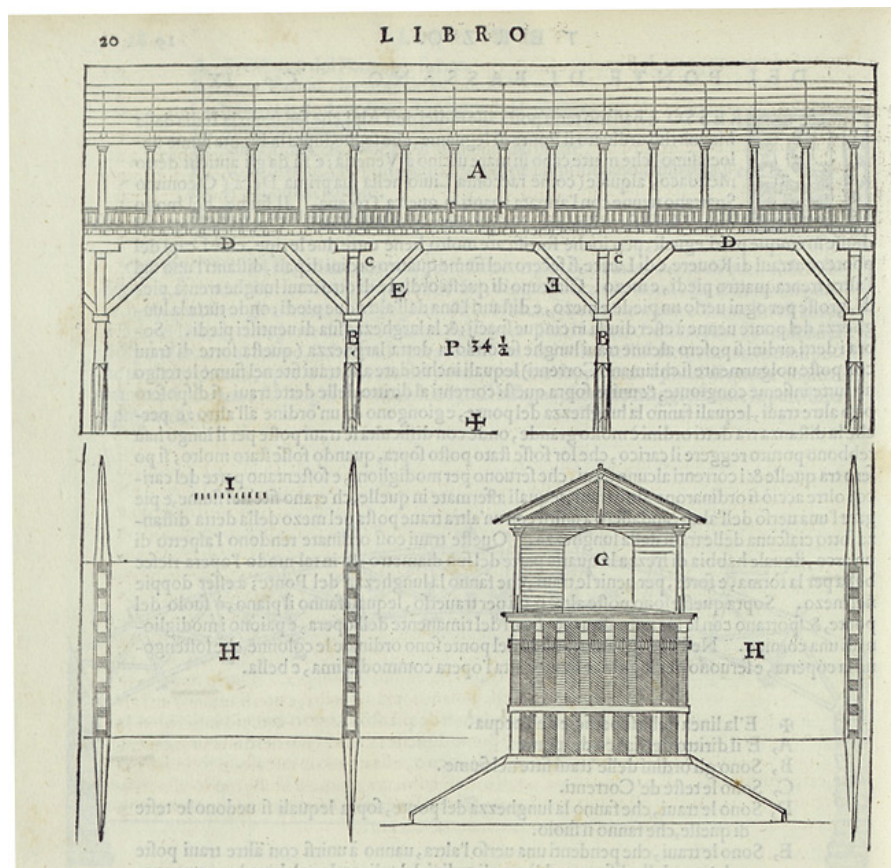


Figura 16. Andrea Palladio. Ponte di Bassano.

Infine in figura 17 sono rappresentati un ponte a campata unica ed un ponte girevole. Gli schemi di questi ultimi due esempi non presentano particolari elementi di novità nella struttura e il testo non contiene indicazioni particolari.

Questa selezione di voci mette bene in evidenza lo spirito dell'*Encyclopédie*, in cui sono presenti due anime distinte, (specchio dello stato dell'arte alla metà del '700): da un lato una sintesi di riferimenti al passato con il diretto riferimento a Palladio e la citazione della regola di Galileo; dall'altro nuovi fermenti con l'apertura al fronte delle conoscenze derivate dalla sperimentazione e la ripetuta insistenza della necessità di combinare teoria ed esperienza.

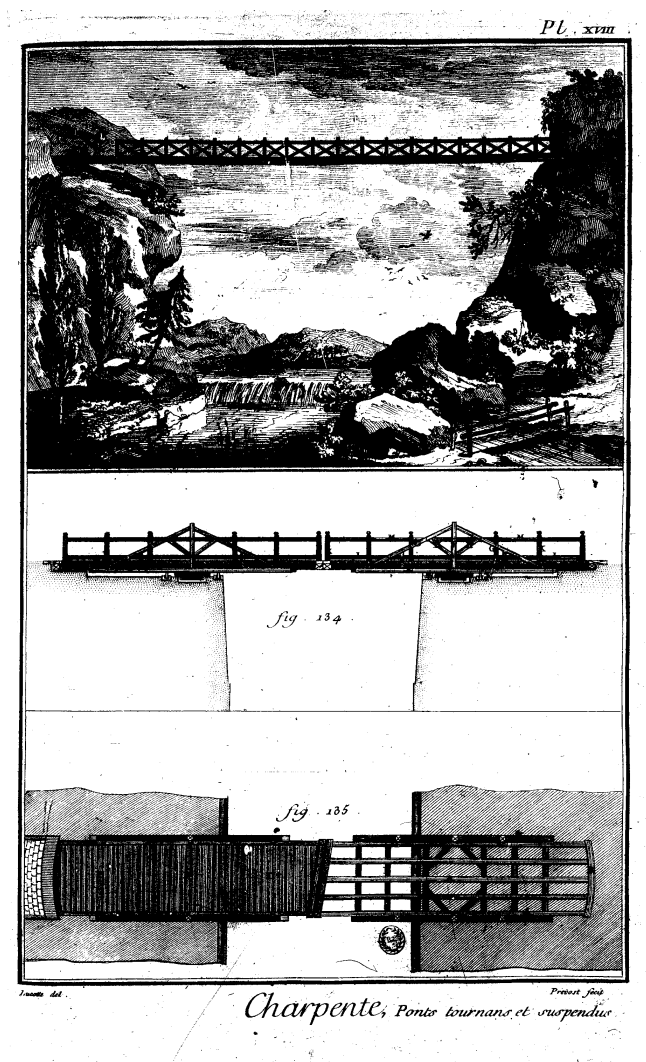


Figura 17. Encyclopédie, Carpentaria Tavola XVIII.

1.3 Calcolo di portata di un ponte in legno secondo la *règle* di Galileo

I tempi stanno cambiando: si avverte sempre più l'esigenza di regole descritte da formule matematiche che consentano di definire le corrette proporzioni degli elementi strutturali; le regole ereditate dal passato sono messe in discussione alla luce della sperimentazione che molti ricercatori hanno svolto e delle sempre più forti esigenze di razionalità. Alcuni manoscritti del *Fonds Ancien* dell'*École des Ponts et Chaussées* danno chiara testimonianza del travaglio che anima questo periodo e della forte spinta verso lo sviluppo di nuovi strumenti a sussidio della progettazione.

Il primo manoscritto esaminato *Calcul de la Résistance des Jambes de force doublées pour chaque Côté de la longueur du Pont*³⁶, datato 1793, contiene alcune interessanti annotazioni riguardo al calcolo della resistenza degli archi di una campata in un ponte in legno. La scheda di catalogazione dell'archivio del *Fonds Ancien* rimanda al disegno DG 473 (*Projet d'un pont en charpente*) rappresentato in figura 18. La prima parte riguarda l'analisi dei carichi che gravano su questo ponte, che assommano a 11242 libbre³⁷ per poi proseguire facendo riferimento a prove di resistenza effettuate qualche anno prima da Philippe Charles Varennes de Fenille con lo scopo di mettere a confronto diverse specie legnose. Le prove erano state condotte su campioni aventi sezione trasversale quadrata di 2 pollici di lato e 7 piedi e 8 pollici di lunghezza; i risultati di questa campagna sperimentale sono riportati nel testo *Administration forestière*³⁸. Il campione è incastrato ad un estremo mentre è libero all'altro. La descrizione della prova indica che il carico è applicato nell'estremo libero e che la rottura è avvenuta in corrispondenza dell'estremo incastrato (corrispondente alla sezione più sollecitata) per effetto di un carico di 185 ½ libbre³⁹.

A partire da questa prova di resistenza si vuole determinare la resistenza degli archi.

Per determinare il valore del carico che l'arco di 15 piedi di lunghezza⁴⁰ e con sezione trasversale di 12 pollici di base e 30 pollici di altezza è in grado di sopportare, Varennes propone di utilizzare la regola proposta da Galileo e adottata da Buffon e da altri "meccanici" illustri, assumendo che il campione si trovi in posizione orizzontale e sia vincolato con due appoggi alle estremità. La nota formula indica, per la resistenza (R) di una trave a mensola, un valore pari a:

$$R = k \cdot \frac{b \cdot h^2}{l} \quad (3)$$

dove:

b ed h rappresentano rispettivamente la base e l'altezza della sezione trasversale

l la lunghezza dell'elemento

k è una costante dipendente dalla resistenza del materiale.

Applicando la proporzione fra la trave incastrata della prova sperimentale e il caso reale, Varennes ottiene per il ponte una portata equivalente pari a 29700 libbre, che corrisponde a circa tre volte il valore del carico permanente ed accidentale precedentemente calcolato (11242 libbre).

³⁶ "Calcul de la Résistance des Jambes de force doublées pour chaque Côté de la longueur du Pont." MS 2613 ©École Nationale des Ponts et Chaussées

³⁷ Per la conversione delle unità di misura vedi tabella allegata.

³⁸ Philippe Charles Varennes de Fenille, *Mémoires sur l'administration forestière, et sur les qualités individuelles des bois indigènes ou qui sont acclimatés en France auxquels on a joint la description des bois exotiques que nous fournit le commerce*, Bourg, Impr. de C.C.G. Philipon, 1792

³⁹ Questo valore del carico non è compatibile con le dimensioni geometriche fornite (2×2 pollici di sezione e 7 piedi e 8 pollici di lunghezza).

⁴⁰ Non è ben chiaro a che cosa si riferisca questa lunghezza, dal disegno sembra che la luce di ogni campata sia molto superiore.

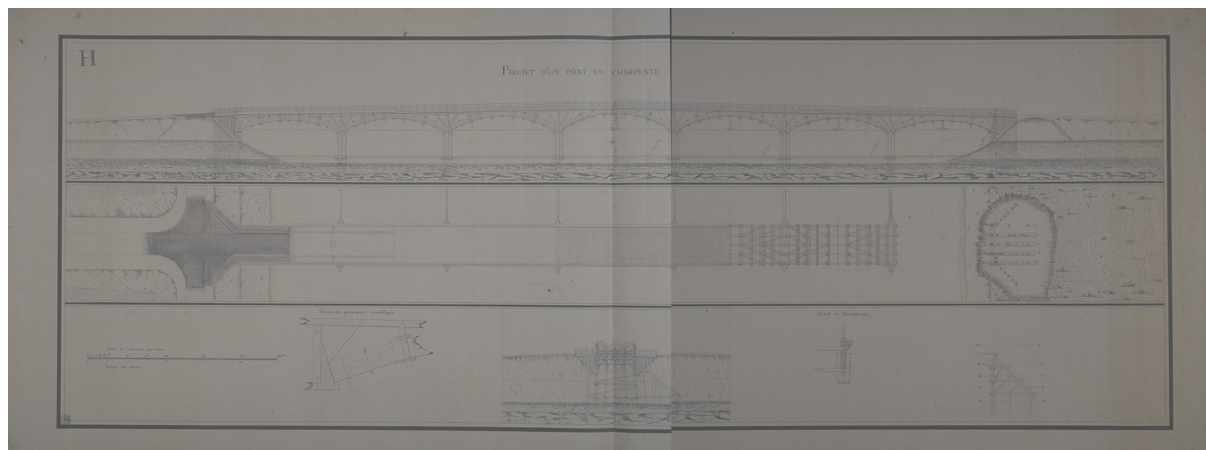


Figura 18. Progetto per un ponte di legno.
©École Nationale des Ponts et Chaussées. DG 473

L'autore riporta che Buffon e Bernoulli concordano nel considerare questa formula del carico di portata sia applicabile a travetti poco flessibili, con modalità di rottura fragile; la regola inoltre, suggerisce Buffon, dovrebbe essere differente per ciascuna specie legnosa, poiché la resistenza varia da una specie all'altra⁴¹.

Varenes è convinto che il valore della resistenza determinato mediante la formula di Galileo sia troppo elevato rispetto al valore che si riscontra nell'esperienza; pertanto è necessario trovare una legge più aderente alla realtà. La riduzione di resistenza in funzione della lunghezza dell'elemento proposta dalla formula di Galileo sarebbe insufficiente e la formula dovrebbe quindi essere rivista in questo senso⁴². Per questo motivo Varenes esprime la necessità di introdurre un coefficiente riduttivo della resistenza.

L'autore prosegue elencando una serie di indicazioni adottate nel ponte di figura 18, utili ad aumentare la resistenza degli elementi dell'arco⁴³.

Se si vincolano gli elementi dell'arco ai quinti della luce mediante l'aggiunta di una mensola posta nella parte iniziale e di una biella di collegamento con l'impalcato, la luce libera si riduce a $\frac{3}{5}$ e di conseguenza, in base alla regola di Galileo, la resistenza aumenta nella proporzione da 3 a 5⁴⁴.

⁴¹ "Buffon a reconnu avec Bernouilly que cette Règle convenant aux solives qui seraient absolument inflexibles et rompraient tout à coupe différente pour les bois à cause de leur élasticité: et que la diminution operée par la longueur des pieces doit se faire en plus grande Raison que cette donnée par la Règle de Galilée: mais celà n'influe point sur les calculus que l'on vient d'adopter, vu que la Résistance du bois sera encore beaucoup plus grande qu'il n'est nécessaire pour l'effort qu'il aurait à soustenir." in *Calcul de la Résistance des Jambes de force doublées pour chaque Côté de la longueur du Pont*, MS 2613, Fonds Ancien École des Ponts et Chaussées, 1793 p. 182

⁴² "la diminution operé par la longueur des pieces doit se faire en plus grands Raison que cette donnée par la Règle de Galilée mais celà n'influe point sur les calculs que l'on vient d'adopter vu que la Résistance du bois sera encore beaucoup plus grande qu'il n'est nécessaire pour l'effort qu'il aurait à soustenir." ibidem, p. 182

⁴³ "Ou doit aussi remarquer a en fasseur de l'augmentation de résistance des jambas de force." ibidem, p. 182

⁴⁴ "Qu'elles doivent être fortifiées aux deux cinquième de leurs longueurs, on partant de chacune des Culées par une grande double Moise pendante figurée sur le dessin assemblée et boulonnée au bout d'en bas a ses Jambes de force; et par le bout opposé avec une poutrelle du pont joignant la saillée du dernier corbeau de pierre ce qui

Un secondo modo per giungere ad una valutazione più ridotta dello sforzo nell'arco, consiste nel considerare il carico distribuito sull'intera luce anziché concentrato in mezzeria⁴⁵. In questa condizione di carico, per l'arco si stimerà una resistenza doppia.

Gli elementi dell'arco in prossimità delle spalle saranno inoltre più resistenti se inclinati di circa 30°; considerando unicamente la componente del carico perpendicolare all'asse, la riduzione del carico è pari al seno dell'angolo di inclinazione e quindi il carico applicato si dimezza. La scelta di non considerare la componente orizzontale del carico è dettata dal fatto che la forza perpendicolare è quella che dà luogo alla condizione più svantaggiosa⁴⁶.

Varenes calcola poi la resistenza di travi di abete lunghe 10 piedi con sezione trasversale quadrata con lato di 12 pollici utilizzate nell'impalcato del ponte.

Il termine di paragone è costituito dalle esperienze di Buffon riportate nei *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*⁴⁷, condotte su un campione di legno di rovere lungo 10 piedi e con sezione trasversale quadrata di 8 pollici di lato. La sua capacità portante, prima che giunga a rottura, amplificata di quattro volte per le differenti condizioni di vincolo, è pari a 23414 libbre se si assume che il campione si trovi in posizione orizzontale e che sia vincolato con due appoggi e caricato in mezzeria⁴⁸.

I dati ottenuti dalle prove effettuate da Buffon e da Parent dimostrano che il legno di abete, più leggero di quello di rovere, è circa il 20% più resistente rispetto all'altro. Questo significa che il carico di 23414 libbre può essere incrementato a 28496 libbre e si paragona con il valore di 11242 libbre, che è la stima del carico applicato su ciascun arco⁴⁹.

reduira en quelque sorte aux trois cinquièmes leur longueur et les fortifiera à peu près dans le rapport xx 3 à 5 de la résistance que l'on vient de leurs attribuer." ibidem, pp. 182-183

⁴⁵ "Que le poids que devra supporter chaque jambes de force se trouvera distribué sur toute la longueur au lieu d'être comme on l'a supposé dans le calcul précédent, réuni à son extrémité: et que pour cette seule considération la jambe de force sera encore foulagée de la moitié de la charge." ibidem, p. 183

⁴⁶ "Qu'elle sera aussi fortifiée par son inclination xx 30 degrés en raison du sinus de cet angle xxx total, ou dans le rapport de 1 à 2 qui est celui xx xxx sinus: parceque dans le calcul que l'on a fait on a supposé qu'elle serait placée horizontalement, situation qui est la plus faible qu'elle puisse avoir pour résister à une charge qui agirait dans une direction verticale et perpendiculaire à la longueur des fibres." ibidem, p. 183.

La considerazione, in linea di principio è corretta, ma si dovrebbe considerare il coseno dell'angolo; la riduzione sarebbe quindi più modesta.

⁴⁷ Georges-Louis Leclerc, Comte de Buffon *Expériences sur la force du Bois. Second Mémoire*, Mémoires de l'Académie Royale des Sciences 1741", Paris, p. 333

⁴⁸ "On peut conclure d'après les expériences de M. Buffon rapportées dans les Mémoires de l'Académie des Sciences Année 1741 page 333 faites sur une pièce de bois de chêne de 10 pieds de longueur et de 8 pouces de grosseur en quarré, qu'elles pourra porter, en les réduisant au quart, un poids de 23414 lis étant chargée dans son milieu et posée horizontalement sur deux points d'appui, sans être fixée a ses bouts, pour qu'elle ne soit pas exposée à se rompre." ibidem pp. 184-185

⁴⁹ "On savait aussi après les expériences qui ont été faites par M. de Buffon et Parent que le bois de sapin qui pèse moins que le chêne, est cependant plus fort d'un cinquième pour porter que ce dernier: ce qui élèvera à 28496 L les 23414 L trouvées au dessus au lieu de 11242 L dont chaque poutrelle doit être chargée moyennement, ainsi que les jambes de force doublées mentionnées ci devant." ibidem, p. 185

Questo ponte potrebbe essere costruito anche in pietra; per i montanti, che devono essere realizzati in un blocco unico per evitare giunzioni, si potrebbe impiegare granito, marmo o altra pietra simile molto resistente; i travetti saranno realizzati preferibilmente in legno, così come la parte mobile del ponte levatoio ed il meccanismo di apertura; il parapetto sarà realizzato in ferro battuto.

1.4 La dimensione trasversale del ponte e della trave

Il secondo manoscritto analizzato⁵⁰ è dedicato ai ponti in legno (*Pont de bois*) con un sottotitolo: *Question et majeure et neuve*. L'argomento affrontato è quello della instabilità laterale dell'impalcato del ponte in legno, poi riferito per semplicità ad una trave sola. La prima parte riguarda la deformabilità delle travi; una seconda parte riguarda la larghezza del ponte rispetto alla lunghezza.

Il testo inizia riportando il quesito che Cadet de Chambine, segretario generale dell'amministrazione dell'*École des Ponts et Chaussées*, propone in una lettera del 19 dicembre 1798, per conto del Ministro, su quale debba essere la larghezza di un ponte in legno rispetto alla sua lunghezza.

La domanda può essere considerata sotto due aspetti: da una parte la larghezza del ponte ha interesse relativamente alla pubblica utilità (è necessario ad esempio che la larghezza abbia la dimensione minima per poter consentire il passaggio di due carrozze, rispondendo così ad un requisito funzionale), dall'altra è necessaria ai fini della stabilità dell'opera (in relazione quindi a quello che oggi viene indicato con stato limite ultimo).

Le campate dei ponti in legno le cui luci superano i 19 – 20 metri sono soggette ad un movimento verticale e ad uno orizzontale che provengono da una serie di cause: 1° dal peso che grava sul ponte (carico accidentale), dal peso proprio del ponte (carico permanente) e dalle ridotte dimensioni degli elementi in legno di rovere, più resistente degli altri, che contribuiscono sensibilmente al movimento orizzontale. 2° Da un cattivo collegamento tra tenone e mortasa o, se la dimensione del giunto non è proporzionata, alla dimensione degli elementi⁵¹; il tenone deve avere spessore pari ai 2/5 dell'elemento nel quale è praticato l'intaglio⁵². 3° I movimenti orizzontali sono inoltre causati da giunti mal realizzati, dalla cattiva qualità del legname e dai relativi difetti, dalle dimensioni della sezione trasversale, non adeguate alla lunghezza dell'elemento. Altre cause derivano dalla poca relazione tra gli elementi portanti e la resistenza che devono fornire e dal fatto che spesso ci si dimentica che, nella realizzazione delle travi, due elementi della medesima lunghezza hanno resistenze che stanno tra loro

⁵⁰ MS 233 © École Nationale des Ponts et Chaussées

⁵¹ “Il vient aussi de ce que les tenons ni sont de jauge aux mortaises, ni proportionnés à la grosseur des bois” in MS 233 © École Nationale des Ponts et Chaussées p. 189

⁵² “Les tenons doivent avoir d'épaisseur 2/5 de celle de la pièce de bois dans la quelle ils sont pratiqués”, ibidem, p. 189

come i rispettivi prodotti della base per il quadrato dell'altezza⁵³. 4° Infine anche la corrente dei fiumi e dei torrenti ed il vento contribuiscono a generare movimenti orizzontali⁵⁴.

L'esperienza dimostra che, malgrado tutte le attenzioni prestate nella realizzazione del ponte in legno, nell'accuratezza della costruzione, nella scelta di materiale di buona qualità e nella scelta delle dimensioni da assegnare agli elementi in funzione dei carichi, nella cura per realizzare solide connessioni nei giunti tenone e mortasa, rinforzi e consolidamenti, si verificano spesso sia cedimenti verticali che spostamenti orizzontali, direttamente proporzionali alla lunghezza del ponte ed inversamente proporzionali alla sua larghezza⁵⁵. L'autore ha cercato di studiare il fenomeno attraverso la lettura di trattati di carpenteria autorevoli⁵⁶ senza però riuscire a trovare risposta; dopo molte riflessioni sul movimento orizzontale, egli lo esprime attraverso il semplice rapporto tra la larghezza e la lunghezza dell'impalcato.

Dopo molte prove sperimentali, l'autore ricava una proporzione differente, tale da assicurare sufficiente stabilità, secondo la quale la larghezza del ponte dovrebbe essere pari a circa un terzo della luce:⁵⁷

$$b = \frac{1}{3} \cdot l \quad (4)$$

In un'altra forma un po' più articolata la (4) può essere indicata come:

⁵³ "Les mouvements horizontales sont souvent occasionnés, outre les défauts de coupe et d'assemblages. Par la mauvaise qualité des bois gras et gelifs tranchés les nœuds viciés, et l'épaisseur des aubiers qui en diminuent les dimensions; et par conséquent la force; par les dimensions des equarrissage qui ne sont pas proportionnées à la longueur des pièces; par le peu de relation des différents pièces entr'elles suivant les poids qu'elles doivent porter et les résistances qu'elles doivent avoir et parceque, dans la composition des fermes on oblie souvent qu'en deux pièces de même longueur, leur résistance est dans la raison du produit de leur plan, par leur épaisseur verticale, et qu'elles doivent être comme le produit du quarré de la hauteur de l'une, multiplié par son épaisseur, au produit du quarré de la hauteur de l'autre pas son épaisseur; si que pour avoir le rapport de la résistance de deux pièces de différentes longueurs, épaisseurs et hauteurs, il faut multiplier le quarré de la hauteur par l'épaisseur, et diviser le produit par la longueur, attendu que la hauteur d'une pièce exprime le bras de levier qui repond à la puissance resistente.", *ibidem*, p. 190

⁵⁴ "Enfin le courant des fleuves et rivières et les vents peuvent encore contribuer au mouvement horizontal", *ibidem*, p. 190

⁵⁵ "On a l'expérience que, malgré toutes les attentions apportées à la composition d'un pont de bois, toutes les précautions prises par sa bonne construction, et pour la qualité saine de la matière et malgré les dimensions bien déterminées et calculées suivant la longueur portée et l'usage des pièces, la bonne liason et solidité des assemblages par tenons, mortoises, renforts et embrassement et malgré les fermes, moises et echarpes liernes contrevents et decharge il se fait outre l'affaissement ou mouvement vertical, un mouvement horizontal assés considerable et toujours allarmants que le ouvriers appellent vergement ou rollement dont la quantité est en raison inverse de la largeur du pont et en raison directe de la longueur de travées.", *ibidem*, p. 191

⁵⁶ "J'ai depuis long temp fait des réflexions sur se mouvement horizontale, plus à craindre qu'on ne l'imagine. J'ai lu et conseillé avec attention tout les auteur que traité de la charpente; Palladio, Scamozzy, Antonio Sangallo, Mathurin Jousse, La Hire, D'Aviler, Fourneau, Mesange, Gautier et Bélidor mais tous ces auteurs n'ont parlé de la largeur des ponts de bois que relativement a la voye ou passage necessaire aux voitures qui doivent les frequenter sans aucune consideration de la largeur à la longueur des travées: et c'est la question vraiment interessante et neuve qu'on demande de traiter aujourd'huy.", *ibidem*, p. 191

⁵⁷ "D'après beaucoup des expériences et d'(esfois), j'ai trouvé que pour qu'un pont de bois eut une solidité convenable surtout quand il était composé de plusieurs travées supportées par des palées ou des piles de maçonnerie il était necessaire qu'il eut de largeur le tiers de la longueur de la plus long des travées" *ibidem*, p. 191

$$b^2 = \frac{\left(\frac{l}{2}\right)^2}{2} \quad (5)$$

ovvero:

$$b^2 = \frac{l^2}{8} \quad (6)$$

Da cui deriva:

$$b = l \cdot \sqrt{\frac{1}{8}} \cong \frac{l}{3} \quad (7)$$

Nel caso in cui si abbia una campata di 20 metri di luce, l'autore ne calcola la metà (10 metri) e successivamente il quadrato (100), dimezzando il risultato (50) ed estraendone la radice si ottiene una larghezza pari a circa 7 metri⁵⁸. Curiosamente, subito di seguito l'autore propone una serie di possibili proporzioni per la sezione della trave (5 e 7, 10 e 14, 15 e 21) che soddisfano un'altra regola:

$$b^2 = \frac{l^2}{2} \rightarrow b = \left(\frac{l}{2}\right)^2 \quad (8)$$

È una semplice idea che l'autore azzarda ma che ha bisogno di una dimostrazione⁵⁹.

Nello spirito del metodo galileiano, egli avverte quindi la necessità che, sulla base delle indicazioni sperimentali, sia formulata una legge teorica che regoli il problema. Qui, probabilmente, l'autore affronta due problemi contemporaneamente: quello della larghezza minima dell'impalcato, che dovrebbe essere circa un terzo della luce, e quello delle proporzioni ideali della sezione trasversale, già risolto da Parent molti anni prima⁶⁰.

L'autore dichiara di non conoscere nessun principio di teoria meccanica che possa confermare quanto mostra l'esperienza, ovvero che la larghezza del ponte debba essere pari ad un terzo della luce della campata maggiore⁶¹. Un accorgimento utile ad impedire il movimento orizzontale è quello di inserire, in corrispondenza delle pile, elementi inclinati simili a quelli utilizzati nel ponte militare in legno costruito da Cesare sul Reno. Se i pali in legno sono sostituiti da pile in muratura è necessario appoggiare gli elementi inclinati alle travi di bordo, e aggiungere una sottotrave che si estenderà sotto

⁵⁸ “Soit par exemple une travée de 20 mètres dont la moitié est de 10 mètre: le carré soit cette moitié étant 100 mètres alors le carré de la largeur du pont serait 50 mètres dont la racine carrée approchante est de 7 mètres au environ le tiers de la longueur de la travée: ce qui donne la proportion en milieu équarrissage d'une poutre à la quelle on veut attribuer la plus grande résistance possible; c'est à dire 5 sur 7 10 sur 14 et 15 sur 21”, ibidem, pp. 191-192

⁵⁹ “Dont on veut que le carré des petites dimensions est moitié à peu près du carré des grandes: c'est une simple idée que je hazard et peut être l'on pourrait pousser cette analogie jusqu'à la démonstration que resoudrait la question.”, ibidem, p. 192

⁶⁰ Antoine Parent, *Des résistances des poutres par rapport d leurs longueurs ou portees, et a leurs dimensions et situations, et des poutres de plus grand résistance*, Mémoire de l'Académie des Sciences, 1708, pp. 116-123

⁶¹ “Je ne vois ni ne connais aucun principe de théorie mécanique que puisse éclairer et appuyer l'expérience répétée que j'ai faite de donner pour largeur à un pont de bois les tiers de la longueur de la plus grande des travées.” in MS 233 © École Nationale des Ponts et Chaussées, p.192

tutte le travi longitudinali e attraverserà tutta la larghezza del ponte⁶². Con questa sotto-trave, gli elementi inclinati saranno collegati con l'impalcato rispettivamente ad $\frac{1}{4}$ e a $\frac{3}{4}$ della campata, per cui solo la parte centrale della trave, pari a metà della luce, rimarrà senza supporto intermedio⁶³.

Il desiderio di dare una risposta esauriente al Ministro che gli si era rivolto, spinge De Varaigne a formulare il quesito a tutti gli ingegneri dei *Ponts et Chaussées* chiedendo loro di risolverlo e rispondere entro un mese.

Il quesito proposto si riferisce non più ad una trave di impalcato ma ad una trave ABCD come indicato in figura 19, lunga 30 piedi, alta 21 pollici e profonda 15 pollici.

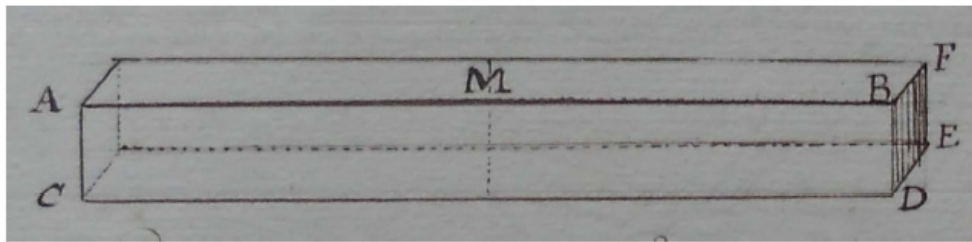


Figura 19. Disegno relativo ad uno dei quesiti proposti.

Queste sono le dimensioni che l'esperienza, che precede sempre la teoria e di cui è la madre⁶⁴, assegna ad una trave perché abbia la massima resistenza possibile.

Di seguito viene applicata la legge empirica suggerita per determinare la larghezza dell'impalcato, una volta nota la luce massima. L'esperienza ha infatti dimostrato che era necessario che la proporzione tra le dimensioni fosse 5 su 7, 10 su 14 e 15 su 21 per la sezione della trave e che la larghezza dell'impalcato sia pari all'incirca ad un terzo della campata⁶⁵.

⁶² “Si on avait les piles en maçonnerie ou lieu des palées il faut, desavant et arrière-bas appuyer des arcs bouter contre les poutres de rive sans les quelles on mettra un sous-poutreau ou travon qui courra sous toutes les poutres et traversera la largeur entière du pont” ibidem p. 192

⁶³ “avec le quel souspoutreau les arcs bouter seront assemblées en mordant de façon que chacun de ces arcs bouter ait de longueur $\frac{1}{4}$ de cette de la travée en sorte qu’il ne restera que la moitié de la travée sans être buttée.” Ibidem, p. 192

⁶⁴ “Voilà les dimensions que l’expérience qui prévient toujours la théorie et dont elle est la mère assigne à un poutre pour la rendre capable de la plus grande résistance possible”, ibidem, p. 193

⁶⁵ “Il est clair qu’elle resistera d’autant plus au mouvement horizontal qui lui serait imprimé qu’elle aura une plus grande épaisseur, que nous regardons comme la largeur du pont, soit en proportion avec la hauteur BD, que l’on peut considerer comme la demi-longueur de la travée; or l’expérience a fait voir qu’il fallait que les dimensions fussent 5 sur 7; 10 sur 14; 15 sur 21 : c’est à dire, que le carré de la hauteur fut double a peu près du carré de la largeur ou épaisseur; d’où il suivrait que le carré de la largeur d’un pont de bois devrait être la moitié du carré de la demi longueur de la travée ou à peu près le tiers de la longueur de toute la travée; ce que nous voudrions pouvoir démontrer. Au surplus ce que nous avons trouvé bon par des expériences reiterée”, ibidem, p. 194

1.5 Dalla trave all'arco: i *Concours des ponts* dell'*École des Ponts et Chaussées*

Il percorso formativo dell'*École des Ponts et Chaussées* prevedeva, al termine dell'anno di corso, una serie di prove (*Concours*) volte a dimostrare le capacità e le competenze dell'allievo. Nel 1775, in seguito all'istruzione di Turgot del 19 febbraio⁶⁶, i *Concours* dell'*École des Ponts et Chaussées* vengono riformati in maniera significativa. Il *Concours d'architecture* viene diviso in tre parti: architettura dei ponti, architettura idraulica e architettura civile. La valutazione dei concorsi di architettura veniva effettuata dai membri dell'assemblea dei *Ponts et Chaussées* formata dagli ingegneri presenti a Parigi e dagli ispettori generali, insieme a Jean Rodolphe Perronet e Daniel-Charles Trudaine, cui si aggiunsero, dopo il 1775, i membri dell'*Académie Royale d'Architecture*.

La novità più significativa riguarda l'introduzione di "gradi" o "punti" attribuiti alle prove degli allievi, sulla base dei quali veniva stilata una graduatoria di merito.

Durante il periodo rivoluzionario le iscrizioni all'*École* diminuirono, i corsi vennero spesso sospesi, si completò la trasformazione dell'*ancienne école* iniziata da Trudaine nel 1775.

Presso l'*École des Ponts et Chaussées* vennero organizzati più concorsi di architettura dei ponti per rendere più familiare questo tipo di costruzione agli allievi. La maggior parte dei progetti redatti in questa occasione propone modelli tradizionali: un impalcato disposto su pali infissi nel letto del fiume, in alcuni casi ulteriormente supportato da uno o più puntoni per lato. L'esigenza di contenere fortemente i costi implica la scelta di ridurre al minimo il numero dei pali di fondazione, che solitamente costituiscono circa la metà del costo dell'opera.

Di seguito si propone la lettura di una selezione degli elaborati presentati ai *concours* di architettura tra il 1773 e il 1818, altri progetti sono raccolti e commentati nell'atlante iconografico allegato.

Alcune note di commento sullo schema strutturale adottato si propongono di leggere nuove intuizioni formali in relazione alle nuove acquisizioni teoriche.

Il progetto vincitore del concorso di ponti del 1801 redatto da Denis Rosalie Lhoste (1779-1855) e rappresentato in figura 20 propone uno schema strutturale piuttosto semplice. La luce del ponte è suddivisa in cinque campate, in ciascuna delle quali l'impalcato è supportato da una doppia serie di puntoni inclinati. Questi, a loro volta, sono collegati tra loro e con l'impalcato mediante elementi perpendicolari che, riducendo la lunghezza di libera inflessione ne contrastano l'instabilità. La struttura richiama alla memoria lo schema strutturale proposto da Palladio per il ponte di Bassano di figura 15. Le pile sono in legno con sezioni piuttosto esili.

⁶⁶ André Brunot, R. Coquand, *Le Corps des Ponts et Chaussées*, Paris, Editions du Centre National de la Recherche Scientifique, 1982, pp. 646-660

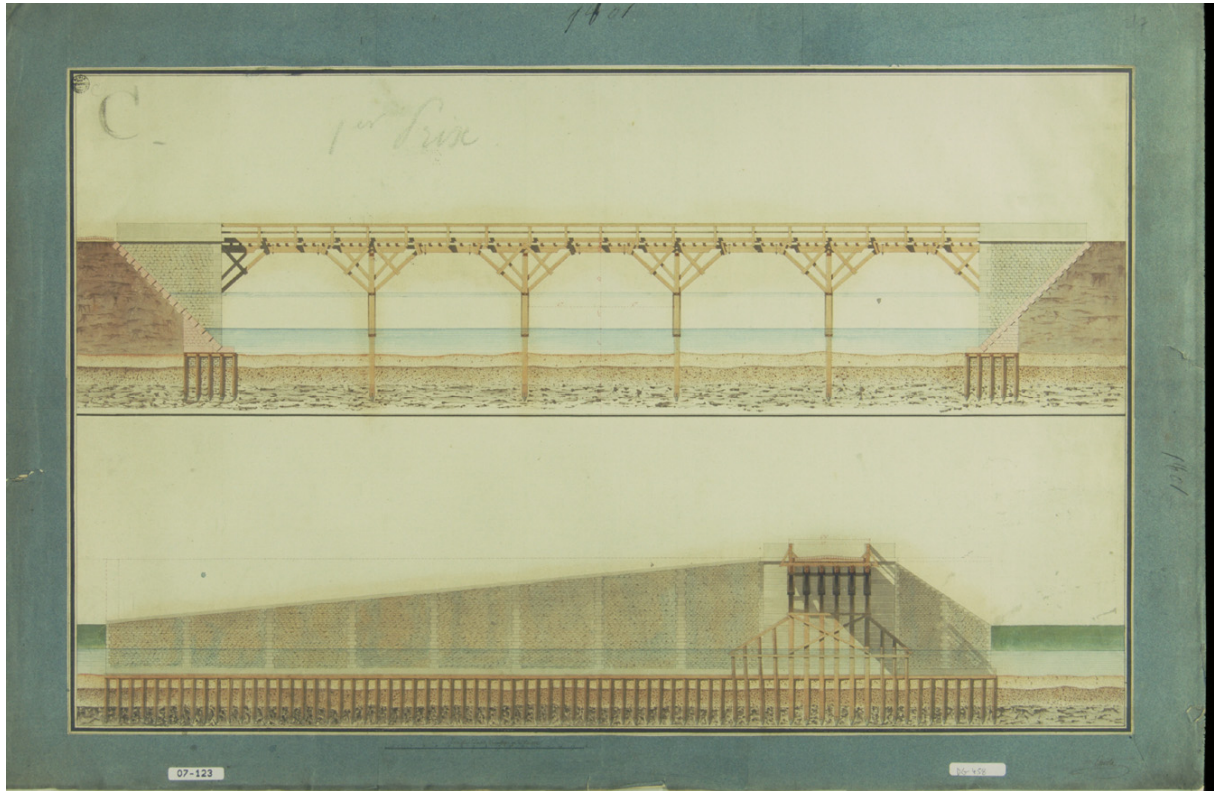


Figura 20: Ponte in legno: prospetto e sezione. © Collection École Nationale des Ponts et Chaussées. DG 458

Il progetto presentato da Ferdinand Jean Bayard de la Vingtrie, per il concorso del 1816 rappresentato in figura 21 e premiato con il secondo premio, propone l'alternativa di due schemi molto simili, che differiscono soltanto per il numero dei puntoni laterali a supporto all'impalcato. In entrambi i casi l'impalcato è rinforzato nella parte centrale della campata da una sottotrave aggiuntiva, e da uno o due puntoni per lato connessi tra di loro e con l'impalcato mediante elementi perpendicolari per ridurre l'instabilità dovuta alla compressione. Le pile, piuttosto snelle, sono realizzate in legno e dalla sezione trasversale è visibile il sistema asimmetrico di controvento trasversale delle pile stesse, in direzione opposta a quella della corrente del fiume.

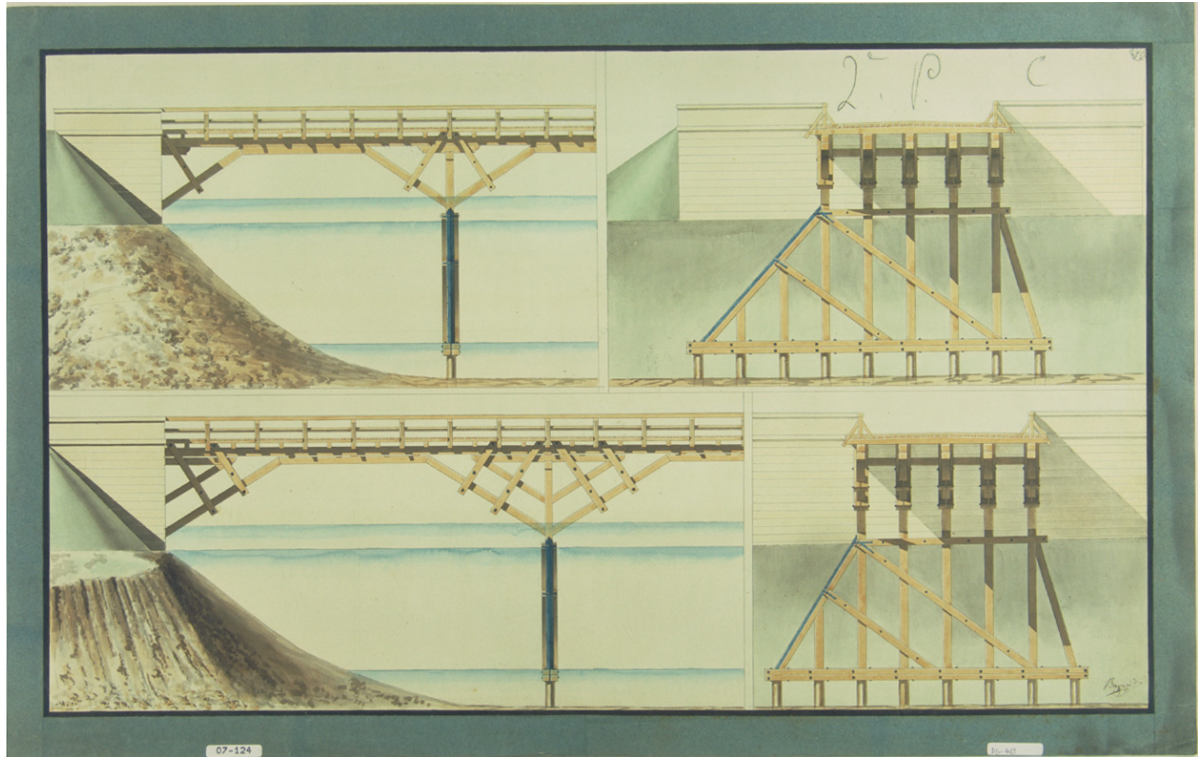


Figura 21: Ponte in legno. Prospetto e sezioni. © Collection École Nationale des Ponts et Chaussées. DG 461

Il progetto di Augustin Louis Cauchy (1789-1857) rappresentato in figura 22, premiato con il secondo premio al concorso di ponti del 1808, presenta una soluzione intermedia tra quella con impalcato sorretto da un arco e quella in cui l'impalcato è sorretto da puntoni. In questo progetto la struttura di sostegno dell'impalcato è realizzata con due puntoni per lato: uno sostiene la sottotrave posta in corrispondenza dell'appoggio, l'altro è a diretto sostegno dell'impalcato. Un'ulteriore trave di sostegno è posta nella parte centrale della campata e collegata ai puntoni adiacenti formando così un arco poligonale, configurazione geometrica intermedia tra arco e poligono.

Dal disegno del prospetto non è possibile capire su quante campate si sviluppi il ponte; gli appoggi sono su pile intermedie in legno, realizzate in maniera insolita. Ai tradizionali elementi in legno disposti verticalmente, Cauchy contrappone una pila formata da un solo elemento verticale e due elementi inclinati.



Figura 22: Prospetto di un ponte in legno. *Concours pont.*
 © Collection École Nationale des Ponts et Chaussées. DG 3052

I lavori di Charles- Joseph Minard sulla resistenza dei materiali e le prove sperimentali da lui condotte sono citati nel *Resumé des leçons* di Navier e nei testi di Poncelet. Il suo nome è inoltre legato alle tabelle di resistenza cui dedica l'ultima parte della sua vita e che gli varranno il titolo di pioniere nell'uso dei grafici nel campo dell'ingegneria e della statistica.

Il progetto da lui presentato per il concorso di architettura del 1812 rappresentato in figura 23 presenta una luce piuttosto considerevole (33,7 metri) e riceve il terzo premio. Come nei casi precedenti lo schema strutturale varia in funzione della luce da coprire: la parte centrale presenta un arco formato da una serie di tre lamine sovrapposte, tra loro collegate da elementi perpendicolari in legno. Due puntoni per lato sostengono ulteriormente l'impalcato nella parte laterale. Gli schemi utilizzati per le campate laterali sono visibili solo in parte ma la soluzione adottata è ormai abbastanza nota, con due puntoni per lato collegati all'impalcato tramite sottotravi di rinforzo. Le pile sono realizzate in pietra e nelle viste della pianta e della sezione dell'impalcato è ben riconoscibile il sistema di controvento trasversale.

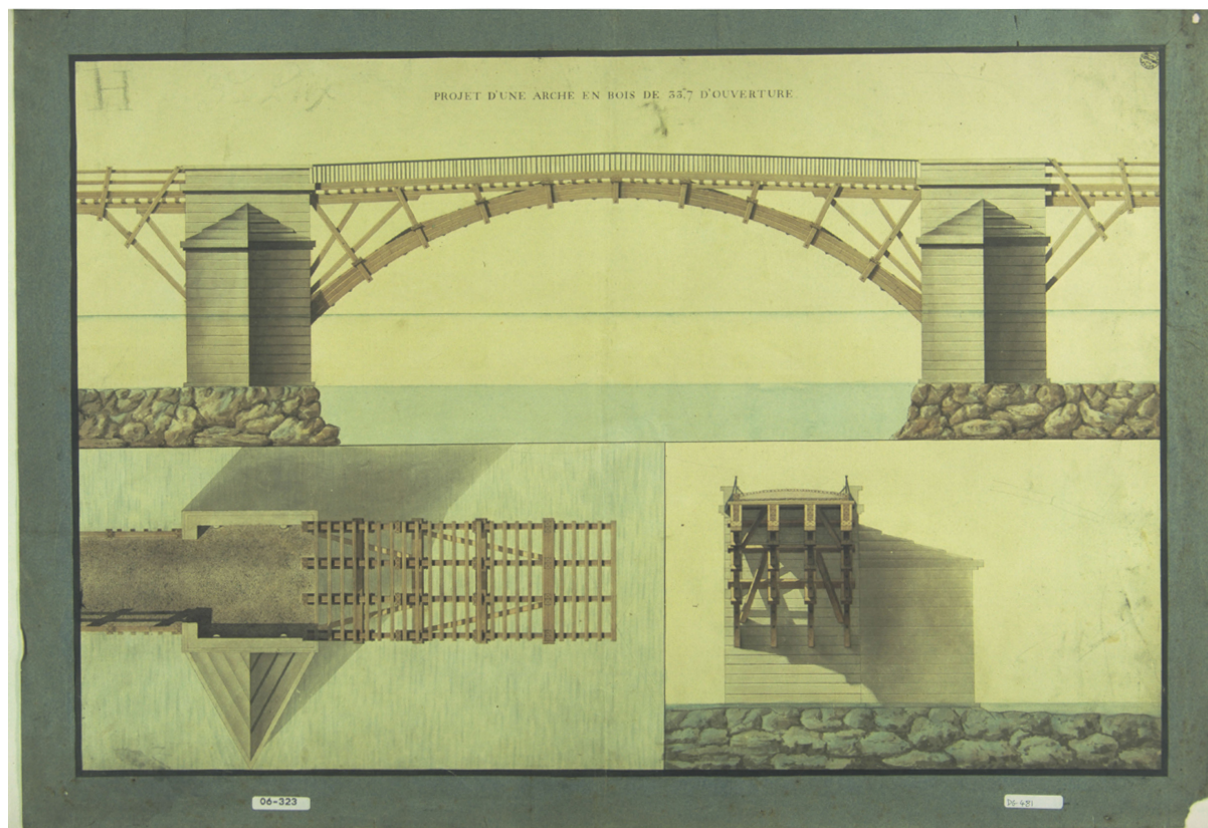


Figura 23: Progetto di un arco in legno di 33.7 m luce. Prospetto, pianta e sezione.
© Collection École Nationale des Ponts et Chaussées. DG 481

Il progetto per il concorso di ponti in legno del 1806 proposto da Louis Marie Martret-Preville (1780-1837) e rappresentato in figura 24 si aggiudica il secondo premio. Lo schema strutturale presenta alcuni elementi di novità rispetto ai precedenti: le campate sulle quali si divide la luce del ponte non sono tutte uguali: quella centrale ha una luce superiore alle due laterali; tutte poggiano su pile in muratura. A luci diverse corrispondono diversi schemi strutturali: la campata centrale presenta uno schema ad arco ottenuto dalla sovrapposizione di più elementi collegati da undici connettori in legno che si prolungano per collegare l'arco con l'impalcato. Quest'ultimo riceve inoltre supporto da un paio di puntoni per lato posti a sostegno della sottotrave presente nella parte laterale della campata.

Le campate laterali, di luce più modesta, presentano un impalcato semplicemente sostenuto da una coppia di puntoni per lato; sia nella parte centrale che nelle due parti laterali è presente una sottotrave aggiuntiva. Un elemento in legno perpendicolare ai puntoni ne riduce la lunghezza di libera inflessione.

Nella pianta dell'impalcato non si trova riscontro della presenza di elementi trasversali di controvento.

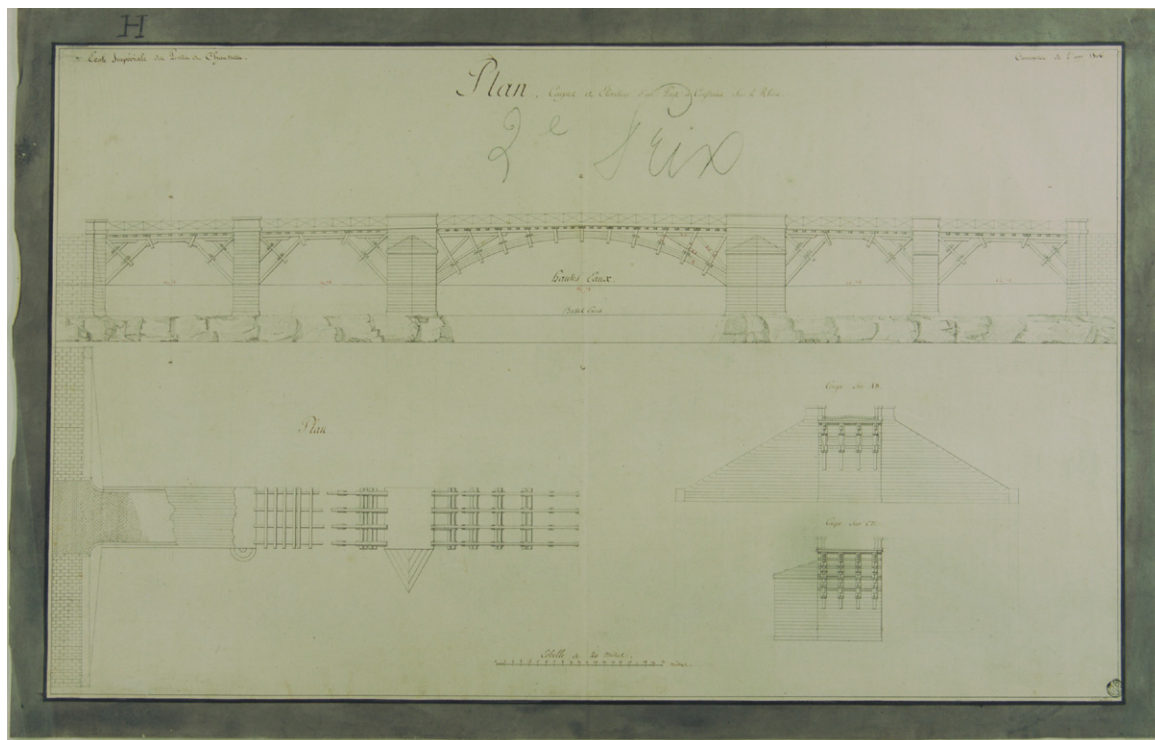


Figura 24: Pianta sezione e prospetto di un ponte da costruire sul Rodano. *2^e prix de pont en bois ou charpente.*
 © Collection École Nationale des Ponts et Chaussées. DG 466

Il progetto proposto da Alexandre Charles Louis Arcelot per il concorso di ponti del 1800-1801 è rappresentato in figura 25. Il simbolo “1^” riportato in alto a sinistra potrebbe indicare che fosse vincitore del primo premio, ma questo fatto non è esplicitamente dichiarato. La struttura si sviluppa su tre campate su pile in pietra, ciascuna delle quali presenta una struttura ad arco a sostegno dell’impalcato con il contributo di una doppia coppia di puntoni per ciascuna campata. Gli elementi metallici di connessione a taglio presenti nell’arco affiancano una serie di elementi in legno che collegano l’arco con l’impalcato.

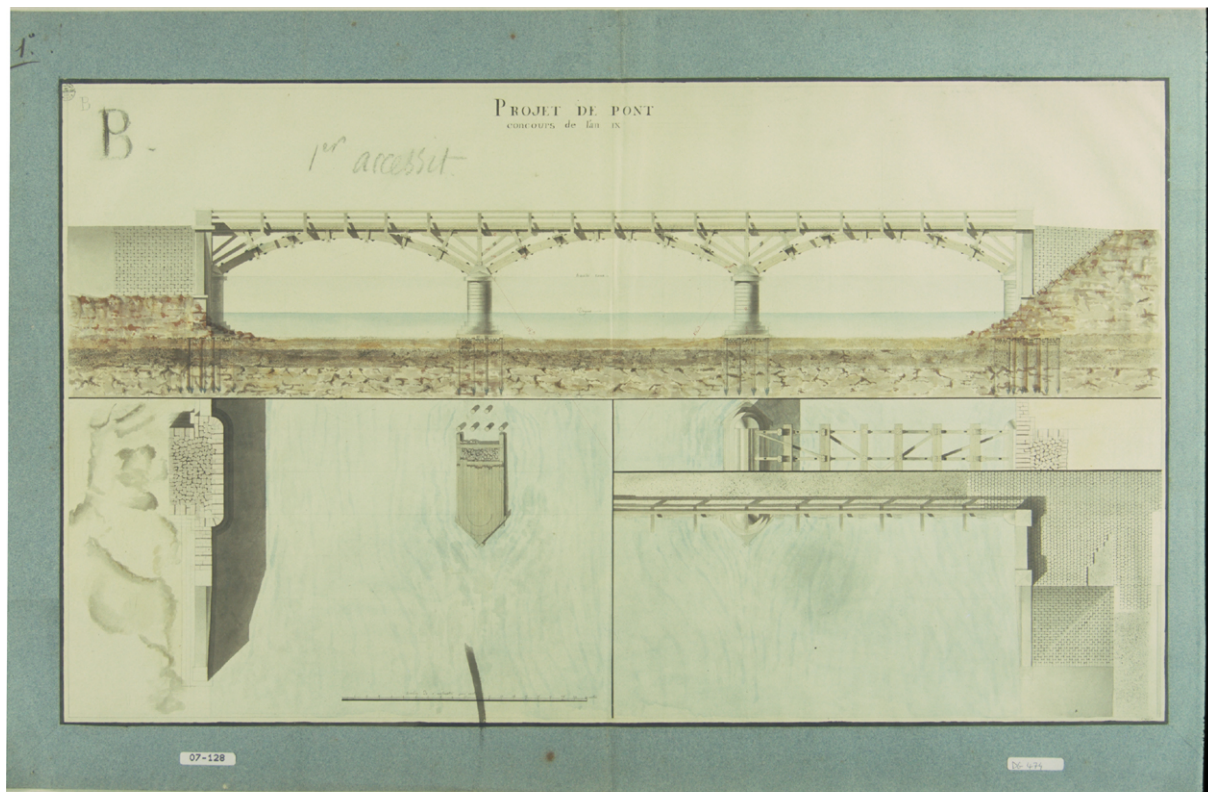


Figura 25: Progetto di un ponte in legno. Prospetto, pianta e particolare.
© Collection École Nationale des Ponts et Chaussées. DG 474.

Un altro progetto, presentato da Ferdinand Jean Bayard de la Vingtrie per il concorso di architettura dello stesso anno, è indicato in figura 26 e presenta uno schema più interessante.

L'impalcato è sostenuto in ciascuna campata da un arco formato da una serie di lamine di legno sovrapposte e giuntate con elementi metallici alternati ad elementi in legno, che si prolungano fino a collegarsi con l'impalcato e con i puntoni laterali. Le pile sono realizzate in muratura e dalla pianta dell'impalcato e dalla sezione prospettica si intravede uno schema di controvento trasversale della struttura. Le considerazioni sulla variazione dello schema strutturale in funzione della luce da coprire sono stati schematizzate nel disegno presentato al concorso di architettura del 1818 da Marie Fortuné de Vergès, e rappresentato in figura 27.

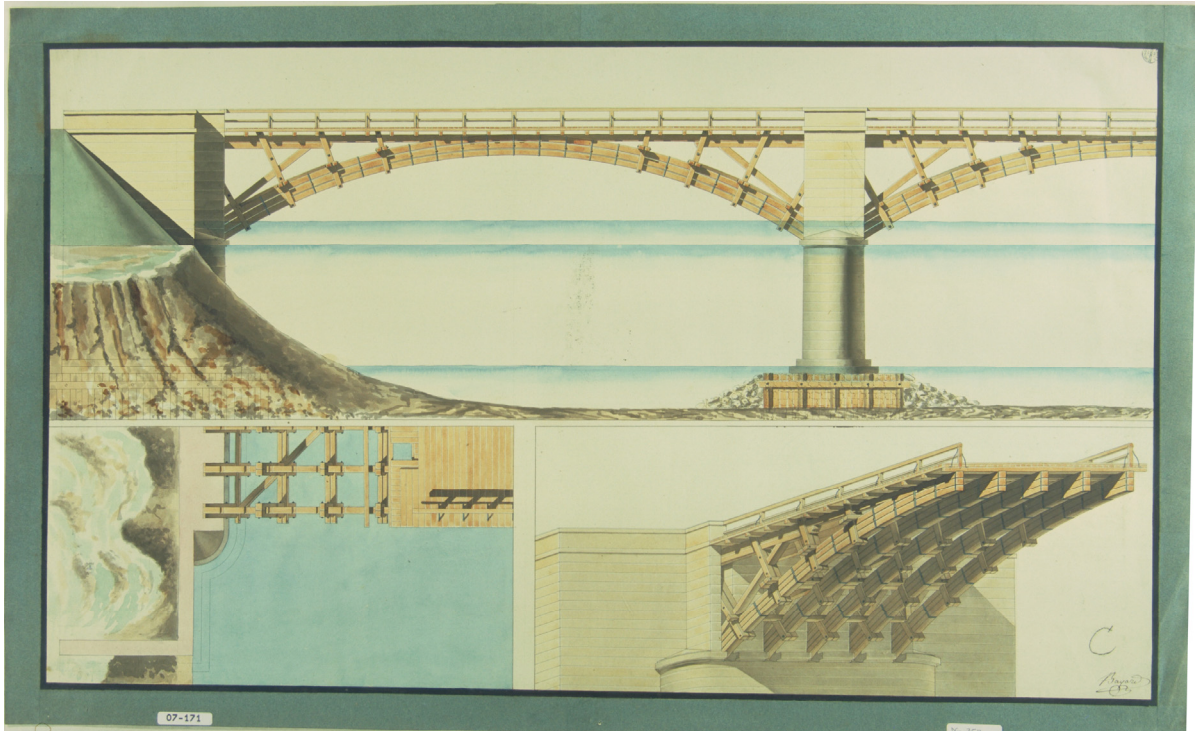


Figura 26: Ponte in legno. © Collection École Nationale des Ponts et Chaussées DG 752

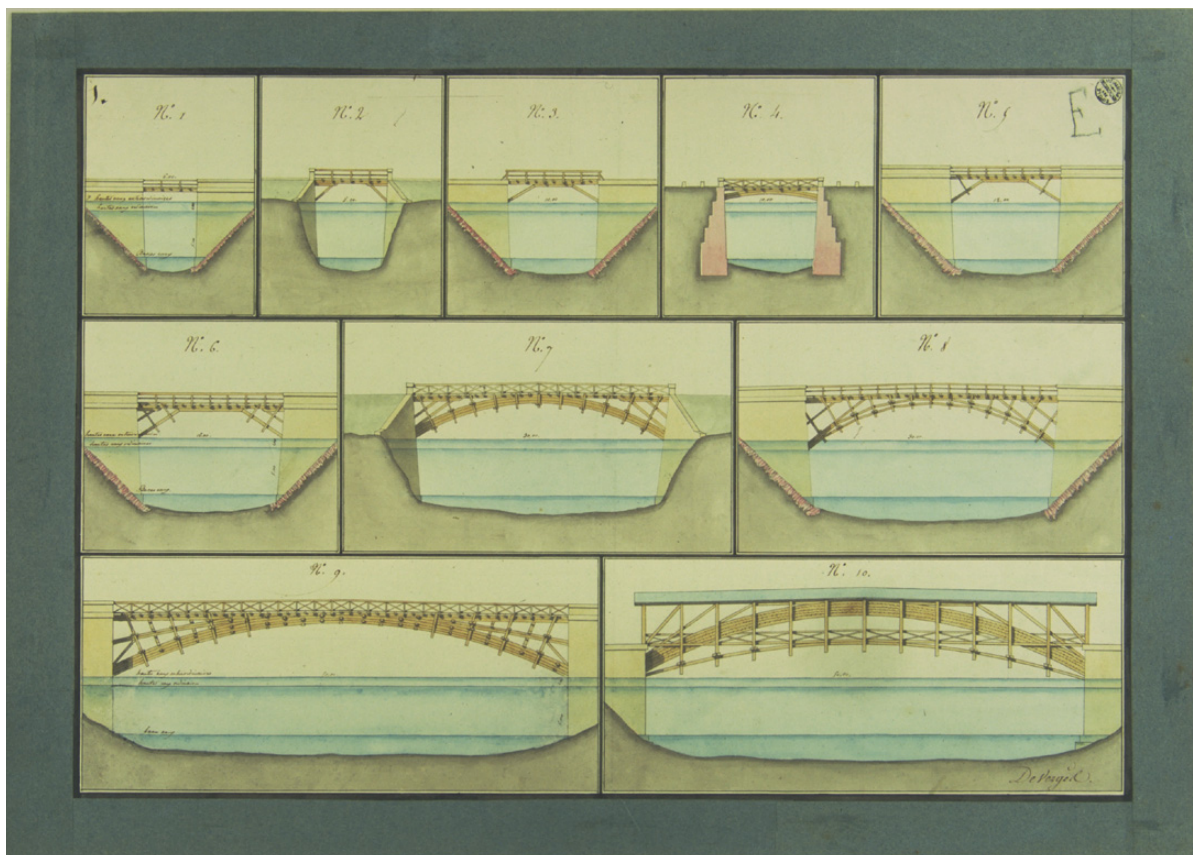


Figura 27: Progetto di dieci diversi ponti in legno.
© Collection École Nationale des Ponts et Chaussées DG 2915.

Questo disegno si differenzia dai progetti precedenti ed è caratterizzato da un chiaro intento didattico. Sono illustrate dieci differenti tipologie strutturali in funzione della luce da coprire, a partire dal semplice impalcato, per passare all'impalcato sostenuto da saette compresse.

A questi schemi segue la soluzione in cui l'impalcato è sostenuto da un arco costituito da più elementi sovrapposti (disegno n° 4) ed altre due proposte in cui la parte centrale della campata è rinforzata da una trave supplementare sempre accompagnata da un puntone (o due) per ciascun lato (disegni n° 5 e 6). Nella soluzione n° 7 l'impalcato è sostenuto da un arco formato da più strati collegati tra loro da elementi perpendicolari in legno.

Il disegno n° 8 è realizzato con profili molto sottili, il 9 ed il 10 riportano schemi più articolati che presentano notevoli somiglianze con progetti effettivamente realizzati come il ponte di Wettingen dei fratelli Grubenmann per il quale si rimanda al paragrafo 1.6. La presenza di una struttura di copertura, unica in tutti gli esempi presentati fin'ora, richiama immediatamente alla mente i ponti di tradizione svizzera, un'ampia documentazione dei quali è contenuta nell'Atlante iconografico allegato.

Il progetto presentato al *concours d'architecture* del 1773 indicato in figura 28, è un ponte da realizzare sulla Senna davanti al nuovo *Boulevard de la Salpêtrière*: lo schema proposto è costituito da sette campate di 90 piedi ciascuna e larghezza di 30 piedi: le dimensioni longitudinale e trasversale dell'impalcato sono state determinate probabilmente in base a indicazioni dettate dall'esperienza per cui la larghezza del ponte è pari a circa un terzo della sua lunghezza, come sarà ripreso qualche anno più tardi da Bernard, nel manoscritto MS233 al quale si è fatto riferimento nel paragrafo precedente. L'impalcato è sostenuto da una struttura reticolare ad arco, cui è collegato in quattro punti mediante elementi in legno allo scopo di ridurre le deformazioni flessionali.

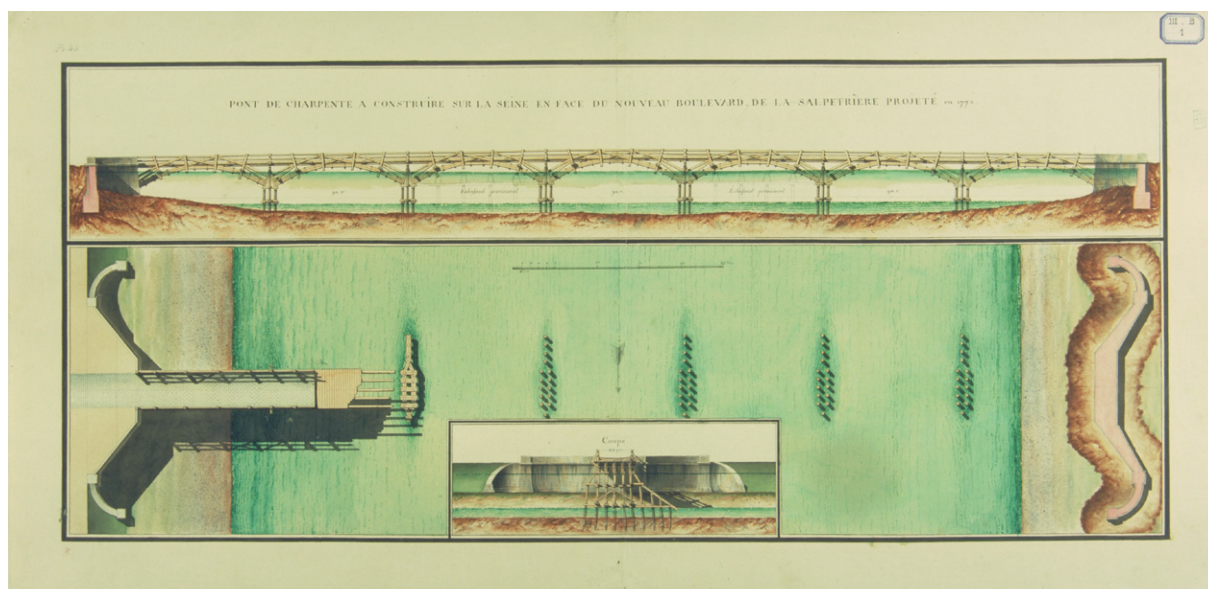


Figura 28: Progetto per un ponte in legno da realizzare davanti al *Boulevard de la Salpêtrière*.
© Collection École Nationale des Ponts et Chaussées. DG 793.

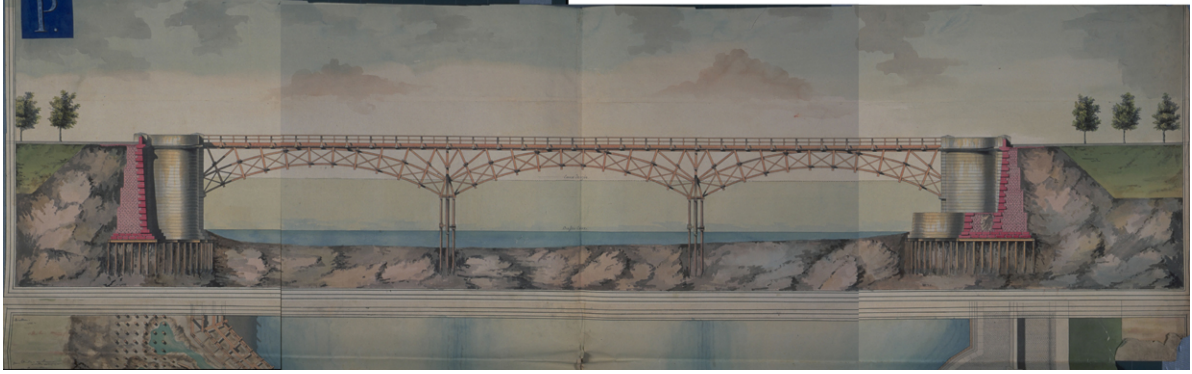


Figura 29. Ponte ad arco reticolare.
© Collection École Nationale des Ponts et Chaussées. DG 497.

Il progetto per il ponte presentato da Nicolas Christin Vincent al concorso del 1788 e rappresentato in figura 29 si basa su uno schema strutturale costituito da un arco reticolare a sostegno dell'impalcato. Il prolungamento dei montanti della struttura reticolare costituisce il collegamento tra arco ed impalcato per ridurre le deformazioni flessionali.

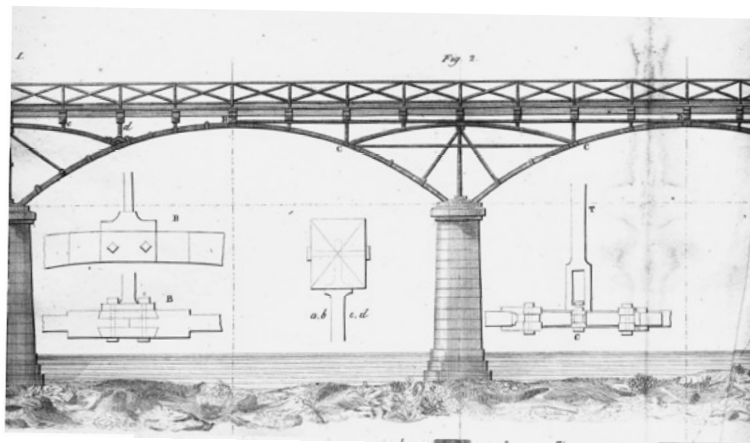


Figura 30. Louis Alexandre De Cessart – *Pont des Arts*.

Le pile in legno hanno sezioni piuttosto ridotte, mentre le spalle in pietra presentano dimensioni consistenti. Questa tipologia di ponte è un po' atipica e presenta più affinità con le prime strutture di ponti in acciaio che vengono costruite negli ultimi anni dell'800. La somiglianza con il *pont des Arts* di Louis Alexandre de Cessart, realizzato tra il 1801 e il 1803 e rappresentato in figura 30 mostra come lo stesso schema strutturale venisse impiegato anche nelle strutture in ferro. La presenza di elementi di collegamento tra arco ed impalcato evita che quest'ultimo si infletta eccessivamente.

Le sezioni sono estremamente snelle; per questo motivo si è resa necessaria l'introduzione di elementi per ridurre la lunghezza di libera inflessione dei puntoni.

Questa rassegna mostra la progressiva evoluzione di una ricerca che, a partire dalla soluzione della trave di impalcato sorretta da una o più saette arriva ad un impalcato sorretto da una serie di saette o

arco poligonale per poi diventare definitivamente arco. Un ulteriore passo è rappresentato dalla soluzione riportata in figura 31 in cui l'arco è appeso all'impalcato mediante una serie di elementi verticali. Le differenze formali documentate in questa serie di esempi sono dettate dalla necessità di poter coprire luci sempre maggiori, per le quali il semplice impalcato con saette non risulta adeguato. È da notare che la struttura dell'arco rimane sempre struttura di supporto di una trave di impalcato e non struttura portante primaria. I paragrafi che seguono presentano e discutono alcuni tentativi arditi che sono stati realizzati in Svizzera (Jean Grubenmann) e in Baviera (Karl Friedrich von Wiebeking) tra la seconda metà del XVIII secolo e i primi anni del XIX.

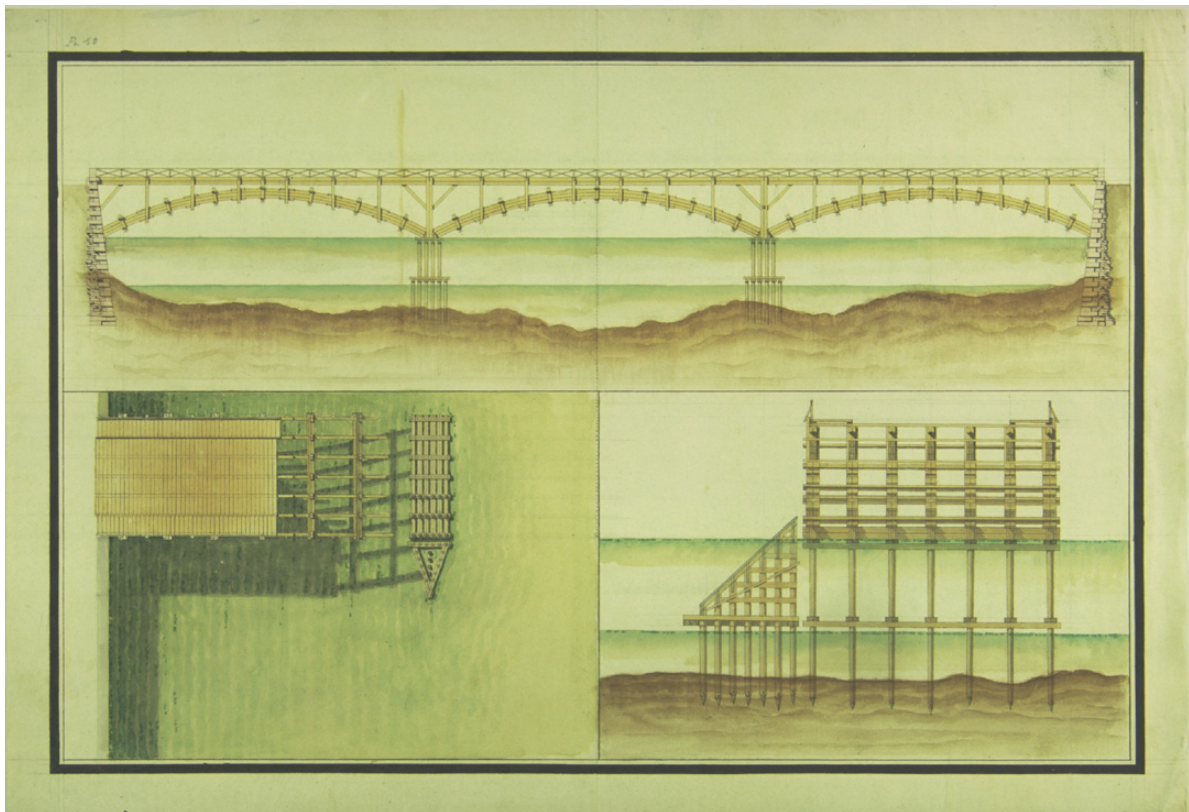


Figura 31. Progetto di un ponte in legno. Senza data.
© Collection École Nationale des Ponts et Chaussées. DG 3.

1.6 Jean Grubenmann: una nuova concezione dell'arco in legno

L'attività di carpenteria si tramandò per generazioni all'interno della famiglia Grubenmann, originaria di Teufen nell'Appenzell, dando luogo alla realizzazione di una numerosa serie di strutture in legno.

Le realizzazioni prodotte dai Grubenmann, a partire da quelle del fratello maggiore Jakob, prendono l'avvio da strutture di copertura e campanili le cui luci sono più modeste rispetto a quelle dei ponti. La fama che si guadagnarono i fratelli Jakob e Johannes, li mise in luce come esperti carpentieri in grado

di affrontare opere impegnative, come la struttura di copertura della chiesa di Grub rappresentata in figura 32 e successivamente quelle dei ponti.



Figura 32. Struttura di copertura della chiesa di Grub.

Hans Ulrich e Johannes (o Jean) Grubenmann appartengono alla seconda e terza generazione della famiglia (vedi figura 33) e sono attivi nella progettazione e costruzione di ponti in legno; con le loro doti di abili carpentieri, sono aperti all'innovazione e, in alcuni casi, ne sono protagonisti.

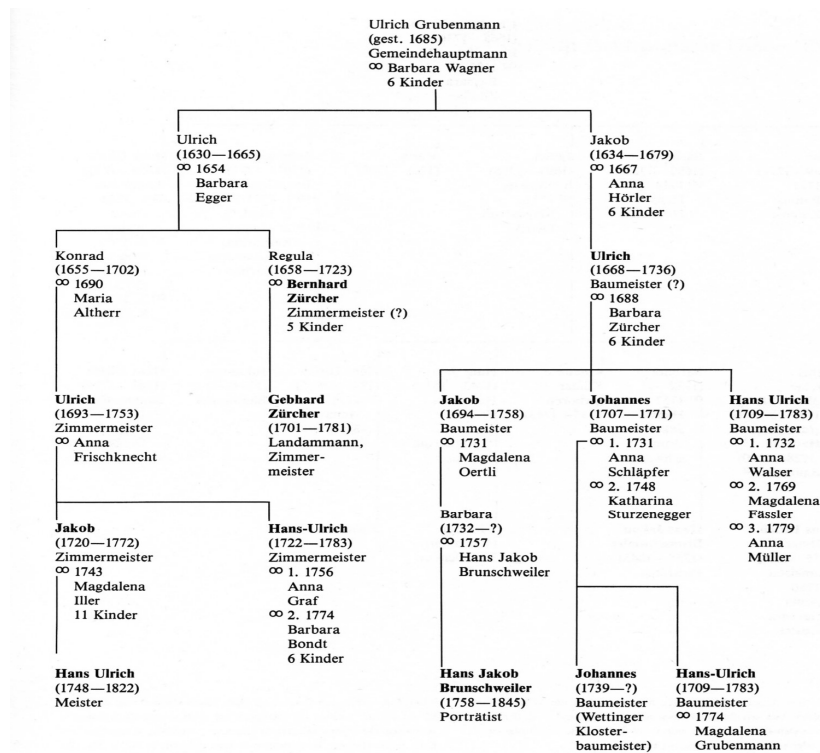


Figura 33. Albero genealogico della famiglia Grubenmann.

Non è rimasta traccia di eventuali loro disegni originali, abbiamo però documentazione diretta di alcune loro opere nella raccolta di incisioni che Michael Shanahan (1731-1811) e Cristoforo dell'Acqua (o Dall'Acqua) (1734-1787) realizzano in occasione del *Grand Tour* di formazione che Michael Shanahan compie nel 1770 al seguito di Frederick Hervey (1730-1803). In questa occasione Hervey e Shanahan si recano in Francia, Germania, Svizzera e nell'Italia del nord: grande interesse è dedicato ai ponti realizzati dai Grubenmann per le innovazioni nella tecnica e nella concezione strutturale⁶⁷. Questa raccolta di incisioni comprende anche altri ponti in legno, realizzati principalmente in territorio alpino ed è attualmente conservata presso la biblioteca del *Royal Institute of British Architects*. La documentazione iconografica di queste tavole è riprodotta e sinteticamente commentata nell'Atlante iconografico allegato.

I ponti di Hans Ulrich e Johannes emergono nel panorama europeo dell'epoca per l'alto livello qualitativo e l'arditezza del progetto; quelli di Schaffhausen e di Wettingen, realizzati nel 1756-1758 e nel 1765-1767, destano grande curiosità ed interesse all'interno delle istituzioni culturali e tra gli uomini di cultura dell'epoca.

Avviene così che, nel 1771, l'*Académie des Sciences* incarica Jacques-François Blondel di invitare Christopher Jezler matematico e fisico, tra il 1766 e il 1769 *Stadtbaumeister* di Schaffhausen, ad illustrare in quale modo questi ponti siano stati concepiti e realizzati e fornire una copia dei disegni di progetto. Nel mese di luglio Jezler si reca a Parigi per partecipare ad una delle sedute dell'*Académie des Sciences* e illustrare i progetti⁶⁸. Dallo scambio epistolare di Christopher Jezler con Samuel Rodolphe Jeanneret (1739-1826) si evince che Jezler non parteciperà a nessuna seduta dell'*Académie* adducendo motivazioni legate a malessere e all'assenza di Blondel⁶⁹.

⁶⁷ Angelo Maggi, Nicola Navone, *John Soane and the Wooden Bridges of Switzerland. Architecture and the Culture of Technology from Palladio to the Grubenmann*, London e Mendrisio, p. 69

⁶⁸ "Ce lundy 22^e Luillet 1771

L'Académie étant assemblée, M. Blondel lui a présenté des plans, coupes, élévation et développemnts de deux ponts, scavois, l'un élevé en 1758 à Schaffouse, l'autre à Vettingen, à deux lieux de Zurich, en Suisse, exécutez sur les desseins et la conduite de Jean Ulrik Grebenmann, dessinez par Jetzler, architecte de Schaffouse, à Schaffouse. L'Académie, après l'examen desd. desseins et s'être entretenu sur cette matière, a invité M. Blondel d'engager le sr Jetzler d'en laisser prendre un double pour la Compagnie, et de l'inviter lui-même à venir à la séance prochaine pour donner sur cet ouvrage important des explications particulières" in Henri Lemonnier, *Procès verbaux de l'Académie Royale d'Architecture, 1671-1793*, Paris, Jean Shemit, 1911-1929, vol. VIII, p. 103-104

⁶⁹ "...Als ich auch dieses bewilliget, so ersuchte er mich, einer Versammlung der Aka[demie] beyzuwohnen. Dieses nun geschah bisher noch nicht, weil ich das einte Mal durch Kopfweh, und das andere durch Abwesenheit H[erm] Blondels abgehalten wurde; es sollte aber nun nächste Wochen geschehen" SBS, Nachlass Christoph Jezler, Msc D 67, Biographisches, Briefe von Jezler, Letterbook from March 1771 to July 1772, p. 39

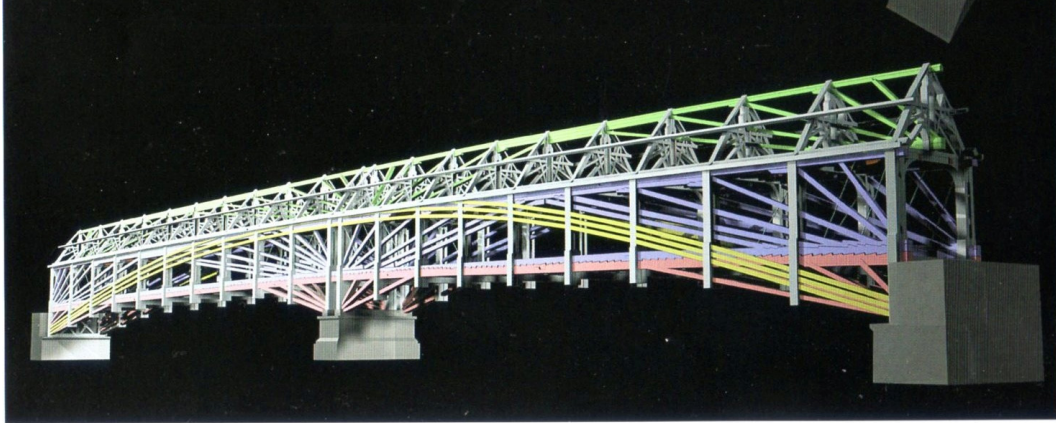


Figura 34. Ponte di Schaffhausen. Modello.

I disegni di cui Perronet e Blondel chiedono a Jezler copie e le descrizioni che li accompagnano sono tutt'ora conservati presso il *Fonds Ancien* dell'École des Ponts et Chaussées⁷⁰ e uno di questi è riportato in figura 35. In figura 37 sono rappresentati: in fig. I il prospetto longitudinale, in fig. II la sezione trasversale, in fig. VII la struttura dell'arco; in questa sono ben distinguibili piccoli cunei inseriti a correzione di piccole imperfezioni di realizzazione.

Per l'interesse ed il dibattito che i ponti di Schaffhausen e Wettingen hanno suscitato nei membri dell'Académie des Sciences verranno presentati e discussi qui di seguito. Il progetto iniziale del ponte di Schaffhausen prevedeva la realizzazione di un'unica campata; la soluzione adottata ed eseguita tra il 1756 ed il 1758 da Hans Ulrich Grubenmann venne però effettuata su due campate: una di 58,8 metri e l'altra di 52 metri circa.

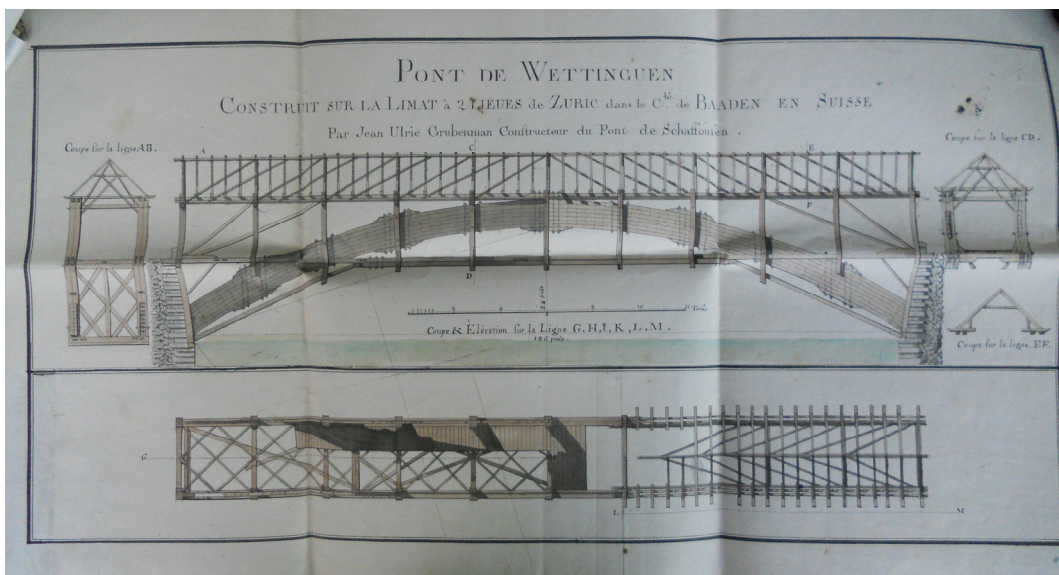


Figura 35. Copia del disegno del progetto del ponte di Wettingen.
© Collection École Nationale des Ponts et Chaussées. MS 2620.

⁷⁰ MS 1464, MS 2611, MS 2620 © Collection École Nationale des Ponts et Chaussées

Si riconosce uno schema strutturale molto articolato riportato in figura 34, la lettura dello schema strutturale di Massimo Laffranchi e Paolo De Giorgi⁷¹, individua una sovrapposizione di quattro diversi schemi: una trave reticolare formata dalla trave di impalcato e da elementi diagonali, (indicata in blu in figura 34); l'impalcato, collegato con le spalle e con la pila centrale mediante una serie di elementi inclinati in modo da ridurre la flessibilità (evidenziato in rosso in figura 34); una struttura ad arco poligonale, che si sviluppa su entrambe le campate (in giallo in figura 34); infine una struttura di sostegno per la copertura, analoga a quella blu, indicata in verde. Tutto questo dà origine ad una struttura altamente iperstatica, secondo una modalità piuttosto diffusa in quel periodo e in quell'area geografica, come testimonia la serie di esempi raccolti e commentati nell'Atlante iconografico allegato.

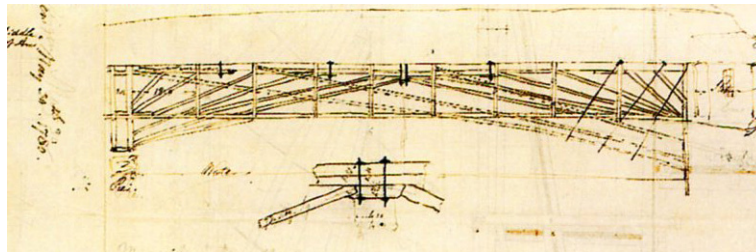


Figura 36. John Soane. Schizzo del ponte di Schaffhausen.

⁷¹ Massimo Laffranchi, Paolo De Giorgi, *Some remarks on the Grubenmanns' wooden bridge structures*, in Angelo Maggi, Nicola Navone, *John Soane and the Wooden Bridges of Switzerland. Architecture and the Culture of Technology from Palladio to the Grubenmann*, London e Mendrisio, 2003

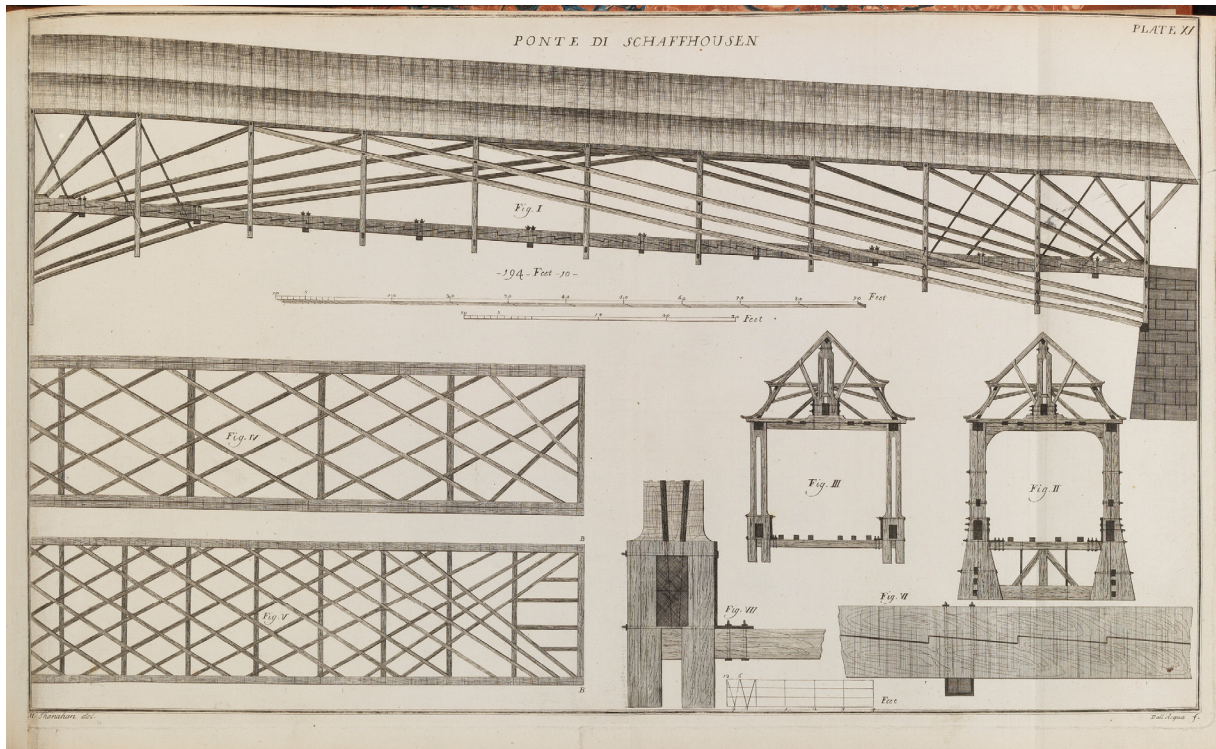


Figura 37. Ponte di Schaffhausen. Michael Shanahan e Cristoforo Dell'Acqua.

L'opera desta ammirazione in tutta Europa, l'iconografia del periodo riferita al ponte di Schaffhausen è assai vasta; spesso lo scopo per cui sono stati realizzati i disegni è legato all'aspetto del paesaggio in cui il ponte si inserisce, più che alla comprensione e alla descrizione di come è stato realizzato. Fanno eccezione le incisioni del R.I.B.A. (*Royal Institute of British Architects*) ma soprattutto quelle relative ai disegni realizzati nel 1780 da John Soane (figure 36 e 38). L'approccio con cui Soane effettua i rilievi e li restituisce sia in forma grafica che sotto forma di semplici appunti è particolarmente minuzioso.

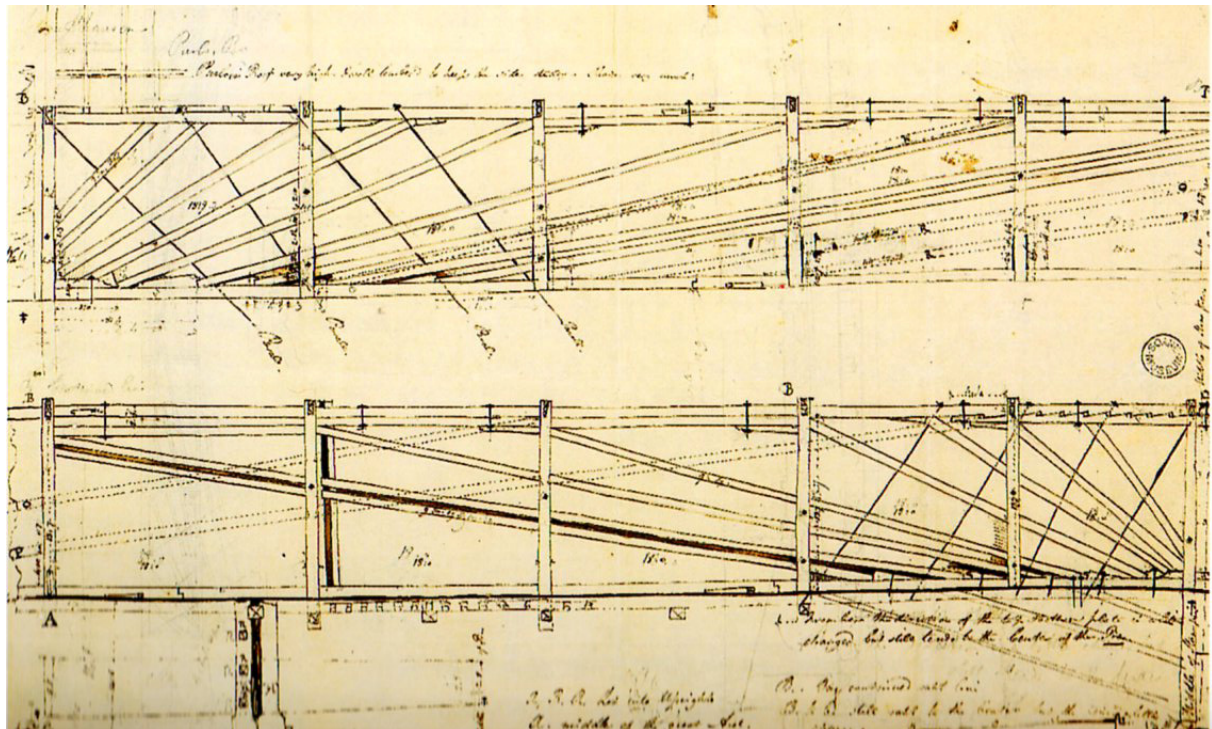


Figura 38. John Soane. Rilievo ponte di Schaffhausen.

Il ponte di Schaffhausen, come quello di Wettingen, furono bruciati nel 1799 dalle truppe francesi. La documentazione iconografica relativa a questo evento è legata alla fama che il ponte aveva raggiunto oltre confine e ne viene riportato un esempio in figura 39.



Figura 39. Distruzione del ponte di Schaffhausen ad opera delle truppe francesi nel 1799.

Tra il 1779 ed il 1780 Soane compie il *Grand Tour* durante il quale, tra il 30 e il 31 maggio 1780, si ferma a Wettingen nel viaggio da Zurigo a Schaffhausen⁷². In quei giorni effettua un vero e proprio rilievo del ponte⁷³ che dà luogo ai disegni riportati nelle figure 43 e 44.

Il modello in scala ridotta del ponte di Wettingen sul Limmat, venne commissionato ad Hans Ulrich e Johannes Grubenmann nel 1764 dai monaci cistercensi dell'abbazia di Wettingen⁷⁴, proprietari del terreno sul quale il ponte venne costruito; tale modello è attualmente conservato presso gli uffici amministrativi del Cantone di Aarau ed è rappresentato nelle figure 40 e 41. Il ponte fu realizzato tra il 1765 ed il 1767, su una luce di 198 piedi con un arco formato da sette lamine in legno.

⁷² "Tuesday Mornng May 30 Left Zurich to go to Schauff. by the way of Wettingen" in John Soane, *Sketches of the bridges at Wetteggn and Schaffhausen* [recto] 1780, London, Sir John Soane's Museum SM 79/1/13

⁷³ "the Bridge of W. Beyond each Idea I had formed of it contribute to make all things agreeable – stay'd some hours at W. To mesure the Bridge" in *ibidem*

⁷⁴ StaatsArchive Aarau AA/3498, f. 42, f. 74, f. 80: f. 201



Figura 40. Modello originale del ponte di Wettingen. **Figura 41.** Particolare dell'imposta dell'arco.

La trave di impalcato è composta dalla sovrapposizione di due elementi al fine di ottenere una sezione più resistente; l'intuizione del fenomeno dello scorrimento relativo tra questi due elementi porta all'utilizzo di perni passanti di collegamento, oltre che alla lavorazione delle superfici di contatto, in modo che risultino indentate.

In questo ponte è chiaramente evidente che l'idea della trave composta è ormai acquisita, si tratta di una corretta intuizione, la cui formalizzazione avverrà circa un secolo più tardi ad opera dall'ingegnere russo Dimitrii Ivanovich Jourawski (1821-1891). I suoi lavori furono pubblicati nel 1850 e nel 1859, e nel 1856 e nel 1860⁷⁵ anche negli *Annales des Ponts et Chaussées*, e seguono in termini temporali quelli sulla trave inflessa di Navier⁷⁶, pubblicati nel 1826.

L'arco ha la sua imposta al di sotto dell'impalcato, in modo da aumentare il raggio e ridurre le spinte sulle spalle. Alla struttura dell'arco si sovrappone una struttura secondaria, che presenta però elementi diagonali solo in corrispondenza della parte terminale della campata.

Alla stabilità della struttura contribuisce la presenza del rivestimento esterno, impiegato in primo luogo a scopo di protezione dall'azione degli agenti atmosferici; tuttavia, essendo inchiodato alla struttura, contribuisce alla formazione di un comportamento scatolare.

⁷⁵ Dimitrii Ivanovich Jourawski, *Sur la résistance d'un corps prismatique et d'un pièce composée en bois ou en tôle de fer à une force perpendiculaire à leur longueur*, in *Annales des Ponts et Chaussées, Mémoires et documens relatifs à l'art des constructions et au service de l'ingénieur; lois, ordonnances et autres actes concernant l'administration des Ponts et Chaussées*, 2^{ème} semestre, 1856, pp. 328-351 e Dimitrii Ivanovich Jourawski, *Remarques sur les poutres en treillis et les poutres pleines en tôle*, in *Annales des Ponts et Chaussées, Mémoires et documens relatifs à l'art des constructions et au service de l'ingénieur; lois, ordonnances et autres actes concernant l'administration des Ponts et Chaussées*, 2^{ème} semestre, 1860, pp. 113-128

⁷⁶ Claude Louis Marie Henri Navier, *Résumé des Leçons Donnés à L'École des Ponts et Chaussées sur l'Application de la Mécanique à L'Établissement des Construction et des Machines*, Paris, Firmin Didot, 1826

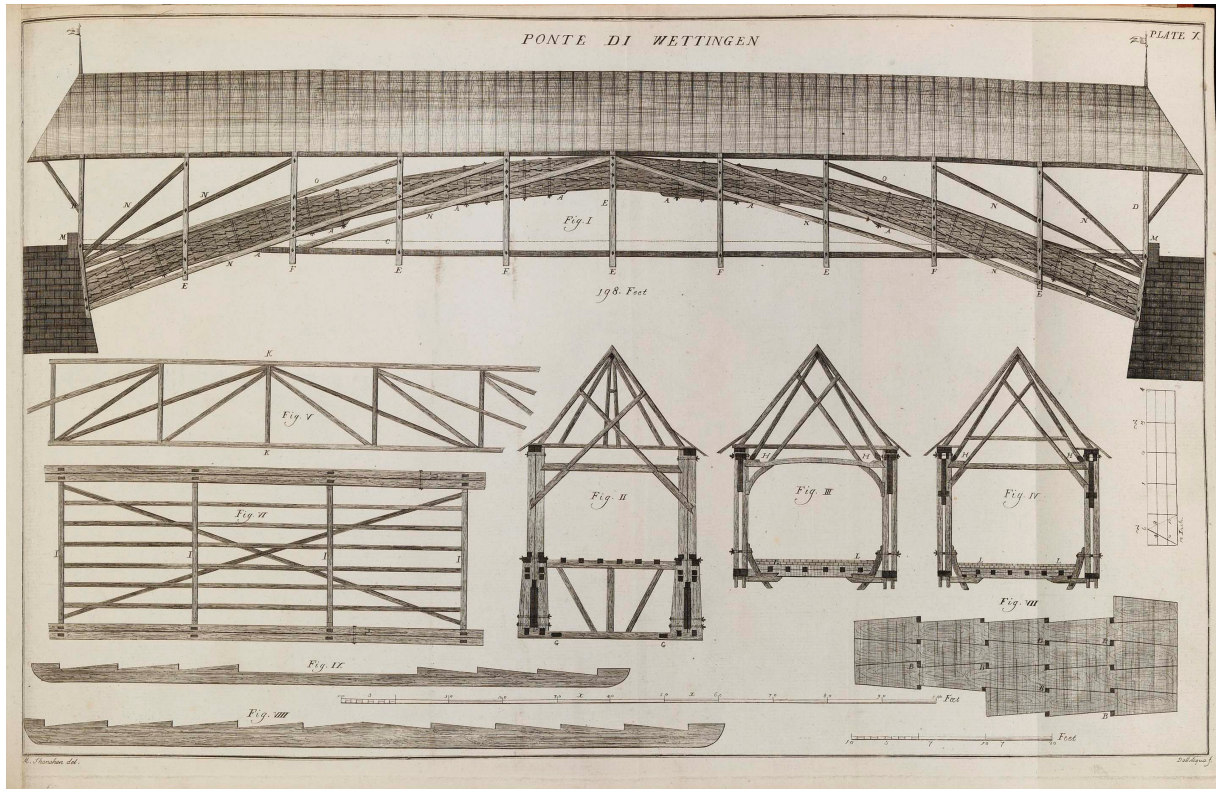


Figura 42. Ponte di Wettingen. Michael Shanahan e Cristoforo Dell'Acqua.

Le note di testo apposte sui disegni del ponte di Wettingen (figure 43 e 44) effettuati da Soane sottolineano che il ponte oscilla molto, pur presentando connessioni ben realizzate e cunei in rovere con sezione di un pollice quadrato⁷⁷.

⁷⁷ "Shakes very much" "Light & Airy" "Lattice Gate at each end, pay toll" "Very well put together & no want of iron & c cover'd with wood shingle on Boards" "Oak wedge 1 inch sq" in MS 79/1/13 verso in John Soane Museum, Londra.

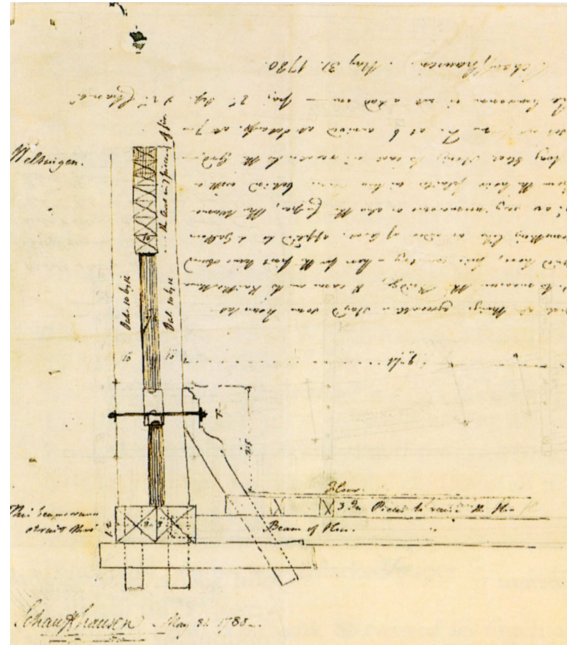


Figura 43. Ponte di Wettingen.

Particolare costruttivo del nodo tra impalcato ed elemento verticale di collegamento con l'arco e la copertura.

Il recto del foglio, indicato in figura 44, riporta il disegno del particolare costruttivo relativo al nodo di collegamento tra l'impalcato e gli elementi verticali di collegamento con l'arco e la struttura di sostegno della copertura.

Nel ponte di Wettingen le lamine che formano l'arco sono collegate con connettori a taglio in ferro, ma sembra che le connessioni delle lamine non siano del tutto efficaci e questo avrebbe dato origine a problemi di stabilità. L'eccentricità tra la linea d'asse dell'arco (che in questo caso è un profilo semicircolare) e la funicolare dei carichi (che ha un andamento parabolico), sommandosi alle imperfezioni di realizzazione, determina l'inflessione dell'arco. Questo ha fatto sì che questa soluzione non venisse impiegata per un lungo arco di tempo, fino a trovare utilizzo da parte di Wiebeking nei primi anni dell'Ottocento⁷⁸. Solo di recente,⁷⁹ incollando le lamine tra loro è stato possibile eliminare del tutto gli scorrimenti relativi nei giunti ed assicurare la rigidità dell'arco.

⁷⁸ Vedi paragrafo 1.7.

⁷⁹ È del 1905 la registrazione in Austria ed in Svizzera del brevetto del legno lamellare incollato effettuata da Otto Hetzer.

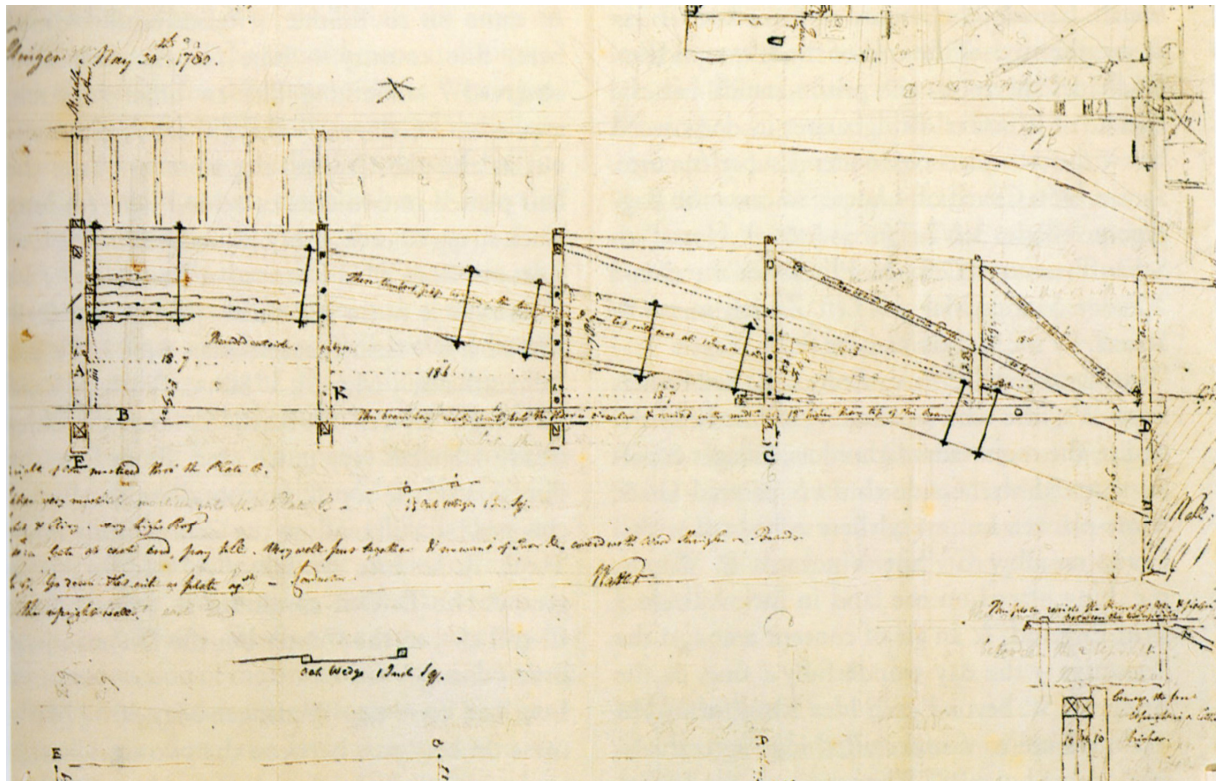


Figura 44. Ponte di Wettingen. Sezione longitudinale di metà campata. [verso].

Il disegno di Soane, rappresentato in figura 44 riporta il rilievo della struttura dell'arco formata da sette strati di lamine curvate, analogamente a quanto indica Krafft⁸⁰ nel disegno di figura 45. Lo scorrimento relativo delle lamine è ridotto grazie all'adozione di profili indentati e di elementi metallici verticali passanti che contrastano le forze orizzontali. La differenza tra il disegno di Krafft e quello di Soane nella rappresentazione dei connettori a taglio all'interno dell'arco non è irrilevante. Il disegno di Soane di figura 44 indica infatti la presenza di elementi metallici perpendicolari alla curvatura dell'arco, mentre il disegno di Krafft di figura 45 indica che si trovano in posizione verticale. La maggior efficacia nell'impedire lo scorrimento si ha nel caso in cui i connettori siano perpendicolari alla curva. Il fatto che l'opera di Krafft sia stata pubblicata nel 1805, dopo la distruzione del ponte nel 1799, attribuirebbe maggior affidabilità al disegno di Soane.

⁸⁰ Jean Charles Krafft, *Plans, coupes et élévations de diverses productions de l'art de la charpente: exécutées tant en France que dans les pays étranger*, Paris, presso l'autore, 1805

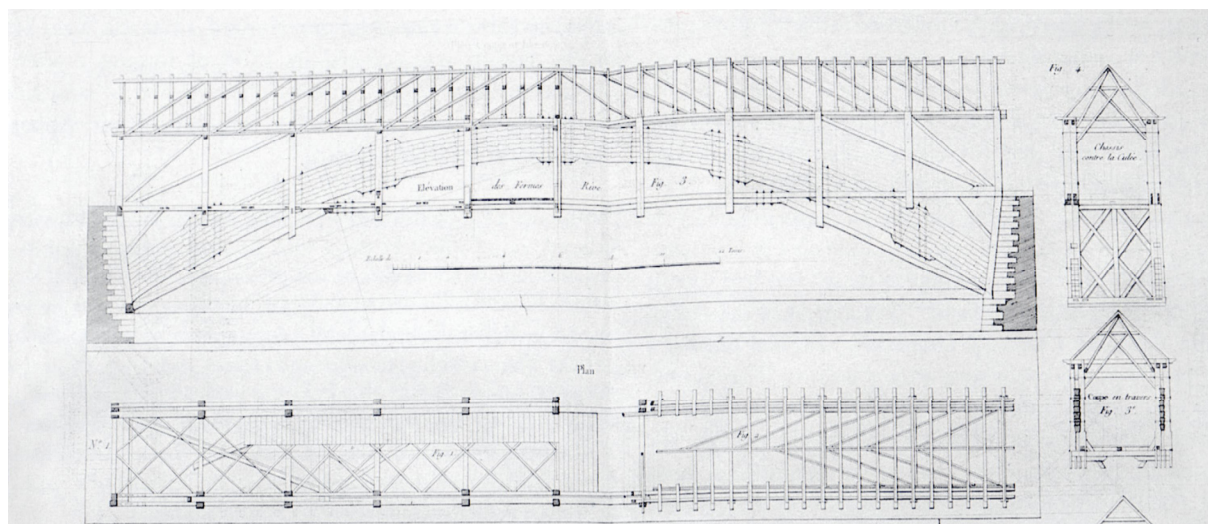


Figura 45. Ponte di Wettingen.

Anche il disegno del ponte di Wettingen, rappresentato in figura 46, fu realizzato da John Soane come indicato in basso a sinistra e venne utilizzato da William Coxe come illustrazione per il testo *Sketches of the Natural, Civic, and Political of Switzerland*, pubblicato a Londra nel 1780. Questo testo appartiene al genere letterario dei resoconti di viaggio, che inizia a diffondersi negli ultimi anni del XVIII secolo. Altri testi simili contengono informazioni di carattere generale o disegni riguardo a questi ponti⁸¹.

La soluzione strutturale adottata per il ponte di Wettingen è quella di impiegare un arco come struttura di supporto primaria. In altri casi, la necessità di coprire una luce non piccola (anche se solitamente inferiore) è stata risolta grazie all'uso di puntoni inclinati di sostegno all'impalcato (*sprengwerk*). Con la soluzione ad arco, la trave di impalcato, di per sé inadeguata a coprire la luce, viene ad avere una serie di supporti intermedi che la appendono all'arco (*hängewerk*) e al tempo stesso la collegano alla copertura. Questi elementi di collegamento presentano un particolare delicato, di non semplice realizzazione, nel giunto di connessione con l'arco (figura 43). Grazie ad essi, risulta abbozzato il disegno di uno schema a trave reticolare che si va a sovrapporre a quello dell'arco. Dal confronto fra le figure 42 e 46, tuttavia, non risulta chiaro se lo schema reticolare sia completo o se alcuni elementi diagonali siano mancanti.

⁸¹ Johann Gerard Reinhard Andreae, *Briefe auf der Schweiz nach Hannover geschrieben im dem Jare 1763*, Zürich und Winterthur, presso John Caspar Füssli, 1776, pp. XI-XXII, Tavola *, pp. 39-41

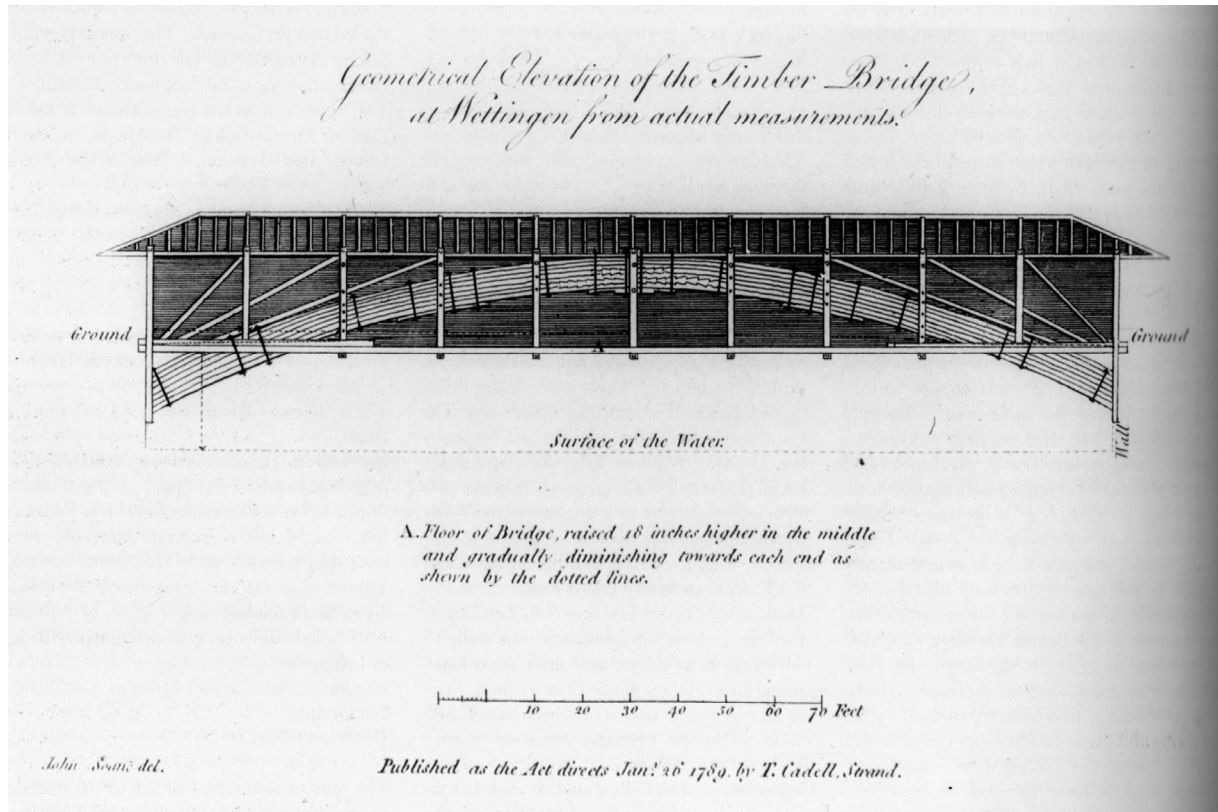


Figura 46. Ponte di Wettingen.

1.7 Karl Friedrich von Wiebeking: “un nuovo modo di costruire i ponti in legno”

Nel 1810 viene pubblicato in francese, a Monaco di Baviera, il *Traité contenant une partie essentielle de la science de construire les ponts, avec une description de la nouvelle méthode économique, de construire des ponts à arches de charpente: inventée par l'auteur et appliquée à douze grands ponts* di Karl Friedrich von Wiebeking (1762-1842), direttore generale del *Bayerischen Strassen und Brückenbaues* e corrispondente dell'*Académie des Sciences* di Parigi. L'opera testimonia il ruolo di riferimento per il progresso scientifico che, all'epoca, era riconosciuto alla Francia in ambito europeo e, al tempo stesso, lo stabilirsi di contatti, su questo tema, fra il mondo germanico e la Francia stessa. Nel trattato di Wiebeking si coglie bene il fermento dell'epoca; è forte la volontà di innovazione, che si esprime non solo attraverso l'idea dell'arco ottenuto incurvando elementi in legno, ma anche attraverso l'attenzione per le nuove tecnologie e la cura per i dettagli strutturali. È in sintonia con i tempi la preoccupazione di fornire procedure scritte ben codificate per il progetto e l'esecuzione, così come l'idea di indagare sperimentalmente modalità e limiti per la curvatura del legno. Le regole di progetto e le proporzioni geometriche da assegnare agli elementi strutturali sono basate sull'esperienza; non c'è traccia di riferimento a procedure di calcolo anche se Wiebeking non specifica

quale sia il ruolo degli ingegneri cui si rivolge per i suoi progetti. In questo aspetto, l'impostazione empirica di Wiebeking riflette ancora la cultura del secolo precedente.

Il testo è strutturato in tre parti: la prima, dedicata alla descrizione di alcuni suoi ponti, termina con una descrizione generale del suo sistema costruttivo basato sull'arco in legno ed un *Exposé* in cui l'autore intende dimostrare il vantaggio dal punto di vista economico dei ponti ad arco "inventati" dall'autore stesso, dell'arte militare e dell'eleganza delle forme. La seconda parte si occupa dell'elasticità del legno e delle sue applicazioni ai ponti ad arco; la terza parte infine riguarda la battitura dei pali per la costruzione di ponti.

Nel seguito, dopo aver illustrato questi tre punti, verranno presentati alcuni dei ponti realizzati da Wiebeking tra il 1805 ed il 1809: il ponte sul Lech presso Augsburg, il ponte di Freysing sull'Isaar, il ponte di Vilshofen.

Al termine della prima parte, all'interno dell'*Exposé*, Wiebeking difende la sua "invenzione" illustrandone i vantaggi e dimostrando come questi ponti non siano affatto dispendiosi. Il primo vantaggio ad essi attribuito consiste nel fatto che, avendo luci considerevoli, ed essendo stato ridotto al minimo il numero di campate, grossi blocchi di ghiaccio o di detriti possano scorrere nell'alveo del fiume senza aumentare eccessivamente il livello delle acque e senza provocare la demolizione delle pile o della campata, e quindi il crollo del ponte⁸².

In secondo luogo la campata più ampia consente maggior facilità di navigazione⁸³; Wiebeking afferma che viene richiesta la massima distanza possibile tra le pile del ponte ed annota che questa distanza è sempre stata determinata in base al progresso delle conoscenze⁸⁴. Se fosse stato applicato il metodo tradizionale bavarese al ponte di Freysing che è lungo 320 piedi, se realizzato con un sistema tradizionale avrebbe avuto sette pali perché, se la distanza tra i pali supera i 40 piedi, si registrano oscillazioni eccessive⁸⁵. Il confronto tra la durata di un ponte con pile intermedie ed un ponte ad arco porta alla conclusione che questi ultimi, malgrado siano più costosi, sono comunque economicamente convenienti in quanto la loro resistenza alla forza di ghiacci o detriti costretti in passaggi stretti è più

⁸² "Les ponts à arches, par leurs grandes ouvertures, préviennent les ravages des inondations, et des bancs de glaçons, ravages causés le plus souvent par les étroites ouvertures des autres ponts de pierre ou de charpente" Karl Friederick von Wiebeking, *Traité contenant une partie essentielle de la science de construire les ponts, avec une description de la nouvelle méthode économique, de construire des ponts à arches de charpente, inventée par l'auteur et appliquée à douze grands ponts, exécutés sous le ministère du comte Montgelas, décrits et représentés dans cet ouvrage: pour servir de complément aux oeuvres de Perronet. Par Charles Frédéric Wiebeking, Avec dix sept grandes planches, faisant suite à celles appartenant à l'architecture hydraulique de l'auteur*, Munich, presso l'autore, 1810, p. 104

⁸³ "Les ponts à arches favorisent la navigation et le flottage" *ibidem*, p. 104

⁸⁴ "Le gouvernements éclairés ont,... qu'ils ont voulu que les piles ou palées des ponts construits... à la plus grande distance possible, distance qui a toujours été proportionnée aux progrès des lumières".

⁸⁵ "Qu'on applique maintenant, si l'on veut, au pont de Freysing les deux raisonnements développés précédemment, admettons qu'un pont de charpente construit suivant l'ancienne méthode pratiquée en Bavière aie sept palées, puisque la rivière Isar a près de cette ville une largeur de trois cent vingt pieds, puisque les pieux des palées, qui doivent être élevés de vingt trois pieds au dessus des basses eaux oscilleroient trop, si la distance d'une palée à l'autre excédoit quarante pieds" *ibidem* p. 104

che doppia, senza considerare il danno in termini economici dei trasporti e dei commerci interrotti a causa del danneggiamento del ponte⁸⁶.

Di seguito Wiebeking confronta i costi al piede di una serie di ponti: 45 fiorini per il ponte di Vilshofen, 43 fiorini per quello di Oettingen, 80 fiorini per quello di Freysing, 70 per quello di Rott, fino ad arrivare a 92 per il ponte di Augsburg, 84 per quello di Bamberg, 120 fiorini infine per il progetto del ponte di Monaco, si tratta di un altro ordine di grandezza rispetto ai ponti in pietra: 5000 fiorini per il ponte di Westminster a Londra, 4600 per quello di Rialto a Venezia, 2000 fiorini per quello di Neuilly. A questo va aggiunto che il costo della manodopera e del materiale per realizzare i ponti in pietra è raddoppiato o triplicato dall'epoca in cui questi ponti sono stati costruiti⁸⁷. Per quello che riguarda la manutenzione dei ponti in legno, Wiebeking indica alcuni accorgimenti che consentono di prolungarne la resistenza evitando la ricostruzione nel giro di pochi anni: le parti esposte all'aria sono state trattate con un doppio strato di catrame; i giunti sono stati trattati con olio caldo, gli elementi di legno che potevano essere danneggiati dall'umidità sono stati rivestiti con scandole di legno⁸⁸. Ripetendo le operazioni su tutte le parti del ponte ogni vent'anni, il ponte viene preservato dall'attacco di tarli e ne viene garantita la durata anche a temperature rigide⁸⁹.

La seconda parte del trattato riguarda alcune considerazioni sulla realizzazione dei ponti; il primo punto tratta dell'elasticità del legno e della sua applicazione ai ponti ad arco. La specie legnosa che Wiebeking indica come preferibile sia per la resistenza a compressione che per la durata è il rovere; ma, prosegue, non è adatto per realizzare gli archi dei ponti, in primo luogo per il costo elevato ed in secondo luogo perché non si riesce a piegare come le conifere⁹⁰. Il legno di rovere è poco elastico, secondo Wiebeking, perché troppo secco; per poterlo curvare è necessario l'utilizzo del fuoco. Il fuoco

⁸⁶ "Pour repousser la spécieuse objection relative aux frais que coutent les nouveaux ponts à arches, je me borne à observer que les ponts ordinaires de pieux ne durent guère au delà de quinze ans. On est donc obligé de les reconstruire au moins deux fois dans l'intervalle d'une génération. En supposant donc qu'un pont à arches coute trois fois plus qu'un pont ordinaire, l'épargne sur les frais de ce dernier n'en sera pas moins qu'apparente, et le calculateur economique, qui ne se borne pas à considérer les besoins momentanés, mais encore les frais progressifs et éventuels sera loin de convenir que cette épargne soit réelle. Et si au culées en maçonnerie, on substitute des culées en bois, le pont à arches ne coutera pas le double des dépenses d'un pont ordinaire" *ibidem* p. 105

⁸⁷ "Mais si l'on veut bien faire attention que, depuis les époques de ces constructions de ponts de pierre, le prix de la main d'oeuvre et celui des matériaux a prodigieusement haussé, on sera forcé de convenir que ces ponts couteroient, de nos jours, le double et le triple de ce qu'ils ont couté jadis." *ibidem*, p. 106

⁸⁸ "celles qui sont ordinairement exposées à l'air ont reçu une double couche de goudron; les joints ont été enduits d'huile bouillante; les bois, qui pouvoient être endommagés par l'humidité, sont couverts d'un toit de planches et par la voie du pont." *Ibidem*, p. 107

⁸⁹ "En renouvelant donc tous les vingt ans l'opération du goudronnage sur toutes les parties du pont, opération qui n'est rien moins que dispendieuse, tous les bois seront préservés de la vermoulure et des autres avaries: que, dans le même intervalle, on renouvelle la voie du pont, rien ne s'oppose à ce que ces modernes constructions ne résistent pendant des siècles à l'inclémence des températures." *Ibidem*, p. 107

⁹⁰ "Le bois de chêne mérite la préférence sur toutes les autres essences de bois, en égard à sa durée et à la résistance qu'il exerce dans une position verticale. Mais on ne peut que rarement en faire usage pour les courbes d'un pont à arches: a) parce' ordinairement le prix en est élevé: b) parcequ'on ne peut le courber au même degré que le bois résineux." *Ibidem*, p. 113

deve essere moderato e posto ad una certa distanza dall'elemento da curvare: il legno in questo modo diventa più flessibile⁹¹. Un eccessivo assorbimento di calore però indurisce il legno.

Wiebeking confronta poi tra loro alcune specie legnose: il larice è da preferire all'abete ed al pino nella costruzione dei ponti ad arco perché è il più resistente, sia se esposto all'aria che all'acqua, ha maggior durata ed è più elastico. Raramente però l'ingegnere può scegliere la specie legnosa; spesso è costretto a servirsi dell'abete ma per la buona riuscita del ponte ad archi è fondamentale la conoscenza dell'elasticità del legno. Wiebeking presenta alcune prove sperimentali realizzate per curvare il legno. Sono proprio queste, secondo Wiebeking, che devono indicare all'ingegnere quale è il grado di curvatura che un elemento di legno può sopportare senza rompersi, non solo per procedere in modo sicuro, ma anche per sapere di quante lamine deve essere composto un arco⁹². È dunque necessario, per Wiebeking, che l'ingegnere sappia quale è il rapporto che deve intercorrere tra la lunghezza della trave e la freccia⁹³. Segue la descrizione di otto prove condotte da Wiebeking stesso su campioni di abete, specie più diffusa in Baviera del larice e del pino. Le prime due prove sono state effettuate il 13 aprile 1808 su due travi di abete lunghe 53 piedi con spessore della sezione trasversale rispettivamente di 10 e di 6 pollici di lato. La prima è stata svolta da quattro operai che agivano su una leva lunga 13 piedi posta di traverso sopra la trave; l'abbassamento finale registrato è stato di 3 piedi, 1 pollice e 9 linee, quando le fibre del legno si sono separate. La seconda prova ha portato un abbassamento totale di 1 piede, 5 pollici e 6 linee. Su questo campione è stata effettuata una prova ulteriore (la terza) a tre giorni di distanza. L'abbassamento registrato per effetto di un carico di 520 libbre è stato di 1 piede e 8 pollici. La quarta prova è stata condotta su un campione formato da tre lamine di abete poste una sull'altra aventi lunghezza di 56 piedi. Giunti ad un carico di 120 libbre l'abbassamento registrato è stato pari a 1 piede, 11 pollici e 6 linee per poi giungere, sempre sotto l'effetto del medesimo carico, a 2 piedi, 4 pollici e 6 linee, quando le fibre hanno iniziato lentamente a separarsi. È l'inizio della fase post elastica che porta, sempre sotto l'azione dello stesso carico ad un abbassamento complessivo di 3 piedi e 10 pollici. In chiusura Wiebeking annota alcune osservazioni sulle prove: a parità di dimensioni, specie e carichi, è più elastico un legno semistagionato di un legno stagionato. Il legno secco non è adatto ad essere curvato.

Le prove svolte portano Wiebeking a ritenere che il legno non squadrato sia più resistente ed elastico di quello squadrato: la trave squadrata di abete di 53 piedi di lunghezza e 6 pollici di spessore si è curvata fino ad $\frac{1}{36}$ della lunghezza, a fronte di una trave analoga non squadrata che ha raggiunto una

⁹¹ "Le feu doit être modéré et placé à quelque distance; le bois acquiert alors beaucoup de flexibilité." Ibidem, p. 114

⁹² "Ce sont elles qui doivent éclairer l'ingénieur sur le degré de courbure qu'un bois peut supporter sans rupture, non seulement pour pouvoir au besoin procéder avec sécurité, mais encore pour fixer la quantité de bois dont chaque cintre devra être composé" ibidem p. 117

⁹³ "Il est donc nécessaire qu'il connoisse la proportion entre la flèche et la longueur de la poutre, pour pouvoir en faire une juste application" ibidem, p. 117

curvatura pari ad $\frac{1}{13}$ della lunghezza. La sovrapposizione di due o tre lamine permette di raggiungere una curvatura più accentuata rispetto ad una trave unica avente le stesse dimensioni. Wiebeking ignora il problema della forza di scorrimento, già noto a Coulomb⁹⁴ che verrà poi formalizzato da Jourawski⁹⁵. Tre lamine di legno semi-stagionato si sono curvate fino ad un nono della loro lunghezza, due lamine hanno raggiunto una curvatura pari ad un ventesimo della lunghezza. La guerra del 1809 ha interrotto la campagna di prove sperimentali di Wiebeking nella quale da ultimo, era stata provata l'elasticità del legno di larice, che può raggiungere una curvatura pari a circa un sesto della lunghezza. In chiusura della sezione sperimentale Wiebeking, suggerisce come valore di riferimento per la curvatura di una trave, quello di un ventiquattresimo della luce⁹⁶.

Il secondo punto della seconda parte del trattato comprende alcune indicazioni per il progetto e la realizzazione di ponti ad arco. Wiebeking afferma che, se la luce del ponte non eccede i 300 piedi, è possibile realizzarlo con un unico arco, compatibilmente con la freccia che una luce consistente comporta⁹⁷. La larghezza del ponte dipende dal traffico previsto: i ponti descritti nella prima parte hanno larghezze comprese tra i 23 e i 48 piedi. Il passo successivo è quello di determinare l'imposta dell'arco, che è strettamente legata alla freccia che si intende attribuire, allo spessore dell'arco in mezzzeria e all'altezza che si vuole assegnare alle rampe⁹⁸. Le indicazioni pratiche suggerite da Wiebeking in merito alla quota di imposta dell'arco sono in funzione del rapporto tra luce e freccia moltiplicato per 10 linee⁹⁹. Wiebeking prosegue notando che un arco troppo ribassato è esteticamente poco gradevole e riporta i rapporti di freccia e luce di una serie di ponti in pietra: il ponte *de la Concorde* (1:9,6 l'arco centrale e 1:11,1 quelli laterali), il ponte *St. Maixence* (1:12), e quelli in legno: ponte di Bamberg (1:12), ponte di Altenmark (1:10,6), ponte di Augsbourg (1:10,72) ed indica in 1:10

⁹⁴ Charles Augustin Coulomb, *Théorie des machines simples en ayant égard au frottement de leurs parties et à la roideur des cordages*, Mémoire de Mathématique et de Physique, présentés à l'Académie Royale des Sciences par divers Savans, et lus dans ses assemblées, 1785, pp. 161-332

⁹⁵ Vedi nota 76

⁹⁶ “mais pour se convaincre de la possibilité de l'execution de ces ponts, il suffisoit de donner aux poutres une flèche qui eût le vingt quatrieme de leur longueur” Karl Friederick von Wiebeking, *Traité contenant une partie essentielle de la science de construire les ponts, avec une description de la nouvelle méthode économique, de construire des ponts à arches de charpente, inventée par l'auteur et appliquée à douze grands ponts, exécutés sous le ministère du comte Montgelas, décrits et représentés dans cet ouvrage: pour servir de complément aux oeuvres de Perronet. Par Charles Frédéric Wiebeking, Avec dix sept grandes planches, faisant suite à celles appartenant à l'architecture hydraulique de l'auteur*, Munich, presso l'autore, 1810, p. 123

⁹⁷ “Si la largeur d'une rivière n'excède pas trois cents pieds, je pense que l'ingénieur trouvera de l'utilité à ne donner qu'une arche au pont qu'il construira; dans les cas, toute fois, que des rives trop basses ne s'y opposeroient pas; parce les grandes ouvertures demandent beaucoup de flèche” *ibidem*, p. 124

⁹⁸ “La fixation de la naissance de l'arche est donc en rapport avec sa flèche, avec l'épaisseur de l'arche à son milieu, et avec la hauteur qu'on veut donner aux rampes.” *Ibidem*, p. 125

⁹⁹ “Je conseillerois donc, b) comme l'expérience m'en a prouvé la justesse, d'admettre, pour le tassement d'une arche, le produit de dix lignes multiplié par le quotient de l'ouverture divisé par la flèche.” *Ibidem*, p. 125

il miglior rapporto tra freccia e luce¹⁰⁰. All'aumentare della luce la freccia, secondo Wiebeking, perde eleganza, così come se si allontana da questo rapporto di 1:10¹⁰¹.

La condizione di strade e rive a basso livello non sempre permette di rispettare queste proporzioni tra freccia e luce. In questi casi si può arrivare fino ad $\frac{1}{24}$ per luci comprese tra 100 e 150 piedi, fino ad

$\frac{1}{20}$ per luci fino a 200 piedi, fino ad $\frac{1}{15}$ per luci di 300 piedi, a $\frac{1}{14}$ per luci di 400 piedi, fino a

$\frac{1}{13}$ per luci fino a 500 piedi ed infine fino a $\frac{1}{12}$ per luci fino a 600 piedi; questi valori sono

espressamente indicati dall'esperienza¹⁰². Wiebeking afferma che sull'esperienza è basato anche il criterio con il quale vengono distanziate le travi¹⁰³. Le dimensioni suggerite per la sezione trasversale delle travi sono di 11 pollici di base per 12 pollici di altezza distanti 14 o 18 piedi al massimo; infatti se le croci di S. Andrea sono troppo distanti ed i controventi perdono stabilità, di conseguenza gli archi possono uscire fuori piano. Per evitare questo fenomeno la distanza massima tra i travetti deve essere compresa tra i 14 e i 18 piedi, 20 al massimo.

Successivamente Wiebeking suggerisce agli ingegneri che vogliono realizzare ponti ad arco in legno alcune indicazioni: non allineare i giunti longitudinali tra gli elementi che formano l'arco per non ridurre eccessivamente la resistenza e la stabilità del ponte, serrare più volte le viti nel corso del primo anno, inserire cunei per mantenere fermo l'arco; questi cunei devono essere realizzati in legno di rovere e devono avere da 12 a 18 pollici di lunghezza ed un'altezza della sezione trasversale compresa tra 5 e 7 pollici. È opportuno che vengano lasciati mezz'ora nell'olio bollente e, prima di essere messi in opera, siano strofinati con il sapone. Le fibre dei cunei devono essere parallele alle fibre dell'elemento in cui verranno inseriti. Prima di terminare la copertura dell'impalcato si stenderà sui travetti uno strato di letame; gli alcali in esso contenuti ne preverranno il decadimento. Si stenderà poi uno strato di argilla spesso 2 pollici per non far passare l'umidità; su questo strato verrà poi ultimata la pavimentazione.

Wiebeking esprime la necessità della realizzazione del modello in scala e ne illustra i vantaggi. Il rapporto suggerito tra modello e caso reale è di 1:36; questo consente all'ingegnere di tracciare un disegno di massima, facilita l'esecuzione ed evita possibili errori; inoltre il modello è di grande utilità per la realizzazione dei giunti, che difficilmente possono essere rappresentati graficamente in modo

¹⁰⁰ "Je pense que la meilleure proportion à établir entre la flèche et la longueur des arcs surbaissées, seroit de 1:10." Ibidem, p. 126

¹⁰¹ "La flèche me paroît perdre toujours de son élégance à mesure qu'elle s'éloigne de cette proportion et que l'ouverture est agrandie." Ibidem, p. 126

¹⁰² "L'expérience, qui m'a indiqué ces proportions, m'a convaincu que de plus grandes ouvertures exigent de plus grandes flèches, comme l'unique moyen de procurer au pont son étayement et sa stabilité nécessaire, et pour prévenir son déversement du plan vertical.", ibidem, p. 127

¹⁰³ "La fixation de la distance entre chaque ferme, ou la fixation de l'espacement des fermes est un objet qui appelle une attention particulière, parceque ces fermes ontribuent essentiellement à la stabilité des ponts à arches. Je crois donc utile de presenter ici des règles appuyées sur l'expérience.", ibidem, p. 127

chiaro. Infine il modello indica con chiarezza all'ingegnere la sequenza delle fasi costruttive e fornirà anche ai carpentieri un'idea precisa del progetto.

L'ultimo paragrafo è dedicato ai processi meccanici impiegati per incurvare le travi¹⁰⁴, uno dei temi più significativi di questa nuova tipologia di ponte¹⁰⁵. Vengono indicate quattro diverse modalità di curvare il legno: attraverso leve e staffe metalliche, attraverso martinetti, attraverso leve e martinetti, attraverso verricelli e leve. Il verricello è legato ad un cavo, agganciato all'estremità libera della trave che deve essere curvata.

Come già ricordato il legno da curvare non deve essere troppo secco; quello già curvato ma non ancora stagionato dovrà essere mantenuto curvo per qualche mese. In un ambiente umido l'operazione di curvatura è più semplice; se si vuole ottenere una curvatura molto accentuata, come per esempio un diciottesimo della lunghezza, occorre impiegare un legno non stagionato e senza difetti.

Vengono di seguito descritti in dettaglio tre ponti realizzati secondo questa nuova "invenzione": il ponte di Augsburg, il ponte di Freysing, il ponte di Vilshofen.

Nel 1794 era stato costruito presso Augsburg, un ponte in legno di undici campate, rappresentato nella parte inferiore della figura 47, ma nel mese di gennaio del 1806 il ponte richiedeva già un intervento di riparazione consistente, il cui costo era stato stimato in 3386 fiorini. Il torrente Lech, sul quale era stato costruito il ponte, era caratterizzato da una velocità di scorrimento delle acque che può raggiungere i 10 piedi al secondo, per cui si rivelò più adatta una soluzione basata sul minor numero possibile di campate. La soluzione proposta da Wiebeking prevedeva la realizzazione di 3 campate di 118 piedi di luce ciascuna ed una larghezza netta dell'impalcato di 26 piedi e 2 pollici, adeguata al traffico locale. Gli archi di ciascuna campata sono formati nella parte centrale da tre lamine in legno di abete poste una sull'altra, alle quali se ne aggiungono altre due nelle parti esterne della campata. Le lamine sono collegate da perni di 1 pollice e mezzo - 2 pollici di diametro. Wiebeking sottopose il suo progetto all'ingegner Pichler ed affidò all'ingegner Gerold il controllo della spedizione dei materiali e la contabilità, il controllo dell'esecuzione e della manodopera sul cantiere, il controllo della fase di smontaggio della centina, della battitura dei pali e della realizzazione delle spalle.

¹⁰⁴ "Procédés mécaniques, fondées sur l'expérience et applicables à l'exécution des ponts à arches." Ibidem, p. 127

¹⁰⁵ "la manoeuvre de courber les poutres est un des plus importants objets de cette nouvelle construction" Ibidem, p. 127

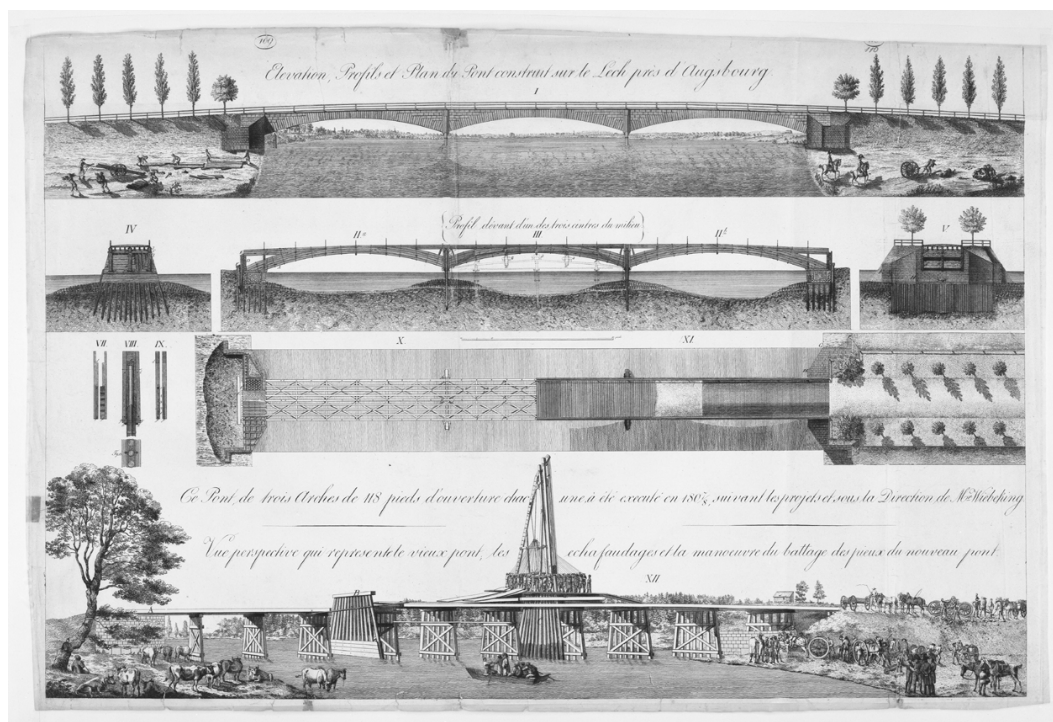


Figura 47. Ponte di Augsburg.

Le spalle si fondano su 124 pali di abete aventi lunghezza compresa tra 18 e 22 piedi. Sulle pile e sulle spalle viene posizionato l'impalcato che è controventato lateralmente. Wiebeking indica poi alcuni suggerimenti per la manutenzione ed il prolungamento della durata del ponte: rivestire di catrame i pali delle pile, le lamine degli archi e le altre parti di legno; proteggere le croci di Sant'Andrea e gli elementi di controvento, favorire lo scolo dell'acqua dall'impalcato disponendo le travi in modo che l'impalcato degradi dal centro all'esterno, trattare il legno in corrispondenza dei giunti con olio bollente. La parte più innovativa ed interessante riguarda la modalità di curvatura delle lamine. Dopo aver inchiodato due lamine alle travi esterne delle pile di sostegno, si fasciano le travi da curvare mediante una staffa metallica. Una volta curvate, le travi sono giuntate mediante indentature. A causa dell'elasticità naturale del legno, la freccia inizialmente compresa tra 15 e 18 pollici, si riduce a 7 – 8 pollici. Le lamine sono state curvate avendole fissate per tre mesi alle centine per mezzo di anelli ed altri dispositivi.

Una volta terminata la posa, si è proceduto al collaudo dell'opera per mezzo di una vettura pesantemente caricata e trainata da diciotto cavalli, sotto il controllo dell'ingegner Pichler. Il ponte ha superato la prova di collaudo senza il minimo danno né la minima oscillazione. Il costo complessivo dell'opera è ammontato a 36.000 fiorini, compresa la realizzazione delle spalle.

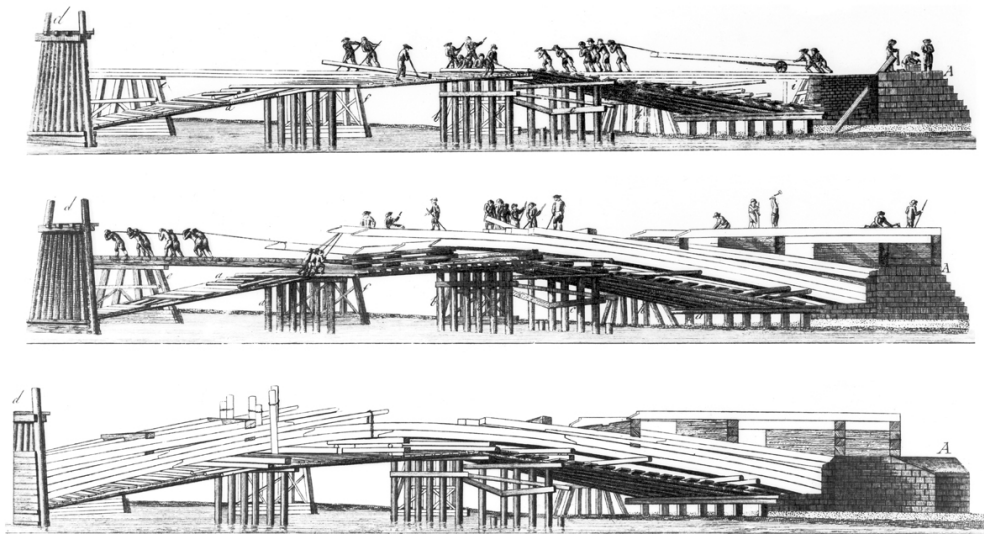


Figura 48. Ponte di Augsburg. Fasi costruttive.

Il vecchio ponte di Freysing era stato costruito su diciotto pile di sette pali ciascuna ed aveva una lunghezza di 688 piedi. Le condizioni in cui si trovava richiedevano un intervento il cui costo ammontava a 1500 fiorini. Fu deciso invece di procedere con il progetto per un nuovo ponte. Alla fine del mese di marzo del 1807 il nuovo progetto prevedeva due campate di 159 piedi ciascuna. Ciascun arco è formato da una serie di tre lamine con una freccia di 12 piedi; la sezione trasversale della lamina inferiore misura 14 pollici e 3 linee per 15 pollici, quella della lamina superiore 14 pollici per 14 pollici e 9 linee, quella intermedia 16 pollici di lato. Sopra le tre lamine in ciascuna campata, ne vengono aggiunte altre tre di 16 pollici di lato incastrate nelle spalle per una lunghezza di 16 piedi e 6 pollici, per evitare l'uscita fuori piano del ponte. Le tre serie di archi sono collegati da sette travi; le travi e gli archi sono collegati con quattordici viti di diametro compreso tra un pollice e mezzo ed un pollice e tre quarti. Le croci di Sant'Andrea che realizzano il controvento trasversale sono collocate al livello delle spalle e della quota inferiore dell'impalcato; la struttura formata dagli archi, dalle travi di collegamento e dai controventi risulta molto stabile anche sotto il peso di carichi gravosi senza che venga registrata la minima variazione fuori piano. Prima di rimuovere la centina sono stati introdotti dei cunei di legno molto stagionato in modo da mantenere l'arco nella sua configurazione.

La descrizione del ponte termina con la spiegazione della modalità utilizzata per la curvatura delle tre lamine inferiori dell'arco, che fa riferimento al disegno riportato in figura 49 e 50. Nonostante l'elevata qualità grafica del disegno e la meticolosità della descrizione, non è tuttavia semplice comprenderne i dettagli. Il testo della spiegazione è riportato qui di seguito. Dopo aver posizionato la trave 14 in chiave, tutti i travetti che assicurano il collegamento trasversale fra le serie di archi paralleli e le tre lamine 5, 6, 7 vengono legati con una fascia di 6 pollici di base e 4 linee di

spessore¹⁰⁶. Viene messa in posizione la chiave *h* e, successivamente, la lamina 21 e le travi *t* e *l0*. Di seguito, vengono rimossi il supporto E ed il travetto II, in quanto non predisposti in conformità con la curva che si vuole ottenere ma semplicemente impiegati come struttura di servizio ed impalcatura.¹⁰⁷ Le travi infatti, per la loro elasticità ed il peso proprio, si inflettono sensibilmente all'estremità quando non sono vincolate; diversamente la curvatura prenderebbe una direzione sbagliata.¹⁰⁸ Agli archi vengono lasciati dai 3 ai 5 piedi di lunghezza in più in modo da poterli tagliare una volta fissati nel punto d'appoggio¹⁰⁹.

Si passa poi al cuneo successivo indicato dalla procedura. Una volta rimosso il travetto indicato con il n. 3, l'arco inferiore si è inflesso per il peso proprio e la sua elasticità e le travi 5 sono state giuntate in un punto non distante dall'estremità attraverso una "graffetta". Si fissa allora alla fine della curva delle tre lamine l'elemento *a* con sezione trasversale di 8 pollici di lato, legato a ciascun arco da un anello spesso un pollice. Lo stesso anello serve a legare l'elemento *i* e l'elemento trasversale *k*. Otto operai hanno premuto sulle estremità degli elementi e sulla trave *a*¹¹⁰. È stata necessaria mezz'ora per curvare gli altri elementi dell'arco¹¹¹. Successivamente, si rafforzano il travetto 4 e la trave 4 e si inserisce nell'arco un cuneo di rovere, in modo che si trovi completamente vincolato. Le travi superiori vengono curvate sopra il travetto 10 e sopra le lamine inferiori. Infine si posano le altre travi e si blocca tutto con il tenone 15.

¹⁰⁶ "ont été enveloppées d'une chaîne tout les mailles avoient six pouces de longueur et quatre lignes d'épaisseur", *ibidem*, p. 48

¹⁰⁷ "parcequ'ils n'étaient pas dressés suivant les points d'après les quels la courbure des cintres avoit été déterminée et parcequ'ils n'étaient destinés qu'à former des couches et des échafaudage de service" *ibidem*, p. 48

¹⁰⁸ "car les poutres, par leur élasticité et leur pesanteur fléchissent si sensiblement à leur extrémité quand on les laisse libres, qu'il est indispensable de les soutenir avant de procéder à la manœuvre de leur courbure; autrement cette courbure prendroit une fausse direction", *ibidem*, p. 49

¹⁰⁹ "On laissa aussi aux courbes de trois à cinq pieds de longueur de plus qu'elles n'en avoient besoin, afin de pouvoir les couper au point fixe qui devoit les faire entrer dans les entailles des colonnes d'appui." *Ibidem*, p. 49

¹¹⁰ "Huit ouvriers, pressant par en bas sur ces deux leviers ainsi que sur la poutre a, devoient aussi faire fléchir les extrémités des courbes." *Ibidem*, p. 49

¹¹¹ "Il n'a fallu qu'une demi heure pour courber les neufs courbes des trois cintres." *Ibidem*, p. 49



Figura 49. Ponte di Freysing.

Il ponte di Vilshofen mostra in modo evidente i vantaggi dei ponti ad arco, non soltanto dal punto di vista economico, ma anche in termini di facilità di navigazione. Il ponte precedente era costato 40.000 fiorini nell'arco di un secolo, mentre la realizzazione del nuovo ponte di Vilshofen non ha richiesto che un quarto di questa somma. Il ponte precedente aveva tre grandi appoggi in pietra e una fondazione a graticcio. Per ridurre le spese è stata preferita la soluzione ad un unico arco, in modo da evitare i supporti intermedi. La luce dell'arco è di 185 piedi e la larghezza è pari a 28 piedi. La struttura del ponte è piuttosto semplice: l'arco è formato da una serie di quattro lamine ed è collegato all'impalcato in corrispondenza delle parti esterne, attraverso una struttura formata da elementi diagonali come visibile dai disegni II, III e IV di figura 50. Le lamine sono realizzate in legno di pino e di abete ed hanno sezioni trasversali con altezze comprese tra 16 e 18 pollici.

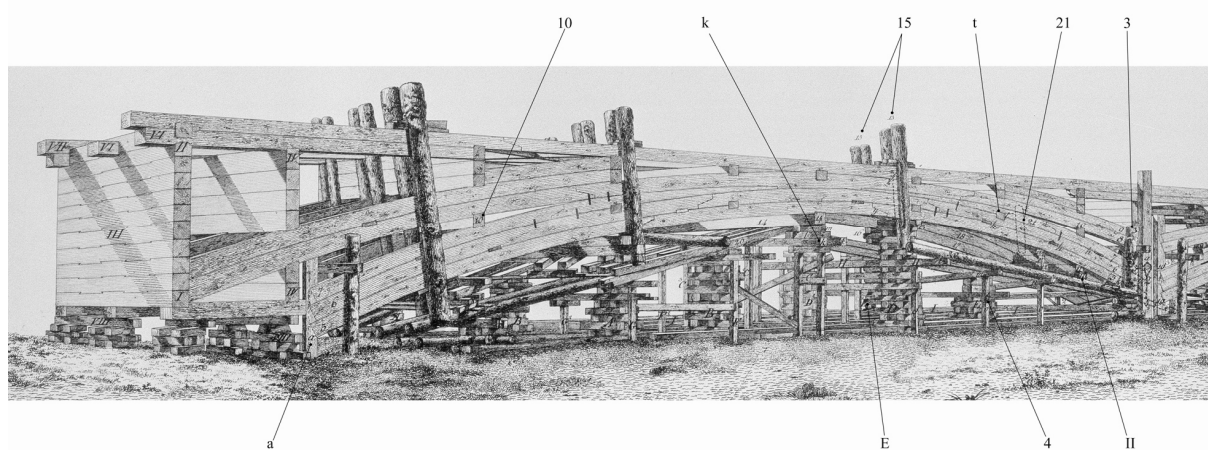


Figura 50. Ponte di Freysing, particolare della realizzazione degli archi.

Per evitare che le curvature degli archi subiscano variazioni sono stati inseriti dei puntoni h, anche in corrispondenza dei giunti di elementi diagonali, vedi disegno III e VIII di figura 51¹¹². La rimozione della centina non ha presentato particolari difficoltà.

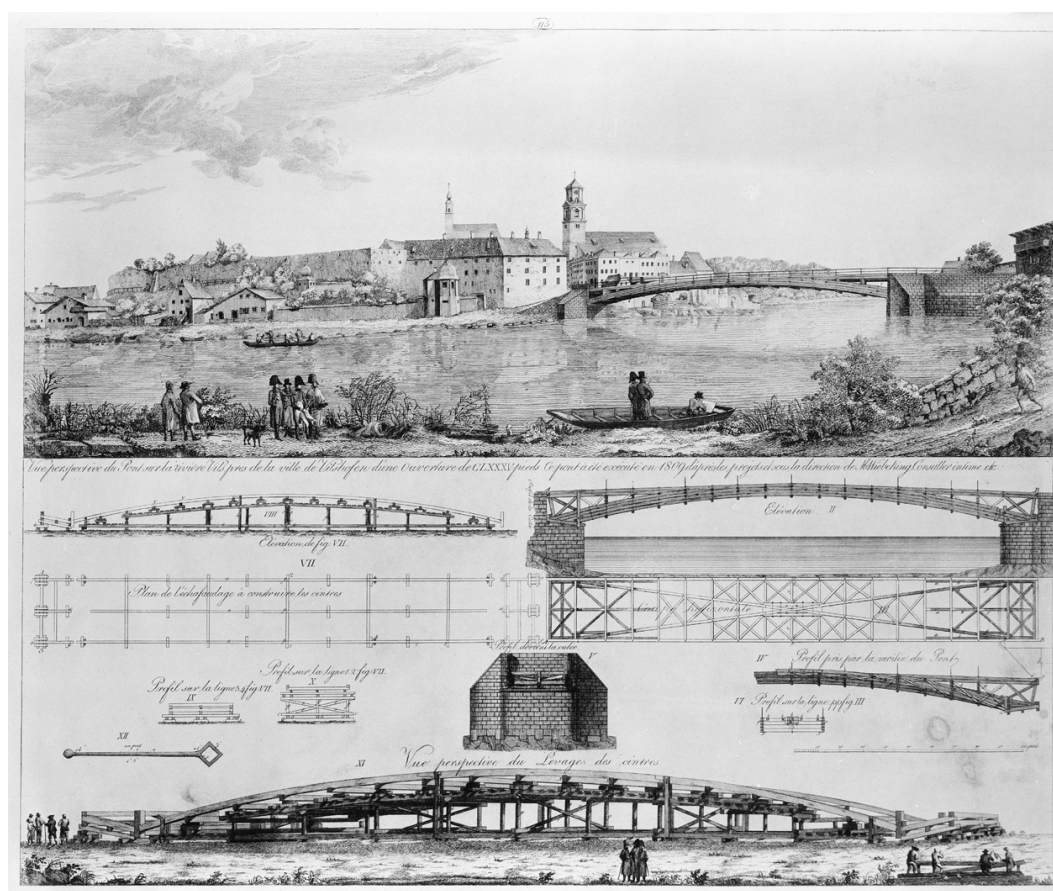


Figura 51. Ponte di Vilshofen.

¹¹² “Pour empêcher les courbes de rebondir, on a appliqué des étreillons. On en avoit de même appliqué là où les cintres diagonaux se joignent.” Ibidem, p. 72

Capitolo 2

Teoria e sperimentazione su elementi in legno nei trattati ottocenteschi francesi di architettura e ingegneria.

Parmi les Arts, qui paraissent
les plus susceptibles d'être
guidé par sciences,
l'Architecture est une de ceux
auxquels on peut appliquer
avec le plus d'avantage
les principes mathématiques
et surtout les règles de la Méchanique.
(Gauthey, 1771)

2.0 Premessa

I primi decenni del XIX secolo sono caratterizzati dalla pubblicazione di numerosi trattati, principalmente francesi, di ingegneria ed architettura. Il contenuto di questi trattati ha il merito di condurre alla formalizzazione della soluzione dei principali problemi della nascente scienza delle costruzioni: in particolare la verifica della resistenza di elementi inflessi o compressi. Si tratta di un percorso non facile, il cui successo è legato al continuo intersecarsi, in coerenza con l'insegnamento galileiano, dell'apparato teorico-matematico e della sperimentazione. Quest'ultima gioca un ruolo determinante, agendo a diversi livelli: non solo a quello della verifica finale di una regola teorica descritta da una espressione matematica, ma anche a quello di semplice orientamento iniziale alla ricerca di una regola, o a quello, più avanzato, di identificazione di valori corretti per i coefficienti che figurano in una formula.

La corretta impostazione della soluzione al problema studiato si fa strada progressivamente, lungo un percorso segnato da felici intuizioni e anche da errori e false idee, ma soprattutto da una vasta attività di ricerca molto ben organizzata e da una grande determinazione a trovare le regole che consentano di basare la progettazione sulla resistenza dei materiali.

A fronte dei numerosi trattati pubblicati su questi temi, il criterio di selezione dei testi adottato in questo studio è stato quello di privilegiare i lavori che, oltre a presentare i risultati di prove sperimentali, hanno tentato di interpretare i dati secondo una legge descrittiva, per ricavarne un criterio di validità generale. L'attenzione si è così fissata sulle opere di Pierre Simon Girard, Jean-Baptiste Rondelet, Jean Henri Hassenfratz, Émiland-Marie Gauthey, Joseph Mathieu Sganzzin, Claude

Louis Navier; precede una premessa sui lavori di Antoine Parent e George Louis Leclerc Comte de Buffon cui questi autori faranno costante riferimento.

In questo studio, emerge con chiarezza il significato del riferimento al legno, le cui caratteristiche rendono possibile l'osservazione del comportamento meccanico in diversi stati di sollecitazione: a trazione, compressione ed a flessione.

2.1 La resistenza del materiale: prime prove sperimentali

Nell'ambito del dibattito in corso nel XVIII secolo sul problema della trave inflessa, Antoine Parent (1666-1716) ricopre una posizione di primo piano per i suoi studi sperimentali e, soprattutto, teorici. A lui spetta il merito di aver trovato per primo la soluzione del problema di Galileo, giungendo alla corretta definizione del modulo di resistenza della sezione.

L'interesse sia per la teoria che per la sperimentazione ne fanno un significativo rappresentante della sua epoca e per questo motivo viene qui presentato un resoconto delle sue attività sperimentali. Si tratta di ricerche condotte su campioni di travi, differenti per condizioni di vincolo, materiale, luce coperta e dimensioni della sezione trasversale. Il lavoro, pubblicato nei *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences* del 1707¹¹³, è piuttosto frammentario e incompleto e si presenta di non facile lettura. Trattandosi di uno dei primi rapporti di attività sperimentali, si riconosce la mancanza di uno stile, a partire da una chiara definizione delle finalità della ricerca.

Emergono tuttavia alcuni aspetti interessanti: da un lato, a Parent risulta chiaro che la sperimentazione svolta a puro fine di ricerca deve poi fornire sia suggerimenti, sia conferme alle indagini teoriche, dall'altro, lo stesso Parent sembra incorrere in un doppio equivoco, facendo discendere da prove a rottura sia la deduzione di una proprietà elastica (il modulo di resistenza), sia le proprietà statiche del problema, più direttamente relazionabili a problemi di equilibrio che di congruenza.

Presenta grande interesse la nota conclusiva, secondo cui le prove svolte confermano l'intuizione teorica della soluzione del problema di Galileo, anche se nel commento delle attività svolte mancano i riferimenti per questa importante conclusione.

Nel seguito vengono riportati in sintesi i risultati di alcune delle sedici prove sperimentali forniti dallo stesso Parent, svolte nel mese di settembre 1707, anno di pubblicazione dei risultati.

La scelta dei campioni sottoposti alle prove è stata effettuata per osservare il contributo dei vincoli, della lunghezza e delle dimensioni della sezione trasversale sulla resistenza a rottura. Le dimensioni delle sezioni trasversali sono comprese tra 3 linee e 2/3 e 1 pollice¹¹⁴; le lunghezze degli elementi

¹¹³ Antoine Parent, *Expérience pour connaître la résistance des bois de chêne et de sapin*, Mémoire de l'Académie Royale des Sciences, Paris, 1707

¹¹⁴ Per la conversione delle unità di misura vedi tabella allegata.

variano tra i 5,5 pollici e i 2 piedi. Le prove documentate in questo paragrafo possono essere suddivise in tre gruppi cui si aggiungono alcuni casi singoli.

Il primo gruppo di prove riguarda tre campioni di rovere tenero ed intende mettere in evidenza il contributo della lunghezza del campione e dei vincoli sulla resistenza. Le sezioni trasversali sono tutte uguali: 5 linee di base e 6 linee di altezza. Il primo campione è incastrato ad un estremo ed ha una lunghezza di 5,5 pollici: il campione porta un carico di 23 libbre¹¹⁵ prima di giungere a rottura, il terzo campione presenta una lunghezza doppia (11 pollici) ed entrambi gli estremi incastrati. Lo scopo di questa prova è di verificare la convinzione che l'esempio con un estremo incastrato avesse metà della resistenza di quello con entrambi gli estremi incastrati. Il carico che questo campione porta prima di giungere a rottura è pari a 51 libbre, circa il 10% in più del doppio della prima prova. Il secondo campione è appoggiato ad entrambi gli estremi; il carico che porta prima di giungere a rottura è di 34,5 libbre.

Il secondo gruppo di prove comprende i campioni quattro e cinque, realizzati con legno di rovere più resistente. Anche in questi casi la lunghezza dei campioni è pari a 5,5 pollici o al doppio (11 pollici) e le condizioni di vincolo sono le stesse del gruppo precedente: un estremo incastrato e due appoggi. La quarta prova viene svolta su un campione di 5,5 pollici di lunghezza con un estremo incastrato, sopporta un carico di 52 libbre prima di giungere a rottura; il campione della prova cinque, di lunghezza doppia e vincolato con due appoggi, porta un carico di 92 libbre. A parità di sezione trasversale i campioni realizzati con legno di rovere resistente sono in grado di portare carichi più che doppi rispetto ai campioni di rovere tenero. Analoghe condizioni di carico e di vincolo e stesse caratteristiche geometriche per le prove sei, sette e otto su campioni di legno di abete hanno determinato valori di carico piuttosto disomogenei: il campione con un estremo incastrato e lungo 5,5 pollici ha portato 37 libbre, il campione sette invece ha raggiunto 68 libbre. Il campione otto infine, di 11 pollici di lunghezza ha resistito ad un carico di 106 libbre.

Dopo le prime otto prove Parent presenta alcune considerazioni suggerite dai valori di resistenza registrati: prendendo in considerazione la forza massima che il campione è in grado di sopportare prima di giungere a rottura, stabilisce che esistono proporzioni ben precise fra i carichi di rottura in funzione delle condizioni di vincolo. In particolare stabilisce il rapporto dei carichi a rottura di due campioni di pari luce rispettivamente appoggiati e incastrati agli estremi sia pari a $2/3$ ¹¹⁶.

¹¹⁵ Per la conversione delle unità di misura vedi tabella allegata.

¹¹⁶ "On peut de ces différentes expériences tirer trois principes d'expériences, sçavoir, que la force d'un solide retenu par un bout & tiré par l'autre perpendiculairement à sa longueur, est à la force d'un pareil solide double en longueur, posé de même sur deux appuis, & tiré par le milieu, environ ou moyennement comme 7 à 12. Et que cette première force est à celle d'un autre solide égal en tout au second, posé & tiré de même, & de même matière, moyennement comme 7 à 18. D'où l'on conclut aussi que les résistances des deux derniers sont entr'elles (tout le reste étant égal) environ comme 12 à 18, ou comme 2 à 3." in Antoine Parent, *Expériences pour connoître la résistance des bois de Chêne et de Sapin*, in *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, Paris, 1707, p. 514

I provini utilizzati nelle prove da nove a dodici hanno caratteristiche geometriche differenti: le lunghezze dei campioni sono rispettivamente di 6,5, 10, 14 e 24 pollici per cui è meno immediato il confronto delle resistenze. Le ultime prove sono condotte su campioni di rovere tenero di 10 pollici di lunghezza ma questi campioni differiscono, seppur non di molto, per le dimensioni della sezione trasversale. I campioni delle prove tredici e quindici hanno stesse caratteristiche geometriche e forniscono valori di resistenza simili tra loro, rispettivamente 25 e 22 libbre.

Il *Mémoire* si conclude con una nota di commento di grande interesse che rimanda ad un precedente *Mémoire* dello stesso Parent del 1704¹¹⁷ e ad uno di Varignon del 1702¹¹⁸: dal confronto dei risultati delle prove sperimentali Parent ritiene di poter dedurre la legge che esprime la resistenza dell'elemento inflesso in funzione del prodotto della base della sezione trasversale per il quadrato dell'altezza¹¹⁹, parametro geometrico della sezione trasversale che prenderà poi la forma del modulo di resistenza, $\frac{b \cdot h^2}{6}$ per sezioni rettangolari.

Ha interesse mettere a confronto l'attività sperimentale di Antoine Parent con quella svolta, circa 40 anni più tardi, dal naturalista Georges-Louis Leclerc Comte de Buffon (1707-1788) (di seguito Buffon). Questi si concentra principalmente sull'osservazione del comportamento del legno a flessione. Nell'*Expérience sur la force du bois, Second Mémoire* presentato all'*Académie Royale des Sciences* nel 1741, Buffon dichiara apertamente che lo scopo del suo lavoro è quello di essere d'aiuto a carpentieri e costruttori nella pratica costruttiva. In lui si riconosce pertanto una finalità della sperimentazione diversa da quella perseguita da Parent, strettamente legata alla ricerca: il suo intento è quello di definire tabelle di portata che forniscano una soluzione diretta al problema della progettazione.

Le sue numerose prove sperimentali riguardano elementi di legno di rovere e di abete rosso caricati in mezzeria. I dati rilevati si riferiscono alle deformazioni misurate in mezzeria per carichi intermedi e per il valore del carico a rottura. Buffon sottolinea che le prove sono state ripetute più volte in modo da ottenere risultati più attendibili, poiché si era riscontrata una variabilità di comportamento piuttosto elevata. Le prove sono state condotte su campioni di dimensioni differenti. I risultati sono stati organizzati in tabelle per facilitarne la consultazione a fini pratici. Un esempio è rappresentato in figura 52, che riporta la prima tabella con dati relativi ad elementi con sezione trasversale di 4 pollici

¹¹⁷ Antoine Parent, *Second Mémoire. Trouver la force avec laquelle il faut pousser un coin, pour separer un corps ou directement, ou sur un point fixe, ou sur deux*, in *Mémoire de l'Académie Royale des Sciences*, 1704, pp. 186-197

¹¹⁸ Pierre Varignon, *De la Résistance des Solides en général pour tout ce qu'on peut faire d'hypotheses touchant la force ou la tenacité des Fibres des Corps à rompre; & en particulier pour le hypotheses de Galilée & de M. Mariotte*, in *Mémoire de l'Académie Royale des Sciences*, 1702, pp. 66-100

¹¹⁹ "En comparant toutes les Expériences faites sur différentes especes de Chêne, & se souvenant que le résistances proportionnelles sont entr'elles comme les produits des quarrés de leurs hauteurs par leur largeurs." in Antoine Parent, *Expériences pour connoître la résistance des bois de Chêne et de Sapin*, in *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, Paris, 1707, p. 516

di lato. Nel testo che precede le tabelle, Buffon annota una considerazione interessante riguardo al rapporto tra resistenza e lunghezza dell'elemento: egli riconosce che la resistenza degli elementi di legno non diminuisce in ragione inversa della lunghezza come proponeva Galileo, per cui ritiene che ci sia motivo di dubitare che questa formula sia corretta¹²⁰.

TABLE DES EXPÉRIENCES
Sur la force du bois.

PREMIÈRE TABLE.

Pour les pièces de Quatre pouces d'équarrissage.

Longueur des PIÈCES.	Poids des PIÈCES.	CHARGES.	TEMPS employé à charger les pièces.		FLÈCHES de la courbure des pièces dans l'instant où elles commencent à rompre.	
			Heures.	Minutes.	Pouces.	Lignes.
7...	60...	5350...	0.	29...	3.	6.
	56...	5275...	0.	22...	4.	6.
8...	68...	4600...	0.	25...	3.	9.
	63...	4500...	0.	13...	4.	8.
9...	77...	4100...	0.	14...	4.	10.
	71...	3950...	0.	12...	5.	6.
10...	84...	3625...	0.	15...	5.	10.
	82...	3600...	0.	15...	6.	6.
12...	100...	3050...	0.	0...	7.	0.
	98...	2925...	0.	0...	7.	0.

Figure 52. G. L. Leclerc Comte de Buffon. Tabella risultati prove sperimentali.

Sulla base di questi risultati Buffon fornisce alcune indicazioni per il dimensionamento di elementi in legno; tali indicazioni tengono conto del fattore di sicurezza calcolato in base all'aspettativa di durata della struttura.

L'autore suggerisce di adottare, come resistenza di progetto per strutture di lunga durata, la metà della resistenza a rottura. Nel caso di strutture temporanee o provvisorie, la resistenza di progetto suggerita arriva fino a 2/3 della resistenza ultima a rottura¹²¹.

¹²⁰ "Cette expérience me laissa dans le doute, parce les charges n'étoient pas fort différentes de ce qu'elles devoient être;...la résistance des pièces de bois ne diminue pas en même raison que leur longueur augmente" Georges-Louis Leclerc, Comte de Buffon, *Expériences sur la force du bois*, in *Mémoires de mathématique et de physique, tirés des registres de l'Académie Royale des Sciences*, 1741, p.302

¹²¹ "Ainsi dans des bâtiments qui doivent durer long-temps, il ne faut donner au bois tout au plus que la moitié de la charge qui peut le faire rompre, et il n'y a que dans des cas pressants et dans des constructions qui ne doivent pas durer, comme lorsqu'il faut faire un Pont pour passer une Armée, ou un Échaffaud pour secourir ou assaillir une Ville, qu'on peut hazarder de donner au bois les deux tiers de sa charge", in Leclerc, G.L. Comte de Buffon, *Expériences sur la force du bois. Mémoires de Mathématique et de Physique, Académie Royale des Sciences*, 1740, p. 465

2.2 L'eredità dello strumento matematico

Il *Traité analytique de la résistance des solides* di Pierre Simon Girard (1765-1835), pubblicato nel 1798, riveste, nell'ambito della trattatistica dell'epoca, un carattere di particolare importanza, in quanto è il primo trattato sulla resistenza dei materiali.

A parte qualche difficoltà di lettura del testo, legata alla terminologia ed alla simbologia impiegate, colpisce il grado di evoluzione della formulazione matematica di alcuni problemi. È il caso dello studio della deformata delle travi per mezzo dell'equazione della linea elastica e della determinazione del carico di punta per aste compresse. Al contrario, l'autore non sa ancora esprimere correttamente le proprietà geometriche delle sezioni e non possiede uno strumento generale di calcolo degli spostamenti. Molto interessante è il rapporto fra teoria e sperimentazione, che è correttamente concepito in relazione a diverse situazioni possibili: sia quella in cui è nota una legge fisica ed il ricorso alla sperimentazione è utile per trovare i valori di parametri che figurano nella formulazione matematica del problema, sia nel caso in cui la legge fisica non è ancora nota e si cerca di comprenderne la forma in base all'osservazione del comportamento sperimentale. Interessante è anche il fatto che l'autore ha chiaro il concetto di "ritorno elastico"; che cioè la prova può essere arrestata ad un livello di carico per cui il campione non subisce danno e che, a carico rimosso, ritorna nelle condizioni iniziali, senza deformazioni permanenti. Infine, l'osservazione sul rapporto tra teoria ed esperienza che, a parere di Girard, si chiariscono a vicenda e si aiutano reciprocamente nella ricerca delle leggi che spiegano i fenomeni fisici è sintomo di una nuova mentalità consolidata¹²².

Prima di esaminare in dettaglio i contenuti del trattato, si anticipa una visione sintetica delle quattro sezioni che lo compongono.

Nella prima sezione Girard tratta della resistenza dei solidi, in particolare ricerca l'espressione generale della *resistenza assoluta* (resistenza a trazione) e della *resistenza relativa* (resistenza a flessione) ed il rapporto che le lega. Girard prende in considerazione e confronta le ipotesi di Galileo, Mariotte e Leibniz sulla base dei risultati sperimentali¹²³. Vengono inoltre riportate alcune osservazioni di Jacques Bernoulli riguardanti lo stato delle fibre al momento della rottura. Segue la ricerca di una regola per trovare la *resistenza relativa* dei solidi prismatici secondo le ipotesi di Galileo e l'applicazione delle ipotesi di Leibnitz e Mariotte a qualche caso particolare. La prima sezione prosegue con una discussione riguardante la resistenza dei solidi quando la forza che causa la rottura del campione agisce agli estremi e con una digressione sulle formule generali della *resistenza assoluta negativa* (resistenza a compressione).

¹²² "Portés par le désir d'être utiles à entreprendre le travail dont nous venons de rendre compte nous nous y sommes livrés avec d'autant plus de zèle que nous sommes convaincus de la nécessité de répandre la lumière des sciences sur la pratique de l'art des constructions pour le porter à ce degré de perfection vers lequel l'industrie humaine doit tendre sans cesse et que nous pouvons espérer d'atteindre." in Pierre Simon Girard, *Traité analytique de la résistance des solides et des solides d'égale résistance*, Paris, Firmin Didot, 1798, p. lv

¹²³ "L'expérience seule peut indiquer les modifications que l'on doit faire à ces formules", ibidem, p. 6

La seconda sezione si occupa dei solidi di *ugual resistenza*; a partire dalla definizione, si passa poi alla equazione generale e alle considerazioni che ne derivano.

La terza sezione riguarda le prove sperimentali (“esperienze”) sulla resistenza e sull’elasticità del legno di rovere e di abete. Viene descritto l’apparato utilizzato per la prova a compressione e viene proposto un calcolo degli sforzi che si verificano sugli elementi sottoposti a prova. Seguono prove condotte per determinare la *resistenza relativa* e l’*elasticità assoluta*; l’ultimo paragrafo è dedicato all’applicazione della teoria a qualche caso sperimentale particolare.

La quarta sezione infine è dedicata alla flessione.

Esaminando ora la prima sezione in dettaglio, nell’ottica di porre l’accento sui suoi aspetti più significativi, viene affrontato il tema della resistenza dei corpi solidi. Girard presenta nei primi capitoli i risultati e le formule proposte da Galileo, Leibnitz e Mariotte, applicando queste formule ad alcuni casi particolari. Vengono studiati il comportamento dei solidi a flessione e a compressione; in seguito viene trattato il comportamento dei solidi soggetti unicamente al solo peso proprio, secondo le ipotesi di Galileo e di Leibnitz. Secondo la terminologia oggi in uso, la discussione verte sui problemi dell’equazione della linea elastica e del carico di punta nelle aste compresse.

L’articolo 73 definisce la *resistenza assoluta negativa*¹²⁴ come resistenza a compressione e in quello successivo specifica ulteriormente¹²⁵ qual è il valore limite da prendere in considerazione; per Girard il valore significativo non è quello a rottura, ma piuttosto quello per cui l’elemento inizia ad inflettersi; perché nell’istante che immediatamente segue alla prima deformazione la resistenza degli elementi diventa *relativa* e può essere calcolata mediante apposite formule. Si tratta dunque di trovare il valore del peso che, agendo parallelamente alle fibre, lo comprime e lo inflette. Musschembroeck (1692-1761) se ne era già occupato¹²⁶ ed Eulero (1707-1783) lo aveva dedotto come corollario dei suoi teoremi sulle curve elastiche¹²⁷. Girard riprende il trattato di Eulero traducendone, nell’articolo 76, *Digression sur les Courbes élastiques. Formule générale de la Résistance absolue négative des Solides*, il corrispondente articolo 5¹²⁸. La trattazione prende in considerazione una lama AB incastrata nell’estremo B; nell’estremità A è incastrato un corpo AC indeformabile, come rappresentato in figura 53, a cui è applicato un carico P ad esso perpendicolare.

¹²⁴ “Nous avons appelé résistance absolue celle d’un corps dont les fibres intégrantes seraient tirées parallèlement à leur longueur par une puissance qui tendrait à les allonger. Nous appellerons résistance absolue négative celle d’un corps dont les fibres seraient soumises parallèlement à leur longueur à l’action d’une force qui tendrait à les comprimer”, *ibidem*, p. 40

¹²⁵ “La limite de la résistance absolue négative des solides n’est pas le poids capable de les briser, mais celui sous lequel ils commencent à fléchir; car à compter de l’instant où la plus petite inflexion a lieu, leur résistance devient relative et peut être calculée au moyen des formules précédentes”, *ibidem*, p. 40

¹²⁶ Pieter van Musschenbroeck, *Physicae experimentales et Geometricae dissertationes*, Lugduni Batavorum, 1729

¹²⁷ Leonhard Euler, *De curvis elasticis in Methodus inveniendi lineas curvas*, Lausanne, 1744

¹²⁸ *Ibidem*, p. 250

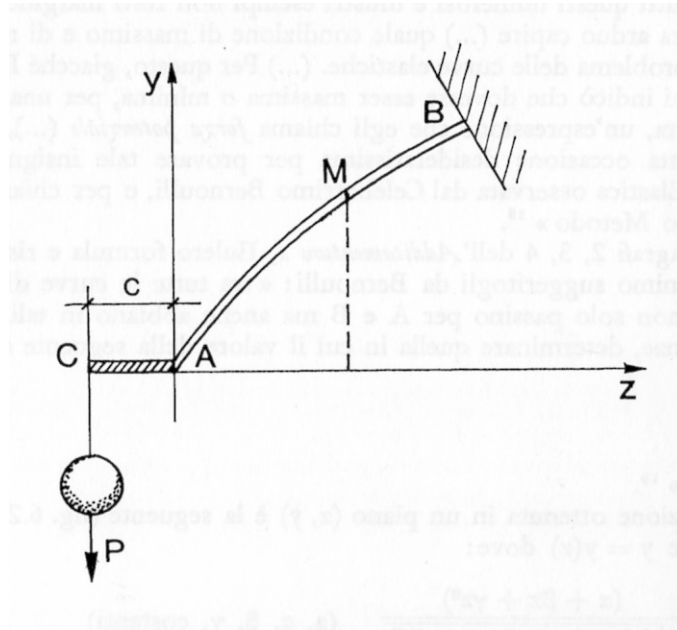


Figura 53: Deformazione di lama elastica incastrata soggetta ad un peso P.

Si assume: $AC = c$, $AP = x$, e $PM = y$; l'effetto flessionale del peso P sarà pari allo "sforzo della sua elasticità" ovvero dipenderà dalle sue caratteristiche:

$$M = P \cdot (c + x) \quad (9)$$

Il *momento di elasticità*, che è maggiore nei punti in cui le fibre sono più tese o più compresse e dove è maggiore la curvatura del solido, è inversamente proporzionale al *raggio giratore* (raggio di curvatura) della curva elastica in quel punto. Indicando con:

$$E \cdot k \cdot k \quad (10)$$

l'elasticità assoluta del solido, e con R il raggio giratore nel punto M, l'energia con la quale il solido AB resisterà all'azione del carico P sarà uguale a:

$$\frac{E \cdot k \cdot k}{R} = - \frac{E \cdot k \cdot k \cdot dx \cdot ddy}{(dx^2 + dy^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (11)$$

Supponendo dx costante. Per l'equilibrio si avrà:

$$P \cdot (c + x) = - \frac{E \cdot k \cdot k \cdot dx \cdot ddy}{(dx^2 + dy^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (12)$$

moltiplicando per dx ed integrando si ottiene:

$$P \cdot \left(\frac{x^2}{2} + cx + f \right) = - \frac{E \cdot k \cdot k \cdot dx \cdot ddy}{\sqrt{(dx^2 + dy^2)}} \quad (13)$$

Da cui deriva:

$$dy = \frac{-P \cdot \left(\frac{x^2}{2} + cx + f \right) \cdot dx}{\sqrt{\left[E^2 \cdot k^4 - P^2 \cdot \left(\frac{x^2}{2} + cx + f \right) \right]^2}} \quad (14)$$

Equazione che permette di tracciare la curva della deformata della lama elastica BA sotto l'effetto del carico P.

Si considera poi una colonna AB posta verticalmente a cui è applicato un carico P nell'estremo B, come illustrato in figura 54. Indicando con $E \cdot k \cdot k$ la sua *elasticità assoluta* ed indicando con $2f$ la sua lunghezza AB, la forza necessaria per determinare la minima inflessione è pari a:

$$\frac{E \cdot k \cdot k \cdot \pi \cdot \pi}{(2f)^2} \quad (15)$$

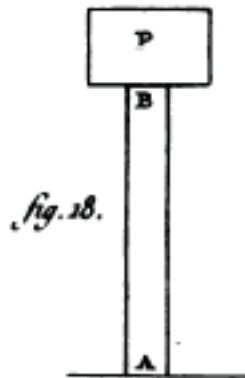


Figura 54: Colonna sottoposta a carico di punta.

La sezione termina con la regola per calcolare la *resistenza negativa* dei solidi (resistenza a compressione); se il solido caricato parallelamente alla direzione delle fibre è un prisma, “il peso che determina la deformazione è direttamente proporzionale al quadrato della base della sezione trasversale, nel piano lungo il quale si manifesta l’inflessione, moltiplicato per l’altezza della sezione ed è inversamente proporzionale al quadrato della sua lunghezza”¹²⁹.

¹²⁹ “Si par exemple le solide chargé parallèlement à sa longueur est prismatique, le poids capable de le faire plier sera directement proportionnel au carré de la dimension de sa base, dans le plan de laquelle l’inflexion se manifeste multipliée par l’autre dimension, et en raison inverse du carré de sa longueur.” in Pierre Simon Girard, *Traité analytique de la résistance des solides et des solides d’égalé résistance*, Paris, Firmin Didot, 1798, p. 54

La sezione successiva si apre con alcune considerazioni sugli effetti generati da una forza di compressione sulle fibre¹³⁰. Applicando una forza di compressione ad un solido, le fibre che lo compongono tenderanno ad espandersi in direzione trasversale e ad aumentare di spessore.

Girard prosegue notando che l'esperienza dimostra che un solido caricato in direzione del suo asse quasi sempre si inflette in entrambi i piani della sezione trasversale, ma osserva che le due curve sono indipendenti e pertanto possono essere analizzate singolarmente¹³¹. Con riferimento al primo disegno di figura 55, indicando con x la distanza AP e con y la distanza PM e ricordando l'espressione dell'elasticità assoluta e del raggio giratore R , indicando con F ed H rispettivamente la componente verticale ed orizzontale del carico P applicato in A , si ottiene che il momento in M generato dalla forza F è pari a:

$$F \cdot y = \frac{E \cdot k \cdot k}{R} = - \frac{E \cdot k \cdot k \cdot dx \cdot ddy}{(dx^2 + dy^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (16)$$

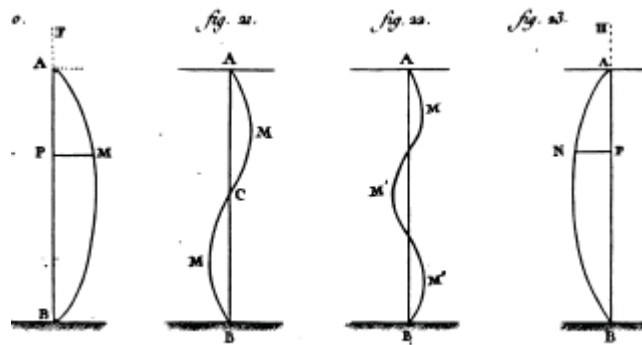


Figura 55: Deformate per aste caricate in direzione longitudinale.

Sostituendo $\frac{dy}{dx} = p$ ed integrando l'equazione, si giunge ad una espressione non più integrabile e

dalla quale non è possibile ricavare i valori finiti delle coordinate x ed y .

La soluzione diviene possibile se si prende in esame il solido al suo primo *grado di inflessione*, potendo quindi confondere il valore dell'arco AM (s) con quello del tratto AP (x). Questo porta ad una semplificazione nella formula (16) che diventa:

¹³⁰ Or, la matière étant impénétrable, ces fibres devenues plus courtes gagneront en épaisseur ce qu'elles perdront en longueur. Elles agiront latéralment les unes sur les autres, et le diamètre du fascieau qu'elles formaient augmentera de plus en plus. Mais cet effet exige que ces fibres n'aient aucune adhérence entr'elles, car si elles étaient retenues les unes aux autres par une force quelconque, elles se courbent nécessairement comme il est aisé de le démontrer.", ibidem, p. 55

¹³¹ "L'expérience prouve encore qu'un solide prismatique ainsi chargé se courbe presque toujours dans les deux plans de son équarrissage, mais comme les courbures dans chacun de ces plans sont indépendentes l'une de l'autre, il nous suffira de considérer chacune d'elles", ibidem, p. 58

$$F \cdot y = -\frac{E \cdot k \cdot k \cdot ddy}{dx^2} \quad (17)$$

Mediante passaggi intermedi, Girard giunge all'espressione che lega il carico F alla lunghezza ed alla elasticità assoluta:

$$F = \frac{m^2 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot k \cdot k}{(2f)^2} \quad (18)$$

avendo introdotto un coefficiente m , numero intero qualunque, per identificare le diverse configurazioni che assume la deformata rappresentate in figura 57. È a Lagrange (1736-1813)¹³² che si deve l'introduzione di questo coefficiente; se $m = 1$, il valore massimo dell'ordinata si trova a metà lunghezza del solido (f); se $m = 2$, l'ordinata massima della deformata si trova ad $1/2 f$ e a $3/2 f$; se m vale 3, il valore massimo della deformata si trova ad $1/3$ di f e così via. Girard passa poi a considerare l'effetto di una forza che agisce secondo l'altra direzione della sezione trasversale causando una seconda deformazione in direzione trasversale. Il procedimento semplificato che segue è quello della proporzione tra questa forza H e la forza precedente F . Dal rapporto tra le due si ricava il valore della deformazione.

Al termine della sezione Girard osserva che con la (18) si può determinare il rapporto tra i carichi e la freccia della deformata ma, poiché non si può ottenere questa riduzione nello stato attuale dell'analisi, si limita ad indicare il carico che, agendo in direzione longitudinale, inizia ad inflettere il solido, dato utile per l'arte del costruire¹³³.

La terza sezione riguarda le prove sperimentali sulla resistenza e sull'elasticità del legno di rovere e di abete. Il primo articolo sottolinea la necessità di far precedere l'applicazione delle formule dimostrate nelle sezioni precedenti da una serie di prove sperimentali volte a determinare il valore del carico che produce la deformazione del solido o la rottura. Le prove sperimentali condotte fino ad allora avevano lo scopo di ricercare solamente il valore del carico a rottura.

Dall'osservazione del comportamento dei solidi durante le prove, Girard nota che rimosso il carico il solido non ritorna sempre nelle condizioni iniziali; per questo è importante distinguere queste diverse condizioni nell'applicazione delle formule.

Nell'articolo 197 Girard richiama la formula che, a suo giudizio, esprime il valore dell'*elasticità assoluta* in funzione del carico applicato e in funzione della freccia massima calcolata in mezzzeria:

¹³² Joseph Louis Lagrange, *Miscellanea Taurinensia*, Accademia delle Scienze di Torino, 1770-1773

¹³³“On déterminerait le rapport de ces charges aux flèches de courbure qu'elles occasionnent par la réduction en termes finis de l'équation de l'élastique; mais comme on ne peut obtenir cette réduction dans l'état actuel de l'analyse, il faut se borner à connaître le poids sous lequel les solides chargés parallèlement à leur longueur commencent à fléchir, ce qui heureusement suffit aux besoins de l'art des constructions” in Pierre Simon Girard, *Traité analitique de la résistance des solides et des solides d'égale résistance*, Paris, Firmin Didot, 1798, p. 64

$$E \cdot k \cdot k = \frac{P \cdot f^3}{3 \cdot b} \quad (19)$$

dove f rappresenta la semi-lunghezza del solido e b la freccia della deformata.

Per Girard non esiste un corpo che sia perfettamente omogeneo in tutte le sue parti ad eccezione forse dei metalli. Per trovare il rapporto tra i diversi valori di resistenza viene suggerito di effettuare una serie di prove sperimentali e di confrontare i risultati tra loro.

Facendo riferimento al *Mémoire* di Eulero contenuto nella *Histoire de l'Académie Royale des Sciences et des Belles-Lettres de Berlin* del 1757¹³⁴ Girard mostra in quanti pochi casi l'equazione della linea elastica è espressa da un'equazione differenziale di primo grado in cui l'elasticità (o rigidità assoluta) è funzione della lunghezza della lama elastica in questione. I calcoli e le espressioni si semplificano notevolmente se anziché considerare una curvatura qualunque, si considera l'istante in cui la lama comincia ad inflettersi. In questo caso la curva della deformata può essere confusa con l'asse delle ascisse e l'espressione del raggio di curvatura diventa molto più semplice. Poiché la determinazione della elasticità assoluta $E \cdot k \cdot k$ è l'oggetto principale di questo lavoro, Girard inizia le prove sperimentali a partire da quelle relative alla *resistenza trasversale* (resistenza a flessione) ma, poiché l'apparato di prova è già disposto per effettuare le prove a compressione, queste saranno le prime ad essere effettuate¹³⁵.

Segue la descrizione dell'apparato di prova utilizzato ed illustrato in figura 56, insieme ad alcuni dettagli relativi alle esperienze condotte su campioni di legno di rovere caricati di punta, di cui sono definiti la larghezza dell'elemento (la dimensione maggiore della sezione trasversale) e lo spessore (dimensione più piccola); infine vengono descritti i contenuti delle tabelle raccolte nella parte finale del testo.

¹³⁴ Leonhard Euler, *Sur la force des colonnes*, presentato all'Accademia delle Scienze di Berlino il 1 settembre 1757, pubblicato nei *Memoires de l'Academie des Sciences de Berlin* n° 13, Berlino, Haude et Spener, 1759, pp. 252-282

¹³⁵ “La détermination de la quantité EKK étant l'objet principal que nous avons en vue, il était naturel de commencer nos expériences par celles sur la résistance transversale, mais ayant trouvé l'appareil que nous allons décrire déjà disposé pour les expériences sur la résistance absolue négative, nous avons entrepris celles-ci les premières. Nous suivrons dans le compte que nous allons rendre des unes et des autres, l'ordre des temps où elles ont été faites.” in Pierre Simon Girard, *Traité analytique de la résistance des solides et des solides d'égale résistance*, Paris, Firmin Didot, 1798, p. 129

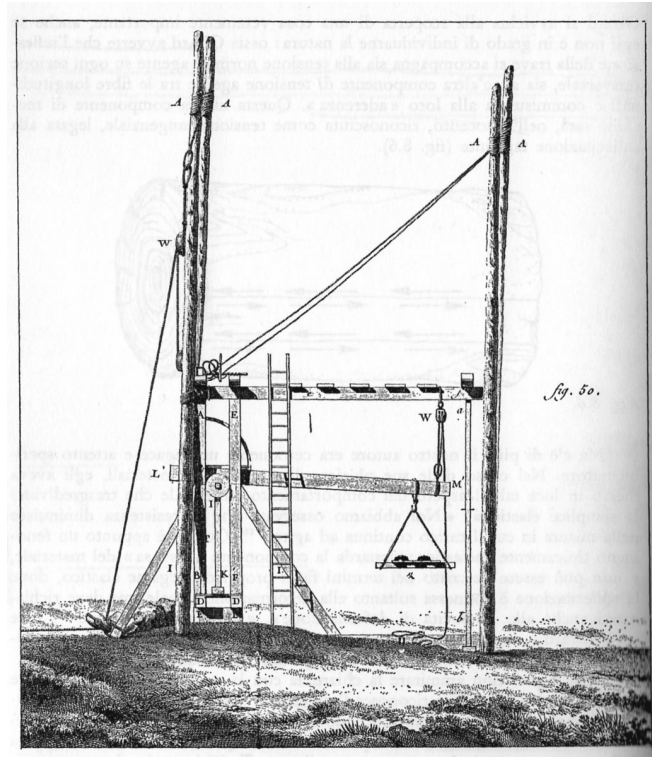


Figura 56. Pierre Simon Girard. Apparato di prova.

In queste tabelle, di cui la prima è riportata in figura 57, la prima colonna indica le dimensioni ed il peso del campione; la seconda e la terza riportano i valori dell'altezza della curvatura nelle direzioni dei due piani della sezione trasversale. Nella quarta e nella quinta colonna sono riportate le frecce relative alle deformate nelle due direzioni, la sesta colonna indica il valore del carico che determina la deformazione. Nelle colonne sette e otto è riportato il carico che ha determinato le frecce delle deformate delle colonne quattro e cinque, calcolato mediante una proporzione rispetto alla freccia prodotta a partire dal carico totale. L'ultima colonna, infine, indica il tempo trascorso dall'inizio della prova al momento dell'osservazione dei dati.

(1)

I. BOIS DE CHÊNE.

TABLE des Expériences faites sur la résistance des Bois chargés de bout.

N ^o des pièces soumises à l'expérience.	INDICATION DES DIMENSIONS et du poids des pièces.	HAUTEUR de la plus grande courbure au moment de l'accomplissement de la pièce		FLÈCHE de la plus grande courbure.		CHARGE		POIDS qui agit sur la pièce pour produire l'effusion		T ₁ 3000 de poids de bois de chêne par mètre cube de bois sec.
		dans le sens de l'épaisseur.		dans le sens de la largeur.		vertical.		dans le sens de l'épaisseur de la largeur.		
		Mètres.	Millim.	Mètres.	Millim.	Mètres.	Millim.	Kilogr.	Kilogr.	
N ^o 1.	Longueur... 0,500	0,020	0,020	0,0000	0,0000	17500,00	17500,00	17500,00	17500,00	8,400
	Largeur... 0,150	0,000	0,000	0,0000	0,0000	17500,00	17500,00	17500,00	17500,00	0,200
	Épaisseur... 0,100	0,000	0,000	0,0000	0,0000	17500,00	17500,00	17500,00	17500,00	0,200
	Poids... 31,200	0,000	0,000	0,0000	0,0000	17500,00	17500,00	17500,00	17500,00	0,200
N ^o 2.	Longueur... 1,500	0,020	0,020	0,0000	0,0000	17500,00	17500,00	17500,00	17500,00	8,400
	Largeur... 0,150	0,000	0,000	0,0000	0,0000	17500,00	17500,00	17500,00	17500,00	0,200
	Épaisseur... 0,100	0,000	0,000	0,0000	0,0000	17500,00	17500,00	17500,00	17500,00	0,200
	Poids... 103,600	0,000	0,000	0,0000	0,0000	17500,00	17500,00	17500,00	17500,00	0,200
N ^o 3.	Longueur... 1,500	0,020	0,020	0,0000	0,0000	17500,00	17500,00	17500,00	17500,00	8,400
	Largeur... 0,150	0,000	0,000	0,0000	0,0000	17500,00	17500,00	17500,00	17500,00	0,200
	Épaisseur... 0,100	0,000	0,000	0,0000	0,0000	17500,00	17500,00	17500,00	17500,00	0,200
	Poids... 103,600	0,000	0,000	0,0000	0,0000	17500,00	17500,00	17500,00	17500,00	0,200
N ^o 4.	Longueur... 1,500	0,020	0,020	0,0000	0,0000	17500,00	17500,00	17500,00	17500,00	8,400
	Largeur... 0,150	0,000	0,000	0,0000	0,0000	17500,00	17500,00	17500,00	17500,00	0,200
	Épaisseur... 0,100	0,000	0,000	0,0000	0,0000	17500,00	17500,00	17500,00	17500,00	0,200
	Poids... 103,600	0,000	0,000	0,0000	0,0000	17500,00	17500,00	17500,00	17500,00	0,200
N ^o 5.	Longueur... 1,500	0,020	0,020	0,0000	0,0000	17500,00	17500,00	17500,00	17500,00	8,400
	Largeur... 0,150	0,000	0,000	0,0000	0,0000	17500,00	17500,00	17500,00	17500,00	0,200
	Épaisseur... 0,100	0,000	0,000	0,0000	0,0000	17500,00	17500,00	17500,00	17500,00	0,200
	Poids... 103,600	0,000	0,000	0,0000	0,0000	17500,00	17500,00	17500,00	17500,00	0,200
N ^o 6.	Longueur... 1,500	0,020	0,020	0,0000	0,0000	17500,00	17500,00	17500,00	17500,00	8,400
	Largeur... 0,150	0,000	0,000	0,0000	0,0000	17500,00	17500,00	17500,00	17500,00	0,200
	Épaisseur... 0,100	0,000	0,000	0,0000	0,0000	17500,00	17500,00	17500,00	17500,00	0,200
	Poids... 103,600	0,000	0,000	0,0000	0,0000	17500,00	17500,00	17500,00	17500,00	0,200

Figura 57. Tabella I contenente i dati sperimentali relativi alle prove su legno di quercia caricato assialmente.

In figura 58 sono riportate le immagini relative alle modalità di deformazione e rottura di campioni delle prove II-IX sottoposti a forze di compressione.

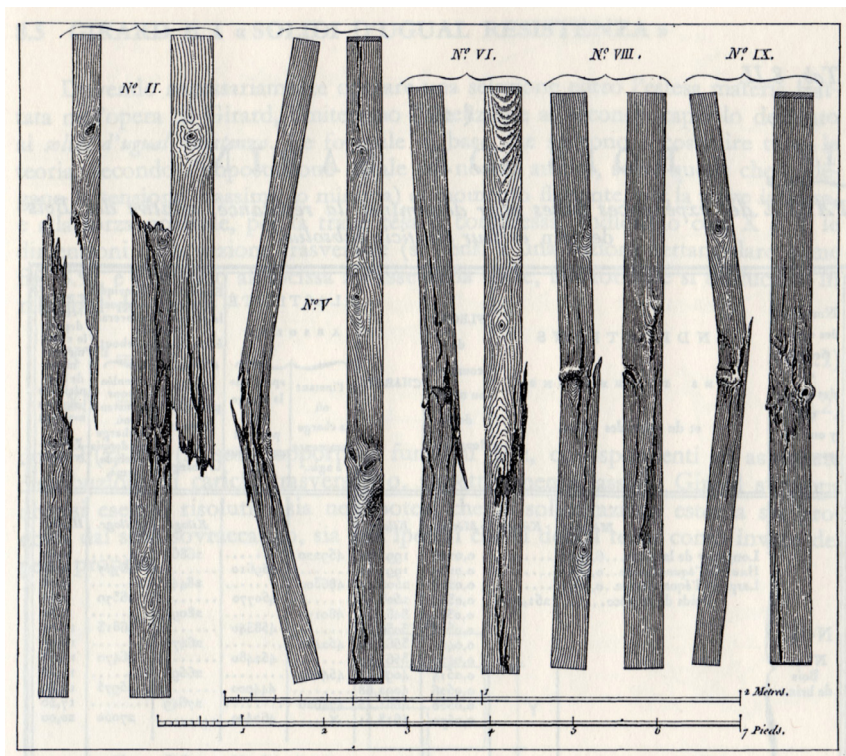


Figura 58: Modalità di deformazione e rottura dei campioni delle prove II-IX.

Un'osservazione sintetica al termine del paragrafo annota gli effetti del carico di compressione; si registra un accorciamento delle fibre e la presenza di fessure in senso longitudinale.

La sezione che segue¹³⁶ contiene alcune osservazioni riguardo alla *resistenza relativa* e all'*elasticità assoluta* riferite a prove sperimentali di cui viene descritto il procedimento. Il campione viene posto sotto l'apparato di prova illustrato in figura 56, viene pesato, e inizia ad essere applicato un carico crescente fino a che si inizia a registrare la deformazione. Poiché i campioni provati non sono perfettamente elastici, è necessario determinare l'*elasticità* o la *rigidezza assoluta* per carichi diversi e i valori corrispondenti della deformata. Il valore medio dell'*elasticità assoluta* (o della rigidezza) fornisce un valore sufficientemente preciso. Nella quarta colonna della tabella II indicata in figura 59 è indicato il valore medio dell'*elasticità assoluta*, calcolata a partire dal primo istante in cui viene applicato il carico.

(5)

II. BOIS DE CHÊNE.

TABLE des expériences faites pour déterminer l'élasticité absolue des bois qui ont été chargés debout, et qui ont supporté les charges rapportées dans la Table précédente.

Nombres des expériences ou des pièces qui y ont été soumises.	INDICATIONS DES DIMENSIONS ou du poids des pièces.		FLECHE de courbure ou celle de la longueur.	ÉLASTICITÉ		Rapport des poids de la pièce comprimée à l'échelle de l'élasticité absolue.		TENDANCE à se rompre ou à se déformer.	
				avant ou la charge commençant à agir.	après que le chargement a cessé.	calculé pour le 1 ^{er} instant de la charge.	calculé pour le moment où la charge a cessé.		
N ^o 1. 2 ^o de la 1 ^{re} Table.	Longueur de la pièce..... 1,20 m. Haut. de l'appareil..... 0,50 m. Long. de l'appareil..... 0,70 m. Poids de la pièce..... 56,245	Mètres Kilogr.	Mètres Kilogr.	188,00	188,00	282,50	282,50	1,548	13,00
				188,00	188,00	300,00	300,00	1,585	13,00
				188,00	188,00	318,00	318,00	1,638	13,00
				188,00	188,00	336,00	336,00	1,691	13,00
				Moyennes.....	188,00	188,00	304,13	304,13	1,641	13,00
N ^o 2. 3 ^o de la 1 ^{re} Table.	Longueur de la pièce..... 1,20 m. Haut. de l'appareil..... 0,50 m. Long. de l'appareil..... 0,70 m. Poids de la pièce..... 56,245	Mètres Kilogr.	Mètres Kilogr.	188,00	188,00	282,50	282,50	1,548	13,00
				188,00	188,00	300,00	300,00	1,585	13,00
				188,00	188,00	318,00	318,00	1,638	13,00
				188,00	188,00	336,00	336,00	1,691	13,00
				Moyennes.....	188,00	188,00	304,13	304,13	1,641	13,00
N ^o 3. 4 ^o de la 1 ^{re} Table.	Longueur de la pièce..... 1,20 m. Haut. de l'appareil..... 0,50 m. Long. de l'appareil..... 0,70 m. Poids de la pièce..... 56,245	Mètres Kilogr.	Mètres Kilogr.	188,00	188,00	282,50	282,50	1,548	13,00
				188,00	188,00	300,00	300,00	1,585	13,00
				188,00	188,00	318,00	318,00	1,638	13,00
				188,00	188,00	336,00	336,00	1,691	13,00
				Moyennes.....	188,00	188,00	304,13	304,13	1,641	13,00
N ^o 4. 5 ^o de la 1 ^{re} Table.	Longueur de la pièce..... 1,20 m. Haut. de l'appareil..... 0,50 m. Long. de l'appareil..... 0,70 m. Poids de la pièce..... 56,245	Mètres Kilogr.	Mètres Kilogr.	188,00	188,00	282,50	282,50	1,548	13,00
				188,00	188,00	300,00	300,00	1,585	13,00
				188,00	188,00	318,00	318,00	1,638	13,00
				188,00	188,00	336,00	336,00	1,691	13,00
				Moyennes.....	188,00	188,00	304,13	304,13	1,641	13,00
N ^o 5. 6 ^o de la 1 ^{re} Table.	Longueur de la pièce..... 1,20 m. Haut. de l'appareil..... 0,50 m. Long. de l'appareil..... 0,70 m. Poids de la pièce..... 56,245	Mètres Kilogr.	Mètres Kilogr.	188,00	188,00	282,50	282,50	1,548	13,00
				188,00	188,00	300,00	300,00	1,585	13,00
				188,00	188,00	318,00	318,00	1,638	13,00
				188,00	188,00	336,00	336,00	1,691	13,00
				Moyennes.....	188,00	188,00	304,13	304,13	1,641	13,00

Figura 59: Tabella II contenente i dati sperimentali relativi alle prove su legno di rovere caricato assialmente.

L'azione prolungata del carico aumenta progressivamente la freccia della deformata. I campioni relativi alle prove riportate nella tabella II non sono stati portati a rottura; l'interesse era rivolto ad osservare se una volta rimosso il carico, il campione fosse tornato nelle condizioni iniziali: il fenomeno osservato è stato quello di un ritorno pressoché totale alle condizioni di partenza.

Girard evidenzia la difficoltà di misurare con precisione spostamenti molto piccoli utilizzando strumenti adatti all'apparato di prova. Questa potrebbe essere la causa della variabilità registrata tra i

¹³⁶ “Détail des Expériences faites pour déterminer la résistance relative et l'élasticité absolue”, ibidem, p. 158

valori dell'*elasticità assoluta*. Le prove IV e V della seconda tabella sono state condotte sul medesimo campione: nella prima il valore dell'*elasticità assoluta* diminuiva sempre più, nell'altra aumentava progressivamente. Girard attribuisce la causa di questo fenomeno al cambiamento delle condizioni atmosferiche¹³⁷. Il confronto tra le prove IX e X dimostra che l'*elasticità assoluta* è in qualche modo proporzionale all'altezza della sezione trasversale, a parità di base della stessa e della lunghezza dell'elemento¹³⁸. Le prove XIII, XIV e XV conducono Girard ad affermare che l'*elasticità assoluta* è "una certa funzione" della lunghezza del campione¹³⁹. Le prove XVI e XVII infine consentono a Girard di esprimere alcune considerazioni sugli effetti della durata del carico sulla freccia della deformata: per effetto dell'azione prolungata del carico il valore della freccia aumenta, l'*elasticità* si riduce sempre di più e quindi se ne deduce che il materiale non è perfettamente elastico¹⁴⁰.

I risultati delle prove del terzo gruppo (comprese tra la 17 e la 24), sono raccolti nella tabella III e mettono in evidenza l'effetto della presenza di nodi sull'*elasticità*¹⁴¹.

Nella tabella V sono raccolti i dati relativi alle prove effettuate per verificare che l'espressione dell'*elasticità assoluta*, funzione del prodotto della base per il quadrato dell'altezza della sezione trasversale trovi corrispondenza nell'esperienza¹⁴².

Nella tabella VI, rappresentata in figura 59, sono raccolti i dati relativi alle prove sperimentali volte a determinare il valore del coefficiente m che lega la lunghezza dell'elemento all'*elasticità assoluta* secondo la:

$$\frac{f}{f'} = m \cdot \frac{E \cdot k \cdot k}{E' \cdot k' \cdot k'} \quad (20)$$

dove:

f rappresenta la distanza tra gli appoggi del primo campione

f' la distanza tra gli appoggi del secondo campione;

¹³⁷ "Quoiqu'il soit difficile de les assigner toutes avec précision, nous pensons que l'état de l'atmosphère lors des observations est une des principales. On sait en effet que l'humidité et la sécheresse, le chaud et le froid influent sur la flexibilité des fibres végétales don't les cordes ordinaires sont composées...il faudrait donc pour mettre une exactitude rigoureuse dans les expériences du genre de celles-ci tenir compte de l'état hygrométrique de l'atmosphère et de sa température à chaque instant de leur durée, ce qui paraît physiquement impraticable", *ibidem*, p. 162

¹³⁸ "les élasticités absolues sont à peu-près proportionnelles aux hauteurs de l'équarrissage dans le pièces de même longueur et de même base", *ibidem*, p. 163

¹³⁹ "Elles confirment d'ailleurs ceque nous avons déjà dit, que l'élasticité est une certaine fonction de la longueur des solides", *ibidem*, p. 164

¹⁴⁰ "La flèche de courbure augmentant par la continuité de son action, la quantité Ekk devient moindre; d'où l'on conclut l'imperfection de l'élasticité dans les corps", *ibidem*, p. 164

¹⁴¹ "Mais comme le parallélisme de ces fibres est presque toujours altéré par les nœuds don't ces pieces sont traversées, l'élasticité doit nécessairement devenir *irrégulier*, et son irrégularité dépend tout-à-la-fois de la grosseur et de la direction des nœuds qui la produisent, et de leur position par rapport aux points d'appui.", *ibidem*, p. 167

¹⁴² "La théorie indique que l'élasticité absolue tant qu'elle produit la résistance à l'inflexion est proportionnelle au produit des largeurs des bases de fracture rectangulaires par le carré de leurs hauteurs. Nous avons recherché d'abord si l'expérience s'accordait en cela avec le raisonnement, et la cinquième table présente le résultat des calculs qui ont été faits pour nous en assurer.", *ibidem*, p. 170

$E \cdot k \cdot k$ e $E' \cdot k' \cdot k'$ rappresentano rispettivamente le *elasticità assolute* del primo e del secondo campione.

Poiché Girard riconosce che anche a parità di lunghezza di campioni ($f = f'$) altri fattori influenzano il valore dell'*elasticità assoluta*, inserisce un secondo coefficiente C tale per cui la (20) diventa:

$$C + \frac{f}{f'} = m \cdot \frac{E \cdot k \cdot k}{E' \cdot k' \cdot k'} \quad (21)$$

ponendo $C = m - 1$ si ottiene:

$$\frac{f}{f'} - 1 = m \cdot \left(\frac{E \cdot k \cdot k}{E' \cdot k' \cdot k'} - 1 \right) \quad (22)$$

La considerazione che le condizioni atmosferiche influenzino l'*elasticità assoluta*, come dimostrato dalle prove sperimentali del secondo gruppo, suggerisce a Girard esprimere la variazione dovuta ad altri fattori attraverso un altro coefficiente; indicando con v la somma degli effetti dovuti alle variazioni atmosferiche sulla coesione longitudinale tra le fibre, il rapporto $\frac{E \cdot k \cdot k}{E' \cdot k' \cdot k'}$ sarà espresso in

funzione di $m + v$ per cui la (22) diventa:

$$\frac{f}{f'} - 1 = (m + v) \cdot \left(\frac{E \cdot k \cdot k}{E' \cdot k' \cdot k'} - 1 \right) \quad (23)$$

Il valore del coefficiente m può essere determinato attraverso prove sperimentali, mentre al coefficiente v potrà essere assegnato un valore in seguito ad una serie di osservazioni.

Per la determinazione dei valori di questi coefficienti vengono utilizzati i risultati delle prove su campioni in legno di rovere riportati nella tabella VI; la quarta colonna riporta i valori dell'*elasticità assoluta* ricavata dalle osservazioni sperimentali, la quinta e la sesta colonna indicano il rapporto tra le lunghezze dei campioni e le *elasticità assolute*, la settima riporta il valore di $(m + v)$, nella ottava è riportato il valore di m e nella nona quello di v .

Per una determinazione più precisa possibile di $(m + v)$, sulla base dei dati raccolti viene calcolato un valore medio e riportato nella pagina finale della tabella VI indicata in figura 61.

Le stesse prove condotte su legno di abete, i cui valori sono riportati in tabella VII, mostrano che il valore del coefficiente $(m + v)$ è pari a 1; da questo si deduce una maggior regolarità nell'andamento delle fibre di questa specie legnosa.

L'ottava e la nona tabella contengono i dati relativi alle prove condotte su legno di rovere e di abete per determinare il valore dell'*elasticità assoluta*.

Concludono il lavoro alcune osservazioni e il tentativo di applicare le formule precedentemente enunciate per il dimensionamento. Girard mette a sistema la prima espressione trovata riguardo all'elasticità (19):

$$E \cdot k \cdot k = \frac{P \cdot f^3}{3 \cdot b}$$

con quella in cui sono stati determinati per via sperimentale i coefficienti ($m+v$) da cui ottiene:

$$\frac{P \cdot f^3}{3 \cdot b} = \frac{(11784451) \cdot (f + 0,3) \cdot a \cdot h \cdot h}{1,3} \quad (24)$$

Nel caso in cui il solido a cui si applica la formula sia un prisma a base rettangolare, noto il carico P , la freccia f , la base a e la lunghezza b è possibile ricavare il valore di h , altezza della sezione trasversale. Girard applica la formula anche nel caso in cui il solido anziché appoggiato agli estremi abbia un estremo incastrato e l'altro libero. In questo caso, dice Girard, la resistenza a flessione raddoppia e la (23) diventa:

$$\frac{P \cdot f^3}{6 \cdot b} = \frac{(11784451) \cdot (f + 0,3) \cdot a \cdot h \cdot h}{1,3} \quad (25)$$

La quarta sezione infine termina con un'osservazione interessante riguardo al rapporto tra esperienza e teoria: queste, per Girard, si chiariscono a vicenda e si aiutano nella ricerca delle leggi che spiegano i fenomeni¹⁴³.

2.3 La verifica della teoria nell'esperienza

La prima parte del *Traité de l'art de bâtir* di Jean Baptiste Rondelet (1743-1829), pubblicato nel 1802, (Tomo I, Libro I, sezione I, capitolo V) presenta particolare interesse ai fini di questo lavoro, in quanto si occupa specificamente del legno. La ricerca di Rondelet costituisce un passo intermedio nel travagliato percorso verso la formalizzazione della scienza del costruire, è infatti caratterizzato da buone intuizioni, che però non si traducono in regole risolutive. L'idea che l'esperienza sia necessaria per determinare la legge di comportamento meccanico è fondamentale nel lavoro di Rondelet, ma risulta poco efficace se l'interpretazione del dato sperimentale non è supportata da appropriati

¹⁴³ "L'expérience et la théorie s'éclaircissent mutuellement et se prêtent des secours réciproques dans la recherche des lois de certains phénomènes. Cependant on ne peut se dissimuler l'extrême difficulté d'assigner ces lois avec assez de précision pour satisfaire généralement à tous les cas. Lorsqu'il s'agit d'appliquer le calcul à la physique, et surtout à des questions qui tiennent d'aussi près à l'organisation intime des corps, il faut se contenter d'approcher de la vérité sans espérer d'y atteindre; mais comme chaque observation faite avec soin est un pas de plus vers elle, on ne doit laisser échapper aucune occasion d'observer. Ainsi, quoique les expériences don't nous avons rendu compte aient été suivies pendant plusieurs années avec autant d'exactitude qu'elles nous ont paru l'exiger, nous pensons qu'il sera toujours avantageux de les répéter ou d'en entreprendre de nouvelles; travail que nous croyons réservé sur-tout aux ingénieurs instruits et zélés pour les progrès de leur art.", ibidem, p. 220

strumenti matematici. Alcune intuizioni presenti nei suoi scritti sono particolarmente apprezzabili e conducono la riflessione nella giusta direzione: la coscienza di un diverso comportamento del materiale a trazione, compressione (con una chiara intuizione dell'instabilità) e a flessione; il concetto di stato limite di resistenza del materiale e di coefficiente di sicurezza; la necessità di fornire regole su cui basare la progettazione; l'idea di modulo resistente di una sezione inflessa, come parametro interpretativo fondamentale del problema.

Venendo, più specificamente, all'esame dei suoi scritti, il primo articolo del trattato "Istruzione sulla formazione e natura dei legni" riporta le indicazioni di Vitruvio contenute nel Capo IX del II Libro a proposito del periodo più adatto per il taglio degli alberi e le operazioni successive per ottenere la massima resistenza per una determinata specie, per poi analizzare le caratteristiche di ciascuna specie legnosa.

La seconda sezione del capitolo III affronta il tema della qualità, della *forza* e delle proprietà dei legnami da costruzione. Segue un confronto tra le caratteristiche della pietra e quelle del legno¹⁴⁴: Rondelet fa riferimento ad alcune prove sperimentali condotte da Buffon sul legno, per determinarne le caratteristiche di resistenza, distinguendo tra *forza assoluta* e *forza relativa*. *Forza assoluta* è "lo sforzo necessario per rompere un pezzo di legno tirandolo per le estremità secondo la lunghezza delle sue fibre"¹⁴⁵, mentre la *forza relativa* "dipende dalla sua posizione: così un pezzo di legno posto orizzontalmente sopra due appoggi situati alle estremità, si rompe più facilmente e sotto uno sforzo minore che se fosse inclinato od a piombo"¹⁴⁶. Rondelet osserva che la forza necessaria per rompere un elemento di legno diminuisce all'aumentare della lunghezza dell'elemento ma, annota, a parità di dimensioni della sezione trasversale, la forza non è inversamente proporzionale alla lunghezza dell'elemento¹⁴⁷. A sostegno di questa affermazione, nel paragrafo *Legno tirato per le estremità*, Rondelet fa riferimento alla prova di resistenza condotta su due elementi con sezione trasversale quadrata di 6 pollici di lato e lunghezze rispettivamente di 8 e 16 pollici. Il risultato della prova dimostra che l'elemento di 8 pollici di lunghezza "porta alquanto più del doppio"¹⁴⁸ di quello lungo 16

¹⁴⁴ "La pietra ha sul legno, è vero, il vantaggio della maggiore durezza, di poter resistere più tempo alle intemperie dell'aria, di non essere soggetta a corrodarsi, a cangiar di forma e di volume, e di procurare agli edifici che ne sono costruiti, una solidità ed una stabilità maggiori di quelle che risultano dall'impiego del legno. Le proprietà del legno sono quelle di essere meno fragile della pietra, più facile a lavorarsi e ad essere trasportato. Il legno essendo formato di fibre longitudinali, tenacissime e fortemente unite fra loro, può servire del pari a tirare ed a portare. Esso può essere impiegato in piedi, per traverso ed inclinato. Le pietre all'incontro essendo composte di parti granose riunite in tutti i sensi, non possono resistere con solidità che allo sforzo della pressione, essendo poste l'una sopra l'altra." in Jean Baptiste Rondelet, *Traité de l'Art de Bâtir*, T I, L. I, sez. II, c. III, Mantova, Fratelli Negretti, 1834 pp. 254-255

¹⁴⁵ Ibidem p. 257

¹⁴⁶ Ibidem. p. 257

¹⁴⁷ "Si trova che lo sforzo necessario a romperlo è tanto meno grande quanto i pezzi sono più lunghi, e che questo sforzo non decresce esattamente in ragione inversa della loro lunghezza quando le grossezze sono eguali", ibidem. p. 257

¹⁴⁸ ibidem. p. 257

pollici. Seguono i resoconti di sette prove sperimentali condotte su campioni con diverse sezioni trasversali, sottoposti a forze di trazione. La conclusione cui giunge Rondelet non è formulata con precisione, ma gli lascia la convinzione che sia chiara la relazione che lega il rapporto tra la resistenza, la forza applicata e l'area della sezione trasversale sulla base dei dati sperimentali, e ne ricava il valore medio della resistenza a rottura per il legno di rovere.

Il paragrafo successivo, *Della forza dei legni in piedi*, prende in esame il comportamento del legno sottoposto a compressione. Se il legno fosse “inflexibile”¹⁴⁹, dice Rondelet, sarebbe in grado di sopportare un peso indipendentemente dalla sua altezza, ma è consapevole che nell'esperienza questo non si verifica. L'intuizione che la resistenza dipenda “in qualche modo” dalla lunghezza dell'elemento in relazione all'altezza della sezione trasversale, una sorta di snellezza, lo porta ad effettuare una serie di prove sperimentali per avere gli elementi necessari per ricavare una legge di comportamento. L'esperienza è per Rondelet la base per determinare la legge di comportamento meccanico. Vengono effettuate numerose serie di prove per osservare la variazione della resistenza al variare della lunghezza dell'elemento in funzione dell'altezza della sezione trasversale. Nella prima serie la lunghezza è uguale all'altezza della sezione trasversale, per poi aumentare fino ad essere dodici, ventiquattro, trentasei, quarantotto, sessanta e settantadue volte maggiore. Rondelet annota nella tabella rappresentata in figura 62 il carico massimo che ciascuna serie di elementi riesce a sostenere e lo indica in forma di frazione rispetto alla prima, pari a 44 libbre per linea superficiale¹⁵⁰. Sulla base di questi dati Rondelet vorrebbe ricavare una legge di validità generale, ma non è in grado di determinare¹⁵¹ “la proporzione” in base alla quale questa forza diminuisce al variare dell'altezza.

Pour un cube dont la hauteur est un, la force est 1	1	la forza è	1
Pour une pièce dont la hauteur est 12.	12	la forza è	5/6
Pour 24.	Per 24		1/2
Pour 36.	Per 36		1/3
Pour 48.	Per 48		1/6
Pour 60.	Per 60		1/12
Pour 72.	Per 72		1/24

Figura 62 Coefficienti riduttivi per il calcolo della resistenza a compressione, nel testo di Rondelet e trascritti.

¹⁴⁹ “Se il legno fosse inflessibile, un pezzo messo bene a piombo porterebbe uno stesso peso, qualunque fosse la sua altezza; ma l'esperienza prova che appena un fusto ha più di sette od otto volte la larghezza della base in altezza, piega sotto il peso prima di rompersi o di restringersi; e che un pezzo di legno alto cento volte il diametro della base, non è più capace di sostenere il minimo peso senza piegare”, ibidem, p. 260

¹⁵⁰ Per la conversione delle unità di misura si veda la tabella allegata.

¹⁵¹ “La proporzione, secondo la quale questa forza diminuisce in ragione dell'altezza, è difficile da determinare per la varietà dei risultati che dà l'esperienza Jean Baptiste Rondelet, *Traité de l'Art de Bâtir*, T I, L. I, sez. II, c. III, Mantova, Fratelli Negretti, 1834, p. 260

Rondelet afferma che i valori di resistenza trovati si accordano con quelli delle prove sperimentali condotte da Jean-Rodolphe Perronet¹⁵², e Pierre Simon Girard¹⁵³ e prova ad applicare i coefficienti di riduzione della resistenza per gli elementi compressi ai campioni provati da Girard. Le differenze tra valori attesi e dati indicati sono piuttosto modeste, dell'ordine del tre per cento circa e Rondelet le attribuisce a difetti di posizione o di qualità. Dall'osservazione dei comportamenti dei campioni durante le prove, Rondelet riconosce che nel momento in cui “un legno comincia a piegare perde assai della sua forza”¹⁵⁴ per cui l'indicazione di carattere pratico suggerisce che “un legno non dovrebbe mai avere in altezza più di dieci volte il diametro della sua base”¹⁵⁵, rientrando quindi nel caso in cui la resistenza sia ridotta a cinque sestimi della *forza assoluta* come indicato nella tabella di figura 64. Poiché, aggiunge Rondelet, si trovano infinite circostanze che duplicano o triplicano lo sforzo di un peso o di un carico, è prudente non fare affidamento sulla resistenza di un legno la cui altezza eccede dieci volte la larghezza della sua base¹⁵⁶. Viene così consigliato l'uso di coefficienti di sicurezza per non rischiare di trovarsi prossimi alle condizioni limite del materiale. Rondelet non è riuscito, sulla base dei dati sperimentali, ad esprimere mediante una formula analitica il comportamento del legno a compressione; le indicazioni progettuali fornite in chiusura del paragrafo si basano quindi unicamente su dati sperimentali prudentemente adattati.

Il paragrafo *Della forza dei legni orizzontali* riporta gli studi sperimentali sul comportamento di elementi in legno sottoposti a flessione. Dalle prove si desume che, a parità di dimensioni della sezione trasversale, all'aumentare della lunghezza la resistenza diminuisce¹⁵⁷. Sulla base di prove meccaniche su elementi di lunghezza costante Rondelet esprime la resistenza a flessione in funzione della base e del quadrato dell'altezza della sezione trasversale. La conclusione è corretta se la lunghezza è costante e quindi resta invariato il momento flettente massimo.

Seguono i resoconti di tre prove sperimentali. Nella prima il confronto è svolto tra due elementi con sezione quadrata con medesime dimensioni e lunghezze diverse per osservare l'influenza della lunghezza dell'elemento sulla resistenza. La formula cui giunge Rondelet ha la forma di una proporzione tra lunghezze e resistenze: il prodotto della luce del primo elemento moltiplicato per la sua resistenza è uguale alla lunghezza del secondo moltiplicata per la relativa resistenza.

La seconda esperienza confronta la resistenza di due elementi di uguale lunghezza con diverse dimensioni della sezione trasversale: il primo ha sezione quadrata con lato di 2 pollici, il secondo

¹⁵² Jean Rodolphe Perronet, *Description des projets et de la construction des ponts de Neuilly, de Mantes, d'Orleans*, Paris, Firmin Didot, 1788, Tome I, p. 97

¹⁵³ Vedi paragrafo 2.2

¹⁵⁴ Jean Baptiste Rondelet, *Traité de l'Art de Bâtir*, T I, L. I, sez. II, c. III, Mantova, Fratelli Negretti, 1834, p. 262

¹⁵⁵ “Questo grado di stabilità porta il rapporto del diametro della base coll'altezza, da sette a dieci”, *ibidem*, p. 263

¹⁵⁶ *Ibidem*, p. 262

¹⁵⁷ “Tutte le esperienze fatte sopra i legni coricati, cioè posti orizzontalmente secondo la loro lunghezza sopra due appoggi, provano che ad eguale grossezza, la loro forza diminuisce in ragione della loro portata, cioè della distanza fra gli appoggi.”, *ibidem*, p. 263

sezione rettangolare con base 2 pollici ed altezza 3. Rondelet vuole verificare che la resistenza sia direttamente proporzionale al quadrato dell'altezza della sezione trasversale. Il risultato porta ad una differenza piuttosto contenuta tra dati sperimentali e teorici, dell'ordine dell'1 per cento circa. L'ultima *esperienza* confronta i valori di resistenza di due campioni, uno con sezione quadrata di 2 pollici di lato, l'altro con sezione rettangolare con base 3 pollici ed altezza 2. Anche in questo caso la regola che Rondelet deduce dall'esperienza si presenta sotto forma di proporzione lineare. La proporzione indica che la base del primo campione sta alla base del secondo come il massimo carico portato dal primo campione sta al massimo carico sostenuto dal secondo. In altri termini si può dire che la base della sezione trasversale è inversamente proporzionale alla resistenza massima. La differenza tra i dati sperimentali e dati attesi è molto contenuta, nell'ordine del 5 per mille, ma non conosciamo la variabilità dei risultati nel caso in cui queste formule siano applicate ad elementi di dimensioni maggiori o con differenze di sezione trasversale più marcate.

Poiché la formula che esprime il valore della resistenza a trazione è piuttosto semplice e Rondelet ha intuito come calcolarlo correttamente, sulla base delle esperienze a compressione e a flessione vorrebbe trovare una legge che esprima il valore della resistenza a compressione e a flessione in funzione di quello a trazione. Per trovare il valore della resistenza a flessione, Rondelet suggerisce di moltiplicare l'area della sezione trasversale per la metà del valore della forza assoluta e di moltiplicare il tutto per il rapporto tra l'altezza della sezione trasversale e la lunghezza dell'elemento¹⁵⁸. Per la resistenza a flessione la formula proposta è quindi:

$$R_{fl} = \frac{1}{2} \cdot \sigma_{tr} \cdot \frac{b \cdot h^2}{l} \quad (26)$$

È degna di nota l'introduzione di un coefficiente riduttivo della resistenza, che verrà poi determinato correttamente per via analitica da Navier.

Dal confronto delle resistenze di tre campioni aventi uguale sezione trasversale quadrata di 5 pollici di lato e lunghezze rispettive di 7, 14 e 28 piedi, Rondelet conferma che la variazione delle resistenze non segue un andamento lineare. La ragione di questo comportamento viene attribuita alla flessibilità del legno e Rondelet riconosce che i risultati delle prove sperimentali seguono un andamento non lineare che può essere riconosciuto "una specie di catenaria"¹⁵⁹. Egli stesso comprende, sulla base dell'esperienza, che la resistenza a flessione diminuisce all'aumentare della lunghezza e deduce che il rapporto non è semplicemente di proporzionalità inversa ma entra in gioco un altro fattore; nelle

¹⁵⁸ "Da infinite altre sperienze e calcoli fatti per trovare il rapporto della forza assoluta del legno di quercia, a quello che esiste essendo posto orizzontalmente su due appoggi, trovasi che il mezzo più semplice è di moltiplicare la superficie della grossezza del pezzo per la metà della sua forza assoluta, e dividere il prodotto pel numero delle volte che la sua grossezza verticale è contenuta nella lunghezza compresa fra gli appoggi", *ibidem*, p. 264

¹⁵⁹ "Da questa differenza risulta che si può attribuire alla flessibilità del legno la causa onde le forze di questi pezzi invece di formare una progressione geometrica decrescente, con lo stesso esponente, ne formano una di esponente variabile, e che queste forze possono essere rappresentate dalle ordinate di una curva che abbiamo riconosciuto essere una specie di catenaria." *Ibidem*, p. 265

“Osservazioni” che seguono Rondelet intende fornire una legge che individui questo coefficiente. Premesso che “è impossibile stabilire una regola che dia risultati concordanti sempre colla esperienza”¹⁶⁰, Rondelet propone una formula per la resistenza a flessione espressa in funzione della *forza assoluta* (o *primitiva*). Ponendo:

a = forza primitiva o assoluta

b = numero di volte che lo spessore verticale è contenuto nella lunghezza

e = spessore verticale dell'elemento

fornisce:

$$\frac{\left(a - \frac{1}{3} \cdot b\right) \cdot e^2}{b} \quad (27)$$

da cui si ricava:

$$\frac{a \cdot e^2}{b} = \frac{1}{3} \cdot e^2 \quad (28)$$

e quindi semplificando ulteriormente si ottiene una formula secondo la quale la forza assoluta è legata al rapporto tra lunghezza dell'elemento e altezza della sezione trasversale secondo un coefficiente pari

$$a \frac{1}{3} :$$

$$a = \frac{1}{3} \cdot b \quad (29)$$

La formula, che non è corretta dal punto di vista dimensionale, forse intende semplificare la precedente nel caso in cui la sezione trasversale sia costante. In ogni caso il coefficiente riduttivo è diverso dal precedente ($\frac{1}{2}$) e si allontana ancora un po' di più da quello che è il coefficiente corretto indicato da Navier ($\frac{2}{3}$).

Le cinque tavole che seguono riportano il confronto tra i dati ricavati dai calcoli effettuati seguendo la formula sopra indicata e raccolti nella colonna dieci, ed i valori delle prove sperimentali condotte da Buffon su campioni aventi sezioni trasversali quadrate di 4, 5, 6, 7 ed 8 pollici di lato. Una di queste tabelle relative a prove su campioni con sezioni di 4 e 5 pollici di lato è riportata in figura 62.

¹⁶⁰ “Sapendo che la forza dei pezzi di legno posti orizzontalmente non diminuisce esattamente in ragione della loro lunghezza fra gli appoggi, abbiamo cercato col paragonare un gran numero di esperienze fatte sul legno di quercia, di scoprire in quale rapporto si faceva questa diminuzione.”, *ibidem*, p. 266

240 TRAITÉ DE L'ART DE BATIR.

PREMIÈRE TABLE.
Expériences sur des pîces de bois carrées de quatre pouces de grosseur, en supposant la force absolue de 55,68.

Longueur des pîces en pieds.	Rapport de la grosseur relative à la longueur.	Poids des pîces en livres.	Épaisseur de la pîce en lignes.	Force absolue.		Classe en livres.	Effort moyen d'après l'expérience.	Force relative d'après le calcul.	Poids pour chaque pîce calculé sur la force absolue.
				Force absolue.	Force relative.				
7	31	66 56	3 6 4 6	55 08	18 68	520 3275	5341	46 08	5381
8	34	68 62	3 5 4 6	55 73	47 53	4000 4500	4383	47 08	4577
9	27	77 71	4 10 5 6	53 06	46 00	3100 3300	4002	46 08	3983
10	30	89 82	5 10 6 6	57 36	47 56	3025 3600	3654	45 08	3518
12	35	100 96	7 6 7 6	59 43	17 43	2850 2925	3090	43 08	2705

DEUXIÈME TABLE.
Expériences sur des pîces de bois carrées de cinq pouces de grosseur, en supposant la force absolue de 59,50.

7	16 1/2	54 86 934	3 6 2 6 2 6	59 60	54 08	11775 11275 9900	11570	53 20	11570
8	19 1/2	482 118 118	2 11 3 0 3 2	58 87	52 47	9675 8600 8275	9820	53 20	9954
9	21 1/2	132 130 128 1/2	3 2 3 6 4 0	57 30	50 30	8500 8000 7180	8060	52 20	8731
10	28	190 184	3 6 5 0	55 93	47 93	7650 7180	7190	51 20	7738
12	28 1/2	176 176	3 6 8 3	58 80	49 30	6025 6180	6152	49 50	6318
18	33 1/2	200 206	8 1 8 3	61 50	50 30	5480 5700	5386	48 30	5181
18	35 1/2	232 231	8 0 8 2	60 30	47 30	4425 3750	4454	46 70	4387
18	35 1/2	265 264	8 10 8 0	60 18	45 76	3500 3275	3815	45 10	3761
20	44	269 269	10 0 10 0	60 74	44 74	3175 3175	3258	43 50	3280
22	52 1/2	288	11 3	63 28	45 48	2975	3113	41 00	2863
34	57 1/2	319 307	11 0 13 6	56 28	37 46	2380 3125	2317	40 30	2524
38	65 1/2	258 308	12 0 12 0	48 73	35 33	1800 1750	1960	37 00	1902

Figura 63. Tavole relative alle prove sperimentali per determinare la resistenza assoluta.

Rondelet infine vuole rappresentare graficamente la variazione di resistenza di campioni aventi sezione trasversale pari a 5 pollici, e lunghezza compresa tra 7 e 28 piedi. In figura 64 sono rappresentati due grafici distinti identificati da due linee diverse: una a tratto continuo ed una tratteggiata. Il grafico con linea continua è stato tracciato utilizzando alcuni dei risultati delle prove sperimentali di Buffon; quello tratteggiato rappresenta i valori di resistenza ottenuti secondo la regola proposta¹⁶¹ (25) e calcolati secondo una forza primitiva di 59,60 libbre su linea quadrata. L'irregolarità del grafico a tratto continuo è attribuita da Rondelet al fatto che i campioni avessero valori di resistenza a trazione differenti¹⁶².

¹⁶¹ “Le ordinate della curva regolare $m, l, k, i, h, g, f, e, d, c, b, Z$, indicano i risultati dei calcoli fatti secondo la regola proposta, supponendo una stessa forza primitiva per ogni pezzo.”, ibidem, p. 272

¹⁶² “Le ordinate del poligono $N, O, P, Q, R, S, T, U, V, X, Y, Z$, indicano i risultati delle esperienze fatte sopra travicelli grossi 5 pollici in quadratura, e lunghi diversamente, la forza primitiva delle quali variava in ciascun pezzo.”, ibidem, p. 272

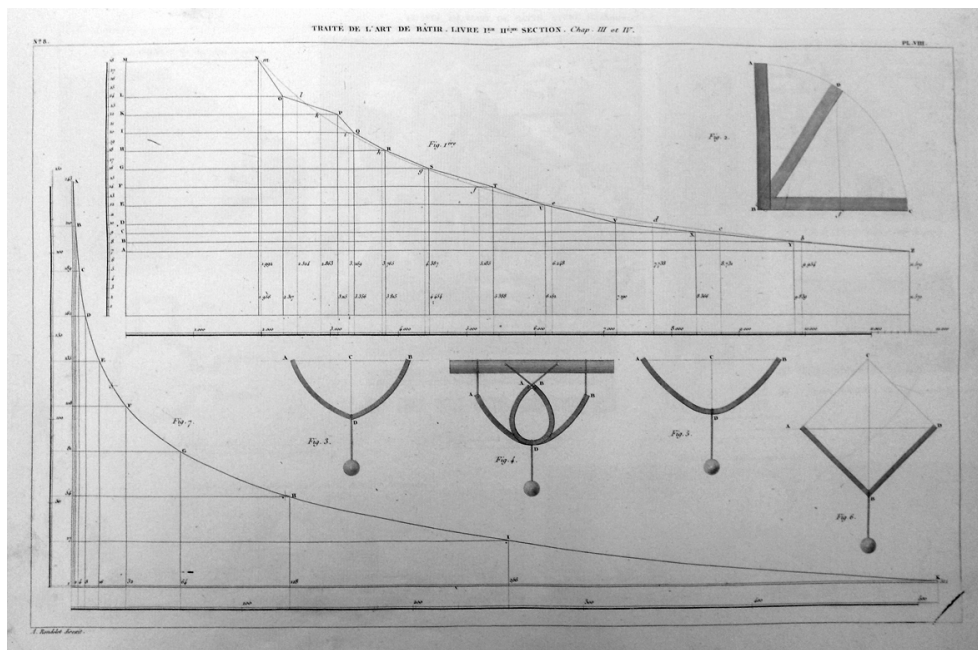


Figura 64. Diagramma variazione resistenza a flessione all'aumentare della lunghezza del campione.

Per essere di maggior aiuto nella pratica costruttiva, Rondelet raccoglie i risultati sperimentali relativi alle prove di resistenza in cinque tabelle come rappresentato in figura 65 suggerendo, a favore di sicurezza, di considerare come resistenza effettiva un decimo del valore indicato nelle tabelle¹⁶³.

¹⁶³ “Di più, i pezzi di legno acciò sieno nel caso di resistere solidamente a tutti gli sforzi che possono sostenere, conviene che il loro carico sia molto minore di quello sotto cui si rompono. Le ricerche fatte su ciò hanno fatto conoscere che nell'uso comune questo carico non è che il decimo di quello indicate nelle tavole, e che uno più forte può comprometterne la solidità; d'onde risulta che per conformarsi all'uso giustificato dalla esperienza non si ha che a sopprimere l'ultima cifra dell'espressione indicata nelle tavole. Così nell'esempio precedente, invece di prendere 15527 libbre od 8151 chilogrammi, non si prenderanno che 1552 libbre o chilogrammi 815. D'altronde è essenziale il far osservare che in questi casi il carico si suppone riunito al mezzo della portata delle travi, il che equivale ad un carico doppio, che fosse ripartito in tutta la sua lunghezza.”, ibidem, pp. 273-274

TAVOLA

Indicante la maggior forza dei legni posti orizzontalmente, espressa in libbre e chilogrammi, in ragione delle loro dimensioni in piedi di Parigi e in piedi metrici.

LUNGHEZZA dei pezzi				LUNGHEZZA dei pezzi				LUNGHEZZA dei pezzi			
Rapport. della grav. vertic. colla lunghezza.				Rapport. della grav. vertic. colla lunghezza.				Rapport. della grav. vertic. colla lunghezza.			
FORZA in libbre		FORZA in chilogram.		FORZA in libbre		FORZA in chilogram.		FORZA in libbre		FORZA in chilogram.	
Pezzi di 3 pollici sopra 3.											
pi. pol.											
1 6	6	11558	5952	8 0	24	3347	1756	6 6	13	10001	5250
1 9	7	9657	5069	8 4	25	3190	1674	7 0	14	9225	4812
2 0	8	8596	4407	8 8	26	3045	1598	7 6	15	8552	4489
2 3	9	7414	3887	9 0	27	2911	1527	8 0	16	7964	4181
2 6	10	6633	3481	9 4	28	2787	1462	8 6	17	7445	3908
2 9	11	5988	3145	9 8	29	2671	1401	9 0	18	6982	3665
3 0	12	5453	2862	10 0	30	2562	1345	9 6	19	6570	3449
3 3	13	5000	2625	Pezzi di 3 pollici sopra 5.							
3 6	14	4612	2421	2 6	6	18896	9920	10 0	20	6198	3255
3 9	15	4275	2401	2 11	7	16995	8449	10 6	21	5861	3076
4 0	16	3982	2090	3 4	8	13990	7544	11 0	22	5556	2916
4 3	17	3722	1954	3 9	9	12537	6486	11 6	23	5278	2770
4 6	18	3491	1832	4 2	10	11050	5801	12 0	24	5020	2655
4 9	19	3285	1724	4 7	11	9981	5239	12 6	25	4786	2512
5 0	20	3099	1626	5 0	12	9088	4771	13 0	26	4569	2398
5 3	21	2931	1538	5 5	13	8334	4375	13 6	27	4367	2292
5 6	22	2778	1453	6 0	14	7688	4056	14 0	28	4180	2194
5 9	23	2638	1384	6 3	15	7126	3741	14 6	29	4007	2103
6 0	24	2510	1317	6 8	16	6656	3483	15 0	30	3845	2017
6 3	25	2395	1255	7 1	17	6077	3189	Pezzi di 4 pollici sopra 4.			
6 6	26	2284	1199	7 6	18	5818	3054	2 0	6	20156	10581
6 9	27	2185	1145	7 11	19	5685	2984	2 4	7	17168	9913
7 0	28	2099	1097	8 4	20	5165	2711	2 8	8	15022	7856
7 3	29	2005	1251	8 9	21	4884	2564	3 0	9	13181	6919
7 6	30	1922	1099	9 2	22	4659	2454	3 4	10	11787	6187
Pezzi di 5 pollici sopra 4.											
2 0	6	15117	7955	9 7	23	4597	2507	3 8	11	10701	5617
2 4	7	12876	6779	10 0	24	4184	2196	4 0	12	9694	5089
2 8	8	11105	5876	10 5	25	3988	2093	4 4	13	8889	4666
3 0	9	9886	5190	10 10	26	3807	1998	4 8	14	8200	4305
3 4	10	8840	4641	11 3	27	3659	1909	5 0	15	7601	3990
3 8	11	7984	4191	11 8	28	3483	1828	5 4	16	7079	3715
4 0	12	7270	3816	12 1	29	3339	1752	5 8	17	6617	3475
4 4	13	6697	3499	12 6	30	3203	1681	6 0	18	6206	3258
4 8	14	6150	3176	Pezzi di 3 pollici sopra 6.							
5 0	15	5701	2992	3 0	6	22675	11903	6 0	19	5840	3066
5 4	16	5309	2786	3 6	7	19514	10159	6 6	20	5510	2892
5 8	17	4965	2605	4 0	8	16793	8815	7 0	21	5210	2735
6 0	18	4655	2443	4 6	9	14829	7784	7 4	22	4958	2592
6 4	19	4380	2299	5 0	10	13260	6961	7 8	23	4691	2462
6 8	20	4132	2169	5 6	11	11977	6287	8 0	24	4463	2342
7 0	21	3907	2050	6 0	12	10906	5725	8 4	25	4254	2233
7 4	22	3704	1944	Pezzi di 4 pollici sopra 6.							
7 8	23	3518	1841	3 0	6	11903	5961	8 8	26	4061	2151
				3 6	7	10514	5459	9 0	27	3881	2057
				4 0	8	9353	5061	9 4	28	3716	1950
				4 6	9	8329	4784	9 8	29	3561	1869
				5 0	10	7420	4587	10 0	30	3413	1791
				5 6	11	6617	4445				
				6 0	12	5906	4355				

TOMO I.

36

Figura 65. Jean Baptiste Rondelet. Risultati prove di resistenza a flessione.

2.4 Basi sperimentali della meccanica

Jean Henri Hassenfratz (1755-1827) si inserisce in maniera interessante nel processo di sviluppo delle conoscenze: pur senza fornire un contributo teorico innovativo, partecipa tuttavia al dibattito con l'idea che, in mancanza di un procedimento matematico sicuro, l'esperienza fornisce una guida utile. La sua organizzazione dei dati sperimentali, sia suoi sia di altri autori, è pregevole; Hassenfratz li raccoglie in tabelle di pratica utilità per la stima dei valori di resistenza di elementi di varie dimensioni. Di notevole interesse è la sua tabella, riportata in figura 66, che contiene una classificazione delle condizioni di vincolo e con la quale la portata della trave viene subordinata alla luce in relazione ai vincoli impiegati. La chiarezza grafica del disegno corrisponde alla chiarezza di idee che la ispira; molto interessante è la visualizzazione grafica del modo di realizzare l'incastro attraverso il contatto su due punti e quindi con una coppia di forze.

Il testo di Jean Henri Hassenfratz, *Traité de l'art de la charpenterie*, pubblicato nel 1804 è organizzato in due parti, la prima è ulteriormente divisa in cinque capitoli. Il primo capitolo prende in esame il legno, ne studia l'impiego come materiale da costruzione e descrive le caratteristiche della crescita e le proprietà delle varie specie (peso specifico, resistenza meccanica, combustibilità, degrado...). Il paragrafo VI è dedicato alla resistenza meccanica. I primi due sottoparagrafi esaminano l'aspetto della *resistenza orizzontale*, cioè a flessione. Hassenfratz presenta i lavori svolti da chi lo ha preceduto nella definizione di una legge per determinarne le caratteristiche meccaniche: Galileo, Wurtius, Grandi, Mariotte, Leibnitz, Varignon, Pascal, Jacques Bernoulli, Eulero e Lagrange che, a suo parere, hanno considerato la resistenza in modo astratto, da un punto di vista "geometrico" che esclude il materiale e le sue proprietà meccaniche.

L'espressione che fornisce la resistenza di un elemento in legno indica come questa sia direttamente proporzionale alla base ed al quadrato dell'altezza della sezione trasversale, ed inversamente proporzionale alla lunghezza:

$$R = k \cdot \frac{b \cdot h^2}{l} \quad (30)$$

Hassenfratz consiglia di verificare la formula con dati sperimentali perché, a seconda di come è stata valutata la "resistenza uniforme" del legno (che non dipende cioè dalla disposizione delle fibre), potrebbe essere necessario definire una legge differente¹⁶⁴. Hassenfratz divide gli studi che hanno sviluppato una legge sulla resistenza del legno in base alle dimensioni dell'elemento (quelli di Mariotte Parent, Varignon, Bélidor, Buffon, Lamblardie, Girard); in altri ci si è occupati anche di determinare i rapporti tra le resistenze di diverse specie e l'influenza sulla resistenza dovuta alla presenza di elementi metallici di rinforzo nelle connessioni (quelli di Duhamel¹⁶⁵). Le prove meccaniche di Mariotte, Parent, Varignon, Bélidor, Duhamel, Musschembroek sono state effettuate su provini di dimensioni molto contenute: sezioni quadrate con lato compreso tra 2 e 6 centimetri e lunghezze comprese tra 50 centimetri ed 1 metro.

Le prove effettuate da Buffon, Lamblardie e Girard sono state condotte su campioni di grosse dimensioni: sezioni trasversali quadrate di lato compreso tra 15 e 30 centimetri e lunghezze comprese tra 1,5 e 9 metri.

La verifica della resistenza degli elementi inflessi può essere effettuata in due modi: si può considerare il campione incastrato ad un solo estremo, come rappresentato nei disegni 6 e 18 di figura 66, al quale

¹⁶⁴ "Cependant comme cette loi a été déduite de l'hypothèse d'une résistance uniforme, et qu'il est possible que les bois, pour leur structure, l'arrangement de leurs fibres, puissent se trouver dans une autre hypothèse que celle da la quelle on est parti, on a cherché à s'assurer si l'expérience y répondait, ou si, d'après les résultats obtenus, on pouvait déduire une loi différente." In Jean Henri Hassenfratz, *De l'art du charpentier*, vol. I, Paris, Firmin Didot, 1804, p. 35

¹⁶⁵ Henri Louis Duhamel du Monceau, *Du Transport, de la conservation et de la force des bois*, Livre 5, Paris, 1780 (consultata versione Paris, Leroi, 1835)

è applicato il carico nell'estremo libero, oppure vincolando il campione ai due estremi ed applicando il carico in mezzeria, come nel disegno 10 di figura 66.

La teoria e l'esperienza, prosegue Hassenfratz, concordano nel dimostrare che queste diverse modalità di vincolo dei campioni determinano valori di resistenza differenti. Hassenfratz è consapevole che il campione vincolato su due appoggi, indicato nel disegno 10 di figura 66, è in grado di sostenere un peso pari a metà del carico sostenuto se gli appoggi hanno una condizione di vincolo sugli spostamenti verticali, come indicato nei disegni 13 e 14 di figura 66, che di fatto impedisce la rotazione.

Per rompere campioni tozzi e corti è necessaria una forza maggiore; se il peso applicato è troppo debole per causare la rottura dell'elemento, come nel disegno 18, è possibile, mediante due bande metalliche poste all'estremità, allungare l'elemento come nel disegno 9. Secondo la legge precedentemente richiamata, la forza per rompere il campione si dimezza se raddoppia la lunghezza.

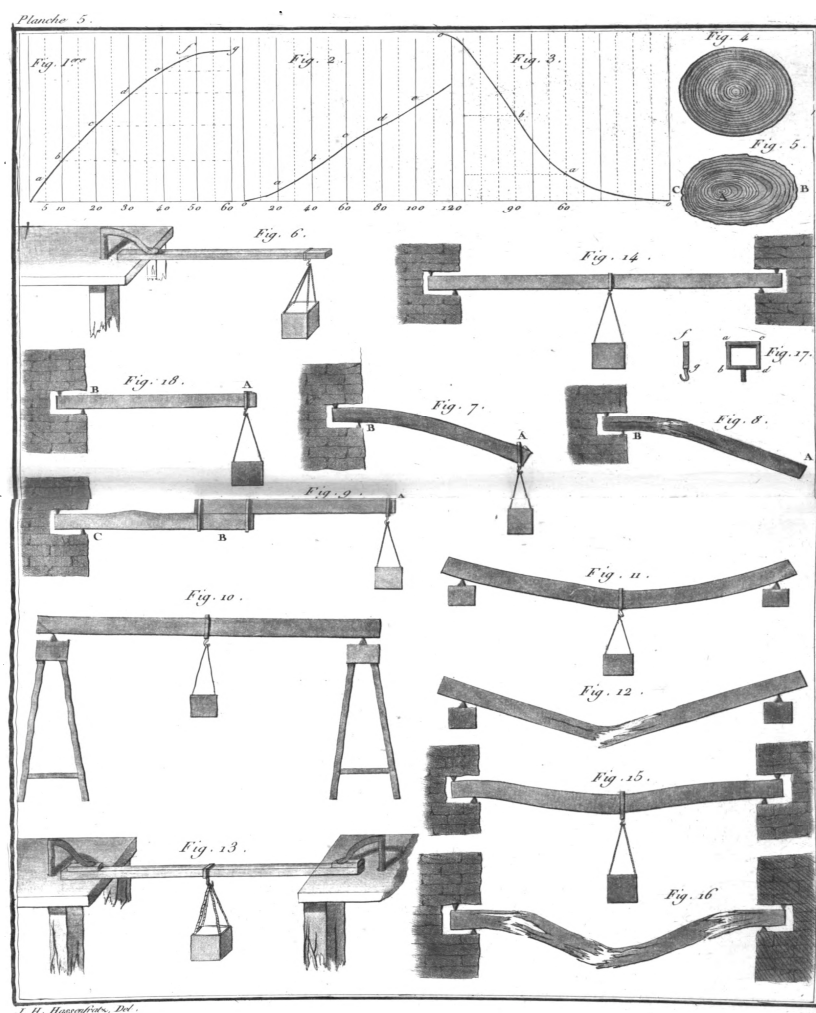


Figura 66. Jean Charles Hassenfratz “Resistenza orizzontale”.

Se gli elementi sono appoggiati ad entrambi gli estremi (disegno 10) ed il carico è applicato mediante in mezzeria, la resistenza si misura in base al peso che inflette il campione (disegno 11) o che lo

rompe (disegno 12). Hassenfratz sa che il carico che porta a rottura il campione raffigurato nel disegno 10 di figura 66 è, lo stesso che provoca la rottura di un elemento lungo la metà, vincolato ad un solo estremo, a cui è applicato il carico nell'estremo libero (disegno 18).

Vengono riportate e descritte poi le esperienze condotte da Girard, Buffon, Duhamel e Cossigni; i risultati di questi ultimi due, condotti su campioni in legno di rovere, pino del nord, abete e salice, integrano i dati riportati nella tabella delle prove condotte da Hassenfratz su una serie di 40 specie come indicato in figura 67, che costituiscono un punto di partenza per ulteriori sviluppi.

DE L'ART DU CHÂRPENTIER. 45

Tableau de la résistance de différents bois de 5 mètres de long et d'un décimètre d'équarrissage.

NOMS DES BOIS.	RÉSISTANCE EN KILOGRAMMES D'APRÈS		RÉSISTANCE MOYENNE.
	DUHAMEL ET COSSIGNI.	HASSENFRATZ.	
Acacia à 3 épines.	"	750	750
Albercier.	"	1004	1004
Alaier.	"	1148	1148
Arbre de Judée.	"	939	939
Bois de Sainte-Lucie.	"	1095	1095
Bouleau.	"	853	853
Châtaignier.	"	957	957
Charme.	"	1034	1034
Chêne.	{1024 1039}	1000	1000
Ebenier.	"	1155	1155
Epine blanche.	"	957	957
Krabbe de Virginia.	"	1094	1094
— jaspé.	"	1196	1196
Faux acacia.	"	1305	1305
Févier.	"	1084	1084
Hêtre.	"	1058	1058
If.	"	1037	1037
Mahaleb.	"	1095	1095
Maronnier.	"	931	931
Mélèze.	"	843	843
Noisetier.	"	1008	1008
Noyer.	"	900	900
— d'Amérique.	"	864	864
Orme.	"	1077	1077
Peuplier d'Italie.	"	588	588
Pin du Nord.	888	"	888
Platan.	"	728	728
Platan d'Orient.	"	776	776
— d'Occident.	"	853	853
Poirier.	"	883	883
Pommier.	"	976	976
Prunier.	"	1147	1147
Sapin.	918	"	918
Saule.	850	"	850
Sicomore.	"	900	900
Sorbier.	"	965	965
Tilleul.	"	750	750
Tolpier.	"	563	563
Tuya de la Chine.	"	707	707
Vernis du Japon.	"	758	758

Quoique les expériences sur ces 40 espèces de bois aient été faites avec beaucoup de soin, je ne les présente encore que comme un commencement de travail qu'il serait utile que les

Figura 67. Tabella confronto resistenze Duhamel-Hassenfratz.

Lo scopo delle numerose prove di resistenza effettuate da Hassenfratz è quello di trovare un valore medio dei risultati di tutte le prove per verificare la validità della legge generale della resistenza del

legno e successivamente organizzare i dati in tabelle che ne consentano l'impiego nella pratica¹⁶⁶. Una serie di venti tabelle, due delle quali rappresentate in figura 68 e 69, riporta i valori di resistenza del legno di rovere: le prime tre colonne indicano le dimensioni geometriche del campione (lunghezza, altezza, larghezza). Le lunghezze sono comprese tra 1 e 15 metri, per i campioni compresi tra 1 e 6 metri di lunghezza la sezione trasversale quadrata il lato varia da 2 a 30 centimetri; per campioni di lunghezze superiori si raggiunge una sezione trasversale quadrata di 40 centimetri di lato.

RÉSISTANCE du bois de chêne de 1 mètre de longueur.

H A U T E U R .

Largeur.	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30
0,02	40	160	360	640	1000	1440	1960	2560	3240	4000	4840	5760	6760	7840	9000
0,04	80	320	720	1280	2000	2880	3920	5120	6480	8000	9680	11520	13520	15680	18000
0,06	120	480	1080	1920	3000	4320	5880	7680	9720	12000	14520	17280	20280	23520	27000
0,08	160	640	1440	2560	4000	5760	7840	10240	12960	16000	19360	23040	27040	31360	36000
0,10	200	800	1800	3200	5000	7200	9800	12800	16200	20000	24200	28800	33800	39200	45000
0,12	240	960	2160	3840	6000	8640	11760	15360	19440	24000	29040	34560	40560	47040	54000
0,14	280	1120	2520	4480	7000	10080	13720	17920	22680	28000	33880	40320	47320	54880	63000
0,16	320	1280	2880	5120	8000	11520	15680	20480	25920	32000	38720	46080	54080	62720	72000
0,18	360	1440	3240	5760	9000	12960	17640	23040	29160	36000	42760	51840	60840	70560	81000
0,20	400	1600	3600	6400	10000	14400	19600	25600	32400	40000	48400	57600	67600	78400	90000
0,22	440	1760	3960	7040	11000	15840	21560	28160	35600	44000	53440	63360	74360	86400	99000
0,24	480	1920	4320	7680	12000	17280	23520	30720	38880	48000	58080	69120	81200	94080	108000
0,26	520	2080	4680	8320	13000	18720	25480	33280	42120	52000	62020	74880	87880	101920	117000
0,28	560	2240	5040	8960	14000	20160	27440	35840	45360	56000	67760	82640	94640	109760	126000
0,30	600	2400	5400	9600	15000	21600	29400	38400	48520	60000	72600	88400	101420	117600	135000

Figura 68. Tabella resistenze travi in legno di rovere di 1 m di lunghezza al variare di base ed altezza della sezione trasversale.

Bois de chêne de 15 mètres de longueur.

H A U T E U R .

Largeur.	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,40
0,02	66	96	132	171	216	266	323	384	451	523	600	682	771	864	963	1066
0,04	133	192	264	342	432	532	645	768	901	1045	1200	1368	1541	1728	1925	2133
0,06	200	288	396	512	648	800	967	1152	1352	1567	1800	2047	2312	2592	2887	3200
0,08	266	384	522	682	864	1066	1290	1536	1802	2090	2400	2730	3082	3456	3850	4266
0,10	333	480	653	853	1080	1333	1613	1920	2263	2643	3000	3413	3853	4320	4813	5333
0,12	400	576	783	1023	1296	1600	1935	2302	2703	3135	3600	4095	4623	5184	5775	6400
0,14	466	672	914	1194	1512	1866	2258	2688	3154	3652	4200	4778	5394	6048	6738	7466
0,16	533	768	1044	1364	1728	2133	2580	3072	3604	4180	4800	5460	6162	6912	7700	8533
0,18	600	864	1175	1533	1944	2400	2903	3456	4055	4703	5400	6143	6935	7776	8663	9600
0,20	666	960	1306	1706	2160	2666	3226	3840	4506	5226	6000	6826	7706	8640	9630	10666
0,22	733	1056	1436	1876	2396	2933	3548	4224	4956	5748	6600	7528	8476	9502	10588	11733
0,24	800	1152	1567	2047	2592	3200	3870	4608	5407	6270	7200	8190	9247	10362	11550	12800
0,26	866	1248	1697	2217	2808	3466	4193	4992	5857	6793	7800	8873	10017	11232	12513	13866
0,28	933	1344	1828	2388	3024	3733	4516	5326	6268	7236	8340	9556	10788	12096	13476	14933
0,30	1000	1440	1958	2558	3240	4000	4838	5760	6759	7838	9000	10258	11558	12960	14438	16000
0,32	1066	1536	2089	2729	3456	4266	5160	6144	7209	8360	9600	10920	12320	13824	15400	17066
0,34	1133	1632	2219	2899	3672	4533	5483	6528	7660	8883	10200	11620	13120	14688	16363	18133
0,36	1200	1728	2340	3070	3888	4800	5806	6912	8110	9406	10800	12386	13970	15552	17326	19200
0,38	1266	1824	2461	3241	4104	5066	6129	7296	8561	9923	11400	12969	14641	16416	18289	20266
0,40	1333	1920	2582	3412	4320	5333	6453	7680	9012	10453	12000	13652	15412	17280	19252	21333

Figura 69. Tabella resistenze travi in legno di rovere di 15 m di lunghezza al variare di base ed altezza della sezione trasversale.

¹⁶⁶ “j’ai cherché à obtenir une moyenne de toutes les expériences, afin d’y appliquer la loi générale de la résistance des bois, et construire des tables qui pussent au besoin être employées à juger la force des bois dont on veut faire usage.” In Jean Henri Hassenfratz, *De l’art du charpentier*, vol. I, Paris, Firmin Didot, 1804, p. 46

Nella breve spiegazione sulla modalità di utilizzo della tabella emerge la finalità del lavoro: la verifica del carico che un dato elemento, di dimensioni assegnate, è in grado di sostenere¹⁶⁷. Hassenfratz annota due considerazioni riguardo all'utilizzo di questi dati nella pratica costruttiva: l'impiego del legno nelle costruzioni di solito prevede che le estremità degli elementi siano incastrate in un muro, o all'interno di una struttura a *pan de bois*, ecc., perciò, come nei casi in cui gli estremi siano incastrati, la resistenza raddoppia e si può quindi fare riferimento a valori doppi rispetto a quelli indicati nelle tabelle. La seconda considerazione riguarda la tipologia di carico applicato: le prove sperimentali sono state condotte applicando un carico concentrato in mezzzeria; Hassenfratz osserva però che questo non è ciò che avviene nella realtà quando i carichi sono solitamente distribuiti su tutta la lunghezza dell'elemento. La conclusione cui giunge Hassenfratz è che se il carico è distribuito, anziché concentrato, si può prendere in considerazione un carico doppio rispetto a quello indicato in tabella.

Sulla base delle due precedenti considerazioni relative alla natura dei vincoli ed alla tipologia del carico, sembrerebbe che i valori di carico indicati in tabella fossero molto al di sotto rispetto a quelli realmente sostenibili dalla trave, ma è da tenere presente che i valori indicati si riferiscono al carico che provoca la rottura dell'elemento e non a quello che causa deformazioni, che invece è pari a circa un terzo del valore a rottura. L'altra considerazione riguarda la qualità del legno impiegato: il legno utilizzato nelle prove è legno sano, il più possibile esente da difetti. Non sempre accade però che quello comunemente impiegato sia di buona qualità; da qui l'opinione che i valori indicati in tabella siano i più coerenti con i valori reali¹⁶⁸. Per adattare i valori medi di resistenza sul legno di rovere a valori di resistenza di altre specie, Hassenfratz suggerisce di effettuare prove di resistenza su nuovi campioni e ricavare, mediante una proporzione, il coefficiente da applicare ai valori di resistenza del legno di rovere.

L'ultima avvertenza riguarda il fatto che il valore di resistenza indicato in tabella comprende anche il peso proprio e pertanto, al fine di valutare il massimo carico cui può essere sottoposta una trave, occorre calcolare il valore del peso proprio della trave e sottrarlo a quello indicato in tabella.

Successivamente Hassenfratz tratta il problema della resistenza "verticale" o resistenza a compressione. Vengono illustrati il metodo ed i risultati sperimentali di Musschembroek¹⁶⁹, i dati di

¹⁶⁷ "Il est facile avec ces tables d'avoir la résistance d'un morceau de bois quelconque; soit, par exemple, la résistance d'un morceau de bois de chêne de 6 mètres de long, 18 centim. de large et 22 centim. de haut. On cherchera d'abord la table calculée pour les bois de 6 mètres de long.", *ibidem*, p. 58

¹⁶⁸ "Ces deux considération semblent prouver que la résistance des bois, indiquée dans les tables, est beaucoup au-dessous de ce que les bois supporteraient réellement: mais si l'on fait attention que la résistance a été calculée sur la force qui doit faire rompre la pièce de bois, et que celle qui commence à la courber n'est que le tiers de celle qui la fait rompre; de plus que cette moyenne est déduite d'expériences faites sur des bois sains, que dans l'usage, les bois employés ont des gercures, des nœuds ou d'autres accidens qui déterminent une rupture plus prompte et une résistance moins grande: on voit que l'on peut, sans inconvénient, se servir des nombres indiqués dans la table.", *ibidem*, p. 64

¹⁶⁹ Pieter van Musschembroek, *Physicae experimentales et Geometricae dissertationes*, Lugduni Batavorum, 1729

Perronet¹⁷⁰, ed il metodo per effettuare le prove proposto da Girard. Confrontando i valori della resistenza a compressione con quelli della resistenza a flessione Hassenfratz registra che i primi sono superiori ai secondi, e che, in base alle prove di Musschembroeck, il legno di rovere è meno resistente di quello di abete e di faggio e che la resistenza a compressione è circa il triplo della resistenza a flessione¹⁷¹; questi risultati differiscono da quelli registrati da Perronet e Girard ma poiché Perronet non fornisce indicazioni sulla modalità di conduzione delle prove e sull'apparato sperimentale adottato non è possibile sapere quali dati siano più attendibili¹⁷². La parte finale del paragrafo riporta le considerazioni ed i risultati ottenuti da Girard e annotati all'interno del *Traité analytique de la résistance des solides*. Le esperienze di Girard sono tutte volte a determinare l'*elasticità assoluta*, anziché la resistenza, intendendo per *elasticità assoluta* il carico che si può sopportare prima che l'elemento inizi ad inflettersi¹⁷³. Sia per Girard che per Hassenfratz la formula che esprime l'*elasticità assoluta* è la medesima di quella della resistenza: direttamente proporzionale alla base ed al quadrato dell'altezza della sezione trasversale ed inversamente proporzionale alla lunghezza¹⁷⁴ ma cambia il valore della forza cui fanno riferimento: nel primo caso viene considerata la forza che inizia a deformare il campione, nell'altro è il valore del carico che determina la rottura del campione. La conclusione cui giunge Hassenfratz dopo aver osservato il comportamento meccanico dei campioni soggetti ad una forza di compressione è che il legno solitamente si inflette nella direzione del lato minore (quella che ha momento d'inerzia minore) e che i campioni con sezione trasversale quadrata si deformano nelle due direzioni¹⁷⁵, dando origine ad una doppia curvatura come indicato in figura 70.

¹⁷⁰ Jean Rodolphe Perronet, *Description des projets et de la construction des ponts de Neuilly, de Mantes, d'Orleans...du projet du canal de Bourgogne...et de celui de la conduit des eaux de l'Yvette et de la Bièvre à Paris*, Paris, 1788, p. 97

¹⁷¹ “La moyenne des quatre résistances verticales de Mussembroek est de 70, celle des quatre résistances horizontales est de 24; d'où il suit que, si l'on pouvait ajouter quelque confiance aux expériences de Mussembroek, la résistance verticale serait à-peu-près le triple de la résistance horizontale” In Jean Henri Hassenfratz, *De l'art du charpentier*, vol. I, Paris, Firmin Didot, 1804, p. 65

¹⁷² “Perronet n'ayant pas fait connaître, dans cette ouvrage, la méthode qu'il a employée, il est difficile de déterminer si ces résultats méritent plus de confiance que ceux de Mussembroek”, *ibidem*, p. 65

¹⁷³ “Les expériences de Girard ont eu pour objet de déterminer l'élasticité absolue du bois. Il appelle élasticité absolue le poids que peut porter, avant de se courber, un morceau de dimension donnée. Il a préféré de rechercher l'élasticité absolue plutôt que la résistance, parce que, dans un assemblage de charpente où toutes les pièces se distribuent la charge, le fléchissement de l'une d'elles, transporte sur les autres le poids qu'elle supportait.”, *ibidem*, p. 67

¹⁷⁴ “L'élasticité est comme la résistance: en raison directe des largeurs, double des hauteur et inverse des longueurs.”, *ibidem*, p. 67

¹⁷⁵ “En examinant la courbure que prend le bois chargé debout, Girard a remarqué que les bois méplats se courbaient ordinairement dans le sens de la plus petite face, que le bois carrés se courbaient dans les deux sens, et que quelques bois méplats, affectaient aussi cette double courbure”, *ibidem*, p. 66

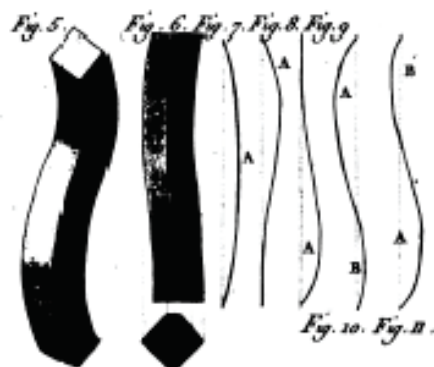


Figura 70. Configurazione deformata in campioni soggetti a compressione.

Il paragrafo successivo, *De l'adhérence des fibres du bois*, tratta della resistenza a trazione. L'autore fa riferimento alle prove meccaniche condotte da Musschembroek, le uniche – sostiene – che possono essere riportate¹⁷⁶ riguardanti campioni di dodici specie legnose.

Hassenfratz nota che Musschembroek non ha fatto riferimento alla lunghezza degli elementi sottoposti a trazione, ritenendo che questo dato non influisse sulla resistenza. A conclusione dei risultati Hassenfratz afferma che non è possibile rapportare l'aderenza delle fibre a nessuna legge di resistenza¹⁷⁷. La nota di chiusura del paragrafo rimarca il fatto che Musschembroek, dopo una numerosa serie di prove sperimentali, non sia riuscito a dedurre alcuna legge che esprimesse la resistenza in funzione dei carichi.

Il secondo capitolo è dedicato alla coltivazione degli alberi e alle varie modalità di taglio e di lavorazione dei tronchi. Il capitolo tre è dedicato al trasporto del legname via terra e via acqua e il capitolo quattro tratta della curvatura del legno. Il capitolo cinque infine, è dedicato al calcolo del volume proposto sulla base di un confronto tra metodi precedenti e metodi attuali e alla conversione delle unità di misura.

2.5 La proposta di un approccio rigoroso

Dopo la pubblicazione del *Traité des ponts* di Gautier nel 1716 non era stato pubblicato nessun altro trattato dedicato esclusivamente ai ponti prima del *Traité de la construction des ponts* di Émiland Marie Gauthy. L'opera, pubblicata tra il 1809 e il 1816 dal nipote Claude Louis Navier, contiene note importanti, apportate dallo stesso Navier, riguardanti il comportamento dei corpi elastici.

¹⁷⁶ “Je n'ai encore trouvé d'expériences sur cette espèce de résistance, que celles que Mussembroek a publiées; ce sont aussi les seules que je puisse citer”, *ibidem*, vol. I, p. 69

¹⁷⁷ “Comme Mussembroek n'a pas déterminé les longueurs des bois sur lesquels il a fait ses expériences, et qu'il pense que cette longueur n'y a pas d'influence, on ne peut rapporter l'adhérence des fibres à aucune lois de résistance”, *ibidem*, pp. 69-70

Nel panorama della trattatistica dell'epoca, il lavoro di Gauthey segna una tappa importante per i risultati raggiunti sulla teoria della trave inflessa. A fianco di questa, altri problemi sono ormai correttamente impostati: quelli delle aste tese o compresse e quello della freccia di travi inflesse, nonché l'espressione della resistenza sviluppata dai diversi materiali.

Il *Traité* di Gauthey è diviso in quattro parti. La prima è dedicata allo studio dei ponti in pietra francesi ed europei con luce superiore ai venti metri. Seguono indicazioni relative al dimensionamento dei ponti in pietra ed alla valutazione delle opere di sostegno; la terza parte è dedicata alle centine impiegate per la costruzione delle volte, seguita dallo studio della loro resistenza. Gauthey affronta poi il tema dei ponti in legno, in ferro e dei ponti mobili. A questo proposito alcune note di Navier sulla modalità di calcolare la "forza" degli elementi di legno costituiscono un importante contributo. I problemi trattati sono relativi alla resistenza dei corpi solidi, alla flessione di una "lama" elastica, ai solidi di ugual resistenza, alla flessione di un corpo elastico, con particolare attenzione al rapporto tra resistenza e deformazione delle fibre, alle prove sperimentali sulla flessione delle travi in legno per determinare la loro elasticità. Segue una parte sulla valutazione della *forza* del ferro in cui sono riportati i commenti ed i risultati sperimentali di Musschembroek, Aubry, Bruyère, Buffon, Perronet oltre a quelli di Gauthey e di Navier stesso. Infine il quarto libro presenta la tecnologia della costruzione e della stima delle opere, delle fondazioni, delle macchine per gli scavi oltre alla descrizione della realizzazione delle volte e dei piedritti. Completa l'opera un'appendice sulla resistenza dei muri alla spinta delle terre e sulla resistenza del ferro a trazione.

La nota al primo capitolo del secondo libro (*Note sur la manière de calculer la force des pièces de bois*) è molto interessante e la premessa è particolarmente significativa. I vantaggi della conoscenza della resistenza dei materiali sono apprezzati da coloro che devono costruire, ma, malgrado di questa questione si siano già occupati Eulero e Lagrange, i risultati a cui sono giunti non sono stati d'aiuto nella pratica costruttiva¹⁷⁸. Le formule analitiche trovate non potevano essere utilizzate senza aver determinato in maniera opportuna i valori di alcune costanti, tentativo realizzato sulla base di prove sperimentali. Sarà con Navier, qualche anno più tardi, che le formule analitiche corrette verranno semplificate e rese disponibili per l'applicazione nella pratica costruttiva.

¹⁷⁸ "Il n'est point de constructeur qui n'apprécie l'avantage de connaître exactement le degré de force des matériaux; et la partie de la mécanique, connue sous le nom de résistance des solides, est une de celles qui offrent les applications les plus utiles. Mais quoique beaucoup de personnes s'en soient occupées, et qu'Euler et M. Lagrange n'aient point dédaigné d'en faire un des sujets de leurs recherches, les résultats auxquels on est parvenu n'offrent encore presque aucun secours à la pratique des constructions. Les formules analytiques ne peuvent être de quelque utilité qu'autant qu'on déterminé convenablement les valeurs des constantes qui y sont introduites; et, jusqu'à présent, c'est presque sans succès qu'on a essayé de faire cette détermination en se servant des expériences connues." In Émiland Marie Gauthey, *Traité de la construction des ponts*, Paris, Firmin Didot, 1809, p. 19

Gauthey passa in rassegna la modalità con cui coloro che l'hanno preceduto hanno affrontato il tema della *forza* negli elementi in legno, che hanno basato il loro lavoro sul confronto tra le indicazioni di Galileo, Mariotte, Eulero e Lagrange e quelle provenienti dall'esperienza.

A partire dalle conclusioni del lavoro di Galileo, fondatore della teoria sulla resistenza dei solidi, Gauthey osserva il comportamento di un elemento sottoposto ad una forza di trazione ed esprime la relazione tra la forza, l'area della sezione trasversale e la resistenza a rottura formulando correttamente l'espressione analitica:

$$P = R \cdot A \quad (31)$$

dove:

P è la forza di trazione e viene identificata con la *resistenza assoluta*

A è l'area della sezione trasversale

R la resistenza a rottura.

Per quanto riguarda il comportamento di una mensola di lunghezza q , incastrata ad un estremo e caricata con un carico concentrato Q nell'estremo libero, Gauthey riprende l'espressione utilizzata da Galileo secondo la quale il rapporto tra il carico Q e la resistenza assoluta P è pari a:

$$Q = \frac{P \cdot r}{q} \quad (32)$$

dove:

r è la distanza tra il baricentro della sezione trasversale ed il bordo inferiore della sezione.

Se la sezione trasversale è rettangolare con base a ed altezza b :

$$P = R \cdot a \cdot b \quad (33)$$

ed r (per sezione rettangolari) è pari a:

$$r = \frac{1}{2} \cdot b \quad (34)$$

la (29) diventa allora:

$$Q = R \cdot \frac{a \cdot b^2}{2q} \quad (35)$$

Facendo riferimento ai testi di Lagrange¹⁷⁹ ed Eulero¹⁸⁰, Gauthey riporta le espressioni che indicano il valore del momento resistente alla base della sezione trasversale:

$$M_r = \frac{A \cdot E^m \cdot b^{(m+2)}}{B^m \cdot (m+2)} \quad (36)$$

dove:

b è l'altezza della sezione trasversale

¹⁷⁹ Joseph Louis de Lagrange, *Mémoire sur la force des ressorts pliés*, in Mémoires de l'Académie Royale des Sciences et Belles-Lettres de Berlin, T. XXV, 1771, p. 77-110

¹⁸⁰ Leonhard Euler, *Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes*, Lausanne, 1744

A , E , B , ed m sono costanti per ciascun elemento.

Se si basa la determinazione del momento resistente sulla convinzione di Galileo, per la quale tutte le fibre resistono in modo uguale, ovvero che l'allungamento delle fibre sia costante in tutti i punti della sezione trasversale, ad m viene attribuito il valore 0 e la (36) diventa:

$$M_r = A \cdot b^2 \quad (37)$$

Se il momento resistente viene invece determinato assumendo che l'allungamento delle fibre sia variabile in modo lineare, ad m viene attribuito il valore 1 e la (36) diventa:

$$M_r = \frac{A \cdot E \cdot b^3}{B \cdot 3} \quad (38)$$

Sulla base delle diverse ipotesi di deformazione delle fibre si ottengono due diverse espressioni del momento resistente, una in funzione del quadrato l'altra in funzione del cubo dell'altezza della sezione trasversale (b).

In chiusura del paragrafo Gauthey osserva che in entrambi i casi la formula non corrisponde ancora in maniera efficace ai risultati delle prove sperimentali. La conclusione a cui giunge è che queste formule non descrivano il comportamento reale del legno, che lo scarto tra la teoria e l'esperienza non sia trascurabile e che tale scarto non possa essere attribuito ad errori nelle prove sperimentali né ad imperfezioni del materiale. È convinto che ci siano inesattezze nella formulazione delle espressioni. Il desiderio di fornire una legge semplice che descriva correttamente il comportamento del legno lo porta a proseguire per cercarne una che corrisponda in modo più convincente al dato reale¹⁸¹.

In seguito Gauthey presenta la legge della resistenza di un corpo elastico soggetto a flessione; dall'osservazione del comportamento delle fibre e facendo riferimento al testo di Jacques Bernoulli¹⁸² del 1705, Gauthey distingue tre possibili casi: il primo in cui le fibre del corpo elastico siano tutte tese, il secondo in cui le fibre siano tutte compresse, il terzo infine in cui le fibre siano in parte tese ed in parte compresse. Sulla base di equazioni integrali di equilibrio, nei primi due casi si ottiene un valore di momento resistente pari a:

$$M_r = \frac{\varepsilon'' \cdot b^3}{3} \quad (39)$$

¹⁸¹ “Mais on ne peut se dissimuler que, soit qu'on fasse le moment d'élasticité proportionnel au carré ou au cube de l'épaisseur, les formules sont encore loin de représenter les effets naturels d'une manière suffisamment exacte, et les différences que présentent les uns et les autres étant assez considérable, pour qu'on ne puisse les attribuer totalement aux erreurs des expériences et aux variations dans l'état physique des matières mises à l'épreuve, il faut en conclure qu'il y a quelque vice caché dans la composition des formules. Afin de s'en assurer, on a repris entièrement l'analyse de la théorie de la résistance des solides, qui se trouve développée dans ce qui va suivre d'une manière simple et nouvelle à quelques égards. On a eu soin d'indiquer dans les notes les points dans lesquels les considérations employées diffèrent de celles qui avaient été admises jusqu'à présent.” in Émiland Marie Gauthey, *Traité de la construction des ponts*, Paris, Firmin Didot, 1809, vol. II, p. 22

¹⁸² Jacques Bernoulli, *Véritable hypothèse de la résistance des solides avec la démonstration de la courbure des corps qui sont ressort*, in *Mémoire de l'Académie Royale des Sciences*, 1705, p. 176-186

e

$$M_r = \frac{\varepsilon_n \cdot b^3}{3} \quad (40)$$

in cui ε'' rappresenta la resistenza a trazione delle fibre situate a distanza unitaria dall'*asse di equilibrio* (asse neutro), ε_n rappresenta la resistenza a compressione delle fibre situate a distanza unitaria dall'*asse di equilibrio* e b rappresenta l'altezza della sezione trasversale.

Nel caso di sezioni in parte tese ed in parte compresse, la formula suggerita da Bernoulli è pari a:

$$\frac{\varepsilon'' \cdot V^3}{5} + \frac{\varepsilon_n \cdot (b - V)^3}{3} \quad (41)$$

dove:

V è la distanza dall'*asse di equilibrio*.

Integrando opportunamente l'equazione (41), si ottiene l'espressione che indica il momento resistente per sezioni rettangolari:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon'' \cdot b \cdot c}{3} \right) \cdot a \cdot b^2 \quad (42)$$

dove:

ρ è il raggio di curvatura dell'elemento inflesso

a è la base della sezione trasversale

c la lunghezza dell'elemento.

Nel paragrafo V Gauthey riassume le formule che esprimono il legame tra carico e spostamento nel caso di elementi inflessi, ed il valore del carico critico per aste caricate di punta.

Una mensola incastrata ad un estremo e caricata con un carico concentrato nell'estremo libero determina un abbassamento che viene espresso mediante la seguente relazione:

$$P = 3 \cdot \varepsilon \cdot \frac{f}{c^3} \quad (43)$$

in cui

c è la distanza tra l'estremo fisso e il punto di applicazione del carico P

ε è l'*elasticità assoluta* del solido (Ekk di Girard).

Nel caso in cui la trave sia vincolata con due appoggi agli estremi e il carico P concentrato sia applicato in mezzzeria la (43) diventa:

$$P = 48 \cdot \varepsilon \cdot \frac{f}{c^3} \quad (44)$$

dove:

c in questo caso è la distanza tra gli appoggi.

Nel caso in cui l'asta sia soggetta ad una forza di compressione, il carico critico è pari a:

$$Q = \frac{\pi^2 \cdot \varepsilon}{4 \cdot c^2} \quad (45)$$

Se l'elemento è compresso, si inflette; questo fenomeno è legato allo spessore dell'elemento: se l'altezza della trave è considerevole rispetto alla lunghezza (elemento tozzo), il campione non si infletterà, ma le sue fibre saranno schiacciate. Se il rapporto tra la minima dimensione trasversale e la lunghezza dell'elemento è maggiore di $\frac{1}{6}$, $\frac{1}{7}$, anziché inflettersi si romperà. Gauthey è consapevole che il valore della resistenza a trazione non è uguale a quello della resistenza a compressione ma, in generale, la formula che esprime il comportamento a compressione indica che la resistenza è proporzionale all'area della sezione trasversale, come per la pietra, se il rapporto tra altezza della sezione trasversale e lunghezza dell'elemento è maggiore di $\frac{1}{6}$ o di $\frac{1}{7}$. I valori di resistenza massima a compressione (500 kg/cm²) sono circa la metà rispetto a quelli di trazione (950 Kg/cm²). Per evitare eccessive deformazioni Gauthey suggerisce di non superare i 160 Kg/cm² per travi caricate perpendicolarmente alle fibre e 200 Kg/cm² per travi caricate parallelamente alle fibre (coefficiente di sicurezza pari a 2,5). Questi valori si riferiscono a legno ben stagionato, in cui non siano presenti difetti od alterazioni. La presenza di acqua all'interno dei giunti provoca la marcescenza delle fibre con conseguente riduzione della resistenza: le fibre riducono le loro dimensioni e questa è la causa della maggior parte dei crolli dei ponti in legno.

Quattro tabelle contenenti i risultati sperimentali delle prove di resistenza effettuate da Buffon, Aubry e Lamandé su travi in rovere disposte orizzontalmente e soggette ad un carico verticale, vengono allegate al testo e riportate in figura 71, 72, 73 e 74. Nelle rispettive colonne sono indicate le dimensioni della sezione trasversale, la distanza tra i punti d'appoggio, i carichi cui la trave è stata sottoposta, la freccia corrispondente a ciascun carico ed il valore del rapporto tra il carico applicato e la freccia registrata.

N° 1.

Expériences de Buffon sur la flexion du bois de chêne chargé horizontalement.

Numéros des expériences.	Ecartissage des poutres = a = b.	Distance des points d'appui = c.	Charge portée par la poutre = P.	Flèche de courbure correspon- dante = f.	Valeur de $\frac{P}{f}$
	mètres.	mètres.	kilogrammes.	mètres.	kilogrammes.
6	0,153	8,538	333	0,108	3805
			378	0,251	2502
			825	0,440	1870
			957	0,542	1766
7	0,153	4,169	1022	0,052	31937
			1312	0,071	31296
			2002	0,125	18889
			2491	0,194	12840
			2746	...	...
8	0,153	2,084	5449	0,041	515545
			2639	0,020	196930
			4428	0,054	150255
			4918	0,052	94977
			5408	0,068	79029
9	0,153	7,146	521	0,068	4721
			965	0,135	4185
			810	0,251	3307
			1033	0,525	5946
10	0,153	3,375	326	0,014	50734
			4015	0,034	43292
			1305	0,047	52021
			1994	0,084	23758
			2484	0,084	18000
			2795	0,153	...
	0,217	3,375	7852	0,054	146880
			8211	0,068	151044
			10380	1,081	128145
			11664	1,095	122779

Figura 71. Tabella n.° 1: prove a flessione realizzate da Buffon.

Commentando la tabella n.1, Gauthey sottolinea l'irregolarità con cui sono state fatte le osservazioni riguardo ai valori delle frecce indicate nella quinta colonna: a volte le prime frecce registrate hanno valori troppo piccoli, a volte valori molto grandi. Per determinare il *momento di elasticità* relativo a ciascun elemento, Gauthey ha utilizzato un grafico riportato in figura 75: in ascissa sono indicati i carichi, in ordinata i valori della freccia.

Segue la tabella n° 2, con i carichi applicati e le relative frecce registrate in tre prove a flessione condotte da Aubry. È stato registrato un maggior numero di prove, i cui valori, in termini di freccia della curvatura, seguivano lo stesso andamento delle prove di Buffon¹⁸³.

¹⁸³ "Les flèches de courbure y ont été observées en plus grand nombre; elles suivent les même lois que dans les expériences de Buffon" in Émiland Marie Gauthey, *Traité de la construction des ponts*, Paris, Firmin Didot, 1809, vol. II, p. 38

N° 2.

Expérience de M. Aubry sur la flexion du bois de chêne chargé horizontalement.

Numéros des expériences.	Largeur des pièces = a.	Hauteur des pièces = b.	Distances des points d'appui = c.	Charges portées = P.	Flèches correspondantes = f.	Rapports des charges aux flèches = $\frac{P}{f}$.
1 ^{re} .	mètre. 0,081	mètre. 0,081	mètres. 3,898	kilogrammes.	mètre.	kilogrammes.
				122	0,027	4518
				188	0,034	5426
				276	0,081	3407
				565	0,108	5380
				482	0,162	2796
				538	0,217	2479
				576	0,244	2561
				604	0,312	1936
2 ^e .	0,027	0,068	1,624	74	0,007	10572
				125	0,014	8786
				138	0,018	8222
				172	0,025	7478
				197	0,023	7880
				237	0,027	8778
				245	0,036	6730
				293	0,041	7195
				371	0,054	6870
3 ^e .	0,027	0,054	1,624	75	0,025	5174
				98	0,029	5379
				122	0,036	5389
				147	0,043	5267
				171	0,059	2898
				196	0,068	2882
				208	0,077	2704
				220	0,086	2558
				255	...	...

Figura 72. Tabella n.°2. Prove a flessione realizzate da Aubry.

Anche nella tabella n.°2 nell'ultima colonna sono indicati i valori del rapporto tra carico e freccia, utili a determinare i valori del *momento di elasticità* mediante la formula derivata dalla (42) e dalla (44):

$$3 \cdot \varepsilon + 2 \cdot \varepsilon'' \cdot b \cdot c = \frac{1}{8} \cdot \frac{c^3}{ab^2} \cdot \frac{P}{f} \quad (46)$$

dove:

a è la base

b l'altezza della sezione trasversale

c è la lunghezza dell'elemento.

La terza tabella riporta i dati delle prove sperimentali condotte da Lamandé su elementi compressi.

N° 3.

Expériences de M. Lamandé sur les bois chargés verticalement.

Numéros des expériences.	Eclaircissage des pièces = a = b.	Longueur des pièces = c.	Première flèche de courbure observée.	Poids qui a causé la première inflexion.	Poids moyen = Q.	Poids qui a causé la rupture.	Poids moyen.	Durée de l'expérience
	mètre.	mètre.	mètre.	kilogrammes.	kilogram.	kilogram.	kilogram.	heures.
1	0,084	0,649	0,002	5571	5500	7105	8861	4
			0,001	6148		9680		6
			0,003	6418		9688		18
			0,001	5341		9373		8
2	0,084	1,298	0,002	2865	2865	3384	2693	21
			0,004	2843		3337		27
			0,004	2865		6169		6
			0,004	2865		3665		6
3	0,084	1,948	0,004	1439	1325	3295	3309	6
			0,004	1500		3402		5
			0,006	1250		3360		5
			0,004	1230		3681		5
4	0,081	0,649	0,002	15727	18129	23165	23163	27
			0,001	20331		23165		24
5	0,081	1,298	0,004	9233	9246	10836	16463	29
			0,004	8476		16737		5
			0,003	9334		16437		9
			0,007	9918		12810		17
6	0,081	1,948	0,004	4146	4795	12245	11619	7
			0,003	4413		15176		19
			0,002	3090		10877		4
			0,006	4610		13022		18
			0,004	3794		16774		6
7	0,108	0,649	0,002	28129	27211	43301	40921	11
			0,001	28496		50051		8
			0,001	23497		48105		23
			0,002	30667		42944		28
			0,001	26264		40206		30
8	0,108	1,298	0,001	28668	21488	43798	40495	8
			0,002	13498		39090		5
			0,002	22966		33290		19
			0,001	20819		43804		19
9	0,108	1,948	0,004	9812	9665	29152	27629	7
			0,006	7878		29888		5
			0,004	8417		24374		22
			0,006	12545		28622		22

Figura 73. Tabella n° 3. Prove a compressione realizzate da Lamandé.

Nella quarta e quinta colonna sono riportati i valori della prima freccia ed i carichi che la generano, la cui media è riportata nella colonna successiva. La formula utilizzata per esprimere il *momento di elasticità* è riportata nelle note di commento della tabella:

$$3 \cdot \varepsilon + 2 \cdot \varepsilon'' \cdot b \cdot c = \frac{24}{\pi^2} \cdot \frac{c^2}{a \cdot b^2} \cdot Q \quad (47)$$

La quarta tabella riepiloga i risultati delle tabelle precedenti; nella quinta colonna sono indicati i dati relativi al *momento di elasticità* ricavati dalla prova sperimentale; nella sesta colonna sono riportati i valori determinati mediante la formula del *momento di elasticità*. Il confronto tra il *momento di elasticità* osservato nella prova e il *momento di elasticità* calcolato secondo la (46), è riportata in forma di diagramma in figura 75.

N° 4.

Évaluation du moment d'élasticité du bois de chêne, déduite des expériences précédentes.

Numéros des expériences.	NOMS des AUTEURS.	Valeurs, pour les bois chargés horizontalement, de $\frac{P}{l}$	Valeurs de la fonction $b c$.	Valeurs du moment d'élasticité $= 3 e' + 2 e'' b c$.		Différences relatives entre les valeurs de l'élasticité, observées et calculées.	
				données par l'observation	données par le calcul.	positives.	négatives.
1	M. Lamandé.	kilogrammes	mètres.	kilogrammes.	kilogrammes.	"	0,467
4	idem.	"	"	"	"	"	0,492
2	idem.	"	"	"	"	0,288	"
7	idem.	"	"	"	"	"	1,597
5	M. Aubry.	5584	0,08770	25011600	53955219	"	1,544
3	M. Lamandé.	"	0,10309	77467900	54825988	0,292	"
5	idem.	"	0,10315	71278400	54826056	0,251	"
2	M. Aubry.	10572	0,11043	43356040	33096907	"	0,215
8	M. Lamandé.	"	0,14018	69883000	56617576	0,190	"
6	idem.	"	0,13779	85222550	37317388	0,509	"
9	idem.	"	0,21044	70785800	60208251	0,149	"
8	Buffon.	165542	0,28154	73202300	63851791	0,151	"
1	M. Aubry.	4518	0,51374	62959986	63389917	"	0,042
10	Buffon.	52021	0,48253	74206600	74105041	0,001	"
7	idem.	21296	0,56281	78217205	78217203	"	0,000
"	idem.	146889	0,77354	81962000	89079218	"	0,087
9	idem.	4721	0,96470	87323000	98737047	"	0,128
6	idem.	5805	1,12560	112056000	106980350	0,043	"
Différences relatives moyennes, sans avoir égard aux expériences n° 7 de M. Lamandé, et n° 5 de M. Aubry.						0,184	0,202

Figura 74. Tabella n.° 4. Calcolo valore momento di elasticità.

I punti del diagramma riportato in figura 75 sono ben interpolati da una retta; questa mostra chiaramente che le due espressioni del momento di elasticità non sono uguali ma, come sempre, la sperimentazione suggerisce come andrebbe corretta la formulazione teorica per renderla capace di descrivere il fenomeno fisico.

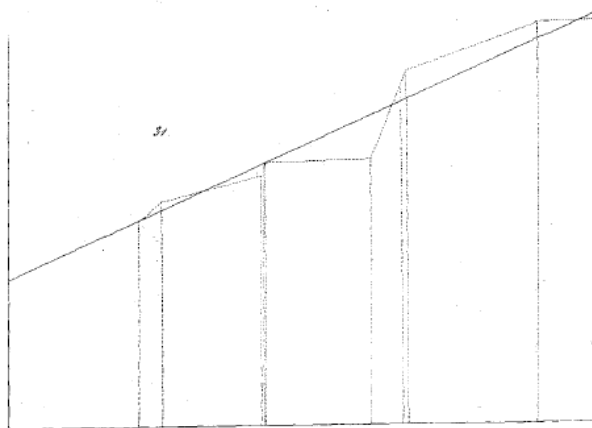


Figura 75. Momento di elasticità sperimentale e teorico.

2.6 Il dimensionamento degli elementi in funzione dei carichi

Nel percorso verso la soluzione del problema della flessione, viene affrontato lo studio del testo di Joseph Mathieu Sganzin (1750-1837) in quanto costituisce uno dei primi strumenti con i quali la cultura ingegneristica europea ha formato le prime generazioni di allievi della *West Point Academy*. Il *Programme ou résumé des leçons d'un cours de constructions* costituirà infatti per molto tempo il testo di riferimento per il corso di meccanica tenuto da Claude Crozet prima che venga pubblicata la traduzione del *Résumé des Leçons* di Navier ad opera di Dennis Hart Mahan nel 1837.

Tra il 1805 ed il 1809 Sganzin pubblica il *Traité de géométrie descriptive*, nel 1806 il *Programmes du cours de géométrie descriptive appliquée à l'art de l'ingénieur des ponts et chaussées* e nel 1809 pubblica il *Programme ou résumé des leçons d'un cours de constructions*. Le trenta lezioni del corso di costruzioni sono suddivise in tre parti. La prima parte comprende le prime dieci lezioni e riguarda i materiali da costruzione: malta, calce, mattoni, intonaco. Le lezioni nove e dieci sono dedicate al legno: la nona lezione riguarda il legno come materiale da costruzione, la decima tratta della resistenza meccanica. La seconda parte raggruppa le lezioni dalla undicesima alla ventunesima ed affronta il tema delle strade e dei ponti; l'ultimo paragrafo della ventunesima lezione è dedicato ai ponti in legno. La terza parte infine si occupa delle opere relative alla navigazione ed ai porti di mare.

Come accennato, il testo di Sganzin ha costituito un ruolo importante nella formazione della *West Point Academy*, inizialmente adottato in lingua francese, tradotto poi in inglese nel 1827. Ai fini di questo studio è stata consultata anche la seconda edizione inglese, pubblicata a Boston, *An Elementary course of civil engineering translated from the French*, e confrontata con la terza edizione francese sulla quale è stata fatta la traduzione. Vengono presi in considerazione e confrontati sia il testo in

lingua francese sia la traduzione inglese, oltre a due traduzioni in italiano: quella del 1832 per la stampa di Gaspare Truffi e quella del 1850 stampata da Giuseppe Antonelli.

La lezione IX della edizione francese affronta l'argomento del legno come materiale da costruzione, impiegato nelle strutture di fondazione quando il terreno non offre una resistenza sufficiente, nelle strutture di copertura, nella realizzazione di scale, ponti e per elementi decorativi o come sostituto della muratura quando è necessario contenere tempi e costi di costruzione. Altri impieghi del legno nelle costruzioni sono costituiti da impalcature e centine. Vengono poi enunciati tre punti importanti: “per l'economia del legno, la cui disponibilità si riduce sempre di più è necessario pertanto:

1. che le strutture siano realizzate con legno sano (più resistente);
2. che gli elementi siano disposti nella maniera più vantaggiosa (economia di elementi e di sezioni trasversali);
3. infine che le dimensioni siano calcolate secondo la resistenza che devono fornire”¹⁸⁴.

Nel tentativo di mettere a fuoco l'adozione dello strumento di calcolo per la determinazione degli elementi strutturali in legno, il terzo punto riveste un ruolo particolarmente significativo.

Si è ritenuto interessante analizzare e confrontare i testi di altre edizioni e quelli tradotti in inglese ed in italiano.

La traduzione inglese del testo¹⁸⁵ riporta:

1. Le opere di carpenteria dovrebbero essere realizzate solo con legno stagionato¹⁸⁶
2. Gli elementi devono essere disposti nel modo più vantaggioso¹⁸⁷
3. Le dimensioni dovrebbero dipendere dai carichi che gli elementi devono sostenere¹⁸⁸”.

Quest'ultimo punto costituisce un elemento di novità, anche solo per il fatto di essere espresso in modo esplicito.

Questa particolarità riscontrata nella traduzione inglese rispetto alla terza edizione francese ha suggerito di prendere in considerazione anche la traduzione italiana nell'edizione di Gaspare Truffi del 1832 eseguita dall'ingegner Giuseppe Cadolini sulla medesima edizione francese.

¹⁸⁴ “Résumé de la neuvième leçon. *Du Bois considéré comme moyene de construction.*

Les bois sont employés dans la construction des édifices, ou simplement comme moyens d'exécution... On fait également usage des bois pour la construction des ponts en charpente pour celle des estacades; enfin, ils servent à une grande quantité d'ouvrages pour l'exécution desquel ils remplacent la maçonnerie, lorsque, par des motifs d'économie dans les dépenses, ou par le désir d'une prompte jouissance, on se détermine à employer le bois. Pour l'économie des bois, qui, de jour en jour, deviennent plus rares, il est nécessaire:

1. Que les charpentes en général soient composées de bois sains;
2. Que les pièces soient disposées de la manière la plus avantageuse
3. Enfin, que les dimensions en soient calculées d'après les fonctions de résistance qu'elles doivent remplir.

Nous allons nous occuper des bois sous le rapport de ces trois considérations importantes.” in Joseph Mathieu Sganzin, *Programme ou résumé d'un course de construction: avec des applications tirés spécialement de l'art de l'ingénieur des ponts et chaussées*, Liege, Dominique Avanzo, 1840-1844, p. 61

¹⁸⁵ Joseph Mathieu Sganzin, *Elementary course of civil engimeering* (translated from the french), with notes and applications adapted to United States, Boston, Hilliard, Gray, Little and Wilking, 1827

¹⁸⁶ “Carpentry should be composed of dry wood only” ibidem, p. 51

¹⁸⁷ “The pieces used should be disposed in the most advantageous manner” ibidem, p. 51

¹⁸⁸ “The dimension should depend upon the weight which the pieces are to sustain”, ibidem, p. 51

Il testo tradotto così riporta:

“Lezione IX - Resistenza del legno.

Nella costruzione di edifici, il legno vi entra, o come parte integrante, o provvisoriamente...

...s'adopera pure nella costruzione di ponti in legno, e ne' steccati; e per dir tutto, in molte occorrenze tien luogo di muratura, impiegandosi per titoli economici, o per desiderio di sollecito godimento.

A risparmio di legname, che sempre più iscarspeggia, necessita:

1. che le orditure in genere sieno fatte con legno robusti;
2. che i membri sieno distribuiti nel modo più vantaggioso;
3. finalmente che le dimensioni bastino alle funzioni di resistenza a cui si destinano.

Dovendo ora trattenerci de legnami, terremo a soggetto queste tre importanti considerazioni.”¹⁸⁹

In questa traduzione non viene rivolto esplicito riferimento alla relazione tra le dimensioni degli elementi di legno ed i carichi che gravano su essi.

La consultazione della traduzione dell'edizione italiana del 1850, pubblicata a Venezia da Giuseppe Antonelli, non presenta nessuna differenza rispetto alla edizione italiana del 1832 per ciò che riguarda il contenuto di questa lezione (che in questa edizione è indicata come Lezione VI):

“Per l'economia dei legnami, che, di giorno in giorno, diventano più rari, è necessario:

1. che le armature in generale sieno composte di legnami sani e d'una durata relativa alla loro destinazione;
2. che i pezzi sieno disposti nella maniera la più vantaggiosa;
3. che le dimensioni ne sieno calcolate dietro le funzioni di resistenza a cui devono adempiere.

Noi andiamo ad occuparci dei legnami sotto il rapporto di queste tre considerazioni importanti.”¹⁹⁰

Sganzin indica poi le specie legnose più adatte alle costruzioni: il rovere e l'abete sono le migliori. La definizione delle parti principali che costituiscono un albero e le informazioni sulle qualità e sui difetti del legno sono premessa necessaria per definire la resistenza ed il conseguente impiego del legname.

Segue un'analisi delle parti dell'albero e delle relative caratteristiche e difetti seguita dall'indicazione delle condizioni più favorevoli per il taglio e per la conservazione degli alberi. Il paragrafo si conclude con un'annotazione interessante riguardo alla disposizione degli elementi in una struttura in legno che per Sganzin gli studenti dovrebbero già conoscere: la disposizione consigliata è quella a triangolo, nella quale gli angoli non possono subire variazioni, e le lunghezze dei lati non cambiano; questa condizione non si verifica se si opta per una soluzione a quattro o più lati, in cui gli angoli possono

¹⁸⁹ Joseph Mathieu Sganzin, *Programma o sunti delle lezioni di un corso di costruzione di M. J. Sganzin*, prima versione italiana eseguita sulla terza edizione parigina dall'ingegnere G. Cadolini, Milano, Gaspere Truffi, 1832

¹⁹⁰ Joseph Mathieu Sganzin, *Nuovo corso completo di pubbliche costruzioni dietro il celebre programma di Mattia Giuseppe Sganzin*, compilato da Reibell, prima traduzione italiana con aggiunte ricavate dai moderni giornali tecnici francesi, inglesi e tedeschi e dalle più recenti opere di pubbliche costruzioni e segnatamente di quelle concernenti le strade ferrate, i nuovi ponti americani e l'illuminazione a gas...per cura dell'ingegnere Dr. Rinaldo Nicoletti, Venezia, Giuseppe Antonelli, 1850, vol. 1, p. 88

cambiare senza variazioni di lunghezza degli elementi. Questo principio, sottolinea Sganzin, porta a conseguenze significative ed è continuamente applicato nelle opere di carpenteria.

Il capitolo X è dedicato alla resistenza del legno: Sganzin ripercorre brevemente i passi più significativi intrapresi a questo proposito a partire da Galilei che per primo, nel corso del XVII secolo, ha applicato le leggi della meccanica alla resistenza dei solidi in generale, seguito da Leibnitz e Mariotte.

Il percorso prosegue con la ripresa del lavoro dell'accademico Parent che nel 1707 e nel 1708 ripete gli esperimenti di Mariotte per scoprire se la sua teoria, di grande utilità nella pratica costruttiva, può essere applicata anche al legno. Secondo Sganzin gli esperimenti, condotti su campioni non vincolati agli estremi e su campioni con estremi incastrati, riguardavano elementi di dimensioni troppo piccole ed erano stati svolti con poca cura. Il risultato delle prove conferma che la resistenza non corrisponde alla legge ricavata da Mariotte che aveva correttamente individuato la distribuzione degli sforzi nella sezione trasversale. Nonostante l'incertezza dei risultati, Parent raccoglie i dati organizzandoli in tabelle secondo la legge proposta da Galileo e confermata da Leibnitz: i campioni sottoposti a prova avevano lunghezza variabile tra 6 e 36 piedi e sezione trasversale con lato compreso tra 10 e 18 pollici.

La campagna di prove condotta nel 1729 da Bélidor¹⁹¹ è utile alla determinazione della resistenza del legno utilizzando provini incastrati agli estremi. I campioni però, specifica Sganzin, sono anch'essi di piccole dimensioni; i risultati danno valori confrontabili con quelli di Parent, e ben si accordano anche con la legge messa a punto da Galileo. I risultati inoltre mostrano che quando il provino è incastrato agli estremi, la resistenza è maggiore di 1/3 rispetto alla condizione di estremi in appoggio. Sganzin riconosce che questo risultato si accorda con gli esperimenti condotti da Parent, ma non è d'accordo¹⁹². È a Musschembroek che si devono, secondo Sganzin, i primi risultati decisivi sulla resistenza e sulla rottura nel caso di provini incastrati agli estremi, in grado di portare un carico doppio rispetto al provino non vincolato. I risultati ottenuti dalle prove sono conformi ai primi esperimenti di Mariotte e alla teoria di Eulero. Le prove sono state condotte prestando molta attenzione alla qualità del legno e cercando di evitare qualunque causa che possa ridurre la resistenza. Poiché però il legno non è esente da difetti e non è sempre possibile rimuovere le cause che ne riducono la resistenza, si rende necessaria l'adozione di un coefficiente che descriva il comportamento reale dell'elemento.

La traduzione della edizione italiana di Gaspare Truffi del 1832 all'interno della Lezione X indica a proposito della resistenza degli elementi di legno:

¹⁹¹Vedi paragrafo 1.1.2

¹⁹² "Les expériences de Bélidor indiquent encore que les pièces encastées ont un tiers plus de force que celles qui reposent librement sur leurs appuis. Ce dernier résultat, quoique conforme à celui qu'on peut conclure de quelques expériences semblables de Parent, est cependant une erreur." in Joseph Mathieu Sganzin, *Programme ou résumé d'un cours de construction: avec des applications tirés spécialement de l'art de l'ingénieur des ponts et chaussées*, Liege, Dominique Avanzo, 1840-1844, p. 72

“... In quest’opera di Girard, che non è possibile l’analizzare, trovansi delle considerazioni nuove ed interessanti sulla resistenza dei legni col mezzo delle quali si possono facilmente calcolare le dimensioni opportune per le resistenze assolute, e le saette della curvatura iniziale, alle quali la prudenza insegna arrestarsi e che tanto importa di conoscere per la solidità delle costruzioni.”¹⁹³

La lezione X della edizione in lingua inglese fa sempre riferimento alla resistenza del legno e del ferro. Il *Traité Analitique de la Résistance des Solides, et des solides d’égale résistance*, di Girard contiene, secondo Sganzin, la teoria della resistenza più completa che si possa trovare. Il limite della *resistenza negativa assoluta* non è quello di individuare il valore del carico in grado di determinare la rottura del campione, ma il carico che inizia a far inflettere il provino. Gli esperimenti di Girard sono condotti su un campionario molto vasto; i risultati sono raccolti in tabelle in cui sono registrati tutti i dati ritenuti importanti, tra questi il valore della freccia in funzione del carico applicato e della resistenza negativa o positiva rispetto ai valori della freccia. A questo proposito la traduzione inglese del testo di Sganzin riporta in nota dal testo di Barlow¹⁹⁴ la formula della freccia f di un elemento appoggiato agli estremi e soggetto ad un peso W , che è pari a:

$$f = \frac{L^3 \cdot W}{B \cdot D^3} \quad (48)$$

dove L è la lunghezza dell’elemento, B la base della sezione trasversale, D l’altezza.

Nel caso in cui l’elemento sia incastrato ad un estremo e libero nell’altro, il valore dell’altezza della sezione trasversale indicata è pari a:

$$D = \left[L \cdot \sqrt{\frac{a \cdot W}{0,6}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (49)$$

se $B = 0,6 \cdot D$.

In chiusura della seconda parte, nella XXI lezione dell’edizione francese dedicata ai ponti in legno, per quanto riguarda il dimensionamento della sezione trasversale degli elementi Sganzin fa riferimento alla legge di Galileo in base alla quale la resistenza di un elemento è direttamente proporzionale alla base della sezione ed al quadrato dell’altezza, ed inversamente proporzionale alla lunghezza dell’elemento ($R = k \frac{b \cdot h^2}{l}$).

Il secondo punto fa riferimento alle prove condotte da Girard, dalle quali è possibile ricavare il valore del rapporto tra la freccia ed il carico che la determina. Infine in Sganzin trovano spazio alcune considerazioni riguardo alla resistenza in funzione della tipologia dei vincoli (incastrato o appoggio) e

¹⁹³ Joseph Mathieu Sganzin, *Programma o sunti delle lezioni di un corso di costruzione* di M. J. Sganzin, prima versione italiana eseguita sulla terza edizione parigina dall’ingegnere G. Cadolini, Milano, Gaspare Truffi, 1832

¹⁹⁴ Peter Barlow, *A treatise on the strength on timber, cast iron, malleable iron, and other materials; with rules for application in architecture*, London, John Weale, 1837

del carico (concentrato o distribuito). Inoltre Sganzin, con una corretta visione del problema, sostiene che la resistenza della trave cui è applicato un carico distribuito è doppia rispetto al caso in cui il carico è concentrato in mezzera.

Sulla base di queste considerazioni, regole e prove sperimentali, Sganzin è in grado di determinare le dimensioni della sezione trasversale di una trave in posizione orizzontale sulla quale agisce un determinato carico. Queste regole sono applicabili anche se la trave, per effetto del carico, si trova in posizione inclinata: viene considerata come se fosse orizzontale, sollecitata da una forza che agisce perpendicolarmente alle fibre, di cui è possibile calcolare la resistenza considerando la componente che agisce in direzione ortogonale.

2.7 Un apparato scientifico rigoroso reso facilmente accessibile

La lunga ricerca della soluzione al problema della flessione, espressa in termini corretti e al tempo stesso adatti all'impiego corrente, si compie con Claude Louis Navier (1785-1836), il quale, facendo sintesi della lunga riflessione che lo ha preceduto, sa rendere accessibili e facilmente applicabili le formule analitiche senza perdere in precisione per effetto della semplificazione.

Nel 1819 viene affidato a Navier l'insegnamento di *Mécanique appliquée* precedentemente tenuto da Joseph Armand Eisenmann; l'arrivo di Navier all'*École des Ponts et Chaussées* rappresenta un momento importante: fino ad allora infatti la pratica del progetto e le regole empiriche avevano continuato a prevalere sulla teoria fisico-matematica.

Le lezioni di Navier si differenziano molto da quelle del suo predecessore: Navier infatti fa ampio riferimento all'analisi e ai risultati più recenti della ricerca.

Dopo un solo anno di corso, Navier fa litografare gli appunti delle sue lezioni, fornendo ai suoi allievi un vero e proprio libro di testo: il *Résumé des leçons...sur l'application de la mécanique*, in cui, secondo uno schema che verrà ripreso da tutti i suoi successori, la materia è organizzata in tre parti. Una prima parte è dedicata alla resistenza dei solidi, la seconda parte alla meccanica dei fluidi, la terza parte riguarda la teoria delle macchine. Considerevolmente rivista, la prima parte del corso di Navier viene pubblicata da Firmin Didot nel 1826, prima di essere ripubblicata da Barré de Saint-Venant nel 1864. Le altre due parti del corso saranno pubblicate a loro volta nel 1838 in più edizioni litografate. I testi di Navier godranno di ampia diffusione tra gli ingegneri del XIX secolo. Il carattere innovativo delle sue lezioni contrasta con il contenuto ancora tradizionale del corso di meccanica. Spesso gli argomenti riguardano le macchine del XVIII secolo, macchine per piantare i pali in acqua e draghe, delle quali gli allievi devono realizzare i disegni, spiegare il funzionamento e calcolare alcuni effetti. Nonostante il buon livello del suo insegnamento, Navier è costretto ad adattarsi ad un sistema molto rigido. La mancanza di un collaboratore per la didattica lo costringe ad affrontare una sola delle tre

parti del corso ogni anno. Nel 1831 Coriolis viene affiancato a Navier nell'insegnamento del corso: a lui succederà poi nel 1836, anno della sua morte.

Il testo di Navier che ebbe maggior influenza nell'ingegneria del XIX secolo è certamente il *Résumé des leçons sur l'application de la mécanique* in cui è contenuto il suo insegnamento per gli allievi dell'*École des Ponts et Chaussées*.

La prima parte si suddivide a sua volta in quattro parti ed è composta da 30 lezioni perfettamente organizzate e di agevole lettura; l'opera pubblicata da Firmin Didot nel 1826 costituisce la testimonianza più fedele dell'insegnamento sulla resistenza dei materiali offerto da Navier agli allievi dell'*École*.

Nella prefazione del testo, Navier distingue tra la “resistenza elastica” e la “resistenza a rottura”¹⁹⁵.

L'impostazione innovativa del testo di Navier, rispetto ai trattati del secolo precedente, è costituita dall'abbandono dei metodi fondati sul “calcolo a rottura” (ossia sulla ricerca delle condizioni limite di equilibrio), per addentrarsi nello studio delle strutture “elastiche”. Egli infatti intende determinare non il carico che provoca la rottura di un elemento, ma il carico che può essere applicato senza che la deformazione subita dall'elemento continui ad aumentare nel tempo. Per determinare questo valore è necessario unire teoria ed esperienza.

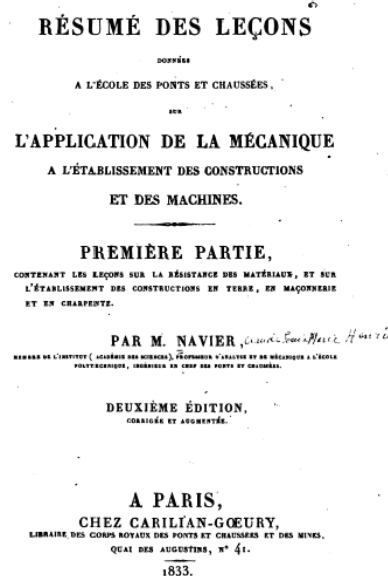


Figura 76. Frontespizio dell'edizione del 1833 del *Résumé des leçons* di Claude Louis Navier.

¹⁹⁵ “La connaissance de la force d'élasticité donne les moyens de calculer la quantité dont une pièce de charpente peut se comprimer, s'allonger, ou fléchir sous une charge donnée. La connaissance de la résistance à la rupture permet de déterminer la limite des poids qu'une pièce peut supporter” in Claude Louis Marie Henri Navier, *Résumé des leçons données à l'École des Pont et Chaussées sur l'application de la mécanique à l'établissement des constructions et des machines*, première partie, Paris, Firmin Didot, 1826 p. vij

La prima parte del *Résumé des leçons* si occupa, nella prima sezione, della resistenza dei corpi solidi. Nell' *Article I^{er}* Navier affronta il problema della resistenza a compressione, riportando i risultati delle prove sperimentali ottenuti da Rondelet¹⁹⁶ in termini di valori di resistenza a rottura per il legno di quercia (385 – 463 kg/cm²) e per il legno di abete (462 – 538 kg/cm²). Una breve annotazione osserva che questi valori non diminuiscono in maniera significativa se la lunghezza dell'elemento è pari a circa sette o otto volte l'altezza della sezione trasversale.

Vengono poi riportati i risultati delle prove sperimentali di Rennie¹⁹⁷ i cui valori sono inferiori ai precedenti (271 kg/cm² per la quercia e 135 kg/cm² per l'abete bianco). Gauthey¹⁹⁸ suggerisce di mantenersi entro i 160 kg/cm² per il legno di quercia, se non si vuole che si verifichino deformazioni eccessive. Le prove condotte da Thomas Tredgold¹⁹⁹ indicano valori di 108 kg/cm² per la quercia e 70 kg/cm² per l'abete. Ulteriori prove condotte da Charles Joseph Minard e da Charles Bernard Desormes nel 1822 su due campioni con giunto a dente semplice hanno portato a valori molto più elevati per il legno di quercia, pari a 530 kg/cm². Navier non riferisce di prove di resistenza condotte personalmente e anche per le prove a trazione adotta il medesimo procedimento. Dalle prove di Minard e Desormes viene proposta una tabella riportata in figura 77 in cui sono indicati i valori della lunghezza del campione sottoposto a trazione all'aumentare del carico applicato.

CHARGES.	LONGUEURS observées.
Kilogrammes.	Mètre.
0	1,016
1708	1,017
0	1,016
2411	1,0175
0	1,016
3114	1,01775
0	1,01625

Figura 77. Tabella di Minard e Desormes. Valori di allungamento di campioni sottoposti a forza di trazione.

¹⁹⁶ Jean Baptiste Rondelet, *Traité de l'Art de Bâtir*, Mantova, Fratelli Negretti, 1834, p. tome I.

¹⁹⁷ G. Rennie, *Philosophical Transactions*, 1818 *Annales de chimie et de physique*

¹⁹⁸ Émiland Marie Gauthey, *Traité de la construction des ponts*, Paris, Firmin Didot, 1809, tomo II, p. 44

¹⁹⁹ Thomas Tredgold, *Elementary principles of carpentry*, London, John Taylor, 1820, p. 60

Le osservazioni che seguono sono interessanti perché fino a questo momento le informazioni riguardo ad un elemento teso si limitavano ad esprimere (correttamente) il valore dello sforzo in funzione del rapporto tra la forza applicata e l'area della sezione trasversale. L'osservazione della prova e la misura dell'allungamento registrato porta alla considerazione che il legno sottoposto a trazione si allunga ma, se il carico viene rimosso, ritorna alla sua lunghezza iniziale²⁰⁰. Una formula abbastanza semplice esprime l'allungamento del campione nel caso specifico relativo alla prova in oggetto ma non viene presentata l'espressione valida in generale.

Il paragrafo dedicato alla resistenza del legno a flessione riporta i dati di alcune esperienze condotte da Duhamel su tre campioni in semplice appoggio con 23 piedi di luce e caricati con carico concentrato in mezzzeria. I tre campioni differiscono per sezione trasversale come indicato in figura 78.

LARGEUR des pièces.	HAUTEUR des pièces.	FLÈCHE de la courbure.
pouces.	pouces.	pouces.
10	9	3 $\frac{1}{2}$
10	11 $\frac{1}{2}$	2 $\frac{1}{2}$
12	13	1

Figura 78. Valori di deformazione per campioni di sezioni trasversali differenti sottoposti a flessione. Prove realizzate da Henri Louis Duhamel de Monceau.

Come per gli altri stati tensionali, anche per la flessione Navier si serve dei risultati delle prove sperimentali condotte su campioni di varie specie e dimensioni, a partire da quelle di Charles Louis Aubry, di Charles Dupin, di Jean Baptiste Rondelet, Peter Barlow, e Thomas Tredgold. Questo gli permette di verificare immediatamente le formule ricavate nella prima sezione all'*Article III, De la résistance d'un corps primitique a la flexion produite par un effort dirigé perpendiculairement a la longueur de ce corps*, evitando di predisporre l'apparato e di effettuare le prove. La sottomissione dei dati sperimentali alla verifica di una legge inizialmente data come ipotesi costituisce il passaggio

²⁰⁰ "Il résulte de cette expérience que le chêne s'allonge (sans avoir perdu la faculté de revenir à sa longueur primitive, après avoir été déchargé) de $\frac{1}{629}$ pour une charge de 213k par centimètre carré de la section

transversale. Cela revient à un allongement de 0,0007464 pour une charge de un kilogramme par millimètre carré de la section transversale." Claude Louis Marie Henri Navier, *Résumé des leçons données à l'École des Pont et Chaussées sur l'application de la mécanique à l'établissement des constructions et des machines*, première partie, Paris, Firmin Didot, 1826 p. 19

finale del metodo galileiano. Nell'articolo III Navier espone sinteticamente gli effetti su corpi prismatici di forze di trazione e compressione, per passare poi ad analizzare gli effetti della flessione. Viene preso in considerazione un solido incastrato ad un estremo e libero nell'altro, soggetto ad un carico concentrato P applicato nell'estremo non vincolato. Perché sia garantito l'equilibrio è necessario:

1. che le forze di trazione e compressione generate all'interno della sezione trasversale "facciano nascere" delle forze verticali la cui risultante sia uguale e contraria a P ²⁰¹;
2. che la somma delle forze orizzontali causate dall'accorciamento e dall'allungamento sia nulla²⁰²;
3. che la somma dei momenti delle forze verticali e orizzontali e del carico P rispetto all'asse aa' sia nulla.²⁰³

Nell'*Article X*, paragrafo 579 della quarta sezione, Navier affronta l'argomento dei ponti in legno. Nella premessa introduttiva, Navier precisa che nella costruzione di ponti è necessario rispettare tre condizioni fondamentali: 1° che l'equilibrio sia stabile; 2° che le parti di ogni elemento abbiano la resistenza sufficiente per resistere ai pesi permanenti della costruzione; 3° che queste parti possano resistere ai "sovraccarichi" in determinati punti dell'impalcato²⁰⁴.

La trattazione successiva viene suddivisa in tre parti a partire dal caso più semplice dei ponti la cui luce non è particolarmente ampia, generalmente costituiti da un impalcato sostenuto da travi e puntoni. Sulla base di equazioni di equilibrio, Navier determina il valore degli sforzi massimi agenti all'interno della trave dell'impalcato: per quanto il calcolo non sia particolarmente complesso, le formule si rivelano di non semplice applicazione nella pratica.

Il grande pregio delle lezioni di Navier, riscontrabile nel *Résumé*, consiste proprio nel semplificare queste formule rendendole accessibili e facilmente applicabili senza perdere in precisione.

²⁰¹ "1. que les extensions et compressions des fibres aient fait naître, dans cette section, des forces verticales dont la somme égale le poids P ", ibidem, p. 44

²⁰² "2. que la somme des forces horizontales produites par ces extensions et compressions soit nulle", ibidem, p. 44

²⁰³ "3. que la somme des momens des forces verticale set horizontales dont il s'agit, et du poids P , pris par rapport à l'axe fixe aa' , soit nulle", ibidem, p. 44

²⁰⁴ "On doit dans l'établissement de ces construction avoir principalement égard aux conditions suivantes: 1° que l'équilibre soit stable ; 2° que les pièces aient la force suffisante pour résister au poids permanent de la construction, et aux surcharges qui peuvent être réparties sur toute l'étendue du plancher ; 3° que ces pièces puissent également résister aux surcharges qui seraient placées dans des points déterminés du plancher", ibidem, p. 382

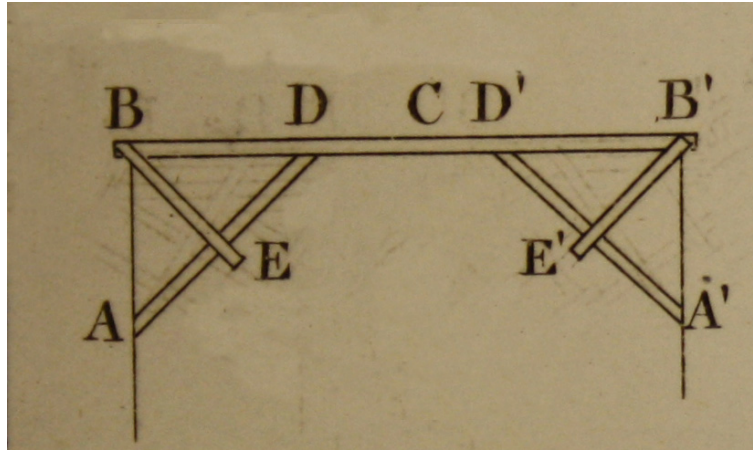


Figura 79. Struttura di ponte in legno con puntoni (AD) e contraffissi (BE).

Viene considerato solo il tratto DD', indicato in figura 79, come se fosse appoggiato agli estremi, soggetto ad un carico distribuito p .

La formula semplificata per il calcolo dello sforzo massimo agente nell'impalcato, nel caso in cui la sezione trasversale retta dell'impalcato sia rettangolare (base b e altezza c) risulta essere:

$$R' = \frac{p}{b \cdot c} \cdot \left[\left(a + \frac{1}{2} a' \right) \cdot \tan \alpha + \frac{3a^2}{c} \right] \quad (50)$$

dove:

R' è lo sforzo massimo nella mezzeria dell'impalcato (preso in esame il tratto BC (o B'C) pari a metà impalcato) [F/l^2]

p è il carico uniformemente distribuito sull'impalcato [F/l]

a e a' sono rispettivamente le distanze CD e BD indicate in figura 79 [l]

$a + 1/2 a'$: lunghezza di influenza di metà impalcato [l]

α : angolo BAD

C : sezione di mezzeria dell'impalcato (punto di riferimento per il calcolo dello sforzo)

AD : puntone

BE : contraffisso

$p(a + 1/2 a')$ = reazione verticale agente in D

$p(a + 1/2 a') / \sin \alpha$ = componente agente nel puntone AD in direzione assiale

$p(a + 1/2 a') \tan \alpha$ = componente agente nel puntone AD in direzione DD'

Facendo riferimento a tre diverse condizioni di carico per l'impalcato (carico concentrato in mezzeria, carico uniformemente distribuito e una combinazione delle due precedenti), Navier indica per ciascun caso la formula per determinare il carico massimo che la trave è in grado di sopportare, sulla base di equazioni di equilibrio, malgrado la struttura considerata sia iperstatica. In queste tre differenti

condizioni di carico Navier sostiene che il punto in cui avverrà la rottura si trova nella mezzeria della trave.

Quando la distanza tra i punti d'appoggio BB' è tale da non permettere di utilizzare una trave unica, è necessario consolidarla mediante puntoni, fissati a sotto-travi come indicato in figura 80.

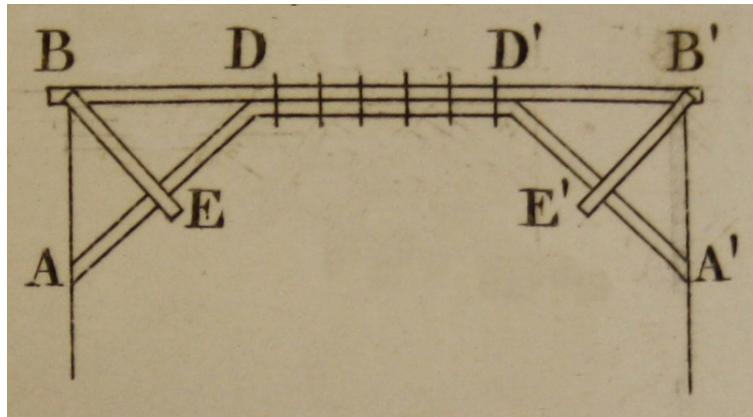


Figura 80. Struttura di ponte in legno con puntoni, contraffissi e sottravi poste nella parte centrale dell'impalcato.

All'aumentare di questa distanza è necessario impiegare un sistema di puntoni ($BE, B'E', D_2E_2, D_1E_1, DE$, in figura 81) che possono essere realizzati in un unico elemento o in più elementi; in ogni caso, poiché caricati di punta, è necessario che non siano eccessivamente lunghi o snelli per evitare fenomeni di instabilità.

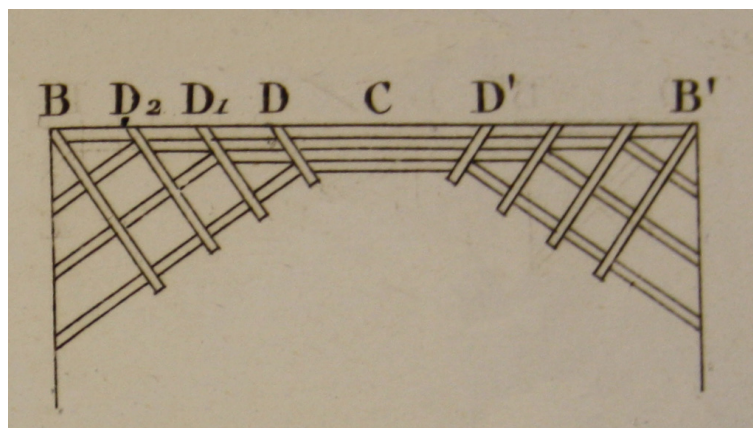


Figura 81. Struttura di ponte in legno con più puntoni e contraffissi e sottravi poste nella parte centrale dell'impalcato.

Alcune modalità di deformazione di elementi snelli in funzione delle condizioni di vincolo sono indicate in figura 82.

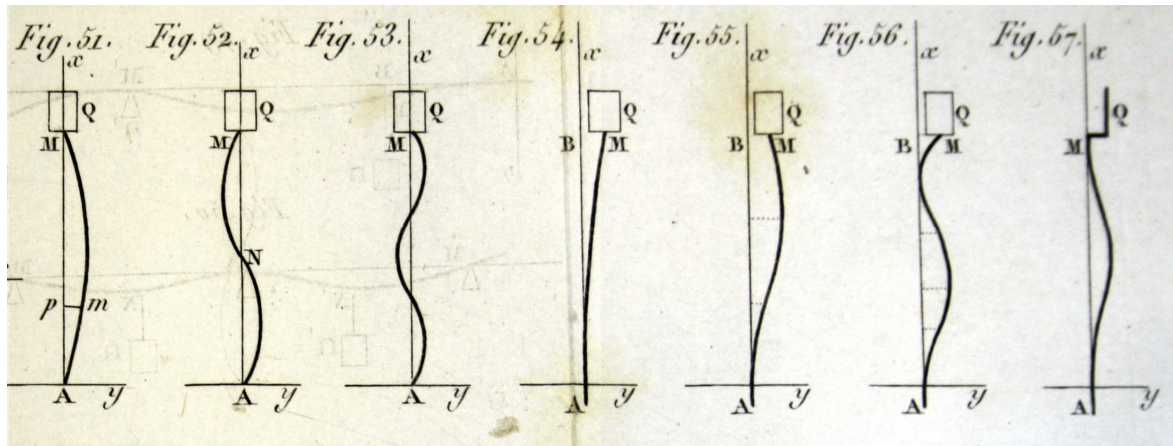


Figura 82. Configurazioni deformate di aste caricate di punta.

La stabilità del sistema globale dipende anche dalle modalità di collegamento degli elementi, che devono essere realizzate con elementi metallici e dalla posizione delle sottotravi che devono essere collegate con le spalle secondo lo schema di figura 83.

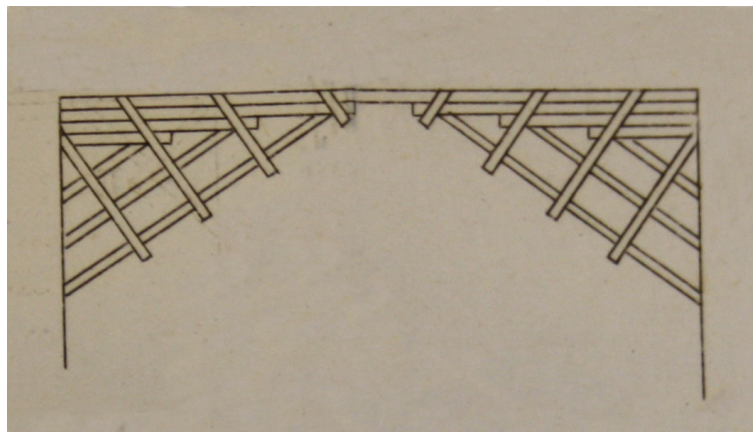


Figura 83. Struttura di ponte in legno con puntoni, contraffissi e sottotravi poste nella parte laterale dell'impalcato.

I puntoni e le sottotravi che appoggiano sulle pile o sulle spalle esercitano spinte, le cui componenti orizzontali tendono ad allontanare le spalle, mentre quelle verticali contribuiscono a mantenere la spinta all'interno della base di appoggio. Per ridurre l'effetto della forza orizzontale sugli appoggi, si può inserire un tirante che assorba la spinta come in figura 84.

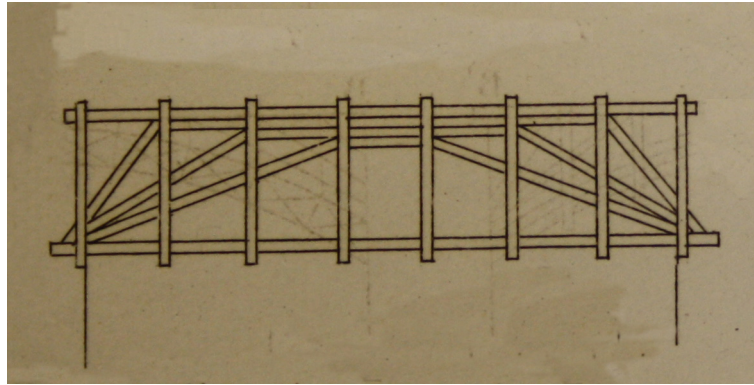


Figura 84. Struttura di ponte con un tirante che assorbe le spinte orizzontali dell'impalcato sulle spalle.

Se il peso della struttura e i sovraccarichi sono uniformemente distribuiti sull'impalcato, e se la freccia è modesta, la configurazione che assume la deformata è quella di un arco di parabola. Navier sostiene che la curva non debba essere esattamente un arco di parabola, in quanto il carico non è uniformemente distribuito ma è più elevato in corrispondenza degli appoggi rispetto alla parte centrale.

Quando tra la distribuzione del carico e la geometria dell'arco esiste una relazione tale per cui l'arco è solo teso o solo compresso, gli archi vengono considerati come *corps homogène*. Questa curva particolare viene definita da Navier come *courbe d'équilibre*.



Figura 85. Ponte ad arco in legno. L'arco è formato da una serie di elementi sovrapposti e bloccati da flange.

Gli strati che formano l'arco sono posti a contatto uno sull'altro e sono bloccati da flange; le giunzioni all'interno di ciascun elemento devono essere disposte in modo da essere sfalsate con quelle degli strati adiacenti. Il momento flettente all'interno dell'arco è pari alla somma dei momenti flettenti di ogni lamina. Se questi elementi non sono semplicemente sovrapposti l'uno sull'altro ma sono collegati con giunti a dardo di giove o serrati con connettori a taglio e se i giunti sono sfalsati, il regime flessionale differisce di poco da quello di un solido costituito da un unico elemento avente per altezza la somma delle altezze degli elementi, a condizione del buon funzionamento dei connettori.

Capitolo 3

La ricaduta delle nuove teorie nella pratica costruttiva dei ponti in legno

3.0 Premessa

La grande apertura a quanto di nuovo ed interessante accade oltre il confine francese caratterizza da sempre l'*École des Ponts et Chaussées*. Nei primi decenni del XIX secolo grande curiosità ed interesse si rivolgono alle nuove tipologie strutturali di ponti in legno che caratterizzano negli Stati Uniti l'intensa attività di costruzione di strade e ferrovie e si accompagnano ad una numerosa serie di brevetti in materia. La Francia è incuriosita dalla razionalizzazione del progetto che, imposta dalle esigenze di standardizzazione del mondo americano, porta alla definizione di schemi semplici, ripetibili e versatili. L'esperienza francese, a sua volta, ha da offrire una nuova sapienza razionalizzata e formalizzata, la nuova scienza del costruire. Il risultato di questa "fusione" costituisce l'inizio di un nuovo approccio, un po' per tentativi, tutto da sviluppare, inventare, approfondire.

In questo contesto, la semplicità della tipologia strutturale proposta e brevettata da Ithiel Town ha consentito l'applicazione della teoria della trave inflessa di Navier, anche se, di necessità, sono state operate alcune semplificazioni sulla schematizzazione della struttura, come viene dettagliato nel seguito.

Un altro aspetto che merita di essere evidenziato è che le prime applicazioni della teoria di Navier si riferiscono tutte a procedimenti di verifica di strutture esistenti e non al progetto di nuove. Questo non stupisce se si considera che la logica deduttiva tipica del procedimento scientifico porta direttamente alla formulazione di criteri di verifica di strutture esistenti e solo in un secondo tempo adatta le procedure alle esigenze del progetto, cioè di ricerca di dimensioni appropriate per gli elementi strutturali. Nel periodo considerato, le tipologie strutturali di ponti in legno sottoposte a verifica a flessione si identificano con strutture provvisorie e temporanee, spesso finalizzate alla realizzazione di altre opere o per il rapido ripristino di strutture in muratura danneggiate o demolite.

L'ultima nota infine riguarda il tipo di verifica utilizzato: viene infatti presa in considerazione solo l'esigenza di verifica della resistenza, senza nessun cenno alla verifica di deformabilità, che in qualche caso mostra di costituire un problema da non sottovalutare; in alcuni aspetti, la soluzione proposta segue ancora i criteri suggeriti dalla pratica del costruire.

3.1 Convenienza economica, resistenza e durabilità del sistema Town

Lo strumento degli *Annales des Ponts et Chaussées* riveste un ruolo importante di documentazione e diffusione dell'attività svolta dagli ingegneri dei *Ponts et Chaussées* e di informazione in merito a nuove opere di ingegneria, articoli, pubblicazioni realizzate anche fuori dal territorio francese.

Gli *Annales* sono preceduti dagli *Annuaire*, di cui abbiamo documentazione a partire dal 1754. Le pubblicazioni di questi primi anni sono molto sintetiche e riportano principalmente informazioni di carattere istituzionale: elenchi dei membri dell'*École* e ruolo loro assegnato.

L'1 maggio 1831 per iniziativa di Berard, direttore generale dei *Ponts et Chaussées* e di Gaspard Riche de Prony, direttore dell'*École des Ponts et Chaussées* e con il sostegno di un'apposita commissione, iniziano ad essere pubblicati gli *Annales des Ponts et Chaussées. Mémoires et documents relatifs à l'art des constructions et au service de l'ingénieur*. Sono state necessarie cinque sedute della commissione per tradurre un articolo di Henry Booth su "La ferrovia da Liverpool a Manchester" che apre il primo numero del nuovo periodico.

La scelta di ricercare all'interno degli *Annales* primi segnali di cambiamento di approccio al dimensionamento (riferito in particolare ai ponti in legno) è dettata dal fatto che gli *Annales* costituiscono una fonte documentaria preziosa che riporta in sintesi l'attività svolta non solo all'interno dell'*École des Ponts et Chaussées* ma anche fuori dal territorio francese, come documentato già dal primo numero.

I riferimenti a testi o ad opere realizzate oltreoceano iniziano ad essere presenti a partire dal secondo volume del 1837²⁰⁵. Si tratta dell'estratto di un testo di Poussin²⁰⁶ sui lavori o progetti di miglioramento realizzati dal Governo degli Stati Uniti tra il 1824 ed il 1831. L'articolo in particolare fa riferimento ai ponti in legno di Ithiel Town (1784-1844) tratto dal secondo capitolo del libro Poussin in cui viene descritto il sistema costruttivo Town.

Le caratteristiche che Town ritiene fondamentale privilegiare nel contesto di espansione di nuove infrastrutture sono quelle della convenienza economica, della solidità e della lunga durata che implica la possibilità che la struttura sia facilmente riparabile. In figura 86 sono riportati i disegni relativi ad un ponte su tre campate realizzato secondo questo sistema: il disegno n° 1 indica una visione d'insieme del ponte, mentre i numeri 5 e 6 si riferiscono rispettivamente ad una sezione trasversale e allo schema della struttura dell'impalcato. Per aumentare la durabilità del legno vengono utilizzati una struttura di copertura ed un rivestimento scatolare esterno; in questo modo si può facilmente intervenire nel caso in cui la struttura o una sua parte sia compromessa. Dalla sezione trasversale

²⁰⁵ *Annales des Ponts et Chaussées Mémoires et documents relatifs à l'art des constructions et au service de l'ingénieur; lois, ordonnances et autres acts concernant l'administration des ponts et chaussées*, Paris, Carilian-Gœury, 1837, vol. 2, p. 99

²⁰⁶ Guillaume Tell Poussin, *Travaux d'améliorations intérieures projetés ou exécutés par le gouvernement général des États-Unis d'Amérique de 1824 à 1831 par Guillaume Tell Poussin ex-major au Corps du Génie Américain et Aide-de-Camp du Général du Génie Bernard*, Paris, Anselin Libraire, 1834

rappresentata nel disegno 5 si nota la presenza di un elemento divisorio posto in mezzeria, che indica la presenza di un doppio senso di marcia e di una corsia riservata ai pedoni per ciascun senso di marcia, una all'esterno della struttura principale ed una all'interno, secondo una soluzione presente in buona parte dei grandi ponti coperti.

Una caratteristica dettata dalle nuove esigenze di traffico (in particolare ferroviario), è quella della disposizione orizzontale dell'impalcato; questo costituisce un enorme vantaggio anche a livello strutturale: la trave orizzontale infatti non esercita nessun tipo di spinta sulle pile e sugli appoggi; questo inoltre costituisce un ulteriore vantaggio per il passaggio delle imbarcazioni²⁰⁷. La semplicità di realizzazione della struttura per la quale non è richiesta l'abilità di un carpentiere specializzato è un altro indubbio vantaggio offerto dal sistema Town in quanto contribuisce a contenere i costi; a questo argomento gli Stati Uniti prestavano molta attenzione: per il fatto di dover realizzare una rete molto vasta, il contenimento dei costi giocava un ruolo determinante nelle scelte.

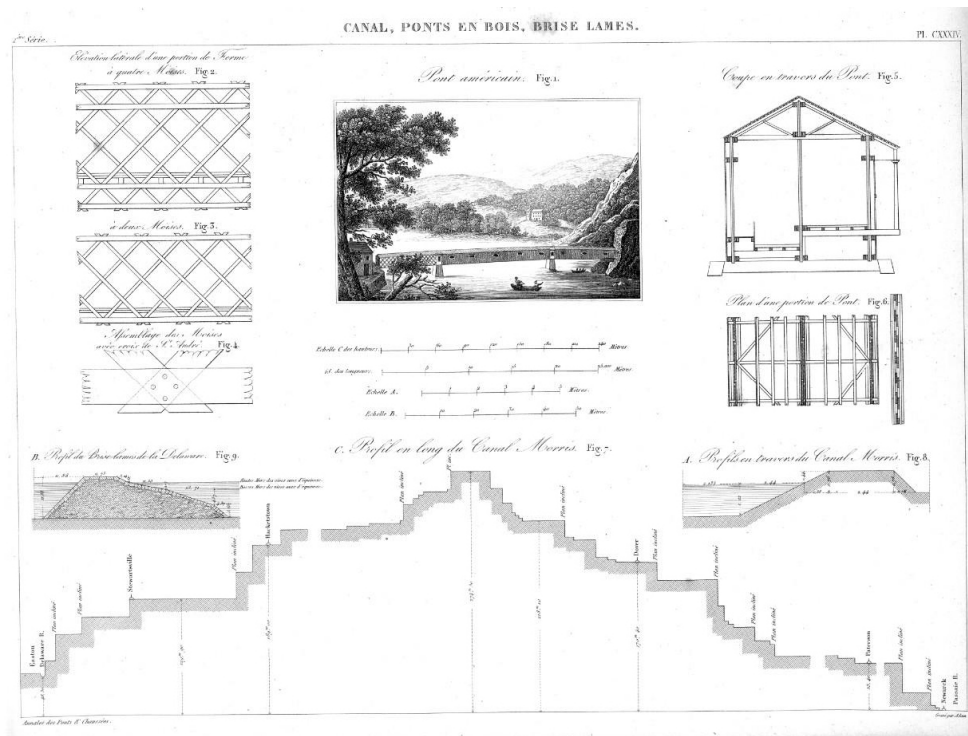


Figura 86. Ponte realizzato con sistema Town.

L'eliminazione dei giunti a tenone e mortasa e degli intagli, insieme agli accorgimenti volti ad aumentare la durabilità della struttura sono tutti fattori connessi alla riduzione della manodopera

²⁰⁷ "Il arrive encore que les conditions même d'établissement de ces constructions, permettent, par suite de la hauteur *ad libitum* des fermes, de disposer le plancher presque horizontalement (condition imposée pour les chemins de fer), et de n'avoir aucune poussée contre les points d'appui, ce qui offre l'avantage d'en simplifier le système, et au besoin de ménager des travées mobiles pour le passage de la navigation." in *Annales des Ponts et Chaussées*, 1837, vol. 2, pp. 99-100

specializzata e quindi al contenimento dei costi. A questo contribuiscono inoltre la possibilità di utilizzare elementi di piccole dimensioni e la facilità di sostituzione di elementi ammalorati²⁰⁸. La struttura a graticcio è caratterizzata da due serie di elementi paralleli, fra loro ortogonali, inclinati di 45 gradi. Le connessioni, come anticipato, non sono realizzate né con tenone e mortasa, né con intagli, ma sono garantite dalla presenza di tre o quattro perni in legno per ciascun collegamento. Il graticcio a sua volta è vincolato agli elementi longitudinali correnti al bordo superiore ed inferiore. La lunghezza degli elementi del graticcio è funzione dell'altezza del sistema che costituisce la trave. Town assegna alla trave un'altezza pari ad un decimo della luce²⁰⁹. Questo criterio non è frutto di calcolo ma, ancorato alla mentalità del passato, è specchio del tipico procedimento empirico, in cui le proporzioni della struttura derivano dall'esperienza di realizzazioni precedenti.

Anche il numero degli elementi longitudinali varia con l'altezza della trave che si desidera ottenere.

Per lunghezze della trave inferiori ai 40 metri viene proposto un elemento longitudinale nella parte superiore ed un altro in quella inferiore (fig. 3 di figura 86); per lunghezze superiori, gli elementi longitudinali raddoppiano sia nella parte superiore che in quella inferiore (fig. 2 di figura 86).

Gli elementi metallici utilizzati per le connessioni vengono eliminati del tutto: il graticcio è formato da elementi in legno di pino di 28 centimetri di base ed altezza compresa tra 7,6 e 8,8 centimetri, i perni utilizzati per le connessioni sono realizzate in rovere bianco con diametro di 3,8 centimetri. Il legno viene tagliato prima di essere stagionato. I travetti dell'impalcato si appoggiano sul corso (o su un corso) inferiore degli elementi longitudinali (fig. 2 e fig. 3 di figura 86).

L'autore dell'articolo termina la descrizione del sistema Town dichiarando che in molte circostanze è desiderabile l'impiego del sistema "modesto" ma assolutamente "ragionevole" di ponte in legno²¹⁰ ed intende richiamare l'attenzione degli ingegneri su questo sistema, che è più economico dei ponti sospesi a campata unica e che consente la sostituzione del ponte di barche con questi ponti in legno detti "americani"²¹¹.

²⁰⁸ "Mais ce qui constitue le système de M. Town, c'est la simplicité qui n'exige le concours d'aucune habile ouvrier; c'est encore la suppression de toute mortaise, de toute entaille, amélioration qui doit beaucoup prolonger la durée de cette charpente; c'est enfin la possibilité de n'employer que des bois de faible dimension (ce qui peut étendre beaucoup l'application de ces système); et la facilité avec laquelle on peut remplacer chaque pièce." in *Annales des Ponts et Chaussées*, 1837, vol. 2, p. 100

²⁰⁹ "La longueur des liens pendants varie avec la hauteur que l'on veut donner à chaque travée de ferme. M. Town donne à la ferme une hauteur égale au dixième de l'ouverture à franchir.", ibidem p. 100.

²¹⁰ "Il est certain que dans de nombreuses circonstances, il serait fort à désirer que l'on essayât de ce mode modeste mais parfaitement bien raisonné, de pont en charpente.", ibidem p. 101.

²¹¹ "Ce système est plus économique que les ponts suspendus, et permettrait par conséquent de remplacer encore un certain nombre de bacs par des ponts en bois, dits américains", ibidem p. 101.

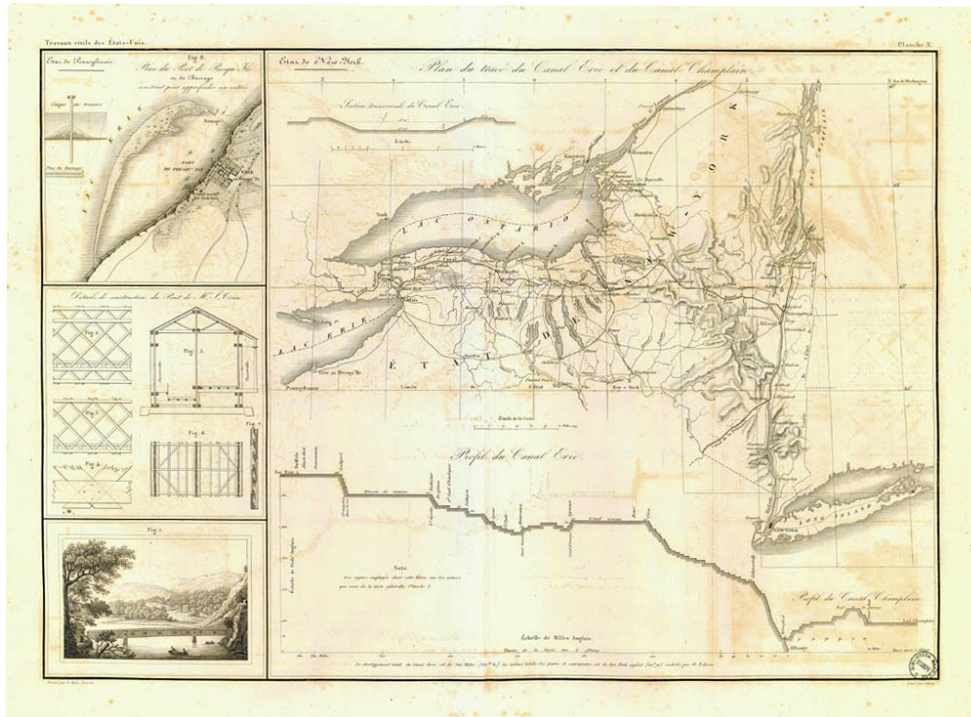


Figura 87. Tavola X da Guillaume Tell Poussin.

Il testo di Guillaume Tell Poussin dedica una nota alla descrizione del sistema Town. La spiegazione è molto dettagliata; la fig. 7 di figura 87 rappresenta la sezione trasversale del graticcio e illustra la modalità con cui si alternano i giunti e come sono disposti i perni dei nodi.

I vantaggi di questo sistema, oltre a quelli precedentemente elencati, comprendono: una minor esposizione all'azione del vento rispetto ai ponti ad arco e di conseguenza un livello di sollecitazione inferiore; inoltre, in questo caso particolare la realizzazione di una parte a ponte levatoio permette il passaggio di imbarcazioni a vela; infine, l'elevata iperstaticità della struttura permette di ripartire gli sforzi su un elevato numero di elementi garantendo maggior resistenza²¹² anche nel caso di sostituzione di elementi danneggiati.

Il secondo volume del 1839 degli *Annales des Ponts et Chaussées* riporta un ampio estratto, redatto da Henry Charles Emmerly (1789-1838) del testo di David Stevenson²¹³ (1815-1885), ingegnere scozzese. Questo testo era stato pubblicato nel 1838 in seguito ad un viaggio durato tre mesi, compiuto in Canada e negli Stati Uniti nel 1837 per ovviare alla mancanza di una pubblicazione soddisfacente in tema di opere nord americane di ingegneria civile. L'ottavo capitolo del libro è dedicato ai ponti e

²¹² “De répartir sur un très grand nombre d'éléments l'action de la tension du pont, par conséquent d'offrir plus de garanties pour sa résistance” in Guillaume Tell Poussin, *Travaux d'améliorations intérieures projetés ou exécutés par le gouvernement général des États-Unis d'Amérique de 1824 a 1831 par Guillaume Tell Poussin ex-major au Corps du Génie Américain et Aide-de-Camp du Général du Génie Bernard*, Paris, Anselin Libraire, 1834, p. 65

²¹³ David Stevenson, *Sketch of Civil Engineering in North America*, London, John Weale, 1838

presenta due brevetti di sistemi americani utilizzati per i ponti in legno: il brevetto Town ed il brevetto Long.

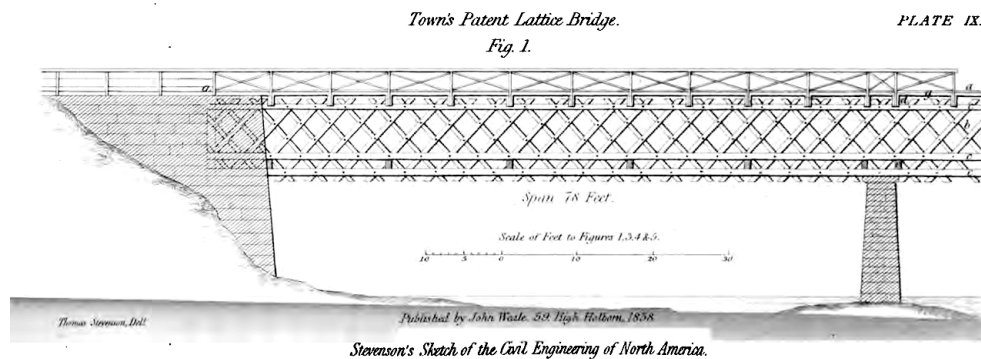


Figura 88. Schema del ponte secondo il Sistema Town. David Stevenson.

Una numerosa serie di ponti, che Stevenson aveva osservato di persona²¹⁴, era stata realizzata secondo il Sistema Town sulla linea ferroviaria Philadelphia e Reading. In figura 88 è rappresentato il prospetto di un ponte, ripreso dalla tavola CLXXVII degli *Annales des Pont et Chaussées*²¹⁵ del 1839 e comprendente una sintesi delle tavole del testo di Stevenson.

Il disegno n° 13 di figura 89 rappresenta una sezione trasversale dello schema Town in cui è ben visibile la struttura di controvento posta sotto l'impalcato.

Le traverse che collegano le due travi longitudinali su cui poggia l'impalcato sono poste ad intervalli rispettivamente di 6 piedi²¹⁶ in corrispondenza dell'impalcato e di 12 piedi nella parte sottostante, come è possibile osservare da fig. 11 e fig. 12 di figura 89 e sono irrigidite da un sistema di elementi diagonali (*h*) a croce di S.Andrea, come illustrato nel disegno n°13 di figura 89. Alcuni elementi realizzati in legno più resistente sono posti in corrispondenza degli angoli in cui si intersecano controventi e travi trasversali contribuendo ad irrigidire la struttura soprattutto se, a causa del passaggio di convogli ferroviari o per avverse condizioni metereologiche, il giunto si dovesse allentare. La struttura a traliccio si appoggia sulle spalle per circa 5 piedi come è possibile vedere dal prospetto in figura 89.

²¹⁴ "...I'm indebted to Mr Robinson of Philadelphia, who is constructing many large bridges on this principle on the Philadelphia and Reading Railway, several of which I examined both in their finished and unfinished state" in David Stevenson, *Sketch of the civil engineering of North America, comprising remarks on the harbours, river and lake navigation lighthouses, steam-navigation, water-works, canals, roads, railways, bridges and other works in that Country*, London, Holborn, 1838, p. 231

²¹⁵ *Annales des Ponts et Chaussées Mémoires et documents relatifs à l'art des constructions et au service de l'ingénieur; lois, ordonnances et autres acts concernant l'administration des ponts et chaussées*, Paris, Carilian-Gœury, 1839, 2^{ème} semestre

²¹⁶ Per la conversione delle unità di misura vedi tabella allegata.

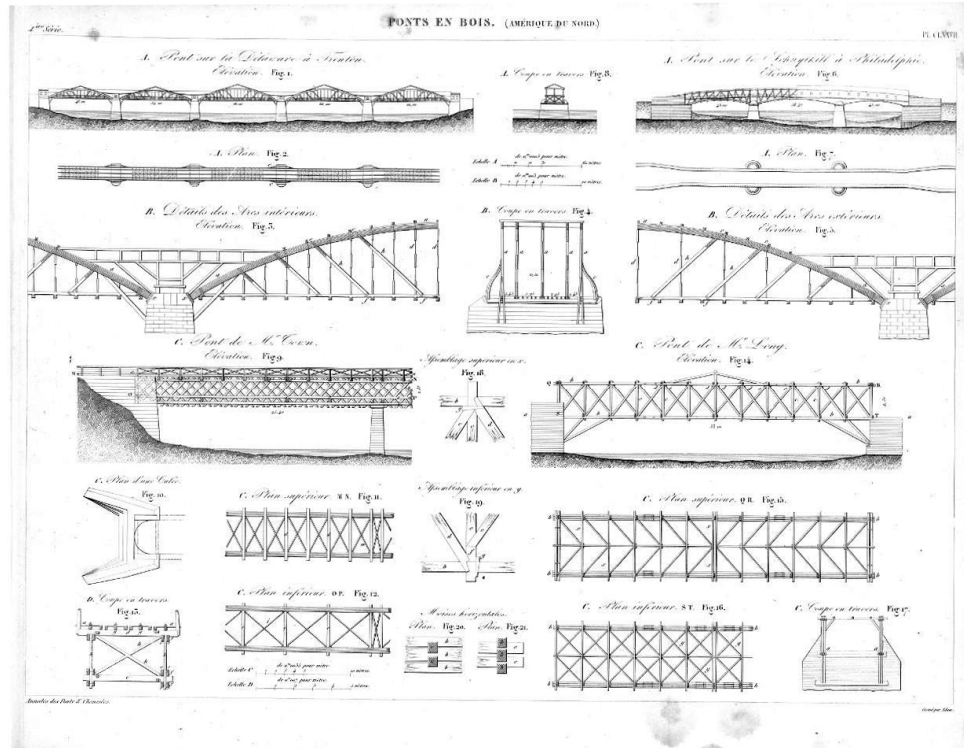


Figura 89. *Annales des Ponts et Chaussées*, 1839 vol. 2 – Tavole riassuntiva da David Stevenson.

I ponti più lunghi costruiti in base a questa tipologia sono: un ponte sulla linea ferroviaria Philadelphia e Reading, realizzato dall'ingegnere Moncure Robinson (1802-1891) lungo 1100 piedi sostenuto da dieci pile in pietra e rappresentato nel disegno n° 9 di figura 89 ed un ponte della linea ferroviaria New York – Harlem lungo 736 piedi su quattro pile in pietra.

3.2 L'evoluzione del Sistema Town

La registrazione del primo brevetto Town risale al 28 gennaio 1820 e comprende, oltre ad un breve testo, la tavola riportata in figura 90. È interessante sottolineare innanzitutto che nella descrizione di questo brevetto riportata in appendice B sia prevista la possibilità che lo schema strutturale sia realizzato anche in altra “sostanza” diversa dal legno²¹⁷. Questo indica che il ferro, impiegato per la prima volta in un ponte realizzato secondo il sistema Town nel 1843 a Dublino²¹⁸, poteva sostituire il legno mantenendo indicativamente le stesse dimensioni e le stesse modalità di realizzazione dei giunti.

²¹⁷ “Suppose a vertical plan against the side of which are placed the sides of a number of equal and similar flat pieces of timber or other substances” in Ithiel Town *Letters Patent 3169X* United States Patent and Trade Office, 28 gennaio 1820

²¹⁸ Il ponte con luce di circa 12 metri, costruito da Sir John McNeill cfr. William Humber, *A Complete Treatise on cast and wrought iron Bridge Construction in three parts, Teoretical, Practical and Descriptive*, London, Lockwood & co., 1870, p.92

La descrizione parte dalle due travi parallele a graticcio che costituiscono l'essenza del sistema Town. Non viene fornita nessuna indicazione sulle dimensioni degli elementi che formano il graticcio (*suitable dimensions*), né sulle distanze da rispettare tra un elemento e l'altro²¹⁹. Nel caso in cui gli elementi della losanga siano posti a distanza ravvicinata, il numero dei nodi è maggiore; questo comporta un maggior grado di iperstaticità della struttura.

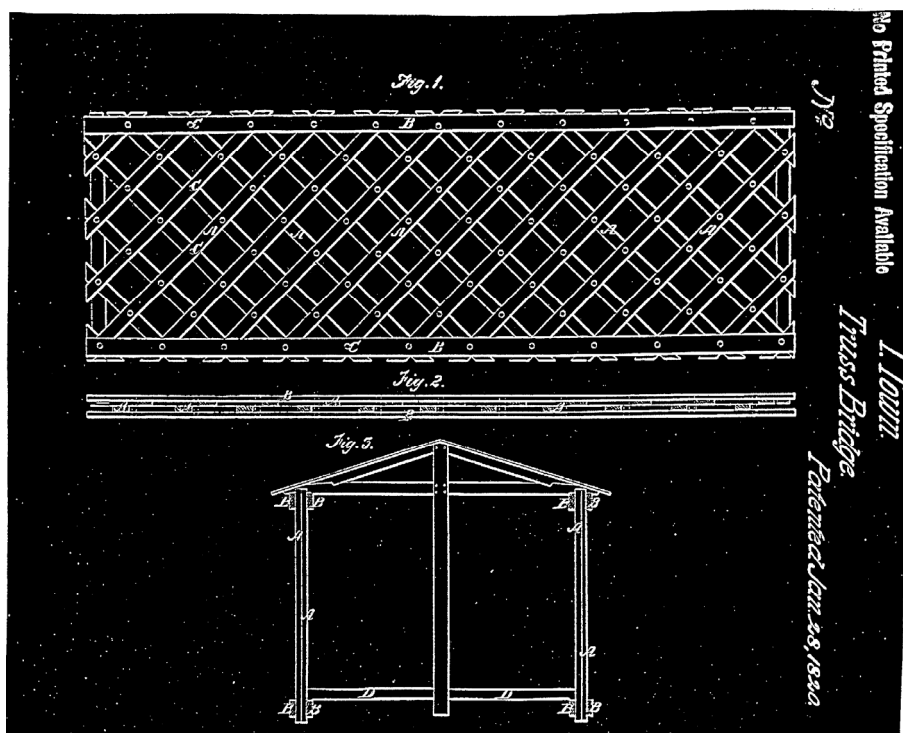


Figura 90. Sistema Town. Brevetto n° 3169X del 28 Gennaio 1820.

Town riconosce il fatto che le losanghe, essendo quadrilateri articolati, sono facilmente deformabili per cui manifesta la necessità che siano inseriti elementi orizzontali e verticali in modo da formare triangoli indeformabili; questo è lo scopo dell'introduzione dei due o più elementi longitudinali posti al bordo superiore o inferiore della trave. Inoltre è necessario bloccare i giunti mediante uno, due o tre perni (o bulloni) in ferro con eventuali cunei in modo che i giunti risultino serrati.

In questo modo la struttura a graticcio diventa una trave da ponte, che, in base alle considerazioni precedenti permette un consistente risparmio di materiale e di denaro, garantendo allo stesso tempo una notevole solidità. Inoltre la struttura risulta conveniente anche per il fatto di non generare spinte laterali sulle spalle la cui realizzazione incide pesantemente nel costo di costruzione di un ponte in legno; infine nel caso in cui sia necessario sostituire o riparare un elemento, questa struttura permette riparazioni semplici ed economiche.

²¹⁹ "Hence the larger the pieces are in proportion to the distance between them..." in Ithiel Town Letters Patent 3169X del 28 gennaio 1820.

Nel 1821 Town pubblica un articolo²²⁰ sull'*American Journal of Sciences (and Arts)* in cui descrive in modo più dettagliato le novità del suo nuovo sistema strutturale. Il titolo contiene già un elemento di novità rispetto al brevetto dell'anno precedente: è infatti presente in modo esplicito il riferimento al ferro, che sostituisce *other substance*. Lo scopo di Town è enunciato nelle prime righe dell'articolo: trovare un modo più semplice, definitivo ed economico sia nella realizzazione che nella riparazione dei ponti in legno e di quelli in ferro²²¹. La soluzione a questo problema è frutto di riflessioni sulla teoria e sulla pratica dei ponti ed è riportata nelle tavole che seguono in cui è rappresentata graficamente l'invenzione del *lattice bridge*, rappresentata in figura 92. All'interno di questa, la fig. 1 rappresenta il prospetto che si differenzia in parte dal disegno riportato nel brevetto; il testo specifica che l'altezza delle travi accostate (una, due o tre) debba essere tale da consentire il passaggio dei carri e su queste travi si appoggiano le travi della copertura. L'altezza inoltre, prosegue Town, deve essere pari a circa un decimo della distanza tra gli appoggi²²² se questa è intorno ai 15 piedi; se la distanza è inferiore, l'altezza sarà comunque determinata dalla dimensione minima che consente il passaggio dei vagoni. Rispetto al disegno del brevetto registrato nel 1820 in questa nuova soluzione gli elementi longitudinali possono essere più di due. Sono realizzati mediante componenti di due spessori differenti, aventi circa le stesse dimensioni degli elementi diagonali. Se la lunghezza del ponte non supera i 130 piedi, sono sufficienti due elementi longitudinali, uno al bordo superiore, uno a quello inferiore, come in fig. 2 di figura 91; se la lunghezza è superiore è necessario impiegarne due o più al bordo superiore ed altrettanti al bordo inferiore (fig. 1 di figura 91).

Gli elementi posti in diagonale sono costituiti da tavole larghe 10 o 11 pollici e spesse da 3 a 3 pollici e mezzo, di qualunque specie legnosa purché abbia buona durabilità se mantenuta secca²²³, l'abete bianco e l'abete rosso sono probabilmente le specie più adatte allo scopo²²⁴.

Sono queste le prime indicazioni dimensionali riferite al sistema Town, che non comparivano nel testo del brevetto, ma non c'è nessun riferimento a ciò che ha dato origine a questi criteri.

²²⁰ Art. XXI. A Description of Ithiel Town's Improvement in the construction of Wood and Iron Bridges: intended as a general system of Bridge-Building for rivers, creeks, and harbors, of whatever kind of bottom, for any practicable width of span or opening, in every part of the country. In *American Journal of Sciences (and Arts)*, vol. III, 1821, pp. 158-166.

²²¹ "To establish a general mode of constructing wooden and iron Bridges, and which mode of construction shall, at the same time, be the most simple, permanent, and economical, both in erecting and repairing, has been, for a long time, a desideratum of great importance to a country so extensive, and interspersed with so many wild and majestic rivers as ours is." In *American Journal of Sciences (and Arts)*, vol. III, 1821, p. 158.

²²² "The height of the trusses is to be proportioned to the width of the openings between the piers or abutments, and may be about one-tenth of the openings, when the piers are fifteen feet or more apart – a less span requiring about the same height, for the reasons before stated" in *American Journal of Sciences (and Arts)*, vol. III, 1821, p. 159.

²²³ "it may be sawed from any timber that will last well, when kept dry", *ibidem*, p. 159.

²²⁴ "White pine and spruce are probably the best kind of timber for the purpose, on account of their lightness, and their not being so subject to spring or warp as white oak.", *ibidem*, vol. III, 1821, p. 159.

Town non dà indicazioni in merito alla distanza da mantenere tra le diagonali; si limita ad osservare che più la distanza è ravvicinata, maggiore sarà la resistenza della trave²²⁵; di seguito descrive la modalità di giunzione tra gli elementi diagonali, uno dei grandi vantaggi del suo sistema.

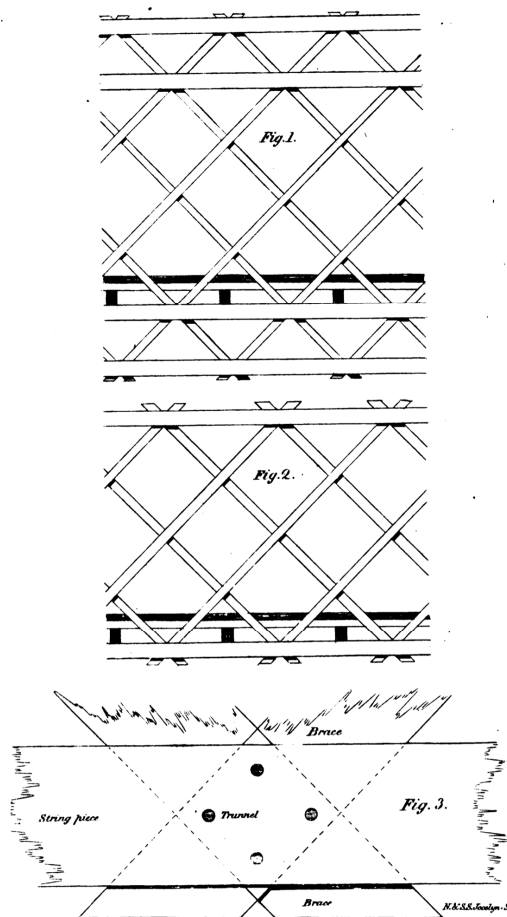


Figura 91. Sistema Town. Particolare della trave e della connessione con il corrente.

Contrariamente alla maggior parte delle giunzioni tradizionali (coda di rondine, tenone e mortasa,...) il giunto proposto da Town non richiede particolari abilità di carpentiere, e questo permette di contenere i costi di costruzione, uno degli obiettivi principali della sua invenzione. Il giunto si realizza utilizzando semplicemente dei perni in rovere bianco del diametro di un 1 ½ pollice²²⁶ stagionati prima di essere messi in opera.

²²⁵“The nearer those braces are placed to each other, the more strength will the truss have” ibidem, vol. III, 1821, p. 159.

²²⁶“The trunnels may be made of white oak, one and a half inches in diameter. They are made very cheaply and excellently, by being rived out square, and driven, while green or wet, through a tube fitted to a block and ground to an edge at the top end; they are then to be seasoned before they are used”, ibidem, p. 160.

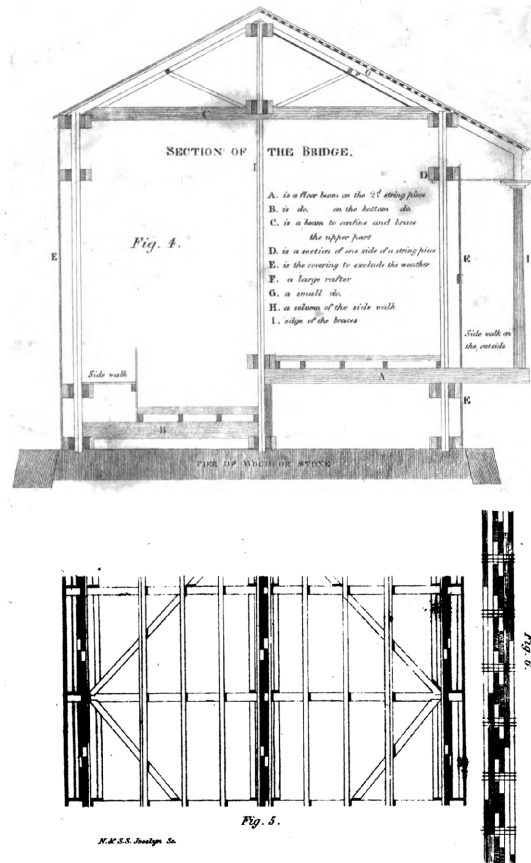


Figura 92. Sistema Town. Sezione trasversale e schema di impalcato.

Rispetto al disegno del brevetto dell'anno precedente, si registra una serie di miglioramenti, a partire dalla capriata di sostegno della copertura nella quale sono state inserite due saette. In fig. 4 è evidenziato in sezione trasversale il collegamento tra gli elementi diagonali e quelli longitudinali e in fig. 5 la modalità di realizzazione dell'impalcato. Se gli elementi che convergono nel nodo sono tesi, questa modalità di realizzare i giunti garantisce una maggior resistenza rispetto a quella del giunto tenone e mortasa. Il sistema, aggiunge Town, è vantaggioso sia quando è realizzato in legno sia quando è realizzato in ferro e in ghisa, materiali che presentano vantaggi che il legno non ha²²⁷.

In questo caso infatti è possibile ridurre le dimensioni degli elementi diagonali ed il numero dei connettori per ciascun giunto.

²²⁷ "This mode of construction will have the same advantages in iron as in wood, and some in cast-iron which wood has not viz. that of reducing the braces in size between the joints and of casting flaunches to them where they intersect, thereby making it unnecessary to have more than one bolt and nut to each joint or intersection.", ibidem, p. 161.

Il fatto che il ponte sia coperto e riparato dall'azione degli agenti atmosferici aumenta di sette/otto volte la durata dell'opera rispetto ad uno non coperto, consentendo un ulteriore risparmio economico²²⁸.

Town successivamente indica che la distanza ideale tra gli appoggi è compresa tra 120 e 160 piedi²²⁹ ed elenca una serie di vantaggi offerti dal suo sistema strutturale: l'assenza dell'arco nella struttura portante elimina le spinte sulle pile o sulle spalle; per questo sono sufficienti appoggi in grado di resistere solo a forze verticali. In termini economici questo comporta un risparmio di circa un terzo della spesa complessiva. Le dimensioni contenute degli elementi in legno permettono di procurare il materiale senza difficoltà e di tagliarli al mulino. Negli elementi piccoli è più semplice individuare i difetti ed evitare che il legno marcisca. Questo sistema non necessita di elementi in ferro, non sempre affidabili specialmente d'inverno quando la temperatura è molto rigida. La presenza di molti nodi, grazie ai quali si ripartiscono gli sforzi, procura grandi vantaggi rispetto ad altri metodi.

La spesa per la sovrastruttura di un ponte non incide più della metà o di due terzi di altri sistemi costruttivi aventi la stessa luce. Questo è importante soprattutto per gli Stati meridionali ed occidentali degli Stati Uniti dove ci sono fiumi larghi e pochi abitanti tra cui suddividere la spesa della costruzione²³⁰.

Nello stesso anno Town pubblica un breve *pamphlet*²³¹ che godrà di una notevole fortuna editoriale; seguiranno infatti ristampe nel 1831, nel 1839 e nel 1841.

Nell'introduzione Town nuovamente indica che la tipologia che intende presentare si presta ad essere realizzata sia in legno che in ferro: le caratteristiche principali di questa tipologia sono quelle di semplicità, convenienza economica, sia nella realizzazione che nella riparazione, caratteristica indispensabile in un Paese che si estende su una vasta superficie e con molti fiumi. La richiesta di un aumento consistente di ponti in legno in tutto il Paese è diventato un tema attuale per cui è essenziale l'ideazione di una nuova tipologia strutturale che risponda ai requisiti sopra delineati.²³²

²²⁸ "When it is considered that bridges, covered from the weather, will last seven or eight times as long as those not covered..." *ibidem*, vol. III, 1821, p. 161.

²²⁹ "When it is considered that bridges, covered from the weather, will last seven or eight times as long as those not covered, and that the cheapness of this mode will admit of its being generally adopted, with openings or spans between piers composed of piles, and at a distance of one hundred and twenty to one hundred and sixty feet apart..." *ibidem*, p. 161.

²³⁰ "The expense of the superstructure of a bridge would not be more than from one-half to three thirds of other modes of constructing one over the same span or opening; this is a very important consideration, especially in the southern and western States, where there are many wide rivers, and a very scattered population to defray the expenses of bridges" *ibidem*, p. 163.

²³¹ Ithiel Town, *A description of Ithiel Town's improvement in the principle, construction, and practical execution of bridges, for roads, railroads, and aqueducts: whether built entirely of wood, or of cast wrought iron...other modes of construction used*, New York, pubblicato presso l'autore, 1839.

²³² "The great and increasing demand for wooden bridges in all parts of this extensive country, is certainly such, and has become a matter so vast in importance, in point of the amount of capital expended, and still more so, in consequence of their important daily use in all public and private business, that little apology is necessary for introducing any proposed improvement upon the attention of the public." In Ithiel Town, *A description of Ithiel Town's improvement in the principle, construction, and practical execution of bridges, for roads, railroads, and*

Town prende atto di una pratica diffusa tra architetti e costruttori: quella di “mettere insieme” materiali, ciascuno secondo una idea personale ottenuta dalla combinazione di principi scientifici e pratica costruttiva. Questa abitudine ha condotto a tanti modi di costruire quanti sono i ponti costruiti, molti dei quali non rispondono all’obiettivo preposto, altri in maniera parziale o per un tempo limitato, mentre la maggior parte di quelli adatti allo scopo avevano costi troppo elevati.

Una breve nota²³³ di Eli Whitney (1765-1825), e firmata da Jeremiah Day, Benjamin Silliman, Simeon Baldwin e Alexandre M. Fisher in calce all’introduzione del *pamphlet*, esprime il loro giudizio in merito all’invenzione di Town. Il primo appunto riguarda l’estrema leggerezza della struttura rispetto alla sua resistenza; il secondo si riferisce agli effetti della combinazione degli sforzi di trazione e di compressione, responsabili, a loro avviso, del verificarsi di spostamenti fuori asse. Whitney apprezza la grande facilità di intervento per sostituire un elemento; riconosce inoltre che la possibilità di coprire e proteggere in modo semplice, economico e durevole la struttura dagli agenti atmosferici, caratteristica importante di cui tenere conto. Nel giudizio complessivo, il sistema Town viene ritenuto degno di considerazioni per la semplicità, la leggerezza, la resistenza, la convenienza economica e la durabilità.

Il 3 aprile 1835 Town deposita un nuovo brevetto²³⁴ riportato in appendice C, che nella sigla di registrazione è preceduto dalle lettere A.I., abbreviazione di *Additional Improvement*.

La struttura proposta nel brevetto del 1835 ed indicata in figura 93 viene definita da Town *double lattice*; il testo fa riferimento alla descrizione contenuta nel primo brevetto del 1820. Il miglioramento consiste nell’aggiunta di una o più serie di elementi diagonali di dimensioni analoghe a quelle del primo brevetto, allo scopo di ridurre la deformazione degli elementi longitudinali. La disposizione di queste serie aggiuntive può essere allineata alla trave esistente o sfasata. Una eventuale terza (e quarta) serie può essere ulteriormente aggiunta. La sezione trasversale, rappresentata in fig. 5 di figura 93 mostra che, a differenza del disegno riportato nell’*American Journal of Sciences (and Arts)* del 1821 (figura 92) non sono presenti le saette nella capriata di copertura. Nella sezione trasversale della trave a graticcio (fig. 2 di figura 93), sono visibili le travi accostate e collegate con perni.

aqueducts: wheter built entirely of wood, or of cast wrought iron....other modes of construction used....New York, presso l’autore, 1839.

²³³ “In compliance with your request I would state my opinion in writing, relative to the model of a wooden bridge which you have constructed, capable of being extended over considerable spaces, without any intermediate support, I have to remark-1st. That it appears to me to be much lighter, in proportion to its strength, than any other wooden bridge which I have seen; a consideration of much importance, both as respects expense, and the greater ease with which it supports its own weight. 2d. In my view, it is a circumstance of no inconsiderable importance, that the stress upon the timber, of which the bridge is composed, is in a longitudinal direction, and mostly a tension strain; and in those parts where the stress operates to compress the wood, still is in a longitudinal direction; and the combination is such as to prevent the timber being bent out of a right line.3d. The construction is such as to afford great facility in taking out any piece of timber in the bridge, and replacing it with another. 4th. This bridge may be covered to protect it from the weather, in a manner very simple, cheap, and durable. On the whole, its simplicity, lightness, strength, cheapness, and durability, are, in my opinion, such as to render it highly worthy of attention. ...”, *ibidem*, p. 4.

²³⁴ Brevetto 8743X del 3 Aprile 1835 United States Patent and Trademark Office.

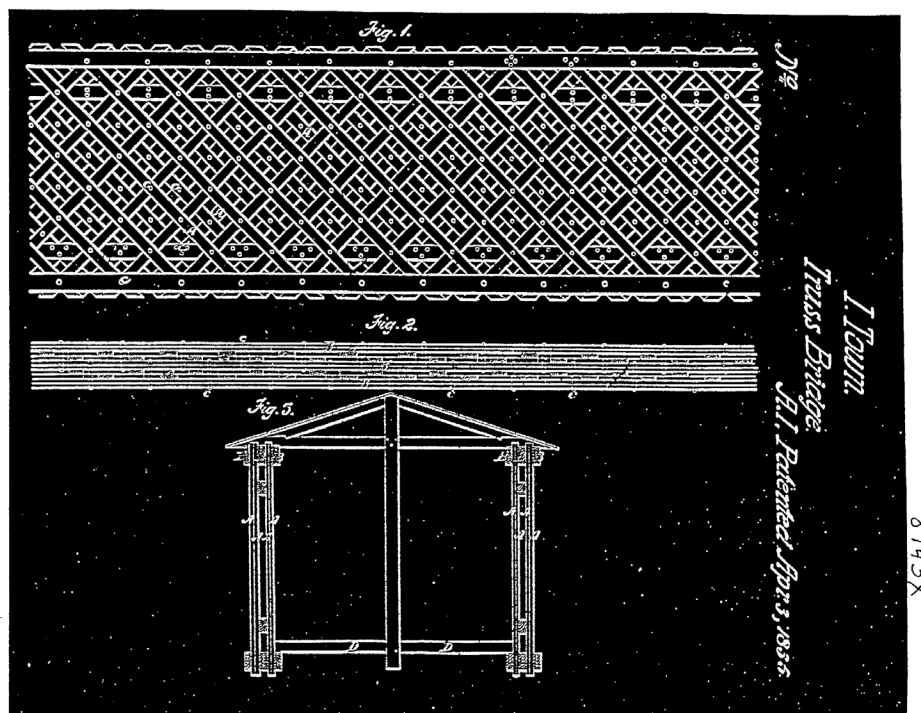


Figura 93. Brevetto n° 8743X del 3 Aprile 1835. Disegno allegato al testo.

L'edizione del 1839 del *pamphlet*, originariamente pubblicato nel 1821, elenca i vantaggi che derivano da questo secondo brevetto: resistenza, rigidità e durabilità maggiori ottenute utilizzando un minor numero di elementi longitudinali²³⁵, raddoppiando il numero dei perni utilizzati per le connessioni che, secondo Town, contrastano le deformazioni dovute ad azioni di trazione. Con l'introduzione di questi miglioramenti, prosegue Town, non ci sono più obiezioni di nessun tipo per l'utilizzo della struttura, che si rivela adatta a ponti di grande luce, ponti ferroviari, acquedotti, opere che richiedono grandi capacità di resistenza e necessitano di livello stradale in piano. Segue una descrizione del sistema: il diametro dei perni utilizzati per le connessioni è di 2 pollici, contro l'1 ½ indicato precedentemente²³⁶. Town è consapevole che le tavole che formano la trave sono soggette a ritiro²³⁷; la presenza di tre o

²³⁵ "1st. An immense additional strength may be obtained, with much less quantity of plank in the string-pieces, in proportion to the strength, stiffness, and durability thereby gained; especially, as double the number of tree-nails pass through all the string-pieces, which are in the middle of the each truss, or between the two series of truss-braces, and thereby secure the splices of the plank composing the string-pieces, in a much more effectual manner, against their tension strain, which is great, and therefore requires the best possible security to counteract it. This manner is effectual, even without the aid of iron, to a greater degree than is practicable in any other manner known in Practical Mechanics." in Ithiel Town, *A description of Ithiel Town's improvement in the principle, construction, and practical execution of bridges, for roads, railroads, and aqueducts: whether built entirely of wood, or of cast wrought iron..other modes of construction used*, New York, pubblicato presso l'autore, 1839, p. 5.

²³⁶ cfr. "Ces chevilles sont généralement en chêne blanc, et ont 0^m 038 de diamètre." in Guillaume Tell Poussin, *Travaux d'améliorations intérieures projetés ou exécutés par le gouvernement général des États-Unis d'Amérique de 1824 a 1831 par Guillaume Tell Poussin ex-major au Corps du Génie Américain et Aide-de-Camp du Général du Génie Bernard*, Paris, Anselin Libraire, 1834, p. 64.

²³⁷ "That the plank composing the trusses is liable to shrink, is true; but...it is therefore evident, that such shrinking cannot produce any effect" in Ithiel Town, *A description of Ithiel Town's improvement in the*

quattro perni in ciascuna tavola permetterà di contenere l'effetto. L'alternativa tradizionale a questa modalità di giunzione è costituita solitamente dal giunto tenone – mortasa che, secondo Town, ha lo svantaggio di determinare sforzi elevati, concentrati in alcuni punti, con conseguente riduzione di resistenza; questo può richiedere interventi consistenti di ripristino o può causarne la distruzione²³⁸. Inoltre il giunto tenone e mortasa, anche se ben realizzato, permette ad aria ed umidità di entrare nel nodo, accelerando il processo di degrado delle parti deboli²³⁹. L'uso di connettori metallici sarebbe solo un rimedio parziale, perché non modifica il comportamento delle tavole di legno, che sarebbero comunque soggette a ritiro²⁴⁰. Successivamente vengono elencati i vantaggi e gli svantaggi offerti da uno schema ad arco rispetto a quello a trave. Town riconosce che la modalità d'uso dell'arco da parte di Burr, Wernwag e Field presentava vantaggi nella buona capacità della struttura ad arco di resistere ai carichi ma per gli svantaggi già illustrati Town ne sconsiglia l'uso. Se il ponte viene riparato dall'azione degli agenti atmosferici la vita utile può aumentare fino a otto o dieci volte rispetto a quella dei ponti non coperti²⁴¹.

Infine, a supporto delle sue tesi, Town riporta alcuni stralci di pubblicazioni su ponti e strade tratti da riviste o da resoconti di viaggi di eminenti ingegneri inglesi. Al testo di David Stevenson²⁴², contenuto anche negli *Annales dell'École des Ponts et Chaussées*, si è fatto riferimento nel paragrafo 3.1.

Alcuni articoli più sintetici sono stati pubblicati sul *National Intelligencer*²⁴³, sul *New York Weekly Express*²⁴⁴ e sul *New Haven Daily Herald*²⁴⁵ nel 1838 e danno un'idea dell'ampia diffusione che Town si proponeva di dare al suo sistema ed al suo brevetto. Dalla ricerca di questi giornali presso la Library of Congress di Washington è stato possibile recuperare solo la copia del *Daily Herald* del 19

principle, construction, and practical execution of bridges, for roads, railroads, and aqueducts: whether built entirely of wood, or of cast wrought iron..other modes of construction used, New York, pubblicato presso l'autore, 1839, p. 6.

²³⁸ “What is stated in regard to shrinkage, is also true, to a greater extent, in that of the mashing or compression of timber, in this arrangement of construction, there is not the least tendency whatever to the compression of any of the plank composing the trusses, by any strain to which they are liable, in their own support, or the support of any other weight; except, only, where the trusses rest upon the piers, and this only by its own gravity, and not by any strain or compression occasioned by the mode of construction, as is the case in all bridges of other modes of construction, where posts are introduced for the insertion of braces, by tenon and mortices, and where, of course, the accumulation of shrinkage, and the compression of the posts, by a great strain on a few points, both contribute to operate towards the weakening of the bridge, so as to give it a vibratory motion, which, in time, is sure to do violence to a bridge, and, in the end, destroy it, or occasion large repairs, and the constantly tightening of wedges and other parts; which, however, cannot possibly raise a bridge which has once settled, or become weak, from such looseness of its parts, and the consequent vibrations thereby occasioned.”, *ibidem*, p. 6

²³⁹ “Hitherto, in bridges not covered from the weather, the immense quantity of mortises and tenons, which, however well done, will admit air and wet, and consequently tend to expedite the decay of the weak parts, has been a material error in constructing bridges of wood.”, *ibidem*, p. 12.

²⁴⁰ “Nor cast iron, whatever expense for it may be incurred, any more than any partial remedy: for still, the wood will both shrink and be, by the great pressure of the part, compressed”, *ibidem*, p. 6.

²⁴¹ “When it is considered that bridges, covered from the weather, will last eight or ten times as long as those not covered, and that the cheapness of this mode will admit of its being generally adopted...”, *ibidem*, 1839, p. 11.

²⁴² David Stevenson, *Sketch of the Civil Engineering of North America*, London, John Weale, 1838.

²⁴³ Pubblicato articolo sul *National Intelligencer* periodico di Washington il 5 e l'11 Agosto 1838.

²⁴⁴ Articolo pubblicato sul *New York Weekly Express* del 4 Agosto 1838.

²⁴⁵ Articolo pubblicato sul *New Haven Daily Herald* 19 Settembre 1838.

settembre 1838, che a sua volta riporta l'articolo del *Richmond Whig*²⁴⁶ preceduto da un elenco di ponti realizzati secondo il sistema Town. Questo articolo è riportato all'interno del *pamphlet* stesso e descrive in modo dettagliato il ponte ferroviario sul fiume James progettato da Moncure Robinson e realizzato sotto la direzione di Charles Sanford. Infine Town riporta alcune parti del trattato di Sir Howard Douglas²⁴⁷ e Robert Fulton²⁴⁸ in cui vengono illustrati i vantaggi del principio costruttivo ideato da lui stesso.

Per quanto riguarda la determinazione dei carichi che un ponte realizzato secondo questo schema è in grado di portare la parte finale del *pamphlet* riporta una serie di formule che tentano di rapportare il modello in scala ridotta al ponte a scala reale. Le formule che Town utilizza per passare dal modello al caso reale sono di difficile interpretazione. La variazione della resistenza è funzione del rapporto di scala, la variazione dello sforzo è funzione del quadrato del rapporto di scala. Town non usa formule analoghe a quelle presentate nel capitolo precedente, l'unica indicazione che ricava per lo stato flessionale è il valore del carico massimo che il ponte può portare valutato mediante un'opportuna amplificazione del carico massimo cui è sottoposto il modello²⁴⁹

L'ultima pagina rimanda ad un'altra edizione, che contiene sette disegni corredati dalle descrizioni e dalle spiegazioni necessarie. Nehemiah Rice Knight (1780-1854), autore di questa nota conclusiva, informa che i modelli del sistema Town sono esposti presso l'ufficio brevetti e presso l'*American Institute* di New York, mentre esempi realizzati secondo il sistema Town si trovano a Richmond, Philadelphia, e in molti tratti ferroviari (Raleigh, Reading, Haverhill...). Per ulteriori informazioni sui diritti dovuti all'autore per il brevetto, l'autore indica il riferimento dell'ufficio brevetti di New York ed indica la cifra dovuta: un dollaro per ciascun piede di ponte realizzato se il pagamento avviene prima della realizzazione del ponte; due dollari per piede, se il ponte viene costruito senza aver

²⁴⁶ *Richmond Whig and public advertiser*, giornale bisettimanale pubblicato tra il 1833 ed il 1867.

²⁴⁷ Sir Howard Douglas, *An Essay on the Principle and Construction of Military Bridges, and the Passage or Rivers*, London, John Murray, 1816. Il riferimento è contenuto nella ristampa precedente alla pubblicazione del *pamphlet*.

²⁴⁸ Robert Fulton, *Treatise on the improvement of Canal Navigation*, London, James Taylor, 1796.

²⁴⁹ "Suppose, for an example, it were required to ascertain the strength of a bridge on this improvement, from experiments made with a model. In this construction, the truss-work is carried across from pier to pier, so that the road-way entirely across, shall be in a horizontal plane, and all the parts shall retain their own respective magnitudes throughout the structure. Now, let l represent the horizontal length of the model, from interior to exterior of the two piers, w is the weight, w the weight it will just sustain at its middle point B before it breaks. Let nl the length of a bridge actually constructed of the same material as the model, and all its dimensions similar: then, its weight will be n^2w , and its resisting power to that of the model, as n^2 to 1, being = $n^2 \cdot (w + \frac{1}{2} \cdot w)$. Hence $n^2 \cdot (w + \frac{1}{2} \cdot w) - \frac{1}{2} \cdot n^2 \cdot w = n^2 \cdot w - \frac{1}{2} \cdot n^2 \cdot (n-1) \cdot w$, the load which the bridge itself would bear at the middle point." Ithiel Town, *A description of Ithiel Town's improvement in the principle, construction, and practical execution of bridges, for roads, railroads, and aqueducts: whether built entirely of wood, or of cast wrought iron..other modes of construction used*, New York, pubblicato presso l'autore, 1839, p. 11.

richiesto l'autorizzazione²⁵⁰. Si tratta, in questo caso, di un indennizzo per una eventuale realizzazione difforme dal modello brevettato²⁵¹.

La serie di tavole allegate sono accompagnate da definizioni e spiegazioni dettagliate; le tavole 1 e 2 sono rappresentate in figura 95.

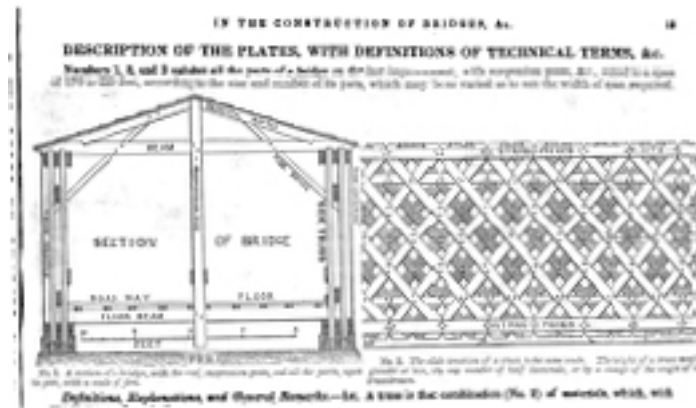


Figura 94. Sistema Town. Sezione trasversale e prospetto della trave.

L'ossatura della struttura è formata da travi posizionate verticalmente ed è indicata in fig. n° 2 di figura 94; queste travi sono collegate superiormente ed inferiormente da due travi orizzontali e da controventi diagonali che le collegano ai puntoni di copertura. Sulla struttura trasversale inferiore viene posizionato l'impalcato; su quella superiore un sistema di copertura e un rivestimento laterale a protezione del ponte.

Nella trave verticale gli elementi diagonali formano losanghe; due serie di questi sono accostate ed intervallate da un elemento in legno di 6 o 7 pollici di spessore.

Le travi trasversali che sostengono l'impalcato poggiano sulle travi longitudinali; un elemento verticale di 12 o 14 pollici di larghezza per 4 o 5 pollici di spessore, saldamente vincolato con tre chiodi, collega la struttura di copertura con la trave trasversale superiore ed inferiore. Le dimensioni di queste ultime sono in funzione della distanza tra i loro punti di appoggio anche se Town non indica quale legge esprima le dimensioni della trave rispetto alla loro luce.

I controventi orizzontali dell'impalcato sono realizzati con elementi diagonali o con tavole di dimensioni adeguate, vincolate con tre perni. Questo irrigidimento è necessario e Town sottolinea che

²⁵⁰ “Any information as to the construction and terms for the right to build, may be had by addressing the patentee, at the city of New York, who will attend promptly to those letters *only*, which are postage paid. Terms for Patent right, one dollar per foot, for the length of the bridge, if applied for and paid before commencing; otherwise, two dollars per foot will be charged, as indemnity for the risk of bad construction, when erected without proper directions and authority, by which great injury is generally done to both parties – the right being at the same price with advice and directions, as without.”, *ibidem*, p. 14.

²⁵¹ Il potere di acquisto del dollaro al 1839 era pari a circa 25\$ del 2012. (<http://www.measuringworth.com/ppowerus/>). Un dollaro al piede era quindi l'equivalente di circa 75\$ al metro. Considerando lunghezze medie di ponti dell'ordine di 30, 40 metri, i diritti consistevano in 2.000 ÷ 3.000 \$ circa al valore attuale.

dovrebbe essere realizzato nel modo più sicuro. I puntoni della struttura di copertura hanno sezioni trasversali di 10 o 12 pollici di larghezza per 4 o 5 pollici di spessore. Tali dimensioni dipendono dalla loro lunghezza; anche in questo caso l'autore non indica quale legge esprima il rapporto tra queste dimensioni.

Al di sotto dell'impalcato una serie di elementi diagonali di controvento contribuiscono ad irrigidire la struttura²⁵²: non sono necessariamente incrociati tra di loro, anche se Town è consapevole che questo contribuisca ad aumentare la resistenza.

I perni, in abete bianco o altro legno molto resistente, hanno 2 pollici di diametro e sono usati per connettere gli elementi diagonali della trave e quelli longitudinali. Per maggior facilità di lavorazione il legno deve essere non stagionato, ma deve essere fatto stagionare prima di essere messo in opera.

Infine seguono alcuni accorgimenti utili per realizzare buoni sostegni intermedi e gli appoggi terminali.

L'*advertisement* conclusivo situato nell'ultima pagina del *pamphlet* contiene ulteriori osservazioni: l'intenzione di Town di proseguire con pubblicazioni analoghe riguardanti l'uso del cemento ed osservazioni riguardanti la muratura di pietra e di mattoni con ulteriori dettagli e regole per determinare l'altezza della trave in funzione della luce della campata. Il testo intenderebbe inoltre spiegare il motivo per cui ai fini della rigidità e della resistenza della trave è preferibile utilizzare un angolo maggiore di 45° e in quale caso sia utile aggiungere esternamente un elemento longitudinale intermedio²⁵³. Tutte queste osservazioni, prosegue Town, sono il risultato di lunga esperienza e pratica nell'ingegneria. Infine Town esprime la preoccupazione che il suo metodo venga utilizzato da persone prive di esperienza: il recente crollo di alcuni ponti sottolinea la necessità che essi vengano costruiti da ingegneri con esperienza²⁵⁴.

L'incendio verificatosi all'Ufficio Brevetti Statunitense nel 1836 ha causato la perdita di molti brevetti registrati fino ad allora. Per questo molti furono nuovamente registrati negli anni immediatamente successivi. Il 3 marzo 1837 venne registrato nuovamente il brevetto Town *double lattice patent*, rappresentato nella figura 109, si tratta di una copia del brevetto depositato nel 1835.

Nella tavola in basso a destra è apposta la data del 4 novembre 1840 ed è indicato che il brevetto è conforme a quello registrato il 3 marzo 1837, mentre in alto è segnato a matita *Additional Impt.*

²⁵² "In section No. 4, the side-braces are differently secured, and may cross each other or not, as shown in the section. By crossing, greater strength is obtained" in Ithiel Town, *A description of Ithiel Town's improvement in the principle, construction, and practical execution of bridges, for roads, railroads, and aqueducts: whether built entirely of wood, or of cast wrought iron..other modes of construction used*, New York, pubblicato presso l'autore, 1839, p. 14.

²⁵³ "5. Some further observations and rules for a more particular manner of determining the height of the trusses for various width of span; the best angle for the inclination of the truss-braces; and why an angle greater than 45°, as seen in the present work, as well as the centre ones, as herein exhibited; all of which observations are the result of long experience and practice, in this particular department of Engineering", *ibidem*, p. 17.

²⁵⁴ "It is hoped, however, that after so many failures of bridges, that no individual or company will erect a Bridge of any considerable consequence without the aid of some able and experienced Engineer, to plan, specify, and give at least, a partial superintendence.", *ibidem*, p. 17.

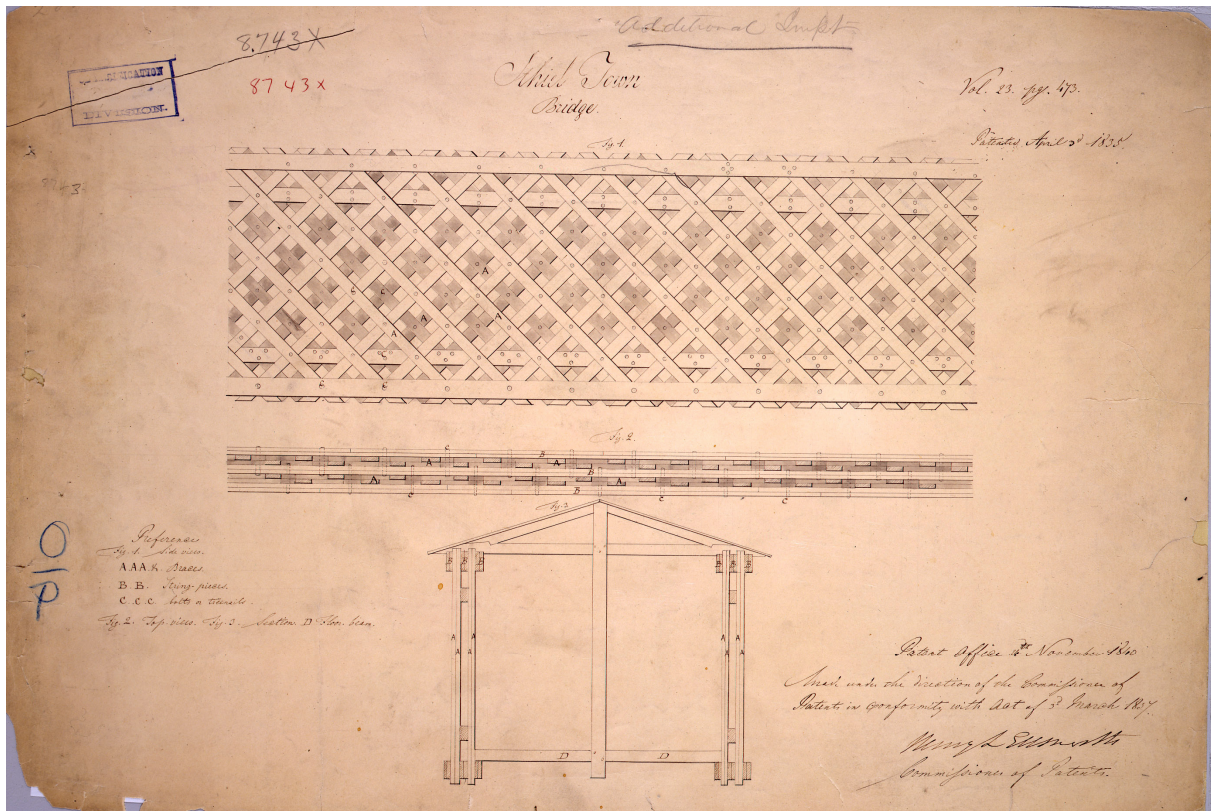


Figura 95. Tavola relativa alla nuova registrazione del brevetto 8743 X dopo l'incendio del 1836.

3.3 Prime relazioni di calcolo di ponti in legno secondo la teoria della trave inflessa di Navier

Le notizie riportate all'interno degli *Annales des Ponts et Chaussées* alternano resoconti e recensioni di opere realizzate all'interno del territorio nazionale ed altre oltre confine.

Il secondo volume degli *Annales des Ponts et Chaussées* del 1842 nella *Note n° 61* riporta la relazione relativa alla costruzione di un ponte provvisorio in legno realizzato in Francia adottando il sistema americano di Ithiel Town. L'articolo è redatto da Hyacinthe Garella (1775-1852), ingegnere dei *Ponts et Chaussées*.

3.3.1 Calcolo di portata di una passerella di servizio a Lione

Il ponte oggetto della relazione era stato costruito quattro anni prima e successivamente demolito, in quanto aveva ormai esaurito la sua funzione. La verifica riportata nella relazione sembra essere una dimostrazione a posteriori della correttezza dell'opera. Nessun calcolo di verifica, apparentemente, era stato fatto al momento della realizzazione.

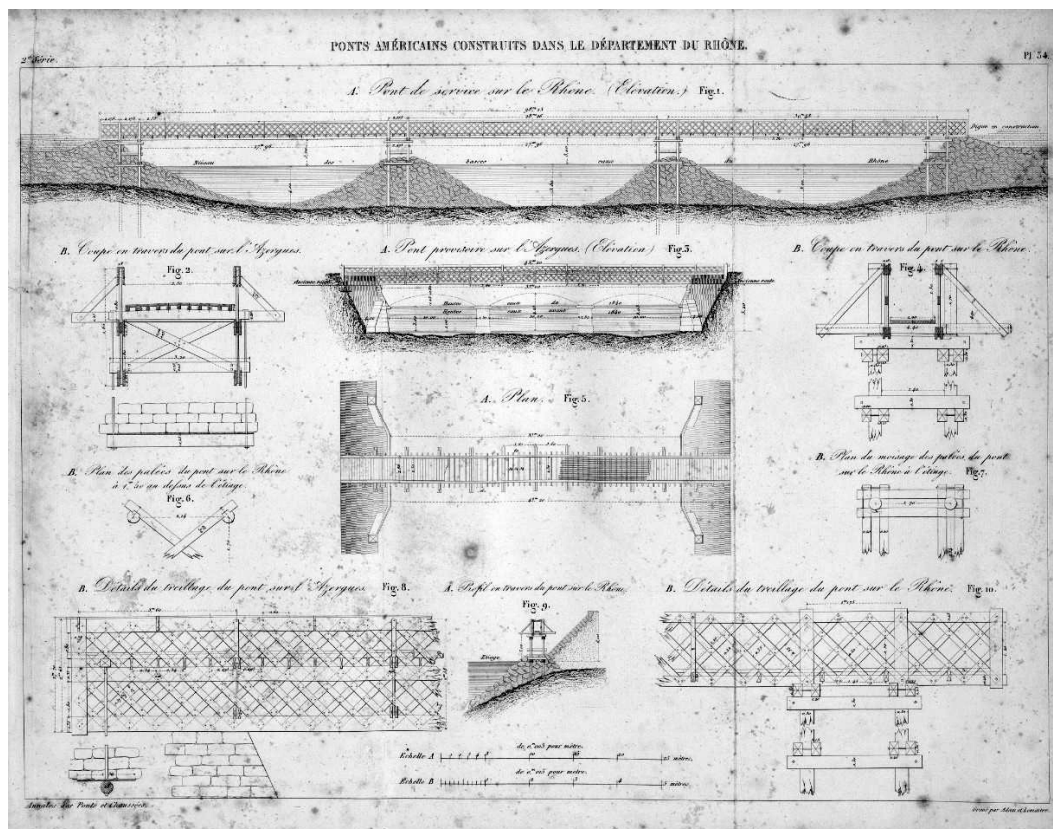


Figura 96. Ponte provvisorio sul Rodano a Lione.

La scelta di utilizzare il sistema Town per un ponte provvisorio da realizzare sul Rodano presso Lione è dettata da una serie di vantaggi che questa tipologia offre soprattutto per i ponti di servizio o provvisori²⁵⁵. Il ponte, illustrato in figura 96, ha larghezza di 1 metro soltanto ed è stato realizzato nel 1838, al solo scopo di consentire il passaggio all'altra riva dei numerosi operai che lavoravano per costruire una diga sul Rodano, a valle del ponte della *Guillotière*. La passerella provvisoria è stata disposta parallelamente alla diga da costruire ed era composta da tre campate di 27,96 metri di luce ciascuna. Le due travi che costituiscono la struttura del ponte distano 1 metro tra loro e sono realizzate mediante elementi disposti ad angolo retto a croce di Sant'Andrea aventi dimensioni di 15 centimetri di larghezza e 3 centimetri di spessore. I correnti superiori misurano 25 centimetri di larghezza e 5 centimetri di spessore. Gli elementi che formano la croce di Sant'Andrea sono stati collegati con due bulloni di 1,5 centimetri di diametro, allineati alternativamente in orizzontale ed in verticale. L'uso di perni in legno di rovere sarebbe stato più economico ma avrebbe richiesto tempi di realizzazione più

²⁵⁵ "Le système de M. Town offre par sa simplicité et son économie des avantages précieux, et qui doivent le faire choisir souvent, surtout dans l'établissement des ponts de service et des ponts provisoires; ayant eu l'occasion d'en faire quelques application, j'ai pensé qu'il pourrait y avoir de l'utilité à en faire connaître les résultats" in *Annales des Ponts et Chaussées*, 1842, 2^e volume, p. 371.

lunghi rispetto ai bulloni che si acquistano già fatti²⁵⁶. La destinazione provvisoria dell'opera in cui questi bulloni sono impiegati permette che possano essere riutilizzati.

I correnti della trave, la cui lunghezza è compresa tra 10 e 20 metri, sono stati connessi mediante giunzione a dardo di Giove in modo che il giunto del corrente superiore non sia allineato con quello del corrente inferiore²⁵⁷.

L'impalcato è realizzato con tavole di 5 centimetri di spessore disposte su travetti trasversali con sezione quadrata di 10 centimetri di lato posti ad interasse di 1,45 metri che appoggiano sul corrente inferiore²⁵⁸.

Gli appoggi intermedi delle travi principali sono formati da quattro elementi in legno di sezione circolare e diametro di 30 centimetri, collegati longitudinalmente e trasversalmente tra loro a livello di "acqua bassa" e immediatamente al di sotto dell'impalcato. Per consolidare la struttura della pila sono stati aggiunti nella parte intermedia due elementi diagonali²⁵⁹.

Il sistema di controvento trasversale delle travi è realizzato mediante il prolungamento della struttura delle pile per tutta l'altezza della trave; il collegamento con la trave avviene in corrispondenza del corrente inferiore e di quello superiore mediante bulloni di 3 centimetri di diametro. A completamento, viene inserita una serie di elementi inclinati posti all'esterno della trave che collegano il corrente superiore della trave con il prolungamento dei travetti di impalcato²⁶⁰.

La costruzione del ponte è iniziata con la battitura dei pali nel fiume; contemporaneamente si sono assemblate le due travi a graticcio. Il sistema delle croci è stato realizzato in pannelli di 4 o 8 metri lunghezza. Nei correnti sono stati semplicemente predisposti i fori per i bulloni per le giunzioni e ottenere un corpo solidale.

Durante la fase di montaggio, punti d'appoggio intermedi sono stati realizzati utilizzando barche di 5 metri di larghezza, ormeggiate ad un sistema triangolare di tre pali battuti nel fiume; successivamente è avvenuto il montaggio delle due travi, che sono state fissate con bulloni ai pali delle pile; la posa del

²⁵⁶ "L'emploi de chevilles de chêne eût été plus économique, mais, à cause de la fabrication, il eût exigé plus de temps que celui des clous et boulons achetés tout faits; ces derniers étaient d'ailleurs préférable dans un pont provisoire qui ne devait avoir qu'une courte existence, et don't les matériaux pouvaient être remployés" in *Annales des Ponts et Chaussées*, 1842, 2^e volume, p. 372.

²⁵⁷ "Les moises en pièces de 10 à 20 mètres de longueur, étaient assemblées à trait de Jupiter, mais de manière à ce qu'il ne se rencontrât jamais, dans le même plan, plus d'un joint dans l'une ou dans l'autre des fermes" *ibidem*, p. 372.

²⁵⁸ "Le plancher, formé de simples madriers longitudinaux de 0^m.05 diépaisseur, reposait sur des poutrelles de 0^m.10 d'équarrissage en tous sens, portant à mi-bois sur les moises inférieures des fermes, et espacées de 1^m.45 de milieu en milieu." *ibidem*, p. 372.

²⁵⁹ "Le pont tout entier reposait sur quatre palées formées par quatre pieux en bois rond, de 0^m.30 de diamètre, reliés par des doubles cours de moises longitudinales et ransversales, au niveau de l'étiage et au-dessus du tablier. On avait ajouté de plus en diagonale, dans la partie intermédiaire, deux moises simples, destinées à augmenter la solidarité de la palée." *ibidem*, p. 372.

²⁶⁰ "Le pieux des quatre palées s'élevaient en dehors et presque jointivement aux fermes, maintenues contre eux par de forts boulons de 0^m. 03 de diamètre, traversant les moises supérieures et inférieures. Le contre-ventement du système était complété par des contre-fiches extérieures à 45 degrés, contre-butant le cours de moises supérieures et assemblées contre l'extrémité des poutrelles convenablement prolongé; ces contre-fiches étaient placées de 5^m.80 en 5^m.80 de distance." *ibidem*, p. 373.

tavolato è stata fatta in seguito senza difficoltà. Il tempo necessario per la realizzazione del ponte è stato di ventidue giorni, dal 16 marzo al 7 aprile, ma i giorni di lavoro effettivo sono stati quattordici, a causa delle interruzioni dovute al maltempo e al regime delle acque del Rodano²⁶¹.

Il costo dei lavori è stato ripartito fra spese per la fornitura del materiale e spesa per la manodopera. Il costo del materiale è ammontato a 3425,28 franchi: 1.292,16 franchi per la fornitura di 26,92 metri cubi di abete rosso per i pali al costo di 48 franchi al metro cubo e 1156,32 franchi per 24,09 metri cubi di legno di abete rosso a 48 franchi al metro cubo; 340 chilogrammi di ferro per il collegamento tra pali e correnti e 718 kilogrammi di bulloni al costo di 0,90 franchi al chilogrammo per un costo rispettivamente di 306,00 e di 646,20 franchi. La manodopera relativa alla posa dei pali ha richiesto 60 giornate di lavoro di carpentiere a 4 franchi al giorno e 6 giornate di lavoro di mastro carpentiere a 5 franchi al giorno. La realizzazione del ponte ha richiesto 13 giornate di mastro carpentiere e 2871,33 giornate di carpentiere, oltre a 30 giornate di manodopera di segantini a 2,5 franchi al giorno per un totale di 2055,32 franchi.

Il costo totale del ponte e dei pali è risultato di 5480,60 franchi; escluse le barche, gli ormeggi, gli ancoraggi che l'amministrazione aveva già a disposizione. Il costo per metro quadrato è stato di 55,85 franchi²⁶².

Il calcolo della resistenza della trave è stato effettuato considerando la trave come un solido cavo, disposto su due appoggi e formato solamente dai due correnti; le croci hanno il solo scopo di connettere rigidamente i due correnti. Se si indica con $2P$ il carico applicato in mezzeria della campata si avrà:

$$2P = \frac{R \cdot c \cdot (b'^3 - b''^3)}{3 \cdot b' \cdot a} \quad (51)$$

dove:

R è la resistenza del legno = 600.000 Kg/m²

c rappresenta lo spessore globale dei quattro correnti = 0,20 metri

b' indica l'altezza totale delle travi = 1,70 metri

b'' rappresenta la distanza interna tra i correnti = 1,20 metri

a rappresenta la lunghezza di metà della campata pari a:

$$\frac{27,96}{2} = 13,98 \text{ metri}$$

Sostituendo nella (51) si ottiene:

²⁶¹ “Le battage des pieux, la préparation des bois qui étaient entièrement en sapin, leur façon et mise en place, ont duré vingt-deux jours (du 16 mars au 7 avril), mais n’ont exigé que quatorze jours de travail réel, à cause de diverses interruptions causées par le mauvais temps et par l’état des eaux du Rhône” in *Annales des Ponts et Chaussées*, 1842 vol. 2 p. 374.

²⁶² La superficie del ponte è di 98,13 m².

$$2P = \frac{600.000 \cdot 0,20 \cdot 3,19}{71.298} = \frac{382.800}{71.298} = 5369,01 \text{ Kg}$$

Il carico ripartito su tutta la lunghezza del ponte è pari a 10.738,02 Kg che corrisponde ad un carico distribuito sulla superficie del ponte pari a:

$$\frac{10738,02}{27,96} = 384,05 \text{ Kg/m}^2$$

Il calcolo fa riferimento alla resistenza a flessione del ponte ma non considera il contributo delle croci di Sant'Andrea, che sono impegnate a taglio. Il calcolo inoltre è stato fatto ipotizzando che le travi siano appoggiate sulle pile, mentre sono quasi incastrate e la resistenza è doppia²⁶³.

Da un rapido calcolo tra l'altezza della trave (1,7 metri) e la luce del ponte (27,96 metri) si ricava che il rapporto tra le due è circa di 1/16. Le indicazioni fornite da Town nelle sue descrizioni suggerivano un rapporto di 1/10, 1/12 tra l'altezza della trave e la luce della campata. È da considerare però che il ponte ha destinazione principalmente di traffico pedonale e non ha manifestato deformazioni evidenti. Peraltro, la distanza ravvicinata cui si trovano le due travi (1 metro) ha contribuito a realizzare una struttura più rigida di un'altra avente larghezza maggiore.

Non è stato possibile sottoporre a carico di prova la passerella prima di metterla in esercizio, ma è stata messa alla prova diverse volte nel corso del suo servizio che è stato di due mesi²⁶⁴. Il passaggio di novanta operai contemporaneamente ha di fatto costituito una prova di carico; considerando una media di 65 Kg per operaio il carico totale è stato di: 5850 Kg, che corrisponde ad un carico di 209,22 Kg/m². In seguito all'applicazione di questo carico non sono stati registrati valori di freccia significativi coerentemente con il calcolo di verifica sopra riportato. Sono state tuttavia significative le oscillazioni in direzione trasversale, che hanno raggiunto circa 25 centimetri²⁶⁵. La flessibilità della struttura potrebbe essere, secondo Garella, la causa a cui si deve la conservazione dell'opera²⁶⁶. Viene riportato l'episodio in cui una barca che trasportava macerie, avendo fatto una manovra falsa, trasportata dalla corrente è andata ad urtare la parte centrale della campata. Il ponte, prosegue Garella, si sarebbe rotto senz'altro se la trave non si fosse deformata ed al tempo stesso la barca, spinta indietro dal colpo non si fosse inclinata leggermente in avanti, non riuscendo così a passare sotto il ponte,

²⁶³ “en second lieu, parce que le calcul est établi comme si les travées ne faisaient que porter sur les palées, tandis qu'elles y sont a peu près encastées, et l'on sait que lorsque l'encastrement est complet, la résistance est doublée”, ibidem, p. 376.

²⁶⁴ “La passerelle qu'on vient de décrire n'a point été soumise à une charge d'épreuve avant d'être ouvert au passage; mais elle a été éprouvée par le fait à plusieurs reprises pendant le temps de son service qui a duré deux mois”, ibidem, p. 376.

²⁶⁵ “L'on n'a pas remarqué, pendant ce moment de surcharge, de flexion verticale appréciable dans les travées; mais les oscillations horizontales étaient très-sensibles, leur amplitude était d'environ 0^m.50, c'est-à-dire 0^m.25 en dedans et en dehors de la position rectiligne d'équilibre.”, ibidem, p. 377.

²⁶⁶ “C'est du reste peut-être à cette flexibilité que la passerelle a dû sa conservation.”, ibidem, p. 377.

spinta dalla corrente rapida del Rodano²⁶⁷. In seguito a questo incidente la campata colpita presentava una freccia orizzontale di 68 centimetri, ridotta a 50 centimetri nel giro di pochi giorni; a parere di Garella questo valore si sarebbe potuto ridurre ulteriormente se la passerella, benché non più necessaria, non fosse stata demolita²⁶⁸.

3.3.2 Calcolo di portata di un ponte provvisorio a Lozanne

L'inondazione straordinaria del 1840 aveva demolito il ponte esistente sull'Azergues presso Lozanne, a nord ovest di Lione. Lo stato delle acque e la nuova inondazione del 1841 hanno impedito che i lavori del nuovo ponte in muratura che lo doveva sostituire terminassero prima dell'inverno. Si è cercato di ripristinare in modo provvisorio il passaggio delle carrozze poiché l'altezza delle acque aveva reso impraticabile il guado utilizzato durante la stagione estiva. Venne realizzato un ponte provvisorio che in breve tempo permettesse la circolazione e consentisse di aspettare la stagione successiva per terminare la costruzione di un ponte definitivo.

Il ponte provvisorio, rappresentato in figura 97, si appoggia sulle spalle in muratura già esistenti ed è progettato in modo che al di sotto dell'impalcato si possano completare i tre archi del ponte definitivo in muratura.

Il ponte è formato da due travi disposte ad un interasse di 2,5 metri, per una lunghezza totale di 43,50 metri (35 metri di luce netta). La parte superiore delle travi longitudinali costituisce un parapetto, la parte inferiore è collegata mediante diagonali di controvento alla trave parallela.

²⁶⁷ “Le pont eût sans doute été brisé si la travée n’ayant fléchi en même temps que le bateau repoussé par le choc s’immergeait légèrement de l’avant, celui-ci n’eût pas pu passer sous le tablier, entraîné par le courant rapide du Rhône.”, *ibidem*, p. 377.

²⁶⁸ “A la suite de cet accident la travée attaquée ne conserva qu’une flèche ou déviation horizontale d’environ 0^m.68, qui aurait peut-être subi une diminution plus forte, si l’on n’avait été dans l’obligation de démolir la passerelle dont le service n’était plus nécessaire.”, *ibidem*, p. 377.

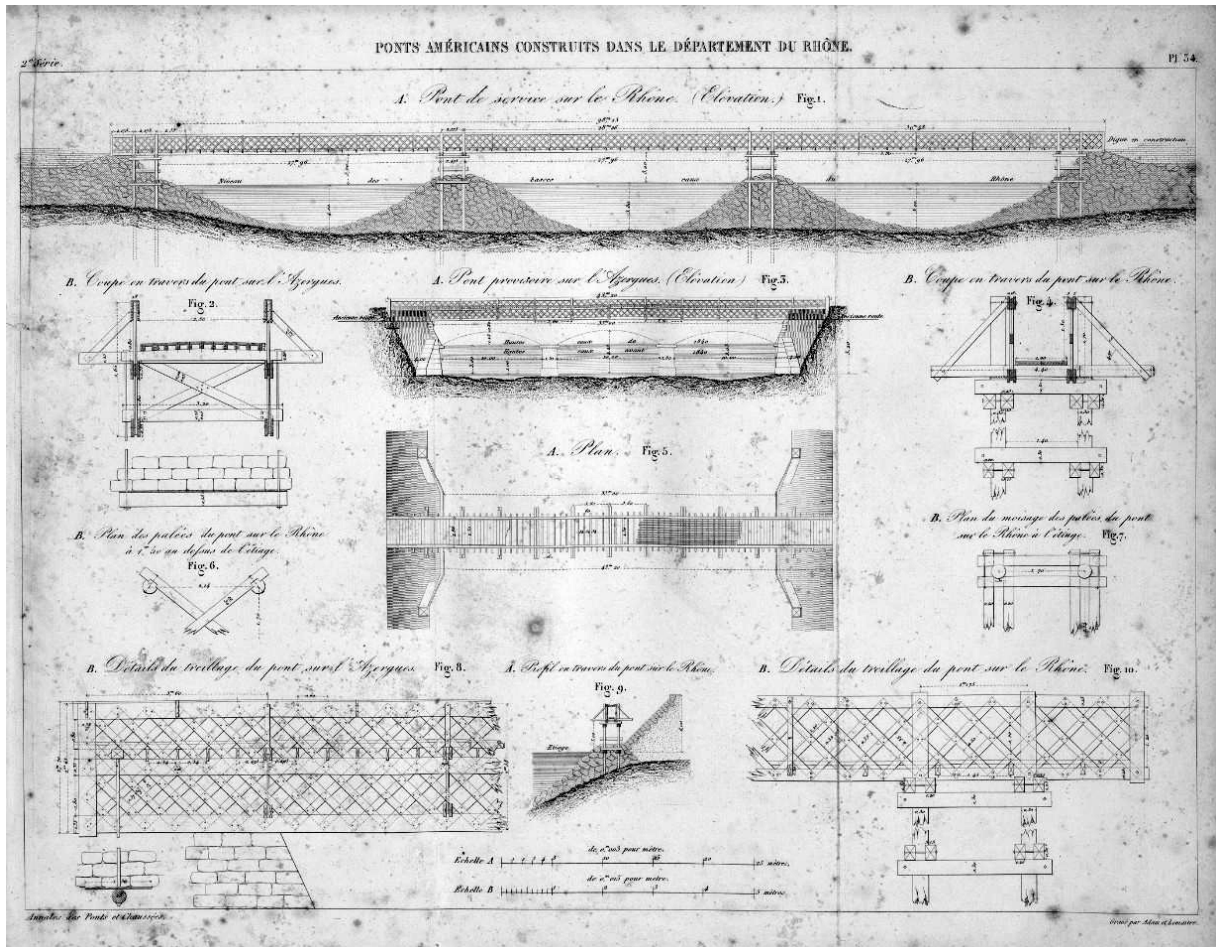


Figura 97. Ponte provvisorio sull'Azergues.

Ciascuna trave, fig. 2 e 8 di figura 97, è formata da elementi diagonali di 15 centimetri di larghezza, 3 centimetri di spessore e 3,50 metri di lunghezza, inclinati di 45 gradi e perpendicolari tra loro²⁶⁹. Su ciascuna trave sono presenti, sia all'esterno che all'interno, tre correnti: uno superiore, uno inferiore ed uno intermedio, aventi larghezza di 35 centimetri e spessore di 6 centimetri, disposti a distanza di 1,15 metri²⁷⁰. Le estremità dei tre correnti sono delimitate da montanti verticali delle medesime dimensioni²⁷¹.

Le giunzioni, prive di intagli, sono state realizzate con chiodi e bulloni come nell'esempio precedente²⁷².

²⁶⁹ "Chaque ferme, fig. 2 et 8, est composée de croisillons de 0^m.15 de large, 3^m.50 de longueur et 0^m.03 d'épaisseur, disposés à 45 degrés, et perpendiculaires les uns aux autres, de manière à laisser entre eux des vides quadrangulaires de 0^m.27 de côté.", ibidem, p. 378.

²⁷⁰ "Ce système de croisillons est maintenu par trois cours doubles de moises longitudinales de 0^m.35 de hauteur sur 0^m.06 d'épaisseur, et 1^m.15 d'axe en axe, et laissant par conséquent entre eux des vides de 0^m.80 de hauteur., ibidem, p. 378.

²⁷¹ "Les extrémités de ces trois cours de moises sont elles-même embrassées et reliées par des doubles moises verticales de même dimension.", ibidem, p. 378.

²⁷² "Les assemblages par juxtaposition sans entailles, sont eux-même fixés au moyen de clous et boulons, comme dans la passerelle don't il a été parlé précédemment.", ibidem, p. 378.

L'impalcato è formato da tavole di 5 centimetri di spessore disposte trasversalmente, appoggiate su elementi longitudinali con sezione quadrata di 10 centimetri di lato ad interasse di 24 centimetri, appoggiate su travi trasversali a loro volta appoggiate sui correnti²⁷³.

Questi travetti trasversali sono di tre tipi: il primo, semplicemente appoggiato sui correnti, misura 25 centimetri di larghezza per 6 centimetri di spessore, il secondo, avente medesimo spessore, si connette ai correnti mediante un giunto a mezzo legno con un intaglio di 5 centimetri; l'ultimo, infine, è formato dalla connessione di due elementi giuntati con un intaglio di 5 centimetri sul corrente. A differenza dei precedenti, questi ultimi misurano 30 centimetri in larghezza in mezzera e 25 centimetri in corrispondenza della parte terminale. I travetti trasversali sono posti tutti ad un interasse di 60 centimetri²⁷⁴.

I correnti inferiori sono legati tra loro da due travi trasversali, disposte ad interasse di 3,60 metri in corrispondenza delle travi che sostengono l'impalcato. Sono rese solidali grazie a due controventi diagonali di 20 centimetri di larghezza e 3 centimetri di spessore, giuntati come le croci di Sant'Andrea delle travi; le estremità dei travetti superiori sono collegate mediante bulloni ad elementi inclinati con sezione trasversale di 10 centimetri di lato e staffe in ferro battuto come visibile in fig. 3 di figura 97²⁷⁵.

Questo sistema di controventi non è sufficiente per una costruzione di lunga durata; senza dubbio sarà opportuno diminuire l'interasse a 3 metri o a 2,4 metri anziché 3,60 e converrà inserire qualche controvento orizzontale tra i due correnti inferiori²⁷⁶.

Il ponte poggia sulle due spalle esistenti in muratura. La carpenteria è stata preparata a Lione e successivamente trasportata a Lozanne. Tutto il legno è di abete rosso e tutti gli elementi eccetto i

²⁷³ “Le plancher, formé d'un platelage transversal de 0^m.05 d'épaisseur, portant sur des pièces longitudinales ou travons de 0^m.10 d'équarrissage en tous sens, espacées de 0^m.24 d'axe en axe, repose sur des poutrelles transversales, qui elles-même s'appuient sur les cours de moises qui sont placés au milieu des fermes”, ibidem, p. 378.

²⁷⁴ “Ces poutrelles sont de trois sortes: les premières, qui ne font que reposer simplement sur les moises, ont 0^m.06 d'épaisseur et une hauteur de 0^m.25 au milieu, réduite à 0^m.20 au bord; les secondes, également de 0^m.06 d'épaisseur, s'assemblent à mi-bois sur les moises par une entaille de 0^m.05 de hauteur; le dernières enfin, se composent d'un système de deux pièces assemblées aussi par une entaille de 0^m.05 sur les moises, mais ayant seulement 0^m.05 d'épaisseur, et espacées de 0^m.10 de milieu en milieu; elles ont, ainsi que les précédentes, 0^m.30 de hauteur au milieu, et 0^m.25 au bord. Toutes ces poutrelles sont distantes de 0^m.60 d'axe en axe.”, ibidem, p. 379.

²⁷⁵ “Le cours de moises inférieurs sont reliés entre eux par deux doubles poutrelles transversales, placées de 3^m.60 en 3^m.60, et correspondant au-dessous des poutrelles doubles qui supportent le plancher et auxquelles elles sont semblables, sauf le bombement de 0^m.05; les unes et les autres sont rendue solidaires par deux contrevents en diagonale de 0^m.20 de largeur sur 0^m.03 d'épaisseur, assemblés de la même manière que les croisillons des fermes; enfin, les extrémités des poutrelles supérieures moisent et serrent à l'aide d'un boulon des contre-fiche de 0^m.10 d'épaisseur, don't l'autre extrémité contre-bute le cours de moises qui relie le haut des croisillons et qui est lui-même recouvert par un lisse de 0^m.05 de hauteur, maintenue par des étriers en fer forgé”, ibidem, p. 379.

²⁷⁶ “Ce système de contre-ventement, on doit le dire, ne serait pas suffisant pour une construction de longue durée; il conviendrait sans doute de diminuer l'intervalle de 3^m.60 en le réduisant à 3^m.00 ou 2^m.40, et de placer quelques contrevents horizontaux entre le deux cours de moises inférieurs.” ibidem, p. 379.

correnti, sono stati comprati già tagliati nel magazzino del legno²⁷⁷. I chiodi ed i bulloni sono stati comprati già fatti ed è stata impiegata una buona parte di quelli che erano già stati utilizzati per la realizzazione della passerella costruita nel 1838 per la diga sul Rodano.

La messa in opera è avvenuta come nel caso precedente, appoggiandosi su cavalletti posti sulle pile del nuovo ponte. I lavori, tempi di trasporto compresi, sono durati 24 giorni e sono terminati il 4 gennaio 1842²⁷⁸. La spesa è stata di 3270,10 franchi, di cui 2309,10 franchi per la fornitura del materiale e 961 franchi per la manodopera. Una nota a piè di pagina specifica che i lavori sono stati realizzati durante la stagione peggiore dell'anno, quando le giornate sono più corte e la terra era ricoperta da 40-50 centimetri di neve. Se si fosse lavorato in una stagione differente ci sarebbe stato un risparmio di circa il 25% sulla manodopera²⁷⁹.

Il costo per la fornitura di 35 metri cubi di legno di abete rosso a 50 franchi per metro cubo ha comportato una spesa di 1750 franchi, ai quali vanno aggiunti 450 franchi per 500 chilogrammi di bulloni. Il costo del trasporto del materiale da Lyone a Lozanne è stato di 282,50 franchi, la preparazione del cantiere è stata pari a 90 franchi e 163,50 franchi per il materiale necessario alla preparazione del cantiere (corde, cavalletti...). La manodopera per la realizzazione ha richiesto 26 giornate di lavoro dei segantini a 2,5 franchi al giorno, 24 giornate di lavoro di mastri carpentieri a 5 franchi al giorno e 194 giornate di carpentieri a 4 franchi giornalieri. Il costo complessivo è stato di 3806,10 franchi²⁸⁰. Il costo per metro quadrato di ponte risulta quindi pari a 35 franchi circa²⁸¹.

Il calcolo della resistenza del ponte viene fatto come nel caso precedente utilizzando la formula:

$$2P = \frac{R \cdot c}{a} \cdot \frac{(b'^3 - b''^3 - b'''^3)}{3 \cdot b} \quad (52)$$

in cui:

R rappresenta il coefficiente di resistenza del legno	= 600.000 Kg/m ²
c indica lo spessore globale dei correnti	= 0,24 metri
b' l'altezza totale delle travi	= 2,65 metri
b'' lo spazio vuoto compreso tra il corrente superiore e quello inferiore	= 1,95 metri
b''' lo spessore del corrente intermedio	= 0,35 metri

²⁷⁷ “La charpente a été préparée à Lyon, et transportée ensuite à Lozanne à 22 kilomètres. Tous les bois sont en sapin; tous, sauf les moises longitudinales, ont été achetés tout sciés dans les magasins de bois”, ibidem, p. 380

²⁷⁸ “Les travaux, y compris le temps du transport, ont duré en totalité vingt-quatre jours, soit à Lyon, soit à Lozanne; ils ont été terminés le 4 janvier 1842.”, ibidem, p. 380.

²⁷⁹ “Les travaux ont été faits pendant la saison la plus mauvaise de l'année, au moment où les jours sont les plus courts; la terre était couverte de 0^m.40 à 0^m.50 de neige; dans toute autre saison il y aurait eu sans doute une économie du quart au moins sur la main-d'œuvre”, ibidem, p. 381.

²⁸⁰ Il costo al metro cubo del legno di rovere è di 50 franchi, il costo di staffe e bulloni di 0,90 franchi al chilogrammo (ne sono stati acquistati 500 chilogrammi), e 0,80 franchi al chilogrammo per i chiodi. Il costo della manodopera è di 2,5 franchi al giorno per i segantini, 4 franchi al giorno per i carpentieri ordinari e 5 franchi al giorno per i mastri carpentieri. Vedi *Annales des Ponts et Chaussées*, 1842, 2^e volume, pp. 380-381.

²⁸¹ La superficie totale del ponte è pari a: 43,50×2,50 = 108,75 m².

a la lunghezza di metà campata = 17,50 metri

Sostituendo i valori si ottiene:

$$2P = \frac{600.000 \cdot 0,24}{17,50} \cdot \frac{11,24}{7,95} = \frac{1.618.560}{139,12} = 11648,64 \text{ Kg}$$

Se il carico P viene ripartito sulla lunghezza del ponte si ottiene:

$$\frac{23.297,28}{35} = 665,63 \text{ Kg/m}$$

Se vogliamo trovare il valore del carico massimo per metro quadrato di impalcato dividiamo il valore trovato per la larghezza dell'impalcato:

$$\frac{665,93}{2,5} = 266,25 \text{ Kg/m}^2$$

Il valore di carico trovato supera quello limite dei 200 kg/m^2 che si usa solitamente e che consente di valutare la solidità o meno della costruzione.

Tuttavia, prima di aprire il ponte al passaggio delle vetture²⁸² è stato ritenuto opportuno effettuare una prova di carico. È stato posizionato per mezza giornata un carico di 13.700 chilogrammi di ghiaia sulla mezzeria del ponte. Non sono state registrate deformazioni significative nelle travi; bisogna precisare che le travi non erano state poste in opera perfettamente allineate orizzontalmente come prevedeva il progetto dell'ingegnere,

Non è stata notata nessuna inflessione apprezzabile nelle travi che, al posto di essere montate in piano, come prevedeva il progetto dell'ingegnere, erano state rialzate in modo da presentare una controfrecchia di 35 centimetri. Questa controfrecchia, che per eccesso di prudenza il mastro carpentiere incaricato dei lavori si era preso la responsabilità di praticare nell'operazione di montaggio, non ha avuto i vantaggi sperati perché, in seguito alle vibrazioni e alle oscillazioni che il passaggio delle vetture imprimeva al ponte, le travi hanno ruotato e preso la forma di una S, in modo da avere nel piano orizzontale la stessa lunghezza che esse avevano nel piano verticale. Tuttavia l'impalcato, divenuto perfettamente orizzontale, non si è inflesso, malgrado il passaggio di vetture molto pesanti che l'hanno attraversato nei mesi successivi.

Dal calcolo del rapporto tra l'altezza della trave (2,65 m) e la luce della campata (35 metri) si ricava il rapporto che può essere confrontato con i valori suggeriti da Town. In questo caso l'altezza è pari ad 1/13, valore superiore rispetto al caso precedente, in ogni caso minore di quello suggerito da Town. Una volta aperto il ponte al traffico (anche di vetture) sono state registrate deformazioni, dovute alla diversa entità dei carichi agenti.

²⁸² Il peso di una vettura vuota presenta valori contrastanti: negli Annales des Ponts et Chaussées del 1841, 2^o volume, (p. 363) è indicato un valore di 2160 chilogrammi per vetture con diametro delle ruote di 11 centimetri.

Dalla descrizione di queste due realizzazioni di ponti “americani” a Lione e nei pressi della valle del Rodano si constata che la costruzione di un ponte di questo tipo non costa più di 60 franchi al metro quadrato, pile, pittura e bitumazione comprese, escluse le opere in muratura delle spalle .

La diffusione di questo sistema permetterà di sostituire con ponti fissi quelli provvisori poco considerati dalle imprese che realizzano ponti sospesi e presenterà notevoli vantaggi nella realizzazione di ponti militari²⁸³.

3.3.3 Verifica di resistenza della nuova campata del ponte di Vaudreuil

La *Notice* n° 9 contenuta negli *Annales des Ponts et Chaussées* del primo volume del 1841 riporta la relazione dell'ingegner Joseph Alexandre Tonnet De Saint Claire riguardo al progetto e alla realizzazione di un ponte provvisorio nei pressi di Vaudreuil.

L'inondazione straordinaria verificatasi nel gennaio 1841, causata dallo scioglimento della neve nel fiume Eure nel nord della Francia, aveva causato il crollo di una delle pile in muratura del vecchio ponte di Vaudreuil, sulla *route royale* n° 182 che collega Mantes a Rouen. Il ripristino tempestivo del ponte aveva provveduto a ristabilire, pur in maniera provvisoria, la via di comunicazione. Il crollo della pila aveva comportato il crollo delle due campate ad essa adiacenti, per cui la parte da ripristinare aveva una lunghezza di circa 17 metri: la soluzione di un impalcato in legno si era presentata come la più semplice e la più economica; ma non era stato altrettanto semplice individuare punti d'appoggio sicuri per l'impalcato²⁸⁴.

La presenza di macerie nel letto del fiume, la difficoltà dovuta alla violenza ed alla altezza delle acque avevano suggerito di utilizzare un unico elemento in legno. L'idea iniziale di utilizzare una serie di puntoni per ridurre la luce della trave venne abbandonata perché la terra di riempimento, messa allo scoperto dal crollo del rivestimento in pietra, non era in grado di resistere alla spinta esercitata dai puntoni e la soluzione con *contraffissi* avrebbe ristretto eccessivamente il passaggio per le barche. Per ovviare a tutti questi inconvenienti la soluzione ideale richiedeva l'adozione di un sistema che non esercitasse spinte e che non richiedesse punti d'appoggio al di sotto dell'impalcato: questi erano i vantaggi del sistema proposto da Ithiel Town, descritto nel testo di Poussin²⁸⁵; per questo motivo Tonnet De Saint-Claire decise di utilizzare questa soluzione.

²⁸³ “L'application de ce système permettrait sans doute de remplacer par des ponts fixes les bacs encore existants que la modicité de leur produit a fait négliger par les compagnies soumissionnaires de ponts suspendus, et on ne peut douter qu'il n'offrît de nombreux avantages pour l'établissement des ponts militaires.” In *Annales des Ponts et Chaussées*, 1842, 2^e volume, p. 383.

²⁸⁴ “Un tablier en charpente était l'ouvrage le plus simple et le plus convenable; mais il n'était pas facile de lui donner des points d'appui qui offrissent quelque sécurité” in *Annales des Ponts et Chaussées*, 1841, 1^e volume, p. 303.

²⁸⁵ Guillaume Tell Poussin, *Travaux d'améliorations intérieures projetés ou exécutés par le gouvernement général des États-Unis d'Amérique de 1824 a 1831 par Guillaume Tell Poussin ex-major au Corps du Génie Américain et Aide-de-Camp du Général du Génie Bernard*, Paris, Anselin Libraire, 1834.

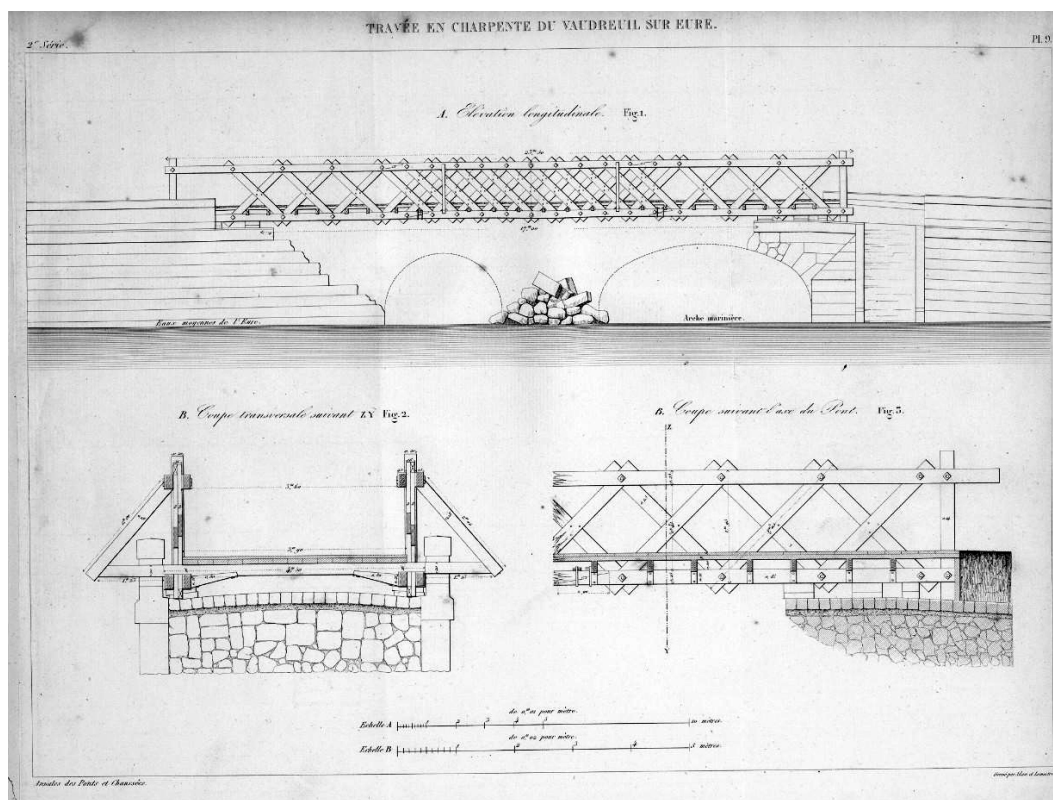


Figura 98. Ponte di Vaudreuil.
Tavola n° 9 in *Annales des Ponts et Chaussées* 1841 1^{er} volume.

Le due travi sono formate da dodici croci di Sant'Andrea ciascuna, e ciascuna croce a sua volta è composta da due travi in abete di 25 centimetri di larghezza, 8 centimetri di spessore e 3,05 metri di lunghezza. Queste travi sono collegate tra di loro senza intagli e sono giuntate mediante tre perni in legno di rovere di 3,7 centimetri di diametro. Le croci di Sant'Andrea adiacenti si sovrappongono in modo da formare uno spessore doppio di circa 16 centimetri e sono a loro volta legate al corrente superiore ed a quello inferiore mediante un bullone. La larghezza netta del ponte è di 3,6 metri.

Le travi vengono inizialmente realizzate utilizzando croci di Sant'Andrea singole come rappresentato in fig. 3 di figura 98, ma in un secondo tempo l'ingegnere si rende conto che è necessario aggiungere altre croci di Sant'Andrea intermedie nella mezzeria della trave. Ne vengono inserite cinque in più, disposte come le precedenti²⁸⁶.

I correnti longitudinali sono realizzati in legno di rovere, sono larghi 25 centimetri, spessi 15 centimetri e lunghi 23,50 metri; la distanza tra il corrente superiore e quello inferiore è di 1,45 metri. Ciascun corrente è formato dalla giunzione di tre elementi lunghi 90 centimetri ciascuno e connessi mediante giunto a dardo di Giove. Nel corrente inferiore il giunto è rinforzato da staffe in ferro forgiato.

²⁸⁶ "Nous n'avions d'abord composé nos fermes qu'avec de simples croix de Saint-André, comme nous venons de l'exposer; mais depuis nous avons reconnu la nécessité, ainsi que nous le dirons plus loin, d'ajouter des croix de Saint-André intermédiaires dans le milieu des fermes; elles sont disposée absolument comme les premières et au nombre de *cinq* dans chaque ferme." In *Annales des Ponts et Chaussées*, 1841, 1^{er} volume, pp. 304-305.

Sul corrente inferiore della trave poggiano ventiquattro travetti realizzati in legno di quercia, posti ad un interasse di 85 centimetri e lunghi 4,5 metri; la sezione trasversale ha larghezza di 10 centimetri ed altezza di 20. Tonnet De Saint-Claire osserva che le dimensioni di questi travetti sono troppo contenute rispetto ai carichi che devono sostenere e nota che sotto l'effetto di carichi elevati si inflettono notevolmente; sarebbe stato necessario aumentarne l'altezza o armarle in modo da ottenere una maggior resistenza a flessione²⁸⁷.

L'impalcato è realizzato mediante la sovrapposizione di un doppio strato di tavole: il primo formato da elementi di 8 centimetri di spessore e inchiodato direttamente alle travi di impalcato, il secondo, perpendicolare al precedente, con tavole di 5 centimetri di spessore.

Per mantenere la posizione verticale delle travi a graticcio sono stati posizionati quattro elementi di 4 metri di lunghezza in corrispondenza delle parti terminali della trave stessa; la loro sezione trasversale è di 20 × 24 centimetri. Altri due travetti della soletta di impalcato, posti circa nella parte centrale della campata, sono stati prolungati esternamente di 1,23 metri per ciascun lato. Un elemento diagonale di 2 metri di lunghezza e sezione trasversale con larghezza di 18 centimetri ed altezza 10 è stato vincolato al travetto dell'impalcato e al corrente superiore come indicato in fig.2 di figura 98.

Le travi sono state completamente realizzate in cantiere, secondo le indicazioni date, sono stati realizzati i fori per i bulloni nei correnti e negli elementi diagonali, successivamente sono state smontate, trasportate e montate nuovamente, pezzo per pezzo, a partire dal corrente inferiore e imbullonate. Infine sono stati realizzati i giunti degli elementi diagonali, messe in opera le travi e posizionati i travetti e le tavole dell'impalcato. Tutte queste operazioni, prosegue Tonnet De Saint-Claire, non presentano alcuna difficoltà²⁸⁸, non essendo necessario nessun taglio né assemblaggio ulteriore e la circolazione può essere rapidamente ristabilita.

Poiché l'opera non è che provvisoria non abbiamo preteso che la struttura fosse protetta da un rivestimento se non nelle giunzioni, e sono stati ammessi dei cedimenti nelle travi di bordo che non ne potessero compromettere la solidità. Manca però il dato quantitativo; pertanto non è possibile effettuare nessun confronto con i valori limite attualmente in vigore.

La relazione prosegue con un paragrafo riguardante il calcolo della resistenza delle travi, normalmente non presente in questo tipo di relazione. Ciò che si rende immediatamente evidente è la collocazione del paragrafo dopo la descrizione degli elementi che costituiscono la struttura, delle loro dimensioni, della realizzazione e messa in opera. Si configura infatti più come una verifica della struttura che non

²⁸⁷ “Les dimensions données à ces poutrelles sont un peu trop faibles, eu égard à leur portée; elles fléchissent sous les fortes charges; il eût fallu augmenter leur hauteur ou les armer, de manière à leur donner plus de résistance à la flexion.” In *Annales des Ponts et Chaussées*, 1841, 1^{er} volume, pp. 305-306.

²⁸⁸ “toutes ces opérations n’offrant aucune difficulté, et la charpente n’exigeant aucune coupe ni assemblage, le pont a pu être livré et la circulation rétablie très-prompement.” In *Annales des Ponts et Chaussées*, 1841, 1^{er} volume, p. 307.

il progetto delle dimensioni degli elementi²⁸⁹. Il momento resistente delle due travi è correttamente espresso considerando il momento di inerzia di una sezione costituita dai correnti superiori ed inferiori, assumendo che siano rigidamente connessi dalle diagonali. La formula impiegata fa esplicito riferimento al testo di Navier²⁹⁰:

$$\rho = \frac{R \cdot a \cdot (b'^3 - b''^3)}{6 \cdot b'} \quad (53)$$

dove:

a indica la larghezza complessiva dei quattro correnti (15 centimetri)	= 60 centimetri
b' rappresenta l'altezza totale della trave	= 1,95 metri
b'' è la distanza interna tra il corrente superiore e quello inferiore	= 1,45 metri
R è la resistenza del legno	= 600.000 Kg/m ²
ρ è il momento resistente sviluppato dalle due travi	= 134.346 Kgm

Questo momento resistente deve essere minore o uguale al momento generato dalle forze esterne. Il valore di quest'ultimo viene espresso mediante la formula:

$$\frac{1}{2} \cdot p \cdot c^2 \quad (54)$$

dove:

p rappresenta il carico distribuito sulla trave e
 c indica metà della lunghezza della campata.

Il momento esterno è pertanto correttamente espresso.

Il carico complessivo della struttura in legno è di 23.000 kilogrammi per 17 metri di lunghezza, che equivale ad un carico distribuito sulla lunghezza della trave pari a 1353 Kg/m.

Poiché la larghezza del ponte è di 3,6 metri, e poiché l'ingegnere ipotizza un carico accidentale di 200 Kg/m² si ottiene un carico di 720 Kg/m, un valore molto modesto rispetto ai criteri in uso oggi, ma evidentemente adeguato alle esigenze dell'epoca. La somma del peso proprio e del carico accidentale dà un carico complessivo pari a:

$$p = 1353 + 720 = 2073 \text{ Kg/m}$$

Il valore del momento dovuto a tale carico vale:

$$\frac{1}{2} \cdot p \cdot c^2 = 2073 \cdot 36 = 74.628 \text{ Kgm} \quad (55)$$

Dal confronto tra i valori dei due momenti risulta evidente che il momento determinato dai carichi è molto inferiore al momento resistente (il 55%). Il coefficiente di sicurezza è quindi di poco inferiore a

²⁸⁹ "Avant de fixer définitivement l'équarrissage des moises et leur écartement dans les fermes, nous avons soumis au calcul les disposition de notre projet, pour savoir si elles offraient une résistance suffissante." In *Annales des Ponts et Chaussées*, 1841, 1^{er} volume, p. 307.

²⁹⁰ Claude Louis Henri Marie Navier, *Résumé des Leçons sur l'établissement des constructions*, Paris, 1826.

2, intendendosi che il valore corrisponde ad una resistenza di 60 Kg/m^2 , ben distante dalla rottura del materiale.

Per questo motivo, prosegue Tonnet De Saint-Claire, è stato deciso di adottare in tutta sicurezza le dimensioni indicate nel calcolo sopra esposto²⁹¹.

Il calcolo di verifica svolto era in realtà corretto. Mancava una verifica a taglio, e cioè degli elementi diagonali e, soprattutto, la verifica di deformabilità. Dal calcolo del rapporto tra l'altezza della trave (1,95 metri) e la luce della campata (17 metri circa) si ottiene un risultato pari a circa $1/8$, $1/9$, valore superiore a quello indicato da Town ($1/10$, $1/12$).

Il ponte fu aperto al traffico il 10 febbraio successivo all'inondazione di gennaio; inizialmente le travi erano state realizzate con croci di Sant'Andrea semplici ma, dopo sei giorni di servizio, furono misurati, nella mezzera del corrente superiore ed inferiore, spostamenti di circa 8 centimetri (circa $1/200$ della luce).

Malgrado ci sia mantenuti al di sotto del valore di $1/10$ per il rapporto altezza/luce delle travi indicato da Town, l'impalcato registra dei cedimenti notevoli. La regola proposta da Town non è quindi sufficiente in questo caso. Anche la verifica di Navier, che apparentemente porta un giudizio favorevole sulla portata, è probabilmente stata effettuata sottostimando i carichi; è inoltre evidente che in questo caso alla verifica di resistenza va affiancata la verifica di deformabilità.

Gli spostamenti dell'impalcato furono osservati per settimane; sei settimane più tardi si riscontrò un valore della freccia doppio rispetto al precedente ($1/100$ della luce) e fu deciso di aggiungere cinque croci di Sant'Andrea nella parte centrale della campata per aumentare la rigidità ed evitare un ulteriore incremento della freccia²⁹². In seguito a questo intervento furono rilevate oscillazioni dell'ordine di quelle di un ponte sospeso, e non furono registrati movimenti fuori piano della trave.

L'ultimo paragrafo infine è dedicato ai costi; vengono indicate le quantità di legno necessarie per la realizzazione della trave: 13,13 metri cubi di legno di rovere e 15,59 metri cubi di legno di abete rosso. Il costo a metro cubo per il legno di rovere è di 112 franchi e di 98 franchi per il legno di abete. Il prezzo include la fornitura e la posa e comprende anche il costo delle parti metalliche necessarie per realizzare le giunzioni.

La spesa complessiva fu quindi di 1470,56 franchi per il legno di rovere e di 1527,82 franchi per il legno di abete rosso, per un totale di 2998,35 franchi.

²⁹¹ “On voit que ce dernier moment n'est que les $\frac{55}{100}$ du moment des résistances; ce qui nous a décidé à adopter avec toute sécurité les dimensions indiquées dans le calcul que nous venons de donner” in *Annales des Ponts et Chaussées*, 1841, 1^{er} volume, p. 308.

²⁹² “après six jours de service, nous avons constaté que les moises supérieure et inférieure n'étaient plus horizontales et avaient pris une flèche de $0^m.08$ mesurée au milieu de la portée de $17^m 00$: six semaines après, nous avons reconnu que cette flèche était doublée, et c'est alors que nous nous sommes décidé à ajouter cinq croix de Saint-André dans la milieu de chaque ferme pour augmenter la résistance et arrêter cette flexion.” In *Annales des Ponts et Chaussées*, 1841, 1^{er} volume, p. 308.

Una nota di commento finale riassume i dati dell'intervento: costo inferiore ai 3000 franchi per realizzare un ponte di 17 metri di lunghezza e 3,6 metri di larghezza, in grado di resistere a carichi elevati, che non esercita spinte sulla muratura su cui poggia, semplice da realizzare. Tutto questo conferma i vantaggi, presentati nel testo di Poussin, del sistema dei ponti americani in legno, con svariate possibilità applicative²⁹³.

²⁹³ “Tous ces avantages mis en évidence par l’essai que nous venons de faire au Vaudreuil, confirment, ainsi que l’avait annoncé d’ailleurs l’ouvrage de M. Poussin, que le système des ponts de bois américaines est certainement susceptible d’un grand nombre d’application utiles, et sous ce point de vue nous avons pensé que l’exposé du dit essai pourrait offrir quelque intérêt.” In *Annales des Ponts et Chaussées*, 1841, 1^{er} volume, p. 309.

CONCLUSIONI

L'obiettivo iniziale che mi ha spinto con entusiasmo in questo lavoro di ricerca è stato quello di determinare in quale momento, circostanza o condizione la nuova scienza del costruire avesse iniziato ad essere posta alla base della progettazione come esigenza ineludibile.

Il tema dei ponti in legno è stato il filo conduttore della ricerca. La tipologia strutturale del ponte, infatti, costituisce una buona esemplificazione per lo studio della flessione, che domina la ricerca scientifica nell'ambito dei problemi delle costruzioni nel periodo di tempo studiato. Durante lo svolgimento della ricerca, del resto, anche la scelta del legno come materiale costruttivo di riferimento si è rivelata pienamente efficace. Da un lato, la sperimentazione volta alla caratterizzazione delle proprietà meccaniche dei materiali si è spesso concentrata sul legno che, in virtù della simmetria del comportamento, si prestava, a differenza della pietra, anche agli studi sulla flessione e sulla trazione, oltre che a quelli sull'instabilità degli elementi compressi. Dall'altro lato, i costruttori dell'epoca studiata si sono avvalsi dell'uso del legno per compiere gradualmente il passaggio dagli schemi strutturali della trave e dell'arco a quello, più evoluto, del sistema reticolare. Il legno, in questo modo, guida il passaggio dalla pietra all'acciaio, inteso come materiale idoneo per la realizzazione di strutture portanti, grazie alla disponibilità di una serie di elementi strutturali derivati da processi di produzione industriale.

Il periodo studiato mostra con piena evidenza il progresso intrecciato degli strumenti matematici e della ricerca sperimentale; quest'ultima è sempre intesa in tutte le sue varie potenzialità: come fonte di suggerimenti nella ricerca di regole di interpretazione dei fenomeni reali, come conferma di leggi fisiche, come strumento per la corretta definizione di parametri all'interno di procedimenti di calcolo. È stato interessante scoprire come le nuove formulazioni teoriche vengono impiegate in un primo tempo come strumento di verifica di opere esistenti e solo in un secondo tempo come strumenti di progetto per il proporzionamento degli elementi strutturali. L'esempio dell'applicazione della teoria della flessione di Navier alle travi da ponte del sistema Town è un'interessante esemplificazione di questo fatto.

Lo studio svolto si è basato su una lunga e attenta selezione di documenti, di luoghi, di fatti che consentissero la miglior ricostruzione del fenomeno analizzato: la progressiva affermazione del metodo scientifico nella progettazione delle strutture. La selezione non poteva che essere parziale ed

essa stessa ha portato ad evidenziare una serie di altri documenti e fatti che avrebbero potuto essere analizzati in alternativa.

Il percorso documentato in sintesi in questa ricerca ha evidenziato, come elemento di particolare interesse, il lungo dibattito sulla “regola di Galileo” e la progressiva messa a punto della meccanica strutturale, mostrando come sia stata costantemente perseguita una stretta relazione tra “pratica” (prove sperimentali) e “teoria” (formulazioni analitiche in grado di esprimere la resistenza strutturale). All’origine di questo processo sta la grande intuizione di Galileo, secondo la quale il carico che un elemento è in grado di sopportare non è più basato unicamente su un rapporto tra le dimensioni ma anche su una caratteristica, tipica di ciascun materiale, che è la resistenza.

In questo ambito, buona parte del secolo successivo a Galileo, il XVIII, è stata dedicata a determinare il valore della resistenza dei materiali (le sperimentazioni furono svolte su una grande quantità di materiali diversi). Sul fronte della definizione di una legge che esprima le dimensioni degli elementi rispetto al carico applicato, questo periodo è caratterizzato da “variazioni sul tema” della regola di Galileo; manca ancora una visione chiara di tutti gli elementi in gioco e la coscienza della presenza di stati tensionali differenti. Rondelet, all’inizio dell’800, è ancora convinto che gli stati tensionali di compressione e di flessione debbano fare riferimento sempre a quello di trazione.

Nel tempo, si fa strada la consapevolezza che il legno non può essere descritto come un materiale a comportamento perfettamente elastico e lineare: Girard ha distinto, osservando le prove sperimentali, la fase elastica da quella post-elastica e Gauthey, per una maggior semplicità nei calcoli, decide di far riferimento a questa prima fase soltanto.

Dalla fine del XVIII secolo si rivela sempre più necessaria la padronanza dello strumento matematico per giungere alla corretta soluzione del problema. Un caso assolutamente eccezionale è rappresentato dalla figura di Rondelet che non possiede conoscenze specifiche di matematica ma è un formidabile ed attento sperimentatore. Modificando la regola di Galileo sulla base dei dati sperimentali, egli riesce a formulare una legge che è molto vicina a quella corretta, successivamente indicata da Navier. Questa, frutto della semplificazione di una formula più complessa, è basata anche sui lavori di Gauthey e di Sganzin, che costituiscono una fase preliminare alla definitiva formulazione della teoria sulla trave inflessa ad opera dello stesso Navier.

Altri argomenti, tipici della nascente meccanica strutturale, non sono stati affrontati in questo lavoro di ricerca, come per esempio quello della trattazione del taglio, che verrà definita e formalizzata qualche anno più tardi da Jourawski. È interessante notare come gli *Annales des Ponts et Chaussées* del 1856 e 1860 riportino il lavoro che Jourawski aveva pubblicato qualche anno prima a S. Pietroburgo. La cosa è interessante sotto due aspetti: il primo è che lo strumento degli *Annales* è realmente attento a quanto di interessante accade anche al di fuori del territorio francese, il secondo che la città di S. Pietroburgo

aveva risentito fortemente dell'influenza di matrice francese nella formazione della Accademia delle Scienze, presso la quale avevano lavorato Eulero e Bernouilli, e della Scuola di Ingegneria, fondata tra gli altri da Lamé e Clapeyron. La formulazione della teoria semplificata del taglio consente finalmente di spiegare il funzionamento delle travi composte, da lungo tempo impiegate pur senza conoscerne il calcolo, e conduce ad una visione completa del problema della trave inflessa.

Le istituzioni culturali francesi, che sono al centro dell'attenzione in questo studio di ricerca, si vengono quindi a confermare come il cuore degli intrecci culturali che hanno guidato per un lungo periodo lo sviluppo della nuova scienza del costruire, sia nella sua evoluzione teorica, sia nell'applicazione al progetto.

1. FONTI

Early Works Biblioteca Royal Institute of British Architects - Londra

Michael SHANAHAN, Cristoforo DALL'ACQUA, *Plans and Elevations of Stone and Timber Bridges in France, Germany, Switzerland, and Italy together with a plan of an intended bridge at Londonderry*, Dublin, 1770

Early Works, 2984, E.c. 125

École Nationale des Ponts et Chaussées - Parigi

Fonds Ancien

- Disegni - DG

3 (Senza data); 156 (1788); 223 (182*); 239 (1818); 452 (1806); 454 (1812); 457 (1801); 458 (1801); 460 (1816); 461 (1816); 466 (1806); 468 (1799); 469 (1799); 470 (1798-1799); 472 (1798-1799); 473 (1798-1799); 474 (1800-1801); 478 (1806); 481 (1812); 497 (17**); 752 (1816); 793 (1773); 1851 (1801); 1913 (1801-1803); 1229 (Senza data); 2915 (1818); 2991 (18**); 2994 (2994); 2996 (1797); 3050(1808); 3051 (1808); 3052 (1808);

- Manoscritti - MS

1464; (1772)

233; (1798)

2611; (1757-1802)

2613; (1793)

2620 (1772)

John Soane Museum - Londra

SM 79/1/13

StaatsArchiv - Aarau

AA/3498

f. 42, f. 74, f. 80: f. 201

Bibliografia

CAPITOLO 1

Leon Battista ALBERTI, *De Re Aedificatoria*, Firenze, 1450-1452

Johann Gerard Reinhard ANDREAE, *Briefe auf der Schweiz nach Hannover geschrieben im dem Jare 1763*, Zürich und Winterthur, presso John Caspar Füssli, 1776, pp. XI-XXII, Tavola *; pp. 39-41F.B.

ARTZ, *The Development of Technical Education in France 1500-1850*, M.I.T. Press, 1966

Bernard Forest de BÉLIDOR, *La science des ingénieurs dans la conduite des travaux de fortification et d'architecture civile*, Paris, Claude Jombert, 1729 (consultata la versione italiana di Luigi Masieri: Bernard Forest de Bélidor, *La Scienza degli ingegneri di Belidor con note del signor Navier*, Milano, Truffi, 1832)

Bernard Forest de BÉLIDOR, *Nouveau cours de Mathématique à l'usage de l'artillerie et du genie ou l'on applique les Parties les plus utiles de cette Sciences à la Theorie & à la pratique des differens sujets qui peuvent avoir rapport à la guerre*, Paris, Claude Jombert, 1725

Bernard Forest de BÉLIDOR, *Architecture Idraulique, ou l'Art de Conduire, d'elever, et de menager les Eaux pour differens besoins de la vie*, Paris, 1737-1754

Luigi BLANCO, *Stati e funzionari nella Francia del Settecento: gli "Ingénieurs des ponts et chaussées"*, Bologna, Il Mulino, 1991

André BRUNOT, R. COQUAND, *Le Corps des Ponts et Chaussées*, Paris, Editions du Centre National de la Recherche Scientifique, 1982

George-Louis Leclerc, comte de BUFFON *Expériences sur la force du Bois. Second Mémoire, Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, Année 1741*", Paris

Pierre BULLET, *L'architecture pratique, qui comprend le détail du toise, & du Devis des ouvrages*. Paris, Estienne Michalet, 1691 (Consultata edizione: Pierre Bullet, *L'architecture pratique*, Paris, Libraires Associées, 1788)

Charles Augustin COULOMB, *Théorie des machines simples en ayant égard au frottement de leurs parties et à la roideur des cordages*, Mémoire de Mathématique et de Physique, présentés à l'Académie Royale des Sciences par divers Savans, et lus dans ses assemblées, 1785, pp. 161-332

Augustin-Charles D'AVILER, *Dictionnaire d'architecture civile et hydraulique, et des Arts qui en dépendent*, Paris, Charles-Antoine Jombert, 1755

Gabriel Philippe DE LA HIRE, *L'art de charpenterie de Mathurin Jousse. Corrigé & augmenté de ce qu'il y a de plus curieux dans cet Art, & des machines les plus nécessaires à un Charpentier*, Paris, Thomas Muette, 1702

Denis DIDEROT, Jean le Rond D'ALEMBERT, *Encyclopédie, ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, Paris, 1751-1777 (edizione consultata *Encyclopédie, ou dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, ed. Denis Diderot and Jean le Rond D'Alembert, University of Chicago: ARTFL Encyclopédie Projet, Robert Morrissey, 2010)

Charles Coulton GILLISPIE, *Science and polity in France at the end of the old regime*, 1980, (consultata edizione italiana *Scienza e potere in Francia alla fine dell'ancien régime*, Bologna, Il Mulino, 1983)

Dimitrii Ivanovich JOURAWSKI, *Sur la résistance d'un corps prismatique et d'un pièce composée en bois ou en tôle de fer à une force perpendiculaire à leur longueur*, in *Annales des Ponts et Chaussées, Mémoires et documens relatifs a l'art des constructions et au service de l'ingénieur; lois, ordonnances et autres actes concernant l'administration des Ponts et Chaussées*, 2^{ème} semestre, 1856, pp. 328-351

- Dimitrii Ivanovich JOURAWSKI, *Remarques sur les poutres en treillis et les poutres pleines en tôle*, in *Annales des Ponts et Chaussées, Mémoires et documens relatifs a l'art des constructions et au service de l'ingénieur; lois, ordonnances et autres actes concernant l'administration des Ponts et Chaussées*, 2^{ème} semestre, 1860, pp. 113-128
- Jean-Charles KRAFFT, *Plans, coupes et élévations de diverses production de l'art de la charpente*, Paris, Levrault, 1805
- Henri LEMMONIER, *Procès verbaux de l'Académie Royale d'Architecture, 1671-1793*, Paris, Jean Shemit, 1911-1929, vol. VIII
- Jacob LEUPOLD, *Theatrum Pontificale oder Schauplatz der Brücken und Brücken-Baues*, Leipzig, Christoph Zunkel, 1726
- Angelo MAGGI, Nicola NAVONE, *John Soane and the Wooden Bridges of Switzerland. Architecture and the Culture of Technology from Palladio to the Grubenmann*, London e Mendrisio, 2003
- Claude Louis Marie Henri NAVIER, *Résumé des Leçons Donnés a L'École des Ponts et Chaussées sur l'Application de la Mécanique à L'Établissement des Construction et des Machines*, Paris, Firmin Didot 1826, (consultata seconda edizione 1833)
- Andrea PALLADIO, *I Quattro Libri dell'Architettura*, Venezia, Domenico de Franceschi, 1570
- Jean Marie PEROUSE de MONTCLOSE, *Concours de l'Académie royale d'architecture au XVIII siècle: inventaire general des monuments et des richesses artistiques de la France*, Paris, Berger-Levrault, 1984
- Antoine PICON, *L'invention de l'ingénieur moderne. L'École des Ponts et Chaussées 1747-1851*, Paris, Presses de l'École des Ponts et Chaussées, 1992
- Antoine PICON, *Architects and engineers in the Age of Enlightenment*, Cambridge, Cambridge University Press, 1992
- Sebastiano SERLIO, *I Sette Libri dell'Architettura*, Venezia, Francesco de' Franceschi, 1584
- F. P. H. TARBÉ de ST. HARDOUIN, *Notices biographiques sur les ingénieurs des Ponts et Chaussées depuis la création du Corps en 1716 jusqu'a nos jours*, Paris, Librairie Polytechnique, 1884
- René TATON, *Enseignement et diffusion des sciences en France au XVIIIe siècle*, Paris, Herman, 1964
- Philippe Charles VARENNES DE FENILLE, *Mémoires sur l'administration forestière, et sur les qualités individuelles des bois indigènes ou qui sont acclimatés en France auxquels on a joint la description des bois exotiques que nous fournit le commerce*, Bourg, Impr. de C.C.G. Philipon, 1792
- Karl Friederick von WIEBEKING, *Traité contenant une partie essentielle de la science de construire les ponts, avec une description de la nouvelle méthode économique, de construire des ponts à arches de charpente, inventée par l'auteur et appliquée à douze grands ponts, exécutés sous le ministère du comte Montgelas, décrits et représentés dans cet ouvrage: pour servir de complément aux oeuvres de Perronet. Par Charles Frédéric Wiebeking, Avec dix sept grandes planches, faisant suite à celles appartenant à l'architecture hydraulique de l'auteur*, Munich, presso l'autore, 1810

CAPITOLO 2

- Peter BARLOW, *A treatise on the strength of timber, cast iron, malleable iron, and other materials with rules for application in Architecture*, London, John Weale, 1837
- Edoardo BENVENUTO, *La Scienza delle Costruzioni ed il suo sviluppo storico*, Firenze, Sansoni, 1981 (consultata edizione Roma, Edizioni di Storia e Letteratura, 2006)
- Jacques BERNOUILLI, *Veritable hypothèse de la résistance des solides avec la démonstration de la courbure des corps qui sont ressort*, in *Mémoire de l'Académie Royale des Sciences*, 1705
- George-Louis Leclerc, comte de BUFFON, *Moyen facile d'augmenter la solidité, la force et la durée du bois*, *Mémoire de l'Académie Royale des Sciences*, Paris, 1738.
- George-Louis Leclerc, comte de BUFFON *Expériences sur la force du Bois. Second Mémoire*, *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, 1741, Paris
- George-Louis Leclerc, comte de BUFFON, *Reflexions sur la Loi d'Attraction*, *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, Année 1745, Paris, 1749
- Salvatore DI PASQUALE, *L'arte del costruire. Tra conoscenza e scienza*, Venezia, Marsilio, 1996
- Henri Louis DUHAMEL Du MONCEAU *Reflexions & Experiences sur la force du Bois*, *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, Paris, 1742
- Henri Louis DUHAMEL Du MONCEAU *Expérience sur l'imbibition de différentes qualités de bois de Chêne plonge dans l'eau, & sur leur dessechement dans l'air libre*, *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, Paris, 1744
- Henri Louis DUHAMEL du MONCEAU, *Traité de l'exploitation des bois, ou moyen de tirer un parti avantageux des taillis demi-futaies et d'en faire une juste estimation Avec la Description des Arts qui se pratiquent dans les Forêts: faissant partie du traité complet des bois et des forêts*, Paris, Guerin & Delatour, 1764
- Henri Louis DUHAMEL du MONCEAU, *Expériences pour connaître la force des bois*, *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, 1768
- Henri Louis DUHAMEL du MONCEAU, *Du Transport, de la conservation et de la force des bois*, Livre 5, Paris, 1780 (consultata versione Paris, Leroi, 1835)
- Armand Rose EMY, *Description d'un nouveau système d'arcs pour les grandes charpentes*, Paris, 1825
- Armand Rose EMY, *Traité de l'art de la charpenterie*, Paris, 1837-1841
- Leonhard EULER, *De curvis elasticis in Methodus inveniendi lineas curvas*, Lausanne, 1744
- Leonhard EULER, *Sur la force des colonnes*, *Accademia delle Scienze di Berlino* il 1 settembre 1757, pubblicato nei *Memoires de l'Academie des Sciences de Berlin* n° 13, Berlino, Haude et Spener, 1759, pp. 252-282
- Nicolas FOURNEAUX, *L' Art du trait de charpenterie par le sieur Nicolas Fourneau, maitre charpentier à Rouen, ci-devant conducteur de charpente et démonstrateur du trait à Paris*, Rouen, Laurent Dumesnil, 1767
- Galileo GALILEI, *Discorso intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica e i movimenti locali*, Leida, Elsevirii, 1638 (consultata edizione Galileo Galilei, *Opere*, Milano, Rizzoli, 1938, vol. 2)
- Émiland Marie GAUTHEY, *Traité de la construction des ponts par M. Gauthey, publié par M. Navier, ingénieur*, Paris, Firmin Didot, 1809-1813
- Pierre Simon GIRARD, *Traité analytique de la résistance des solides, et des solides d'égale résistance*, Paris, Firmin Didot, 1798

- Jean Henri HASSENFRAZT, *Traité de l'art du charpentier*, Paris, Firmin Didot, 1804
- Joseph Louis LAGRANGE, *Miscellanea Taurinensia*, Accademia delle Scienze di Torino, 1770-1773
- Joseph Louis LAGRANGE, *Mémoire sur la force des ressorts pliés*, in *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences et Belles-Lettres de Berlin*, T. XXV, 1771, p. 77-110
- Edmé MARIOTTE, *Traité du mouvement des eaux et des autres corps fluides*, Paris, 1686
- Pieter van MUSSCHEMBROEK, *Physicae experimentales et Geometricae dissertationes*, Lugduni Batavorum, 1729
- Claude Louis Marie Henri NAVIER, *Résumé des Leçons Donnés a L'École des Ponts et Chaussées sur l'Application de la Mécanique à L'Établissement des Construction et des Machines*, Paris, Firmin Didot 1826, (consultata seconda edizione 1833)
- Antoine PARENT, *Des résistances des poutres par rapport d leurs longueurs ou portees, et a leurs dimensions et situations, et des poutres de plus grand résistance*, Mémoire de l'Académie des Sciences, 1708
- Antoine PARENT, *Expérience pour connôître la résistance des bois de chêne et de sapin*, Mémoire de l'Académie Royale des Sciences, Paris, 1707
- Antoine PARENT, *Second Mémoire. Trouver la force avec laquelle il faut pousser un coin, pour separer un corps ou directement, ou sur un point fixe, ou sur deux*, in *Mémoire de l'Académie Royale des Sciences*, 1704, pp. 186-197
- Jean Rodolphe PERRONET, *Description des projets et de la construction des ponts de Neuilly, de Mantes, d'Orleans*, Paris, Firmin Didot, 1788, Tome I
- Bernard POYET, *Nouveau Système de Pont en bois et en fer forgé, comparé avec les ponts ordinaires pour la durée, la solidité et l'économie*, Paris, Plassan, s.d
- G. RENNIE, *Philosophical Transactions*, 1818 *Annales de chimie et de physique*
- Jean Baptiste RONDELET, *Traité theorique et pratique de l'art de bâtir*, Paris, presso l'autore, 1802 (consultata l'edizione italiana: *Opere di Giovanni Rondelet / voltate in italiano per cura di B. Soresina e L. Masieri, con note e giunte importantissime fra le quali il Saggio sul ponte di Rialto di Venezia di Antonio Rondelet. – Mantova, Editori fratelli Negretti, 1840*)
- Joseph Mathieu SGANZIN, *Programme ou résumé d'un course de construction: avec des applications tirés spécialement de l'art de l'ingénieur des ponts et chaussées*, 1809, (consultata la versione Liege, Dominique Avanzo, 1840-1844)
- Joseph Mathieu SGANZIN, *An Elementary Course of Civil Engineering translated from the French, from the Third French Edition with Notes and Applications adapted to the United States*, Boston, Hilliard, Gray, Little and Wilkins, 1826
- Joseph Mathieu SGANZIN, *Programma o sunti delle lezioni di un corso di costruzione di M. J. Sganzin, prima versione italiana eseguita sulla terza edizione parigina dall'ingegner Giuseppe Cadolini*, Milano, presso l'editore, 1832
- Joseph Mathieu SGANZIN, *Nuovo corso completo di pubbliche costruzioni dietro il celebre programma di Mattia Giuseppe Sganzin, compilato da Reibell, prima traduzione italiana con aggiunte ricavate dai moderni giornali tecnici francesi, inglesi e tedeschi e dalle più recenti opere di pubbliche costruzioni e segnatamente di quelle concernenti le strade ferrate, i nuovi ponti americani e l'illuminazione a gas, per cura dell'ingegner D' Rinaldo Nicoletti*, Venezia, Giuseppe Antonelli (Traduzione italiana che segue la quinta edizione francese di Liegi del 1844), 1850
- Stephan TIMOSHENKO, *History of strength of materials*, New York, Dover, 1953
- Isaac TODHUNTER, Karl PEARSON, *A History of the Theory of Elasticity and of the Strength of Materials*, Cambridge, 1886-93, New York, 1960

Thomas TREDGOLD, *Practical Essay on the Strength of Cast Iron, and other metals*, London, J. Taylor, 1824

Thomas TREDGOLD, Peter BARLOW, *Elementary principles of carpentry: a treatise on the pressure and equilibrium of timber framing, the resistance of timber, and the construction of floors, centres, bridges, roofs*, London, John Weale, 1853

Clifford A. TRUESDELL, *The Rational Mechanics or Flexible or Elastic Bodies*, Zurigo, 1960

Pierre VARIGNON, *De la Résistance des Solides en général pour tout ce qu'on peut faire d'hypothèses touchant la force ou la tenacité des Fibres des Corps à rompre; & en particulier pour le hypothèses de Galilée & de M. Mariotte*, in *Mémoire de l'Académie Royale des Sciences*, 1702, pp. 66-100

David YEOMANS, *The development of timber as a structural material*, Ashgate, Ashgate Publishing, 1999

CAPITOLO 3

Annales des Ponts et Chaussées, *Mémoires et documens relatifs a l'art des constructions et au service de l'ingénieur; lois, ordonnances et autres actes concernant l'administration des Ponts et Chaussées*, 2^e semestre, 1837

Annales des Ponts et Chaussées, *Mémoires et documens relatifs a l'art des constructions et au service de l'ingénieur; lois, ordonnances et autres actes concernant l'administration des Ponts et Chaussées*, 2^e semestre, 1839

Annales des Ponts et Chaussées, *Mémoires et documens relatifs a l'art des constructions et au service de l'ingénieur; lois, ordonnances et autres actes concernant l'administration des Ponts et Chaussées*, 1^{ere} semestre, 1841, p. 304-309

Annales des Ponts et Chaussées, *Mémoires et documens relatifs a l'art des constructions et au service de l'ingénieur; lois, ordonnances et autres actes concernant l'administration des Ponts et Chaussées*, 2^{eme} semestre, 1841, p. 363

Annales des Ponts et Chaussées, *Mémoires et documens relatifs a l'art des constructions et au service de l'ingénieur; lois, ordonnances et autres actes concernant l'administration des Ponts et Chaussées*, 2^{eme} semestre, 1842, pp. 371-381

Michael DANKO, *The Evolution of Simple Truss Bridge 1790 to 1850: from empiricism to scientific construction*, University of Pennsylvania, 1979

Howard DOUGLAS, *An Essay on the Principle and Construction of Military Bridges, and the Passage or Rivers*, London, John Murray, 1816

Gregory DREICER, *The long span. Intercultural exchange in building technology: Development and industrialization of the framed beam in Western Europe the United States, 1820-1870*, Cornell University, 1993

Llewellyn Nathaniel EDWARDS, *A record of history and Evolution of Early American Bridges*, Orono, University Press, 1959

Robert FULTON, *A treatise on the improvement of canal navigation*, London, Taylor, 1796

Dario GASPARINI, Caterina PROVOST *Early Nineteenth Century Development in Truss Design in Britain, France and the United States*, in *Construction History International Conference vol. 5*, pp. 21-33, 1989

William HUMBER, *A complete Treatise on cast and wrought iron, including iron foundations in three parts: theoretical, practical and descriptive*, London, Lockwood and co., (terza edizione), 1870

Dennis Hart MAHAN, *An Elementary Course of Civil Engineering for the Use of the Cadets of the United States Military Academy*, New York, John Wiley and Son, 1837

Vittorio NASCÉ, *Contributi alla Storia della Costruzione metallica*, Firenze, Alinea, 1982

Claude Louis Marie Henri NAVIER, *Résumé des Leçons Donnés a L'École des Ponts et Chaussées sur l'Application de la Mécanique à L'Établissement des Construction et des Machines*, Paris, Firmin Didot 1826, (consultata seconda edizione 1833)

Guillaume Tell POUSSIN, *Travaux d'améliorations intérieures projetés ou exécutés par le gouvernement général des États-Unis d'Amérique de 1824 a 1831 par Guillaume Tell Poussin ex-major au Corps du Génie Américain et Aide-de-Camp du Général du Génie Bernard*, Paris, Anselin Libraire, 1834

Benjamin SILLIMAN, *The American Journal of Science (and Arts)*, Converse, New Haven, vol. III, 1821, vol. III, 1821, pp. 158-166

David STEVENSON, *Sketch of the civil engineering of North America, comprising remarks on the harbours, river and lake navigation lighthouses, steam-navigation, water-works, canals, roads, railways, bridges and other works in that Country*, London, Holborn, 1838

Ithiel TOWN, *A Description of Ithiel Town's Improvement in the Construction of Wood and Iron Bridges*, New York, presso l'autore, 1821, (consultata l'edizione del 1839)

PERIODICI

National Intelligencer, 5 Agosto 1838

National Intelligencer, 11 Agosto 1838

New York Weekly Express, 4 Agosto 1838.

New Haven Daily Herald, 19 Settembre 1838

Richmond Whig and public advertiser, 19 Settembre 1838

BREVETTI

United States Patent and Trademark Office Brevetto N°. 3169X, rilasciato il 28 Gennaio 1820

United States Patent and Trademark Office Brevetto N°. 8743X, rilasciato il 3 Aprile 1835

SITOGRAFIA

www.gallica.bnf.fr

www.encyclopedia.uchicago.edu/

www.measuringworth.com/ppowerus/

ELENCO FIGURE

CAPITOLO 1

- Figura 1. Pierre Bullet. Tabella.
- Figura 2. Henri Gautier. Tabella.
- Figura 3. Diametri, circonferenze e superfici di tronchi.
- Figura 4. Deformazione trave caricata agli estremi.
- Figura 5. Prova di resistenza di campione su due appoggi.
- Figura 6. Travi di diversa lunghezza oggetto del confronto tra resistenze.
- Figura 7. *Encyclopédie*, Carpenteria Tavola I.
- Figura 8. *Encyclopédie*, Carpenteria Tavola II.
- Figura 9. G. L. Leclerc Comte de Buffon. Tabella VII.
- Figura 10. *Encyclopédie*, Carpenteria Tavola XV.
- Figura 11. Andrea Palladio. Ponte sul Cismone.
- Figura 12. Andrea Palladio. “Invenzione”.
- Figura 13. Andrea Palladio. “Invenzione”.
- Figura 14. Andrea Palladio. “Invenzione”.
- Figura 15. *Encyclopédie*, Carpenteria Tavola XVI.
- Figura 16. Andrea Palladio. Ponte di Bassano.
- Figura 17. *Encyclopédie*, Carpenteria Tavola XVIII.
- Figura 18. Progetto per un ponte di legno.
- Figura 19. Disegno relativo ad uno dei quesiti proposti.
- Figura 20. Ponte in legno: prospetto e sezione.
- Figura 21. Ponte in legno: prospetto e sezioni.
- Figura 22. Prospetto di un ponte in legno. *Concours pont*.
- Figura 23. Progetto di un arco in legno di 33.7 m di luce. Prospetto, pianta e sezione.
- Figura 24. Pianta sezione e prospetto di un ponte da ricostruire sul Rodano. *2^{eme} prix de pont en bois ou charpente*.
- Figura 25. Progetto di ponte in legno. Prospetto, pianta e particolare.
- Figura 26. Ponte in legno.
- Figura 27. Progetto di dieci ponti diversi in legno.
- Figura 28. Progetto per un ponte in legno da realizzare davanti al *Boulevard de la Salpêtrière*.
- Figura 29. Ponte ad arco reticolare.
- Figura 30. Louis Alexandre De Cessart – *Pont des Arts*.
- Figura 31. Progetto di un ponte in legno. Senza data.
- Figura 32. Struttura di copertura della chiesa di Grub.

- Figura 33. Albero genealogico della famiglia Grubenmann.
- Figura 34. Ponte di Schaffhausen. Modello.
- Figura 35. Copia del disegno del progetto del ponte di Wettingen.
- Figura 36. John Soane. Schizzo del ponte di Schaffhausen.
- Figura 37. Ponte di Schaffhausen. Michael Shanahan e Cristoforo Dell'Acqua.
- Figura 38. John Soane. Rilievo ponte di Schaffhausen.
- Figura 39. Distruzione del ponte di Schaffhausen ad opera delle truppe francesi nel 1799.
- Figura 40. Modello originale del ponte di Wettingen.
- Figura 41. Particolare dell'imposta dell'arco.
- Figura 42. Ponte di Wettingen. Michael Shanahan e Cristoforo Dell'Acqua.
- Figura 43. Ponte di Wettingen. Particolare costruttivo del nodo tra impalcato ed elemento verticale di collegamento con l'arco e la copertura..
- Figura 44. Ponte di Wettingen. Sezione longitudinale di metà campata.
- Figura 45. Ponte di Wettingen.
- Figura 46. Ponte di Wettingen.
- Figura 47. Ponte di Augsbourg.
- Figura 48. Ponte di Augsbourg. Fasi costruttive.
- Figura 49. Ponte di Freysing.
- Figura 50. Ponte di Freysing, particolare della realizzazione degli archi.
- Figura 51. Ponte di Vilshofen.

CAPITOLO 2

- Figure 52. G. L. Leclerc Comte de Buffon. Tabella risultati prove sperimentali.
- Figura 53: Deformazione di lama elastica incastrata soggetta ad un peso P .
- Figura 54: Colonna sottoposta a carico di punta.
- Figura 55: Deformate per aste caricate in direzione longitudinale.
- Figura 56. Pierre Simon Girard. Apparato di prova.
- Figura 57. Tabella I contenente i dati sperimentali relativi alle prove su legno di quercia caricato assialmente.
- Figura 58: Modalità di deformazione e rottura dei campioni delle prove II-IX.
- Figura 59: Tabella II contenente i dati sperimentali relativi alle prove su legno di rovere caricato assialmente.
- Figura 60. Pierre Simon Girard. Tabella VI.
- Figura 61. Pierre Simon Girard. Tabella VI.
- Figura 62. Coefficienti riduttivi per il calcolo della resistenza a compressione, nel testo di Rondelet e trascritti.
- Figura 63. Tavole relative alle prove sperimentali per determinare la resistenza assoluta.

- Figura 64. Diagramma variazione resistenza a flessione all'aumentare della lunghezza del campione.
- Figura 65. Jean Baptiste Rondelet. Risultati prove di resistenza a flessione.
- Figura 66. Jean Charles Hassenfratz "Resistenza orizzontale".
- Figura 67. Tabella confronto resistenze Duhamel-Hassenfratz.
- Figura 68. Tabella resistenze travi in legno di rovere di 1 m di lunghezza al variare di base ed altezza della sezione trasversale.
- Figura 69. Tabella resistenze travi in legno di rovere di 15 m di lunghezza al variare di base ed altezza della sezione trasversale.
- Figura 70. Configurazione deformata in campioni soggetti a compressione.
- Figura 71. Tabella n.° 1: prove a flessione realizzate da Buffon.
- Figura 72. Tabella n.°2: prove a flessione realizzate da Aubry.
- Figura 73. Tabella n° 3: prove a compressione realizzate da Lamandé.
- Figura 74. Tabella n.° 4: calcolo valore momento di elasticità.
- Figura 75. Momento di elasticità sperimentale e teorico.
- Figura 76. Frontespizio dell'edizione del 1833 del *Résumé des leçons* di Claude Louis Navier.
- Figura 77. Tabella di Minard e Desormes. Valori di allungamento di campioni sottoposti a forza di trazione.
- Figura 78. Valori di deformazione per campioni di sezioni trasversali differenti sottoposti a flessione. Prove realizzate da Henri Louis Duhamel de Monceau.
- Figura 79. Struttura di ponte in legno con puntoni (AD) e contraffissi (BE).
- Figura 80. Struttura di ponte in legno con puntoni, contraffissi e sottotravi poste nella parte centrale dell'impalcato.
- Figura 81. Struttura di ponte in legno con più puntoni e contraffissi e sottotravi poste nella parte centrale dell'impalcato.
- Figura 82. Configurazioni deformate di aste caricate di punta.
- Figura 83. Struttura di ponte in legno con puntoni, contraffissi e sottotravi poste nella parte laterale dell'impalcato.
- Figura 84. Struttura di ponte con un tirante che assorbe le spinte orizzontali dell'impalcato sulle spalle.
- Figura 85. Ponte ad arco in legno. L'arco è formato da una serie di elementi sovrapposti e bloccati da flange.

CAPITOLO 3

- Figura 86. Ponte realizzato con sistema Town.
- Figura 87. Tavola X da Guillaume Tell Poussin.
- Figura 88. Schema del ponte secondo il Sistema Town.
- Figura 89. *Annales des Ponts et Chaussées*. Tavole riassuntiva da David Stevenson.
- Figura 90. Sistema Town. Brevetto n° 3169X del 28 Gennaio 1820.

- Figura 91. Sistema Town. Particolare della trave e della connessione con il corrente.
- Figura 92. Sistema Town. Sezione trasversale e schema di impalcato.
- Figura 93. Brevetto n° 8743X del 3 Aprile 1835. Disegno allegato al testo.
- Figura 94. Sistema Town. Sezione trasversale e prospetto della trave.
- Figura 95. Tavola relativa alla nuova registrazione del brevetto 8743X dopo l'incendio del 1836.
- Figura 96. Ponte provvisorio sul Rodano a Lione.
- Figura 97. Ponte provvisorio sull'Azergues.
- Figura 98. Ponte di Vaudreuil. Tavola n° 9 in Annales des Ponts et Chaussées 1841 1[^] volume.

RINGRAZIAMENTI:

Per questa tesi di ricerca sono stati consultati numerosi archivi e biblioteche. Ringrazio tutti coloro che mi hanno reso disponibili testi e manoscritti e fornito copia dei documenti:

Rosmarie Nüesch Gautschi - Grubenmann Sammlung, Teufen

Dirk Bühler - Bild Archiv Deutsches Museum, Monaco
Justine Sambrook – Royal Institute of British Architects, Londra

Rory Cook - Science Museum, Londra

Martha Leskard - Science Museum, Londra

Catherine Masteau - École des Ponts et Chaussées, Parigi

Maria Teresa De Bellis - Académie de France, Roma

Jeannette Rauschert – Staatsarchiv, Aarau

Ruth Häusler - Zentral Bibliothek, Zurigo

Prof. Pina Novello Massai - Fondo Mosca, Politecnico di Torino

Prof. Maria Fay - Archivio Donegani, Sondrio

David Simmons - Timeline, The Ohio Historical Society, Columbus (OH)

Lo sviluppo della ricerca si è avvalso di preziose discussioni con docenti esperti della materia, che ho contattato presso diverse sedi universitarie. In particolare desidero ringraziare:

Prof. Giannantonio Sacchi Landriani- Politecnico di Milano

Prof. Mario Piana - Istituto Universitario di Architettura Venezia

Prof. Massimo Corradi - Università di Genova

Prof. Aldo Castellano - Politecnico di Milano

Prof. Gennaro Tampone - Università di Firenze

Voglio esprimere un ringraziamento particolare al Prof. Jamshid Mohammadi che mi ha ospitato presso l'IIT di Chicago nei mesi di giugno e luglio 2011 dandomi accesso al sistema bibliotecario statunitense e mettendomi in contatto con il Prof. Domingo Carreira e il Prof. Sidney Guralnick.

Uno speciale ringraziamento al Prof. Dario Gasparini della Case Western Reserve University di Cleveland che grazie alla sua competenza del tutto specifica ha svolto un ruolo importante di guida nell'impostazione del lavoro.

Ringrazio infine la Prof. Maria Adelaide Parisi per il suo continuo supporto, incoraggiamento, i suoi suggerimenti e le preziose correzioni ed il Prof. Claudio Chesi per la generosa disponibilità, il vivo interesse e il confronto continuo che hanno caratterizzato questi anni di lavoro appassionato.

Unità di misura			
Unità di lunghezza	mm	cm	m
linea	2,2558	0,2256	
pollice francese	27,07	2,707	
tesa		194,9	1,949
piede francese		32,48	0,3248
piede vicentino		35,7	
piede bavarese		29,859	
piede inglese		30,48	
piede americano		30,48	
Unità di superficie	mm²		
linea superficiale	5,08876		
Unità di peso	g		
libbra	373,248		

United States Patent and Trademark Office

Brevetto Sistema Town n° 3169X del 28 Gennaio 1820

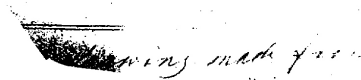
... of any institution or individual

Abiel Town
Letters Patent

3169X

The Schedule referred to in these Letters Patent and making part of the same containing a description in the words of the said Abiel Town himself of his improvement in Bridges.

Suppose a vertical plane against the side of which are placed the sides of a number of equal and similar flat pieces of timber or other substances of suitable dimensions in such manner as that they shall be parallel to each other say between two horizontal lines in the plane and incline so as to make an angle with the horizontal lines of about 45° or any angle that may be necessary for a brace (as they do the office of a brace) upon which place another series of timbers, or other substances of equal dimensions, distance apart and inclining to the horizontal lines in the same manner and between the same parallels into equal diamonds, and half diamonds. Hence the longer the pieces are in proportion to the distance between them the smaller will be the diamonds the more times each piece in one series will be crossed by those of the other series, consequently the greater number of joints, and therefore the more strength and less strain upon each joint when weight or power is applied. But as all plain figures of more than three sides are susceptible of having their angles and areas varied, as also the relative position of their sides, so the above diamond work if secured at all by joints or intersecions, would be insufficient to resist power properly applied to it for the purpose of bearing or attaining its diamond divisions without other timbers or other substances running horizontally vertically or otherwise so as to serve as diagonals to a suitable number of the diamonds and thereby dividing them into triangles, figures which are not susceptible of the change before stated of position, angles and area. supposing then the combination of timbers or other substances to remain with the same position as before stated, but that the supposed vertical plane be removed; suppose also that two timbers or other substances of sufficient tension strength be applied one on each side of the lower ends of the two series of timbers or other substances as to



viewing made from

402

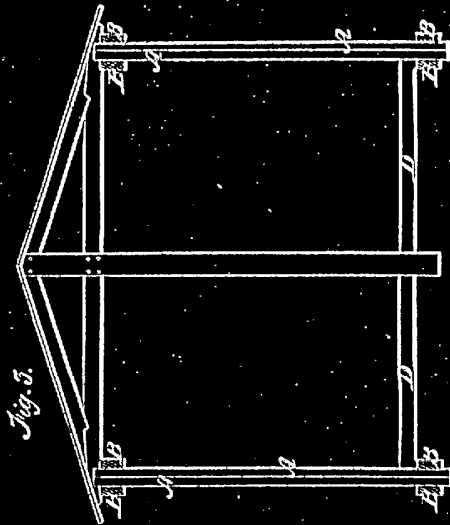
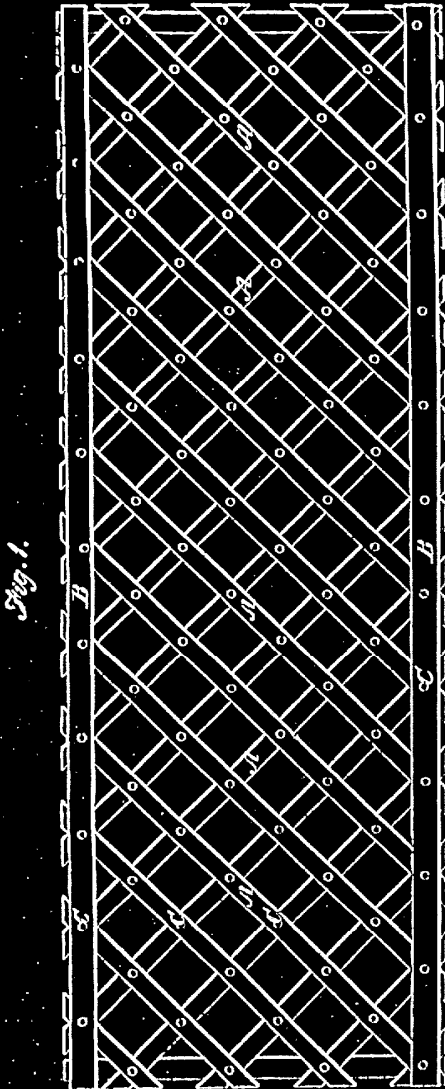
lay horizontally and have their centres correspondent to or pass through or over the centres of those lower joints; and that also two other timbers or other substances capable of bearing a sufficient thrust strain pass like manner along on each side of the upper ends, as joints of the two series of timbers or other substances, and also if necessary other similar horizontal pieces may be placed in like manner on each side of the intermediate rows of joints next to the two former ones and so on as far as the extent of the contemplated arch or span may require, after which secure all the joints by 1, 2, 3 or more trussels or iron bolts with wedges to the trussels, and heads and nuts to the bolts to keep all the parts of a joint in close contact. If this combination be extended to any necessary length and piers or other supports be placed at any reasonable distance from each other and the size and quantity of the substances of which the parts are composed be adapted to this distance between the piers or supports considered in connection with the weight that is necessary the combination should sustain as also the manner the weight will be distributed upon it, then will this construction become the basis of a Bridge on which it is supposed the least weight of materials, least expense, but greatest strength and permanence will be found; it will be subject to the least and easiest repair and have no lateral pressure against the piers or abutments, but containing its whole strength and power to support weight within itself, and only requiring peculiar supports for its own weight. Should circumstances or taste require any curve for the intrados of an arch leaving the extrados still a straight line or any curve either with its convex side up or in an inverted position or should the extrados be thus curved and the intrados remain a horizontal line the principle as to arrangement of materials and as to connecting the joints will remain the same, it only requiring that the upper and lower ranges of joints or intersections of the two series of braces should fall regularly into the lines or curves of the intrados and extrados and which will form the intermediate rows or ranges of interconnections so as regularly to harmonize the intrados or extrados by intermediate strings or curve pieces passing over the joints on each side and secured by trussels or bolts &c as before in

No Printed Specification Available

L. Town.
Truss Bridge.

Patented Jan. 28, 1890.

Nº



Ithiel Town**Letters Patent**

The Schedule referred to in these Letters Patent and making part of the same containing a description in the words of the said Ithiel Town himself of his improvement on Bridges.

Suppose a antical plan against the side of which are placed the sides of a number of equal and similar flat pieces of timber another xxxxx of suitable dimensions in such manner as that they shall be parallel to each other say between two horizontal lines in the plane and xxxxx so as to make an angle with the horizontal lines, of about 45° or any single (?) that may be necessary for a brace (as they do the office of a brace) after which place another series of timbers, another substainces of equal dimensions, distance apart and inclination to the horizontal lines in the same manner and between tho same parallels into equal diamonds and half diamonds. Hence the larger the pieces are in proportion to the distance between them the smaller will be the diamonds the more lines each xxxxx in one series ? will be xxxx by those of tho other series, consequently the greater number of joints, and therefore the more strength and less strain upon each joint when weight or pouxxis applied. But as all plan figures of more than three sides are susceptible of having their angles and areas varied as also the relative position of their sides so the above diamond xxxxx if secured at all all by joints or intersections would be insufficient to resist powerxxxxxxx applied to it for the purpose of deranging or attering ? its diamond divisions without other timber or other substances summing horizontally, vertically or other view so as to save as diagonals to a suitable number of the diamonds and then by dividing them into triangles figures which are not susceptible of the change before stated of position, angles and areas supposing then the combination of timber or other substances to remain with same position as before stated but then the supposed vertical plan beomoved ?; suppose also that two timbers or other substances of sufficient tension strength be applied one on each side of the lower ends and of the two series of timbers or other substances as to lay horizontally and have their cintres commm xxxx to or pass th or over the centres of thou lower joints: and that also two other timber or other substances capable of bearing a sufficient thrust strain pass like manner along on each side of the upper ends as joints of the two series of timber or other substances and also if necessary other simile horizontal pieces may be placed in like manner each side of the xxx intermediate rows of joints next to the two former or xxx and so on as far as the extent of the contemplated arch or span may require. After which secure all the joints by 1, 2, 3 or more trusxxxx or iron bolts with wedges to the xxxx and heads and nuts to the bolts to keep all the parts of each joint in close contact. If this combination be extended to any necessary length and pieces or other supports be placed at any reasonable distance from each other and the size and quantity of the substances of which the part are composed be suitable to this distance between the pier or support considered in connection with the weight that is necessary. the

combination should sustain as ? also the manner the weight will be distributed upon it. Then will this construction become the truss of a bridge in which it is supposed The least weight of materials, least expense, but greatest strength and permanence ? will be found. It will be subject to the least and easiest repair and have no lateral pressure against the piers or abutments, but containing its whole strength and power to support weight within itself and only requiring particular supports for its own weight. Should circumstances or taste require any curve for the intrados of an arch leaving the extrados still a xxxxxxxxxxx xxx or anyxxxx either with its conxxxxx side up or in an inverted position or should the extrados be thus xxxx and the intrados remain a horizontal line the principle as to arrangement of materials and as to connecting the joints will remain the xxxx. It only requiring that the upper and the lower xxxx of joints or intersection of the two series of braces should fall regularly into the lines or curves of the intrados and extrados and which will form the intermediate rows or xxx of interactions so as regularly to harmonize the intrados or extrados by intermediate stringers or curve pieces passing over the joints in each side and secured by treennels or bolt to as before in each xxxxx.

Xxxxxxxxxxxxxxxxx xxxxxxxxxxx xxxxxxxxxxxxxxxx from the bridge xxx xxx xxx the ment distributed ? of the materials in the xxxx of material in the size of the pieces and in the manner of sicuxxxx xxxx materials at the joints should xxxx be used in the construction ? of the xxxxx Especially cast iron the contruction at the joint might be xxxx in part by flxxxx or otherwise as to sexxxx if any but one xxx to xxx xxx the pieces might be somewhat reduced between the joints or the advantage to the strength of the truss.

Xxxxxxx be formed of one or more truss or trusses and the floor placed on xxxx of the horizontal strong pieces that the circumstances may require. In xxxx the truss is to be used the floor may project on each side having xxx water ? edges auspanded ? to the top strong piece of the truss xxxxx xxxxxx oblique boarding for strongxxx Or if the floor lay too high up in the truss its xxxx edges might be braced wholly or in part from the lower strong piece xxxxx secured as by seating on the piers to return its proper xxxx xxxx strenght

Patented 28 January 1820

United States Patent and Trademark Office

Brevetto del Sistema Town n° 8743X del 3 Aprile 1835

Michael Town 8743X
 Letters Patent.

The Schedule referred to in these Letters Patent and
 making part of the same, containing a description in
 full of the said Michael Town, himself of his im-
 provement on a bridge patented the 28th day of
 January 1835.

Be it known that I, Michael Town, of the City of New York,
 County of New York, and State of New York, have made an
 improvement on my bridge patented on the 28th day of
 January 1835, which is described as follows; reference
 being had to the former description, deposited in the Patent
 Office. The improvement on my former bridge which I now
 wish to secure by Letters Patent, is as follows.
 The side truss as described in my former patent being com-
 posed or formed with diagonal braces at angular or
 suitable distance apart and one or more horizontal string-pieces
 at top and bottom, on each side of the braces, and all
 properly dimensioned; proportioned to a suitable height of
 truss, and secured. What I claim as the improvement is
 the addition of another similar set or series of bracing of
 similar kind and dimensions, to be placed in a similar
 manner, either directly opposite to the former; or in any
 other manner so as to bring the second tier not opposite
 to the former; but so that all the intersections of the
 braces of the latter series shall fall between those of
 the former series, on the horizontal string-pieces, if
 such an other string-piece is to be formed similar to the
 former, at top and bottom, with one or more other series
 of similar string-pieces, as required, for the
 same purpose.

8743X

various wood pieces, to be placed over the intersections of the
 last series of braces, against, or opposite to the other strong
 pieces; all of which last intersections of the second
 series of braces, with the strong pieces on each side there
 of to be secured with one or more screws, or other suitable
 fastenings, making in one trip, two sets of two series
 each, of braces, and three series of filling pieces spanning
 over one or more of the intersections and to span the
 of the truss to any number and extent required. In
 case of very wide spans or openings, a third, or a third
 and fourth, &c sets or series of braces may with the same
 be added with their necessary strong pieces, &c with
 or other fastenings, &c to any number or extent required.
 Two, two or more of these trusses with a few small
 other necessary parts as usual will constitute a safe
 floor in favor of it.

Wm. H. Hunt
 Wm. H. Hunt
 Wm. H. Hunt

Wm. H. Hunt
 (S. W. Hunt)

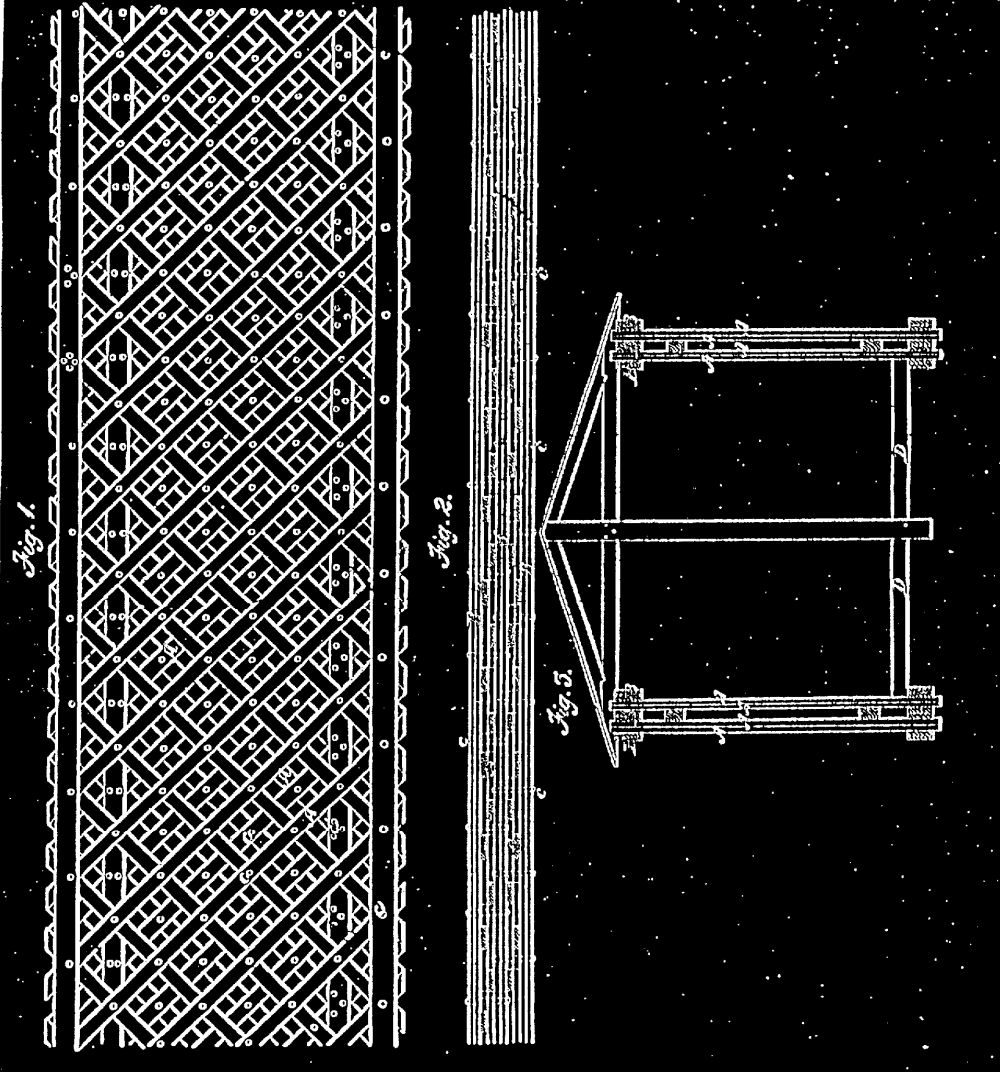
(Granted April 3rd 1855)
 (Drawing)

8743x

I. Town.
Truss Bridge.

A. I. Patented Apr. 3, 1856.

No.



Ithiel Town**Letters Patent**

The Schedule referred to in these Letters Patent and making part of the same containing a description in the words of the said Ithiel Town himself of his improvement on Bridges.

Suppose a antical plan against the side of which are placed the sides of a number of equal and similar flat pieces of timber another xxxxx of suitable dimensions in such manner as that they shall be parallel to each other say between two horizontal lines in the plane and xxxxx so as to make an angle with the horizontal lines, of about 45° or any single (?) that may be necessary for a brace (as they do the office of a brace) after which place another series of timbers, another substainces of equal dimensions, distance apart and inclination to the horizontal lines in the same manner and between tho same parallels into equal diamonds and half diamonds. Hence the larger the pieces are in proportion to the distance between them the smaller will be the diamonds the more lines each xxxxx in one series ? will be xxxx by those of tho other series, consequently the greater number of joints, and therefore the more strength and less strain upon each joint when weight or pouxxis applied. But as all plan figures of more than three sides are susceptible of having their angles and areas varied as also the relative position of their sides so the above diamond xxxxx if secured at all all by joints or intersections would be insufficient to resist powerxxxxxxx applied to it for the purpose of deranging or attering ? its diamond divisions without other timber or other substances summing horizontally, vertically or other view so as to save as diagonals to a suitable number of the diamonds and then by dividing them into triangles figures which are not susceptible of the change before stated of position, angles and areas supposing then the combination of timber or other substances to remain with same position as before stated but then the supposed vertical plan beomoved ?; suppose also that two timbers or other substances of sufficient tension strength be applied one on each side of the lower ends and of the two series of timbers or other substances as to lay horizontally and have their cintres commm xxxx to or pass th or over the centres of thou lower joints: and that also two other timber or other substances capable of bearing a sufficient thrust strain pass like manner along on each side of the upper ends as joints of the two series of timber or other substances and also if necessary other simile horizontal pieces may be placed in like manner each side of the xxx intermediate rows of joints next to the two former or xxx and so on as far as the extent of the contemplated arch or span may require. After which secure all the joints by 1, 2, 3 or more trusxxxx or iron bolts with wedges to the xxxxx and heads and nuts to the bolts to keep all the parts of each joint in close contact. If this combination be extended to any necessary length and pieces or other supports be placed at any reasonable distance from each other and the size and quantity of the substances of which the part are composed be suitable to this distance between the pier or support considered in connection with the weight that is necessary. the combination should sustain as ? also the manner the weight will be distributed upon it. Then will this construction become the truss of a bridge in which it is supposed The least weight of materials, least expense, but greatest strength and permanence ? will be found. It will be subject to the least and easiest repair and have no lateral pressure

against the piers or abutments, but containing its whole strength and power to support weight within itself and only requiring particular supports for its own weight. Should circumstances or taste require any curve for the intrados of an arch leaving the extrados still a xxxxxxxxxxxxxx or anyxxxx either with its conxxxxxx side up or in an inverted position or should the extrados be thus xxxx and the intrados remain a horizontal line the principle as to arrangement of materials and as to connecting the joints will remain the xxxx. It only requiring that the upper and the lower xxxx of joints or intersection of the two series of braces should fall regularly into the lines or curves of the intrados and extrados and which will form the intermediate rows or xxx of interactions so as regularly to harmonize the intrados or extrados by intermediate stringers or curve pieces passing over the joints in each side and secured by treennels or bolt to as before in each xxxxx.

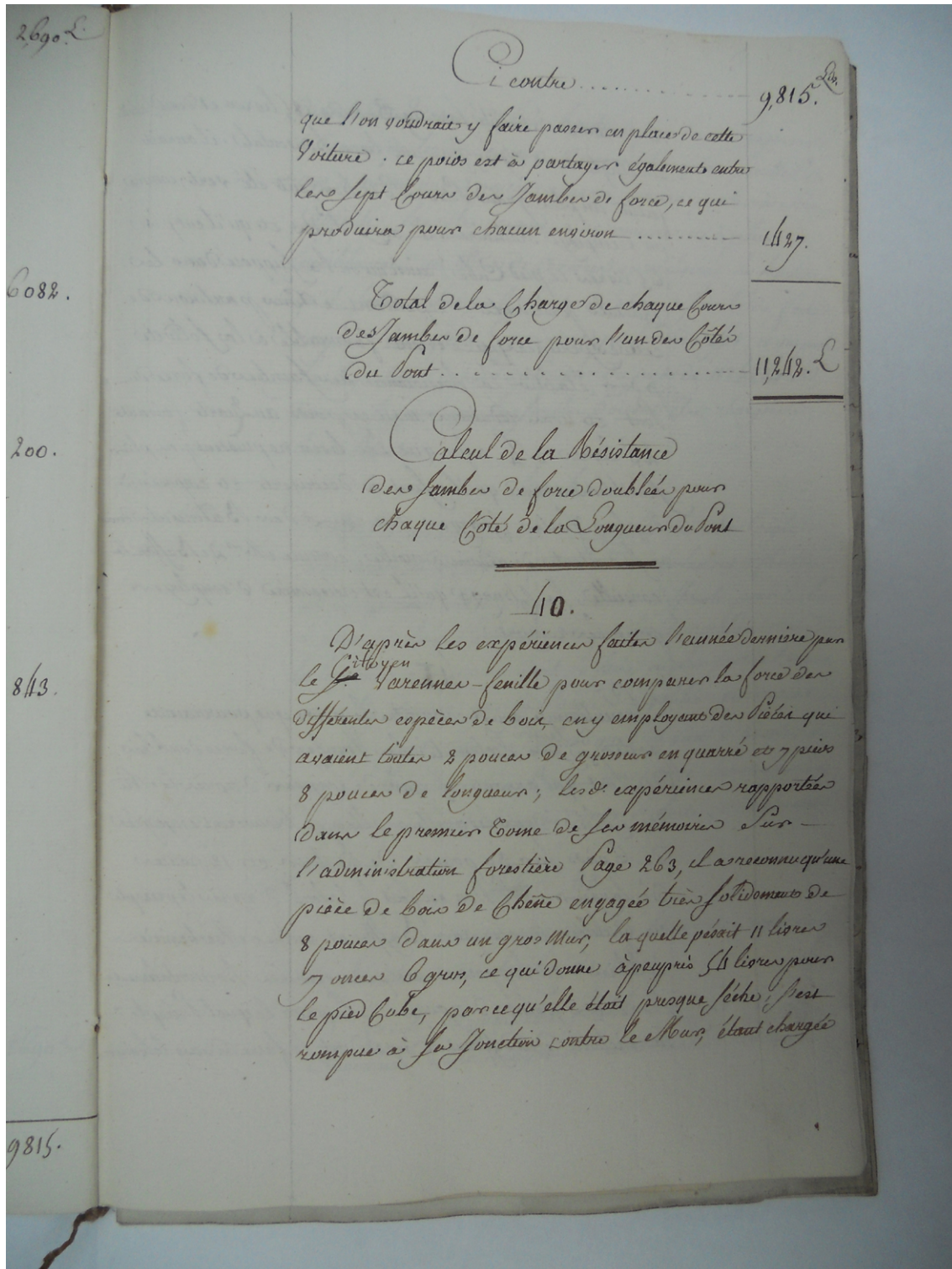
Xxxxxxxxxxxxxxxxxx xxxxxxxxxxxx xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx from the bridge xxx xxx xxx the ment distributed ? of the materials in the xxxx of material in the size of the pieces and in the manner of sicuxxxx xxxx materials at the joints should xxxx be used in the construction ? of the xxxxx Especially cast iron the contruction at the joint might be xxxx in part by flxxxx or otherwise as to sexxxx if any but one xxx to xxx xxx the pieces might be somewhat reduced between the joints or the advantage to the strength of the truss. Xxxxxxx be formed of one or more truss or trusses and the floor placed on xxxx of the horizontal strong pieces that the circumstances may require. In xxxx the truss is to be used the floor may project on each side having xxx water ? edges auspanded ? to the top strong piece of the truss xxxxx xxxxxx oblique boarding for strongxxx Or if the floor lay too high up in the truss its xxxx edges might be braced wholly or in part from the lower strong piece xxxxx secured as by seating on the piers to return its proper xxxx xxxx strenght

Patented 28 January 1820

École des Ponts et Chaussées - Fonds Ancien

MS 2613

Calcul de la résistance des jambes de force doublées pour chaque côté de la longueur du pont



à son autre Extrémité sous un Bois de 18 (livres et demi) et à un angle de 12 degrés sous une ligne horizontale. il aurait fallu un plus grand Poids. Si le bois eût été vert, comme on l'emploie ordinairement aux Ponts et qu'il eût pesé 65 livres le pied Cube, ainsi qu'on l'a supposé dans les Calculs précédents. cependant et pour perfection de cette expérience qui devient favorable à la solidité pour établir la Résistance des jambes de force de Pont et nous réduisons aussi ce poids au quart faisant 46 livres $\frac{3}{4}$. afin que les bois ne puissent en plus sensiblement être qu'ils sont à découvert et exposés à de plus fortes Charges que ce que des Bâtimens de bois en se contentant de réduire à moitié, comme M^r De Buffon le conseille, la précaution qu'il est nécessaire d'employer pour les rompre.

II.

Présentement pour connaître le poids que pourrions porter à ^{l'extrémité} l'extrémité les jambes de force de bois de Pont qui auront 15 pieds de longueur d'après la hauteur des Calées dans lesquelles elles se trouveront engagées de 6 pieds sur 30 pouces de hauteur et 18 pouces de largeur, si l'on en fait le calcul d'après le précepte de Galilée adopté par Buffon et autres Mécaniciens célèbres, en supposant ces pièces posées horizontalement sur deux points d'appui; Suivant le quel précepte la résistance des différens Corps doit se faire de deux labaux.

Donc) et à
 l'aurait
 de, comme
 out p se
 une les
 lion de
 l'activité
 l'écoulement
 fuisant
 p. en plus
 exposés à
 l'écoulement
 Buffon le
 alger
 ariété
 doublés
 de la ta
 engagés
 pouces
 le précepte
 panicien
 l'écoulement
 l'écoulement
 vers l'abaissement

Directe du Quarré de leur hauteur par leur Longueur et
 l'Inverse de leur Longueur, On conviendra qu'une poutre de bois
 qui n'aurait que 2 pouces en quarré, pourra porter à son
 Extrémité, sans être exposée à se rompre, ni à plier
 sensiblement, un Poids de 22 livres, en négligeant la fraction,
 Et qu'il faudra charger le bout de chaque jambée de force
 doublée de 29700. Pour produire le même effet; ce qui porte
 la Résistance à plus du Triple du poids de 11242 livres,
 dont on suppose que les jambées doivent être chargées à
 leurs Bouts.

40. 112.

Buffon a reconnu avec Bernoulli que cette Règle
 convenant au bois qui seraient absolument inflexibles
 et rompraient tout à coup, devenait différente pour les bois
 à cause de leur élasticité: et que la Diminution opérée sur
 la longueur des pièces doit se faire en plus grande raison
 que celle donnée par la Règle de Galilée: mais cela
 n'influe point sur les Calculs que l'on vient d'adopter, vu
 que la Résistance du Bois sera encore beaucoup plus
 grande qu'il n'est nécessaire pour le port, qu'il s'agit de
 soutenir.

41. 113.

On doit aussi remarquer en faveur de l'augmentation
 de Résistance des jambées de force.

1^o Les elles doivent être fortifiées au 2^o par
 Cinquantes de leur longueur, en partant de chacune de

Calculer par une grande double Noire perdue sur le Dessin, assemblée et boulonnée au bout d'un bras
 ses jambes de force; et par le bout opposé avec une poutrelle
 du pont joignant la sautoir du dernier Cerneau de Pierre;
 ce qui redonne en quelque sorte aux trois Cinquiesmes leur
 longueur et les fortifiera à proportion de son le Rapport de
 3 à 5 de la Résistance que l'on vient de leur attribuer.

2^o Que le Bois qui devra supporter chaque jambe
 de force se trouvera distribué sur toute sa Longueur,
 au lieu d'être, comme on l'a supposé dans le calcul
 précédent, réuni à son extrémité: et que pour cette seule
 considération la jambe de force sera encore soulagée de la
 moitié de sa charge.

3^o Qu'elle sera aussi fortifiée par son inclination de
 30 degrés en raison du sinus de cet angle ou sinu
 total, ou dans le Rapport de 1 à 2, qui est celui de
 ses sinus: Parceque, dans le calcul que l'on a fait, on a
 supposé qu'elle serait placée horizontalement, situation qui
 est la plus faible qu'elle puisse avoir pour résister à
 une charge qui agit dans une direction verticale et
 perpendiculaire à sa longueur des fibres.

Et 4^o Qu'on a encore supposé dans ces calculs
 que le pont serait levé et que les jambes de force se
 trouveraient pour leur charge d'état et son poids; au
 lieu qu'étant baissé la moitié du poids de ce pont et de la

Charge qui y passera, se trouvera partagée également, avec
la Nécessité des Jambes de force qui sont situées de
côté opposé, comme on l'a dit cy dessus.

45. 44.

Les Jambes de force peuvent aussi plus être considérées
comme autant de ressorts engagés par l'arc de leur boat qui
soutiendrait par l'autre boat une charge beaucoup plus
considérable que celle du pont projeté et des Voitures ou
pièces d'artillerie qui s'y feroit passer. il sera seulement
susceptible, à cause de l'élasticité du bois et de la Nature
des Ressorts, de se raffaïsser un peu, lors du passage des
Voitures, comme le font les poutrelles des grandes Corvées
de charpente, semblables à celles du Pont de Kell
établi sur le Rhin à Strasbourg, les quelles sont en
Sapin.

Des Observations précédentes peuvent donner la
plus grande Confiance sur la solidité de ce boat.

46. 45.

Il nous reste encore à déterminer la force des poutrelles
de bois de sapin d'environ 10 pieds de longueur et 12
pouces de grosseur en Quarré qui doivent être employés
au pont et à son Coablier.

47. 46.

On peut conclure d'après les Expériences de M.

48 47

On sçait aussi, d'après les expériences qui ont été faites par M. de Buffon et l'on voit que le Bois de Sapin qui pèse moins que le Chêne, est cependant plus fort d'un Cinquième pour porter que ce dernier; ce qui élèvera à 28496. Les 23114. La troisième ci-dessus, au lieu de 11252. Soit chaque Boutrelle doit être chargée moyennement, ainsi que les Jambes de force doublées mentionnées ci-dessus.

49 48

à l'égard des doubles Coura de Poutre qui auront ensemble l'épaisseur et moins de 3 pieds de longueur entre les poutrelles de milieu en milieu, il est aisé d'approuver que leur Résistance sera encore plus grande que celle des Poutrelles.

So. 49.

On pense qu'il y aura aussi Moyen de construire ce Pont en pierre lorsqu'on pourra employer aux Jambes de force du Granit, du Marbre, ou autres pierres semblables de la plus grande Dureté et qu'elles soient d'un seul Quartier sur toute la longueur, l'épaisseur et la hauteur; de chaque Jambe de force pour ne pas être obligé de les doubler, comme celles de Charpente, alors il conviendra de faire les Fousbis en bois, ainsi que le Pont-Lesin et la Charpente qui doit servir à l'entretien.

à l'égard des garde-fols on les posera en fer forgé,

Ort. 50 et dernier:

Cette Construction que l'on croit praticable
 Endroit où l'on trouvera les Nations des pierres
 d'être désignées, en procurant le même avis
 de Charpente, aura de plus celui de la
 du renouvellement des Couches et de cette
 Dépense sera peu considérable; surtout si
 faire mettre du goudron entre les deux
 et recouvrir de trois Couches de fougère
 les autres bois,

à Paris le 28 juillet 1793;

Ort. 50 et dernier
 que l'on croit praticable
 Endroit où l'on trouvera
 les Nations des pierres
 d'être désignées, en procurant
 le même avis de Charpente,
 aura de plus celui de la
 du renouvellement des Couches
 et de cette Dépense sera peu
 considérable; surtout si faire
 mettre du goudron entre les
 deux et recouvrir de trois
 Couches de fougère les autres
 bois.

MS 2613**Calcul de la résistance des jambes de force doublées pour chaque côté de la longueur du pont**

P. 180

40.

D'après les expériences faites l'année dernière par le Citoyen Varennes-Fenille pour comparer la force des différentes espèces de bois en y employant des pièces qui ayaient toutes 2 pouces de grosseur en carré et 7 pieds, 8 pouces de longueur; les x expériences rapportées dans le premier tome de ses mémoires *Sur l'administration forestière* page 263 il a reconnu qu'une pièce de bois de chêne engagé très solidement de 8 pouces dans un gros mur, la quelle pesait 11 livres 7 onces 6 gros ce qui donne à peu près 54 livre pour le pied cube, parce qu'elle était presque sèche s'est rompue à sa jonction contre le mur, étant chargée

p. 181

à son autre extrémité sous un poids de 185 livres et demi et à un angle de 12 degrés sous une ligne horizontale. Il aurait fallu un plus grand poids si le bois eût été vert, comme on l'emploie ordinairement aux ponts et qu'il eut pesé 65 livres le pied cube, ainsi qu'on la suppose dans les calculs précédents. Cependant nous partirons de cette expérience que devient favorable à la solidité pour établir la résistance des jambes de force du pont et nous réduirons aussi ce poids au quart faisant 46 livre $\frac{3}{4}$ afin que les bois ne puissent en plier sensiblement, (parce) qu'ils sont à découvert et exposés à de plus fortes charges que ceux des bâtiments donc on se contente de réduire à moitié comme M. de Buffon le conseille, la charge qu'il est nécessaire d'employer pour les rompre.

41.

Présentement pour connaître le poids que pourraient porter en leurs extrémité les jambes de force doublées du pont qui auront 15 pieds de longueur d'après le nu(mero) des culées dans les quelles elles se trouveront engagées de 6 pieds sur 30 pouces de hauteur et 12 pouces de largeur, si l'on en fait le calcul d'après le précept de Galilée adopté par Buffon et autres Mécaniciens célèbres, en supposant ces pièces posées horizontalement sur deux points d'appui; suivant le quel précept la résistance des différents corps doit se faire dans la raison

p. 182

directe du carré de leur hauteur par leur largeur et l'inverse de leur longueur. On connaîtra qu'une pareille pièce qui n'aurait que 2 pouces en carré pourra porter à son extrémité, sans être exposée à se rompre ni à plier sensiblement, un poids de 22 livres en négligeant la fraction, et qu'il faudra charger le bout de chaque jambe de force couplée de 29700 L pour produire le même effet; ce qui porte la résistance à près du triple du poids de 11242 livres dont on suppose que les jambes de force doivent être chargés à leurs Bouts.

42.

Buffon a reconnu avec Bernoulli que cette Règle, convenant aux solides qui seraient absolument inflexibles et rompraient tout à coup devenait différente pour les bois à cause de leur élasticité: et que la diminution opérée par la longueur des pièces doit se faire en plus grande Raison que cette donnée par la Règle de Galilée: mais cela n'influe point sur les calculs que l'on vient d'adopter, vu que la Résistance du bois sera encore beaucoup plus grande qu'il n'est nécessaire pour l'effort qu'il aurait à soutenir.

43.

Ou doit aussi remarquer en faveur de l'augmentation de résistance des jambes de force.

1. Qu'elles doivent être fortifiées aux deux cinquième de leurs longueurs, en partant de chacune des

p. 183

Culées par une grande double Moise pendante figurée sur le dessin, assemblée et boulonnée au bout d'en bas a ses Jambes de force; et par le bout opposé avec une poutrelle du pont joignant la saillie du dernier corbeau de pierre: ce qui reduira en quelque sorte aux trois cinquièmes leur longueur et les fortifiera à peu près dans le rapport xxx 3 à 5 de la résistance que l'on vient de leurs attribuer.

2. Que le poids que devra supporter chaque jambe de force se trouvera distribué sur toute la longueur au lieu d'être comme on l'a supposé dans le calcul précédent, réuni à son extrémité: et que pour cette seule considération la jambe de force sera encore foulagée de la moitié de la charge.

3. Qu'elle sera aussi fortifiée par son inclination xxx 30 degrés en raison du sinus de cet angle xxx total, ou dans le rapport de 1 à 2 qui est celui xxx xxx sinus: parce que dans le calcul que l'on a fait on a supposé qu'elle serait placée horizontalement, situation qui est la plus faible qu'elle puisse avoir pour résister à une charge qui agirait dans une direction verticale et perpendiculaire à la longueur des fibres.

Et 4. Qu'on a encore supposé dans ces calculs que le pont serait levé et que les jambes de force se trouveraient pour lors chargées de tout son poids; au lieu qu'étant baissé la moitié du poids de ce pont et de la charge

p. 184

qui y passera, se trouvera partagée également la résistance des jambes de force qui sera située du côté opposé, comme on l'a dit cy devant.

44. Les jambes de force peuvent ausurplus être considérée comme autant de ressorts engagées par l'un de leur bouts qui soutiendraient par l'autre bout une charge beaucoup plus considerable que celle du

pont projeté et des voitures ou pièces d'artillerie que l'on ferait passer. Il sera seulement susceptible, à cause de l'élasticité du bois et de la nature des ressorts de s'abaisser un peu lors du passage des voitures comme le sont les poutrelles des grandes travées de charpente, semblables à celles du pont de Kell établi sur le Rhin à Strasbourg, lesquelles sont en sapin.

Les observations précédentes peuvent donner la plus grande confiance sur la solidité de ce Pont.

45. Il nous reste encore à examiner la force des poutrelles de bois de sapin d'environ 10 pieds de longueur et 12 pouces de grosseur en carré qui doivent être employées au pont et à son tablier.

46.

On peut conclure d'après les expériences de M.

p. 185

Buffon rapportées dans les Mémoires de l'Académie des Sciences Année 1741 page 333 faites sur une pièce de bois de chêne de 10 pieds de longueur et de 8 pouces de grosseur en carré, qu'elles pourront porter, en la réduisant au quart, un poids de 23414 livres étant chargée dans son milieu et posée horizontalement sur deux points d'appui, sans être fixée à ses bouts, pour qu'elle ne soit pas exposée à se rompre.

47

On savait aussi après les expériences qui ont été faites par M. de Buffon et Parent que le bois de sapin qui pèse moins que le chêne, est cependant plus fort d'un cinquième pour porter que ce dernier: ce qui élèvera à 28496 livres les 23414 livres trouvées au dessus au lieu de 11242 livres dont chaque poutrelle doit être chargée moyennement, ainsi que les jambes de force doublées mentionnées ci devant.

48. À l'égard des doubles cours de Couchis qu'auront ensemble 6 pouces d'épaisseur et moins de 3 pieds de longueur entre les poutrelles de milieu en milieu, il est aisé d'apercevoir que leur résistance sera encore plus grande que celle des poutrelles.

p. 186

49. On pense qu'il y aura aussi moyen de construire ce pont en pierre, lorsqu'on pourra employer aux jambes de force du granit, du marbre ou autres pierres semblables de la plus grande dureté et qu'elles soient d'un seul quartier pour toute la longueur, l'épaisseur et la hauteur de chaque jambe de force pour ne pas être obligé de les doubler, comme celles de charpente, alors il conviendra de faire les Couchis en bois, ainsi que le pont-levis et la charpente qui doit servir à sa manœuvre, à l'égard des garde-xxxx on les posera en fer forgé.

50. et dernier

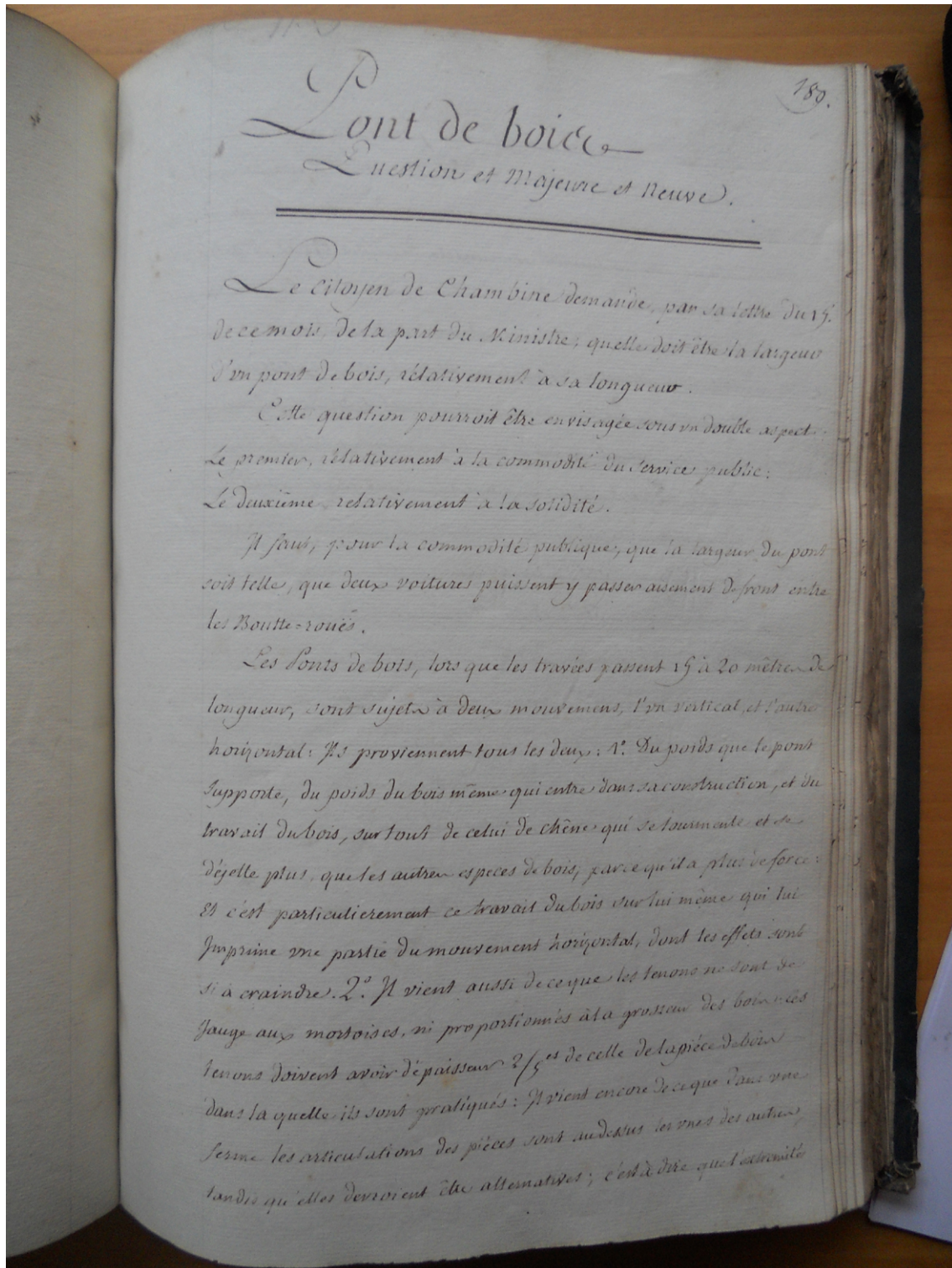
Cette construction que l'on croit pratiquement endroites où l'on trouvera la nature des pierres d'être désignées, en procurant le même avantage de charpente, aura de plus celui de la (xxxx) du

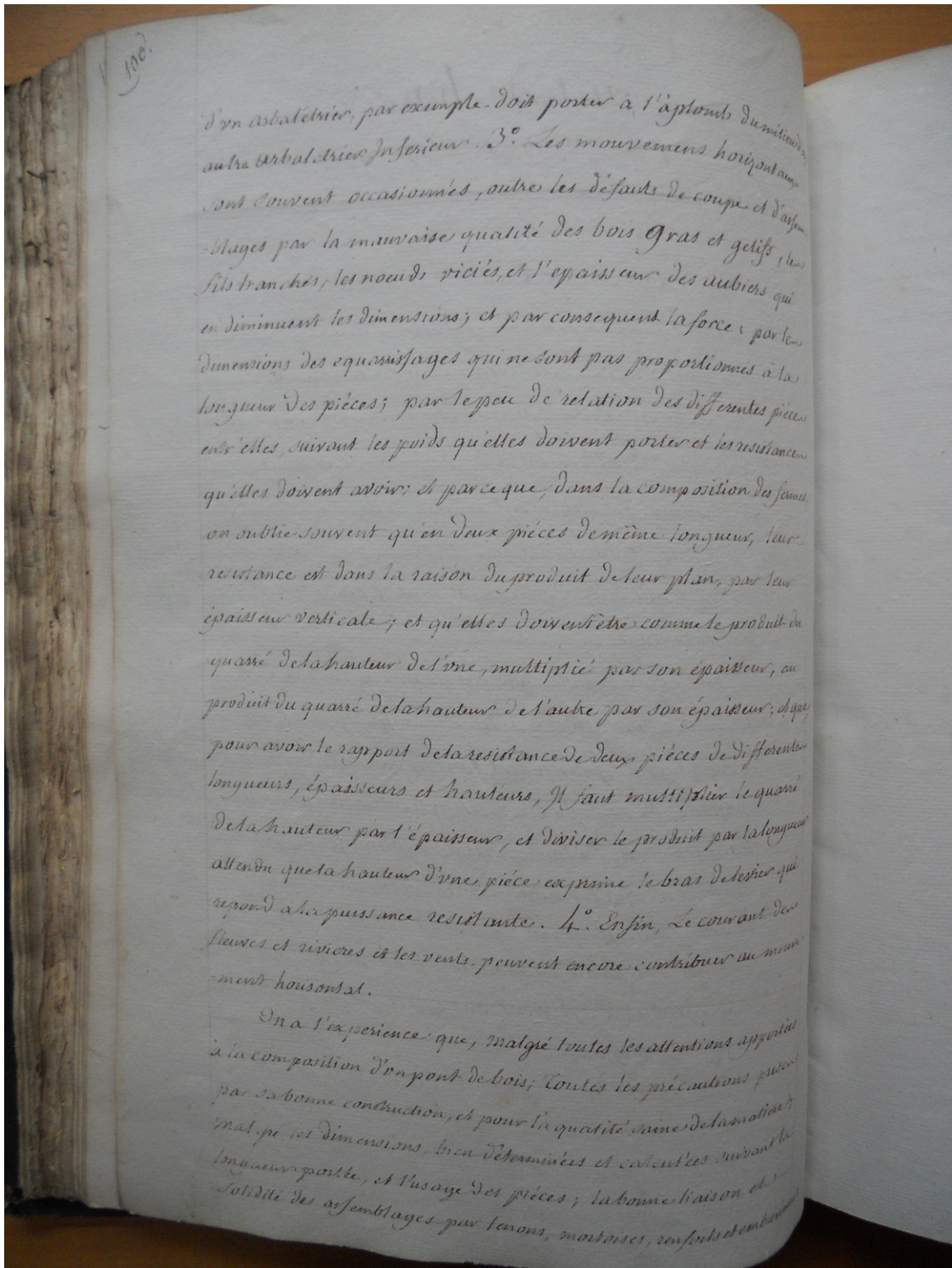
renouvellement des couchis et des (aut..). Dépense sera peu considerable; surtout (sxxx) faire mettre du goudron entre les deux ...et recouvrir de trois couches de couleur (xxx) les autres bois.

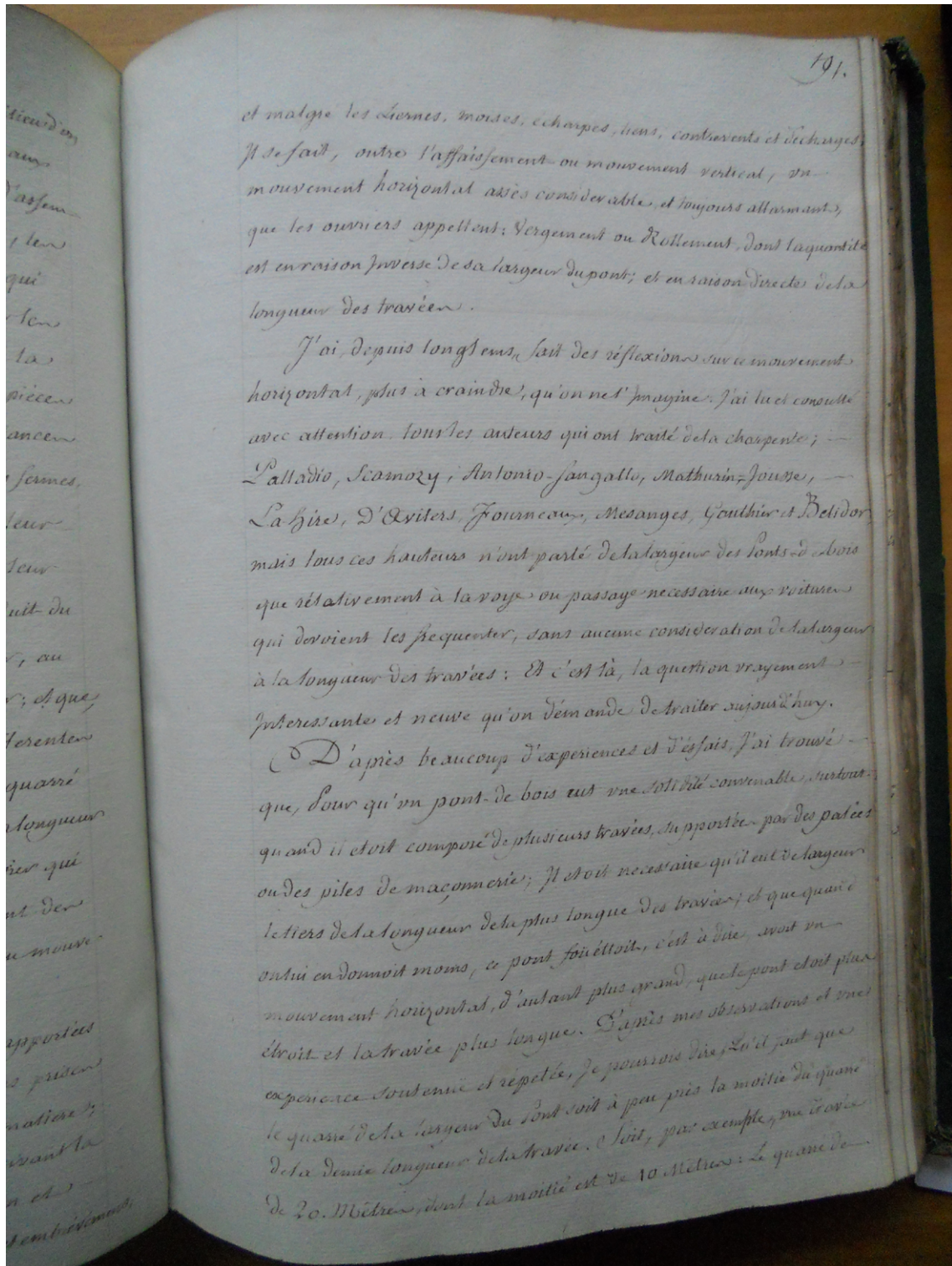
À Paris le 28 Juillet 1793

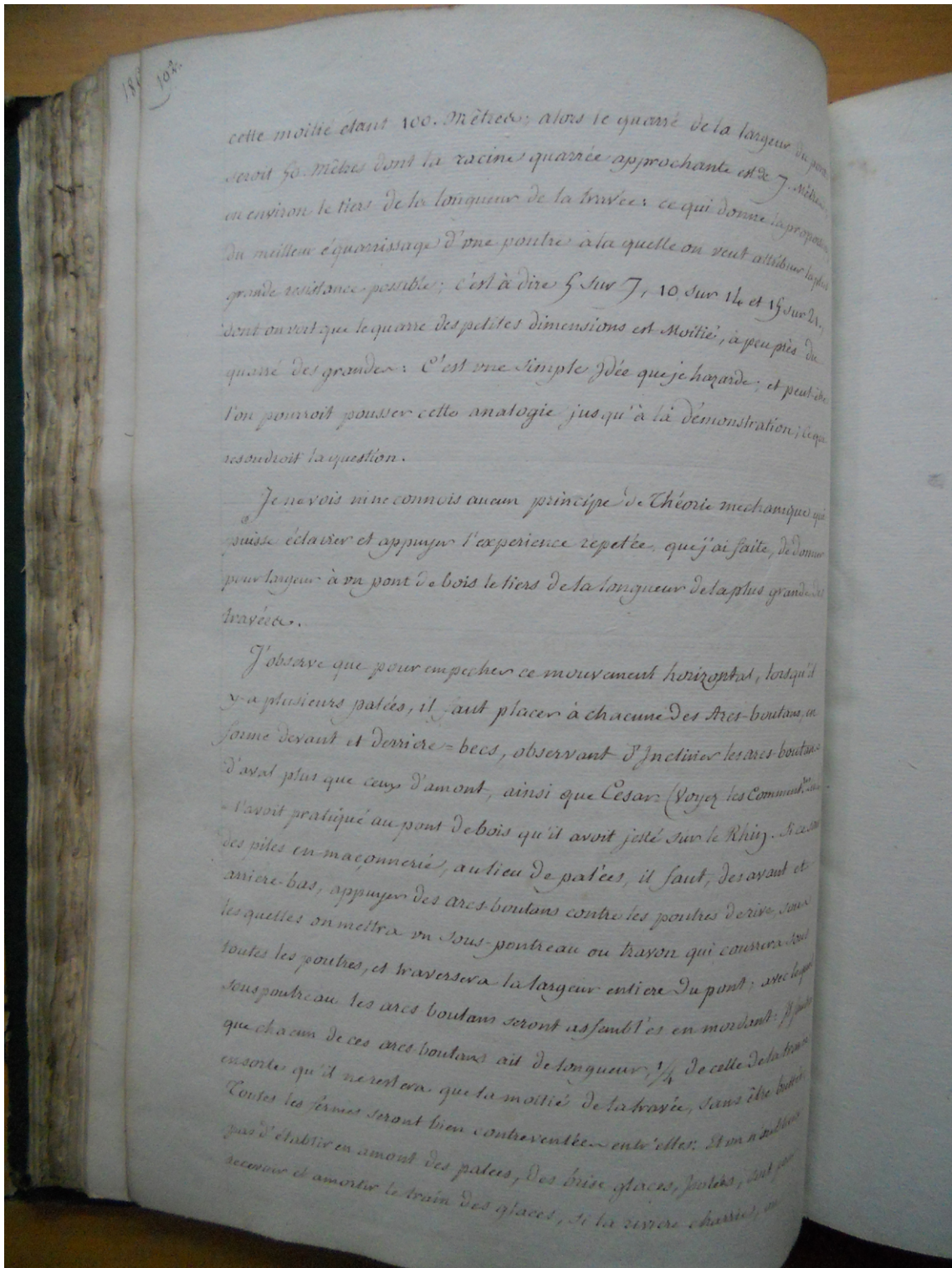
École des Ponts et Chaussées - Fonds Ancien

MS 233









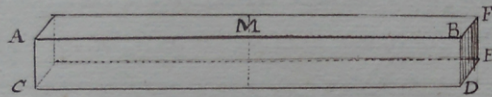
189 190
 cette moitié étant 100. Mètres; alors le quart de la longueur du pont
 seroit 50. mètres dont la racine quarrée approchant est de 7. Mètres
 en environ le tiers de la longueur de la travée, ce qui donne la proportion
 du milieu équilibre d'une poutre à la quelle on veut allonger la plus
 grande résistance possible; c'est à dire 7 sur 7, 10 sur 14 et 15 sur 21,
 dont on voit que le quart des petites dimensions est moitié, à peu près, de
 quart des grandes: c'est une simple Idée que je hazardé; et peut être
 l'on pourroit pousser cette analogie jus qu'à la démonstration; ce qui
 résoudreit la question.

Je n'avois ni ne connois aucun principe de Théorie mécanique qui
 puisse éclairer et appuyer l'expérience répétée, que j'ai faite, de donner
 pour longueur à un pont de bois le tiers de la longueur de la plus grande
 travée.

J'observe que pour empêcher ce mouvement horizontal, lorsqu'il
 y a plusieurs pâtes, il faut placer à chacune des Arcs-boutans, une
 forme devant et derrière-becs, observant d'Incliner les arcs-boutans
 d'avant plus que ceux d'arrière, ainsi que César. Voyez les Commentaires.
 J'avois pratiqué au pont de bois qu'il avoit jété sur le Rhin. Si ce n'est
 des piles en maçonnerie, au lieu de pâtes, il faut, des avant et
 arrière-bas, appuyer des arcs-boutans contre les poutres de bois, sur
 lesquelles on mettra un sous-ponteau ou travon qui couvrira tout
 toutes les poutres, et traversera la largeur entière du pont; avec lequel
 sous-ponteau les arcs-boutans seront assemblés en mordant: Il faut
 que chacun de ces arcs-boutans ait de longueur $\frac{1}{4}$ de celle de la travée
 ensemble qu'il ne restera que la moitié de la travée, sans être battue.
 Toutes les fermes seront bien contreventées entre elles. Et on n'oubliera
 pas d'établir en avant des pâtes, des bris-glaces, poutres, et autres
 secours et amortir le train des glaces, si la rivière est fluente, en

compra le cours des arbres qui sont souvent entraînés par la rapidité des courants.

Nous aurions désiré que nos connaissances plus étendues nous eussent permis de présenter un résultat et des développements plus satisfaisants, au Ministre ami des arts, qui nous a concédés; mais nous prouvons notre bonne volonté, par notre promptitude à remplir ses vœux, autant qu'il est en nous. Je crois en sus plus, qu'il seroit bon d'envoyer le même Programme à tous les Ingénieurs des Ponts et Chaussées et en demander la solution dans un mois. Fais à Paris le 17 Thermidor An 4. de La République Française. signé Bernard.



Voit une poutre ABCD, dont la longueur AB, soit 30 pieds; sa hauteur BD, 21. pouces; et sa largeur ou épaisseur DE 15. pouces. Voici les dimensions que l'expérience, qui présente toujours la Théorie et dont elle est la mère, assigne à une poutre, pour la rendre capable de la plus grande résistance possible: alors cette poutre, sur les dimensions dites cy dessus, si on veut la rompre, en appliquant un poids dans son milieu M, n'éprouveroit aucun mouvement horizontal sous la pression du poids; tandis que le contraire arriveroit et que la poutre se déjetteroit horizontalement avant de rompre; si son épaisseur DE étoit trop faible et dans proportion avec la hauteur BD. Si par exemple DE, n'avoit que 6 ou 8. pouces, au lieu de 15. pouces. Et c'est pour empêcher ce mouvement horizontal, qui auroit lieu dans les solives d'un plancher, qu'on les serre entre elles avec des chéssillons. On voit ici que le carré de la hauteur 21. (441) est à peu près le double du carré de l'épaisseur 15 (225). On observe que les dimensions de l'équarrissage, doivent être plus ou moins fortes, en raison directe

MS 233**Pont de bois**

Question et majeure et neuve

Le citoyen de Chambine demande par sa lettre du 19 decembre de la part du Ministre quelle doit être la largeur d'un pont de bois, relativement à sa longueur.

Cette question pourrait être envisagée sous un double aspect. Le premier, relativement à la commodité du service public: le deuxième relativement à la solidité.

Il faut, pour la commodité publique, que la largeur du pont soit telle que deux voitures puissent y passer aisement de front entre les boutte-roues.

Les ponts de bois, lors que les travées passent 19 à 20 metres de longueur, sont sujets à deux mouvemens, l'un vertical et l'autre horizontal. Ils proviennent tous les deux: **1°** du poids que le pont supporte, du poids du bois même qui entre dans sa construction, et du travail du bois, surtout de celui de chêne qui se tourmente et se déjette plus que les autres especes de bois, parce qu'il a plus de force: et c'est particulièrement ce travail du bois sur lui même qui lui imprime une partie du mouvement horizontal, dont les effets sont si a craindre. **2°** Il vient aussi de ce que les tenons ni sont de jauge aux mortaises, ni proportionnés à la grosseur des bois . Les tenons doivent avoir d'épaisseur $\frac{2}{5}$ de celle de la pièce de bois dans la quelle ils sont pratiqués: il vient encore de ce que dans une ferme les articulations des pièces sont au dessus les unes les autres tandis qu'elles devraient être alternatives c'est à dire que l'estremité d'un arbaletrier par exemple doit porter à l'aplomb du milieu d'un autre arbaletrier inferieur. **3°** Les mouvements horizontales sont souvent occasionnés, outre les défauts de coupe et d'assemblages. Par la mauvaise qualité des bois gras et gelifs tranchés les nœuds viciés, et l'épaisseur des aubiers qui en diminuent les dimensions; et par consequent la force; par les dimensions des equarrissage qui ne sont pas proportionnées à la longueur des pièces; par le peu de relation des differents pièces entr'elles suivant les poids qu'elles doivent porter et les résistances qu'elles doivent avoir et parceque, dans la composition des fermes on oblie souvent qu'en deux pièces de même longueur, leur résistance est dans la raison du produit de leur plan, par leur épaisseur verticale, et qu'elles doivent être comme le produit du carré de la hauteur de l'une, multiplié par son épaisseur, au produit du carré de la hauteur de l'autre pas son épaisseur; si que pour avoir le rapport de la résistance de deux pièces de differentes longueurs, épaisseurs et hauteurs, il faut multiplier le carré de la hauteur par l'épaisseur, et diviser le produit par la longueur, attendu que la hauteur d'une pièce exprime le bras de levier qui repond à la puissance resistente. **4°** Enfin le courant des fleuves et rivières et les vents peuvent encore contribuer au mouvement horizontal.

On a l'expérience que, malgré toutes les attentions apportées à la composition d'un pont de bois, toutes les précautions prises par sa bonne construction, et pour la qualité saine de la matière et malgré

les dimensions bien déterminées et calculées suivant la longueur portée et l'usage des pièces, la bonne liaison et solidité des assemblages par tenons, mortaises, renforts et embrassement et malgré les fermes, moises et echarpes liernes contrevents et decharge il se fait outre l'affaissement ou mouvement vertical, un mouvement horizontal assés considerable et toujours allarmants que le ouvriers appellent vergement ou rollement dont la quantité est en raison inverse de la largeur du pont et en raison directe de la longueur de travées.

J'ai depuis long temp fait des réflexions sur ce mouvement horizontal, plus à craindre qu'on ne l'imagine. J'ai lu et conseillé avec attention tout les auteur qui ont traité de la charpente; Palladio, Scamozzy, Antonio Sangallo, Mathurin Jousse, La Hire, D'Aviler, Fourneau, Mesange, Gauthier et Belidor mais tous ces auteurs n'ont parlé de la largeur des ponts de bois que relativement a la voye ou passage necessaire aux voitures qui doivent les frequenter sans aucune consideration de la largeur à la longueur des travées: et c'est la question vraiment interessante et neuve qu'on demande de traiter aujourd'huy.

D'après beaucoup des experiences et d'(esfois), j'ai trouvé que pour qu'un pont de bois eut une solidité convenable surtout quand il était composé de plusieurs travées supportées par des palées ou des piles de maçonnerie il était necessaire qu'il eut de largeur le tiers de la longueur de la plus longue des travées et que quand on lui en donnait moins, le pont fouettait, c'est à dire avec un mouvement horizontal d'autant plus grand que le pont était plus étroit et la travée plus longue. D'après mes observations et mon experience soutenue et repetée je pourrais dire qu'il faut que le quarré de la largeur du pont soit à peu près de la moitié du quarré de la demi longueur de la travée. Soit par exemple une travée de 20 mètres dont la moitié est de 10 mètres: le quarré de cette moitié étant 100 mètres alors le quarré de la largeur du pont serait 50 mètres dont la racine quarrée approchante est de 7 mètres au environ le tiers de la longueur de la travée: ce qui donne la proportion du meilleur équarrissage d'une poutre à la quelle on veut attribuer la plus grande resistance possible; c'est a dire 5 sur 7 10 sur 14 et 15 sur 21. Dont on veut que le quarré des petites dimensions est moitié à peu près du quarré des grandes: c'est une simple idée que je hazarde et peut être l'on pourrait pousser cette analogie jusqu'à la démonstration que resoudrait la question.

Je ne vois ni ne connais aucun principe de theorie mechanique que puisse éclairer et appuyer l'experience repetée que j'ai faite de donner pour largeur à un pont de bois les tiers de la longueur de la plus grande des travées.

J'observe que pour empecher ce mouvement horizontal lorsqu'il y a plusieurs palées il faut placer à chacune des arcs-boutans, en forme devant et derrière—becs, observant d'incliner les arcs bouter d'aval plus que ceux d'amont ainsi que Cesar (voyez le Commentaires) l'avait pratiquée au pont de bois qu'il avait jetté sur le Rhin. Si on avait les piles en maçonnerie au lieu des palées il faut, desavant et arriere-bas, appuyer des arcs bouter contre les poutres de rive, sans les quelles on mettra un sous-poutreau ou travon qui courra sous toutes les poutres et traversera la largeur entière du pont, avec le quel

souspoutreau les arcs boutans seront assemblées en mordant de façon que chacun de ces arcs buter ait de longueur $\frac{1}{4}$ de celle de la travée en sorte qu'il ne restera que la moitié de la travée sans être buttée. Toutes les fermes seront bien contreventées entr'elles: et on (n'oblirait pas) d'établir en amont des palées des brise glaces, xxxxx xxxx xxxx doit xxx securir et amortir le train des glaces, si la rivière en rompre le cours des arbres qui sont souvent entraînés par la rapidité des courantes.

Nous aurions désiré que nos connaissances plus étendues nous eussent permis de presenter un resultat et des développements plus satisfaisants au Ministre, ami des arts, qui nous a consultés mais nous prouvons nôtre bonne volonté par notre promptitude à remplir les voids autant qu'il est en nous. Je crois au surplus qu'il serait bien d'envoyer le même programme à tous les ingeniurs des Ponts et Chaussées et en demander la solution dans un mois. Fait à Paris 17 Thermidore an 4 de la République Française signé Bernard.

Soit une poutre ABCD dont la longueur AB soit 30 pieds: la hauteur BD 21 pouces et sa largeur ou épaisseur DE 15 pouces. Voila les dimensions que l'expérience qui prévient toujours la théorie et dont elle est la mère; assigne à une poutre pour la rendre capable de la plus grande resistance possible: alors cette poutre sur les dimensions dites cy dessus, si on veut la rompre en appliquant un poids dans son milieu M, n'éprouverait aucun mouvement horizontal sous la pression du poids tandis que le contraire arriverait et que la poutre se dejetterait horizontalement avant de rompre, si son epaisseur DE était trop faible et sans proportions avec la hauteur BD, si pour exemple DE n'avait que 6 ou 8 pouces, au lieu de 15 pouces. Et c'est pour empecher ce mouvement horizontal, qui aurait lieu dans les tabliers d'un plancher, qu'on les serre entr'elles avec des étrésillons.

On voit ici que le quarré de la hauteur 21 (441) est à peu près le double du quarré de l'épaisseur 15 (225). On observe que les dimensions de l'équarrissage doivent etre plus ou moin fortes, en raison directe de la longueur de la poutre. Supposons maintenant qu'une travée soit par le bon assemblage des pièces envisagée comme une seule pièce de bois. Il est clair qu'elle resistera d'autant plus au mouvement horizontal qui lui serait imprimé qu'elle aura une plus grande épaisseur, que nous regardons comme la largeur du pont, soit en proportion avec la hauteur BD, que l'on peut considerer comme la demi-longueur de la travée; or l'expérience a fait voir qu'il fallait que les dimensions fussent 5 sur 7; 10 sur 14; 15 sur 21: c'est à dire, que le quarré de la hauteur fut double a peu près du quarré de la largeur ou épaisseur; d'où il suivrait que le quarré de la largeur d'un pont de bois devrait être la moitié du quarré de la demi longueur de la travée ou à peu près le tiers de la longueur de toute la travée; ce que nous voudrions pouvoir démontrer.

Au surplus, ce que nous avons trouvé bon par des experiences reiterées.

Signé Bernard

POLITECNICO DI MILANO

Dottorato di Ricerca in **Conservazione dei Beni Architettonici**

XXIV Ciclo

DALLA *RULE OF THUMB* AGLI INIZI DELLA SCIENZA DEL COSTRUIRE IN FRANCIA
1716-1841 | I PONTI IN LEGNO

ATLANTE ICONOGRAFICO

Relatore Prof. **Claudio CHESI**
Coordinatore del Dottorato Prof. **Carolina DI BIASE**

Dottoranda

Chiara TARDINI
matr. 738515

ATLANTE ICONOGRAFICO

PONTI IN LEGNO

1773-1822

Le tavole raccolte in questo atlante iconografico provengono principalmente da due aree geografiche: la Svizzera e la Francia alle quali si aggiunge la tavola relativa al progetto per il ponte presso Bormio dell'ingegner Carlo Donegani.

I disegni sono attualmente conservati presso tre archivi: il primo situato all'interno della biblioteca del *Royal Institute of British Architects* di Londra, il secondo dal *Fonds Ancien* dell'*École des Ponts et Chaussées* di Parigi, l'ultimo infine è l'Archivio Donegani di Sondrio.

Le prime diciannove tavole appartengono ad una raccolta di incisioni realizzate dall'architetto irlandese Michael Shanahan e dall'incisore Cristoforo dell'Acqua durante il *Grand Tour* compiuto con Frederick Hervey nel 1770, attualmente conservate nella sezione *Early works* della biblioteca del *Royal Institute of British Architects* di Londra.

La scelta di presentare e commentare questi esempi è dovuta alla eccezionalità del tipo di raccolta che per numero e varietà di casi documentati fornisce un'ampia campionatura dell'area alpina della prima metà del XVIII secolo.

La data di realizzazione di questi ponti purtroppo non è nota se non per i più conosciuti (ponte di Wettingen, ponte di Schaffhausen, ponte di Thun); in ogni caso è sicuramente antecedente al 1770 così come non è stato conservato il testo scritto che probabilmente accompagnava le immagini e ne dava qualche informazione sintetica. Un'altra copia delle incisioni della raccolta del R.I.B.A. si trova presso l'archivio privato del Conte Peter de Salis, ed una copia ulteriore

espressamente fatta realizzare a Thomas Jeans da John Soane è conservata presso l'archivio del John Soane Museum a Londra.

Gli schemi strutturali dei ponti che appartengono a questa raccolta presentano alcuni tratti comuni; per dettagli specifici si rimanda alle note apposte alle singole tavole.

Una caratteristica evidente comune a buona parte degli esempi di questa raccolta è quella di utilizzare uno schema strutturale apparentemente ibrido, in realtà spesso risultato della sovrapposizione di due o più schemi strutturali, uno dei quali è spesso una trave reticolare o una tipologia che la richiama. Le varianti presentate da questo schema assimilabile a trave reticolare sono molte, a partire dal caso con elementi diagonali solo nella parte terminale della campata, a casi in cui è presente una serie di elementi orizzontali.

La sovrapposizione dei due schemi strutturali probabilmente è stata realizzata con l'intento di suddividere i carichi permanenti e quelli accidentali su due strutture distinte: la struttura ad arco poligonale (o ad arco) avrebbe il compito di portare i carichi permanenti della struttura, la struttura secondaria (spesso una struttura reticolare o simile) è deputata al sostegno dei carichi accidentali. Non tutti gli esempi di questa raccolta dimostrano di avere chiaro questo principio e questo si riflette nella scelta dello schema che a volte risulta di difficile lettura.

Le tavole da 20 a 38 sono relative ai disegni realizzati tra il 1773 ed il 1818 dagli allievi dell'*École des Ponts et Chaussées* per i *Concours d'architecture*, e sono attualmente conservate presso il *Fonds Ancien* dell'*École* stessa. Le tavole sono

state divise in funzione dello schema strutturale, in tre gruppi, dei quali vengono brevemente delineate le caratteristiche comuni, mentre si rimanda alle note in calce ai disegni per commenti sul caso specifico. Il primo gruppo presenta uno schema strutturale piuttosto semplice e diffuso anche al di fuori del territorio francese: un impalcato sorretto nelle parti laterali da uno o più puntoni per lato e da una sotto trave di rinforzo nella parte centrale, dove è massimo il momento flettente. Lo schema progressivamente si arricchisce di elementi che collegano il puntone con la sotto trave, non sempre con funzione portante, dando origine ad una struttura intermedia tra l'impalcato e l'arco.

Il gruppo intermedio è costituito da ponti in cui è consolidato lo schema che prevede l'impiego dell'arco nella campata centrale, che ha luce maggiore rispetto a quelle laterali, di luce più modesta. L'arco della campata centrale è solitamente formato dalla sovrapposizione di tre lamine di legno curvato e serrate tra loro con perni passanti per ridurre lo scorrimento relativo dovuto alle tensioni tangenziali. Lo schema delle campate laterali subisce a sua volta modifiche, passando dalla semplice trave di impalcato con puntoni ad un arco poligonale sempre più articolato.

Il terzo gruppo infine presenta archi in tutte le campate, che hanno luci pressoché identiche. In corrispondenza dell'imposta, dove la trave di impalcato non è direttamente sorretta dall'arco, sono presenti uno o più puntoni per lato. Infine il progetto per il ponte da realizzare di fronte al nuovo *Boulevard de la Salpêrière* (DG 793) presenta uno schema diverso dagli altri che è interessante osservare. Si tratta della combinazione di due schemi strutturali: trave di impalcato sovrapposta ad un arco a traliccio il cui intradosso è formato da un arco analogo a quelli dei due gruppi precedenti e l'estradosso è costituito da un

arco poligonale; intradosso ed estradosso sono collegati da montanti con direzione radiale.

Chiude la rassegna delle tavole dell'*École des Ponts et Chaussées* una tavola riassuntiva in cui è ben visibile il mutamento dello schema strutturale in relazione alla luce da superare.

La tavola 39 infine proviene da un'altra area geografica e culturale: l'Impero Austriaco e si riferisce al progetto dell'ingegner Carlo Donegani per il ponte dei Bagni di Bormio. Il progetto reca la data del 1819; il ponte verrà poi realizzato nel 1822, ed appartiene alla Strada carrozzabile dello Stelvio progettata da Donegani stesso. Il ponte si sviluppa su una luce di 26,5 metri e una larghezza di 4 metri. L'impalcato è sorretto da tre serie di saette per lato; le saette più lunghe sono a loro volta sostenute da un arco poligonale a sette lati, circoscritto in una curva semicircolare. Gli elementi che formano i correnti sono collegati mediante giunti a dardo di Giove, non allineati con quelli superiori o inferiori. I correnti sono stati realizzati in legno di larice con sezione di 35 centimetri × 40 centimetri. L'impalcato è controventato mediante elementi posti a croce di S.Andrea con sezione quadrata di 23 centimetri di lato. I travetti di impalcato sono stati realizzati in legno di larice di 10 centimetri di lato. L'impalcato è stao poi coperto di sabbia e ghiaia.

ELENCO IMMAGINI ATLANTE:

Royal Institute of British Architects

Early Works

- Figura 1. Ponte 7 M da Vizelle
- Figura 2. Ponte di Livet
- Figura 3. Ponte di Liuch
- Figura 4. Ponte di Thun
- Figura 5. Ponte di Wettingen
- Figura 6. Ponte di Schaffhausen
- Figura 7. Ponte di Baden
- Figura 8. Bridge at Schindellege
- Figura 9. Bridge at Einsidlen
- Figura 10. Ponte di Richeborg
- Figura 11. Ponte di Zollbruch
- Figura 12. Ponte di Naffels
- Figura 13. Ponte di Enneda e Glaris
- Figura 14. Ponte di Schrvanden
- Figura 15. Ponte di Schwanden
- Figura 16. Ponte di Richenau
- Figura 17. Ponte de Lavis
- Figura 18. The first model of the bridge of Derry
- Figura 19. Bridge at Meisson

École Nationale des Ponts et Chaussées

Fonds Ancien - Concours

- Figura 20. DG 458 Denis Rosalie Lhost. Pont en charpente. Elevation et coupe. 1801
- Figura 21. DG 461 Ferdinand Jean Bayard de la Vingtrie. Pont en charpente. Elevation et coupes. 1816
- Figura 22. DG 3052 Augustin Louis Cauchy. Elevation d'un pont en charpente. 1808
- Figura 23. DG 1229 S. D. Projet de pont en bois.
- Figura 24. DG 466 Louis Marie Martret-Preville, 1806. Plan Coupe et elevation d'un pont a construire sur le Rhône.
- Figura 25. DG 452 Florent Casimir Joseph Debout. Projet d'un pont sur le Rhône. 1806
- Figura 26. DG 478 Victor Leroux. Projet d'un pont sur le Rhône. 1806
- Figura 27. DG 497 Pierre Advinez. Projet d'un pont en charpente. Elevation, plan et coupe. 17**
- Figura 28. DG 481 Charles Joseph Minard. Projet d'une arche en bois de 33,7 m d'ouverture. Elevation, plan et coupe. 1812
- Figura 29. DG 454 Pierre Frederic Leblanc. Elevation d'une arche. 1812
- Figura 30. DG 752 Ferdinand Jean Bayarde de la Vingtrie. Pont en charpente. 1816

- Figura 31. DG 468 Benjamin Lenglier. Projet d'un pont en charpente. Elevation, plan, coupe et details. 1799
- Figura 32. DG 470 1798-1799. Projet d'un pont en charpente.
- Figura 33. DG 472 Projet d'un pont en charpente d'après le programme donné le 15 Thermidor AN VI.
- Figura 34. DG 473 Louis Duval, 1798-1799. Projet de pont en charpente. Elevation, plan coupe et details.
- Figura 35. DG 474 Alexandre Charles Louis Arcelot, 1800-1801. Projet de pont en bois. Elevation, plan et detail de la construction.
- Figura 36. DG 793 Pont de charpente à construire sur la Seine en face du nouveau boulevard de la Salpêtrière projeté en 1773.
- Figura 37. DG 3 Projet de pont en charpente. S.D.
- Figura 38. DG 2915 Fortune Deverges, 1818. Concours architecture. Projet de dix ponts différents en charpente pour le Concours de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.

Archivio Donegani Sondrio

- Figura 39. Ponte dei Bagni di Bormio (Carlo Donegani)

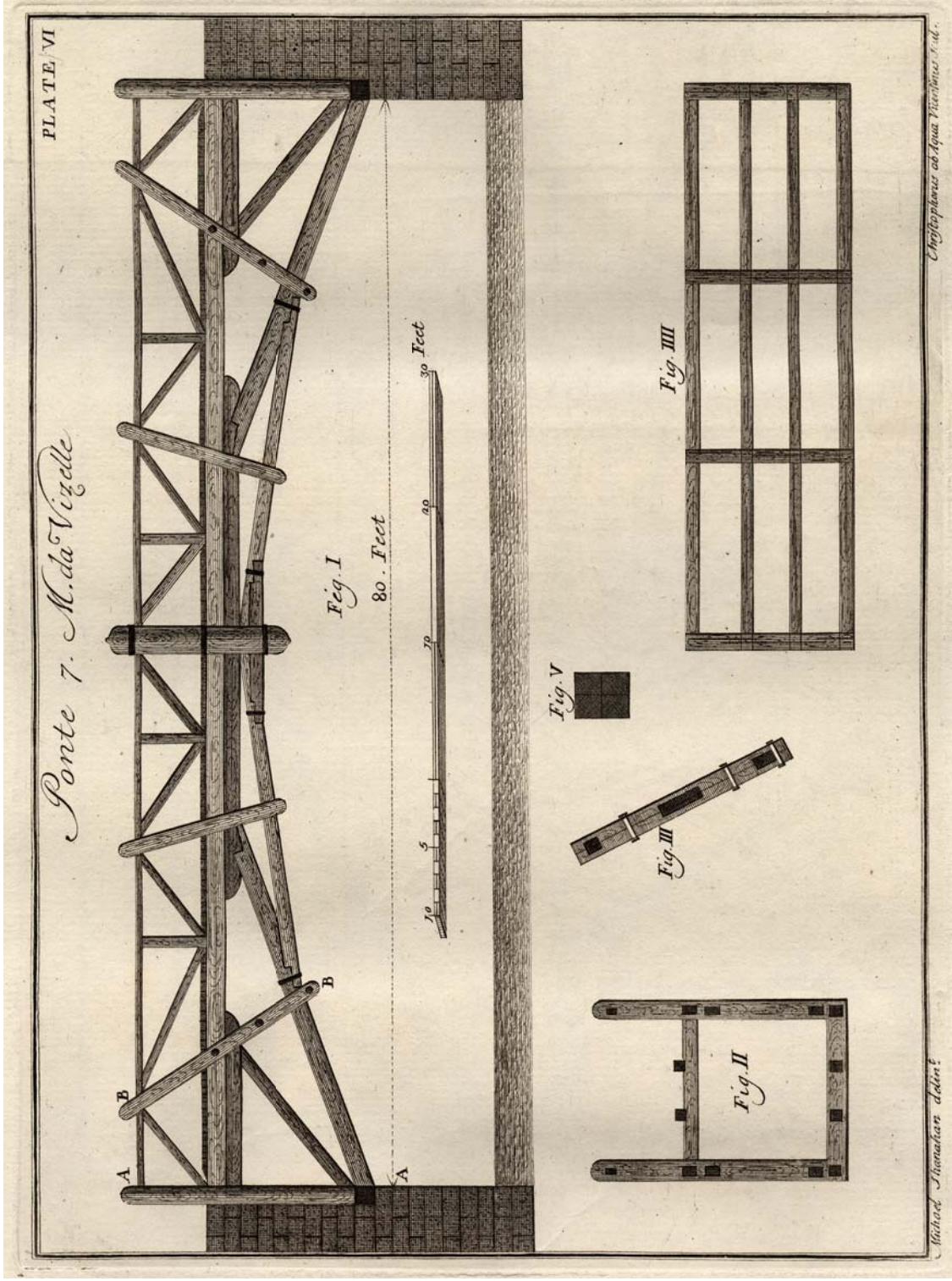


Figura 1. Schema dell'arco in pietra "rivisitato", arco poligonale a sostegno dell'impalcato realizzato con una serie di puntoni con diverse inclinazioni. Impalcato rinforzato nella parte centrale dove è massima la sollecitazione a flessione.

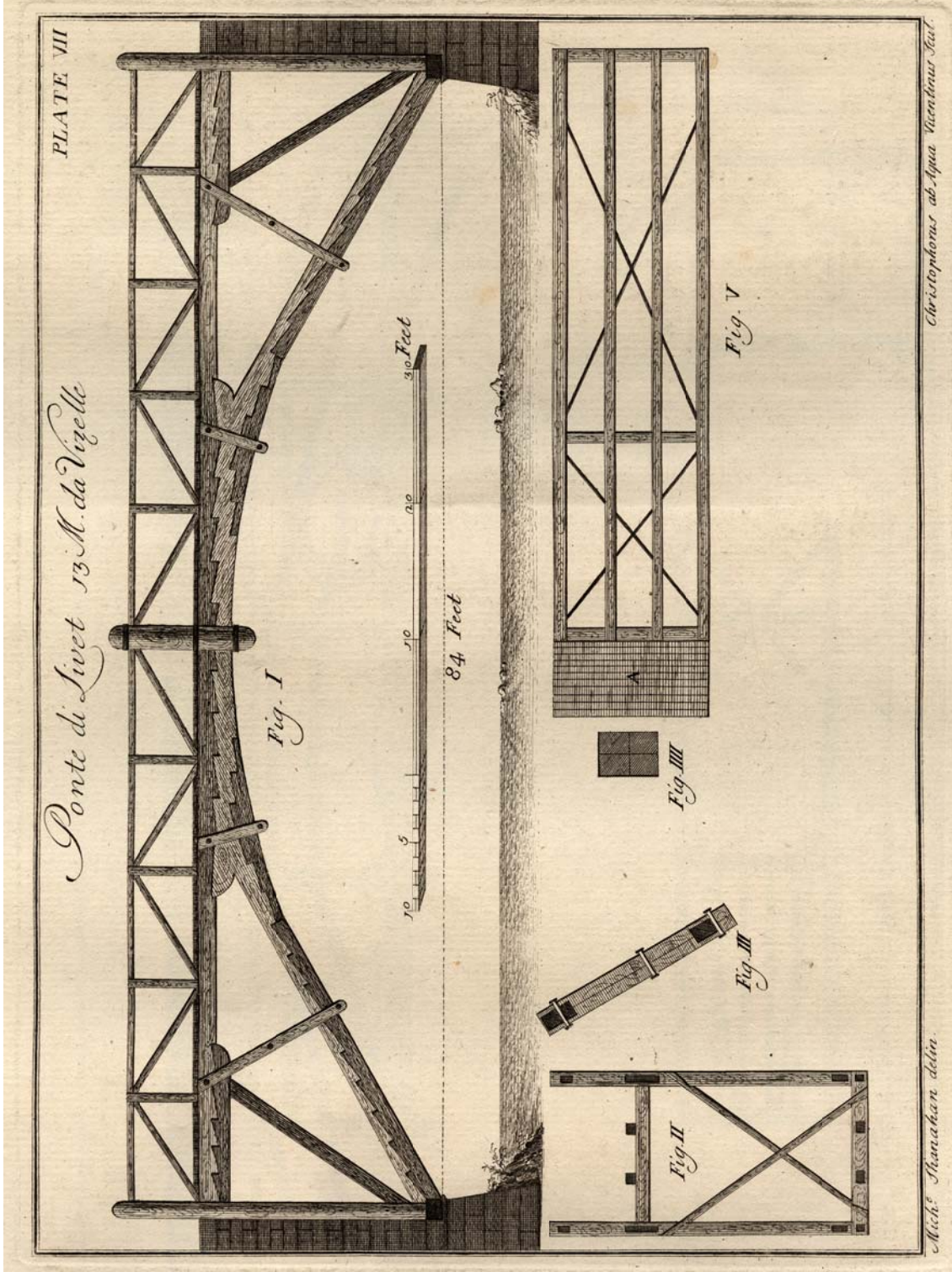


Figura 2. Schema simile al precedente con arco più definito formato dalla sovrapposizione di due elementi, di cui quello inferiore sagomato per formare un arco, in realtà sono due puntoni curvati sovrapposti.

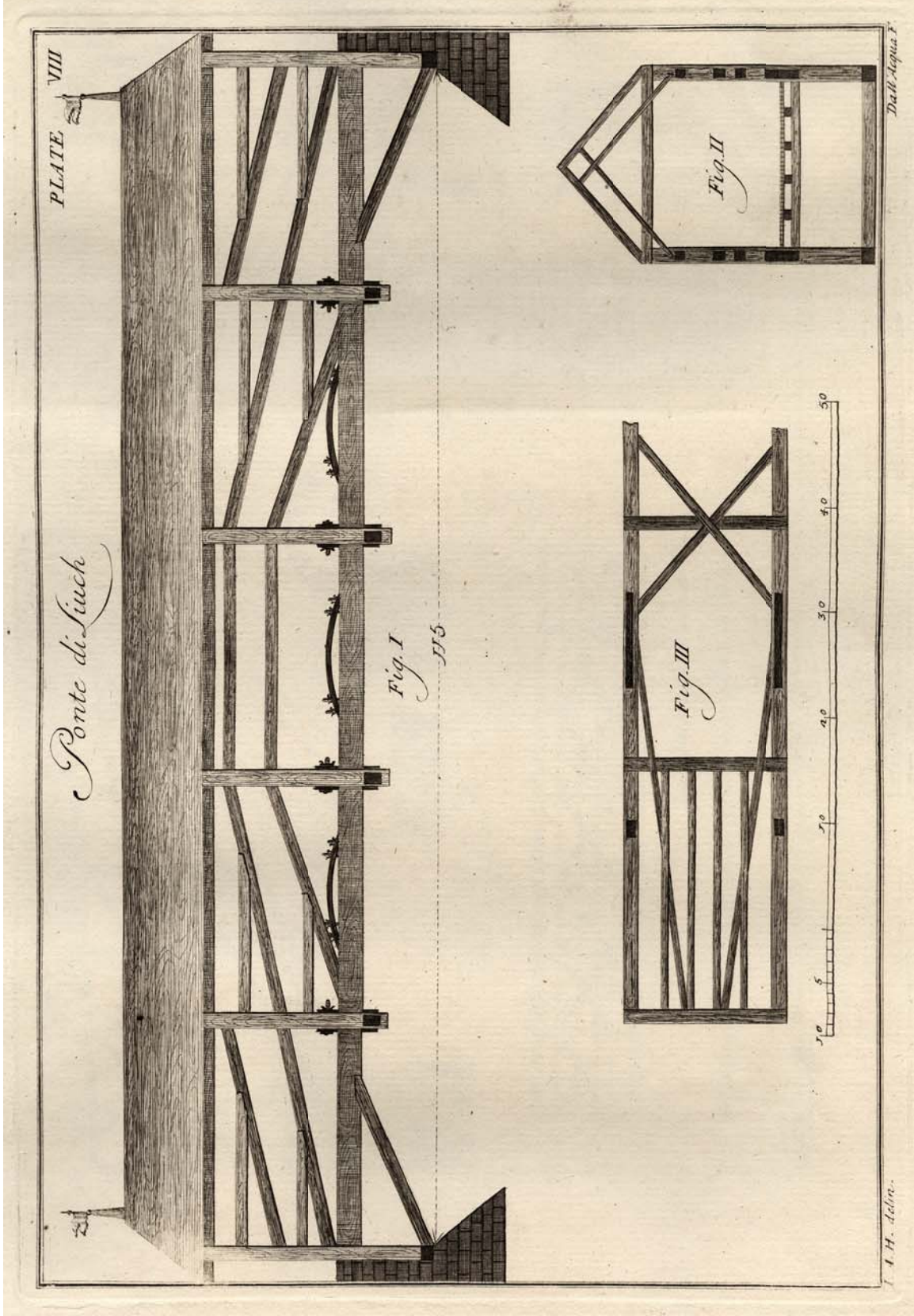


Figura 3. Schema quasi reticolare non perfettamente chiaro: mancano elementi diagonali nella parte centrale (dove però il taglio è minore) e una serie di elementi orizzontali di collegamento, diagonali e montanti. Impalcato sorretto nella parte laterale da due puntoni.

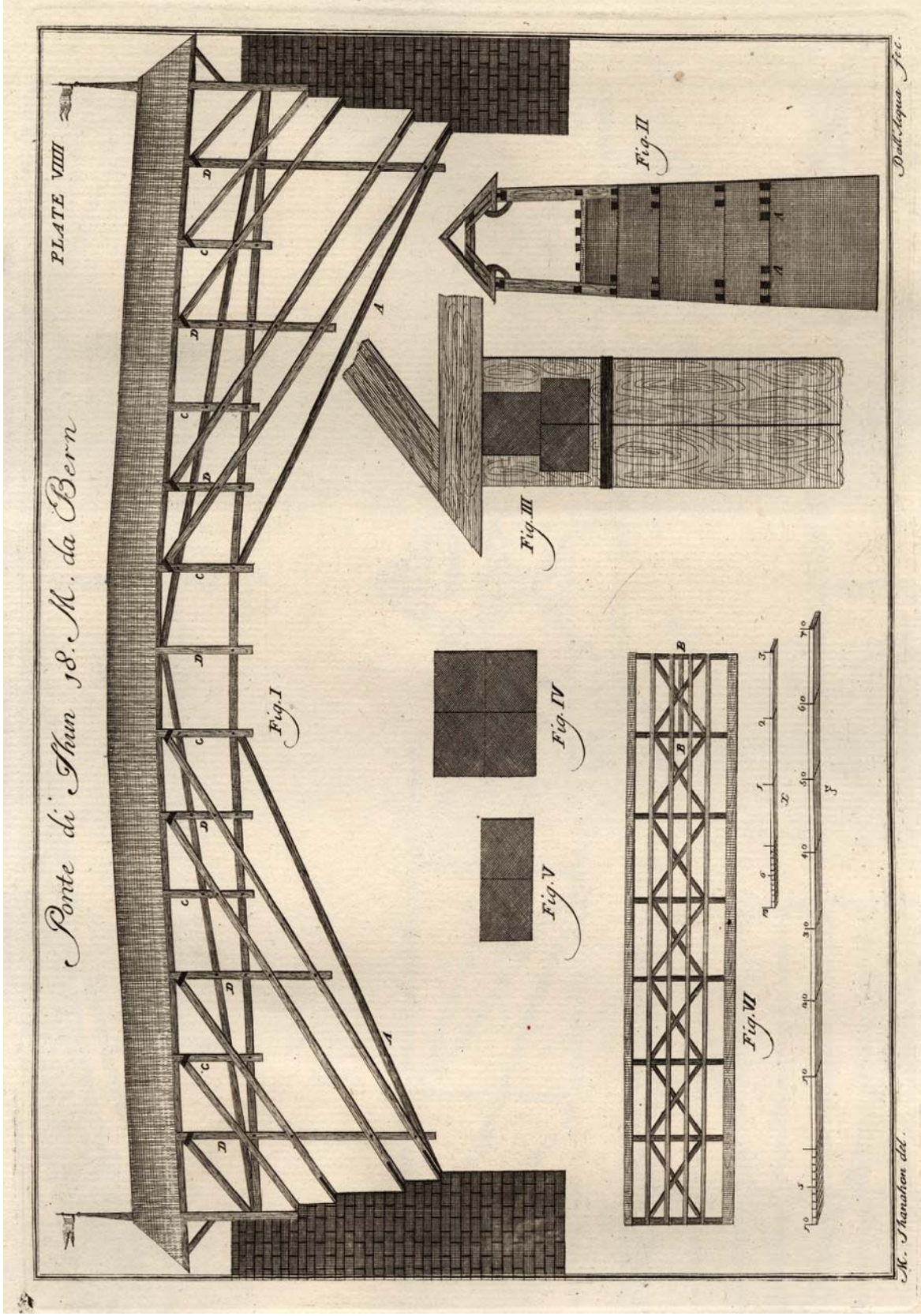


Figura 4. Ponte realizzato da Joseph Ritter nel 1764 (in realtà più frequentemente indicato come ponte di Kandel). Impalcato di grande luce sorretto da una serie di puntoni piuttosto snelli che proseguono fino alla struttura di copertura, a questo si sovrappone uno schema reticolare improprio formato da due lunghi puntoni che coprono metà campata.

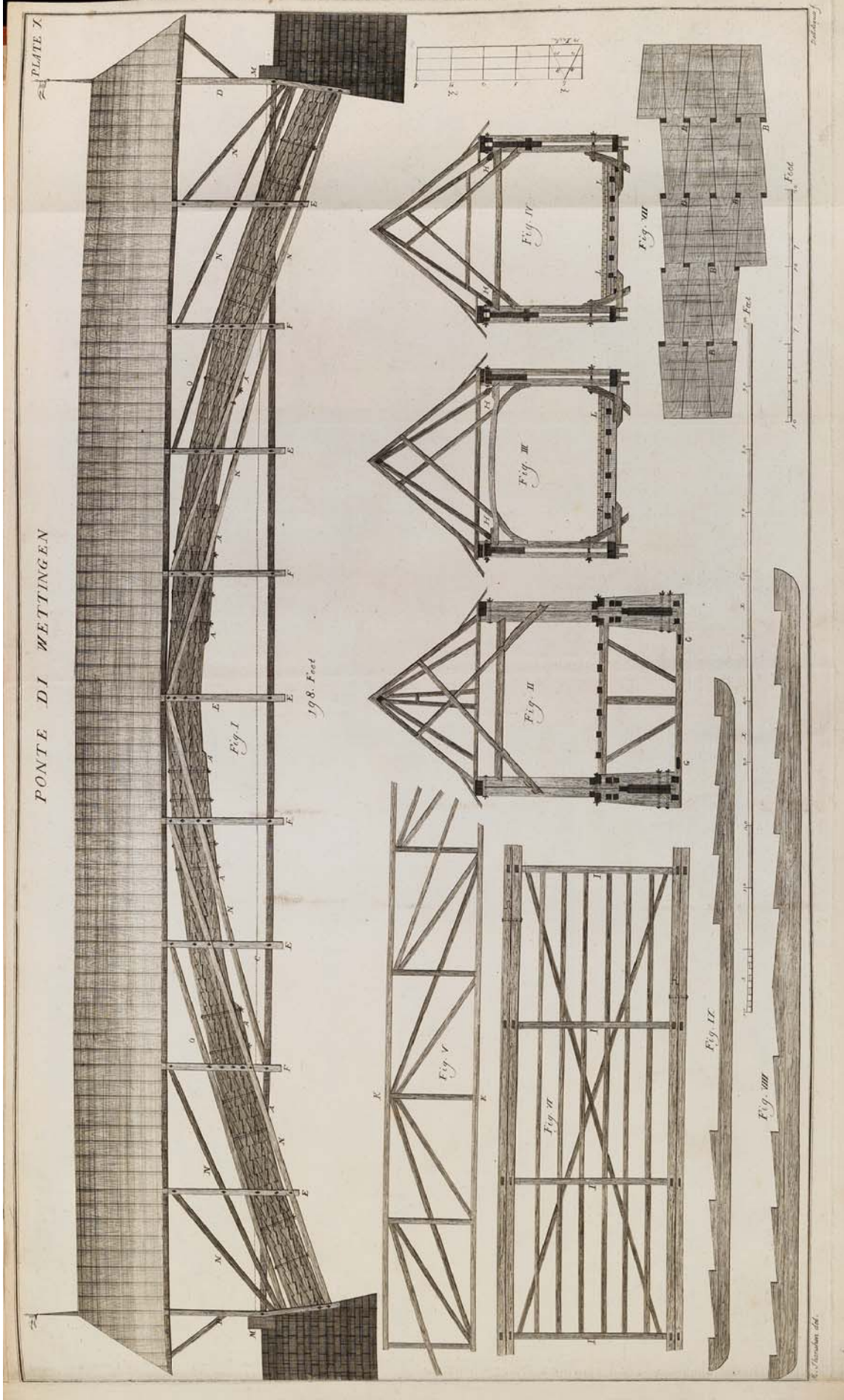


Figura 5. Schema del noto ponte di Wettingen realizzato da Hans Ulrich e Johannes Grubenmann tra il 1765 e il 1767. Disegno che in parte differisce dall'iconografia dell'epoca (vedi paragrafo 1.6).

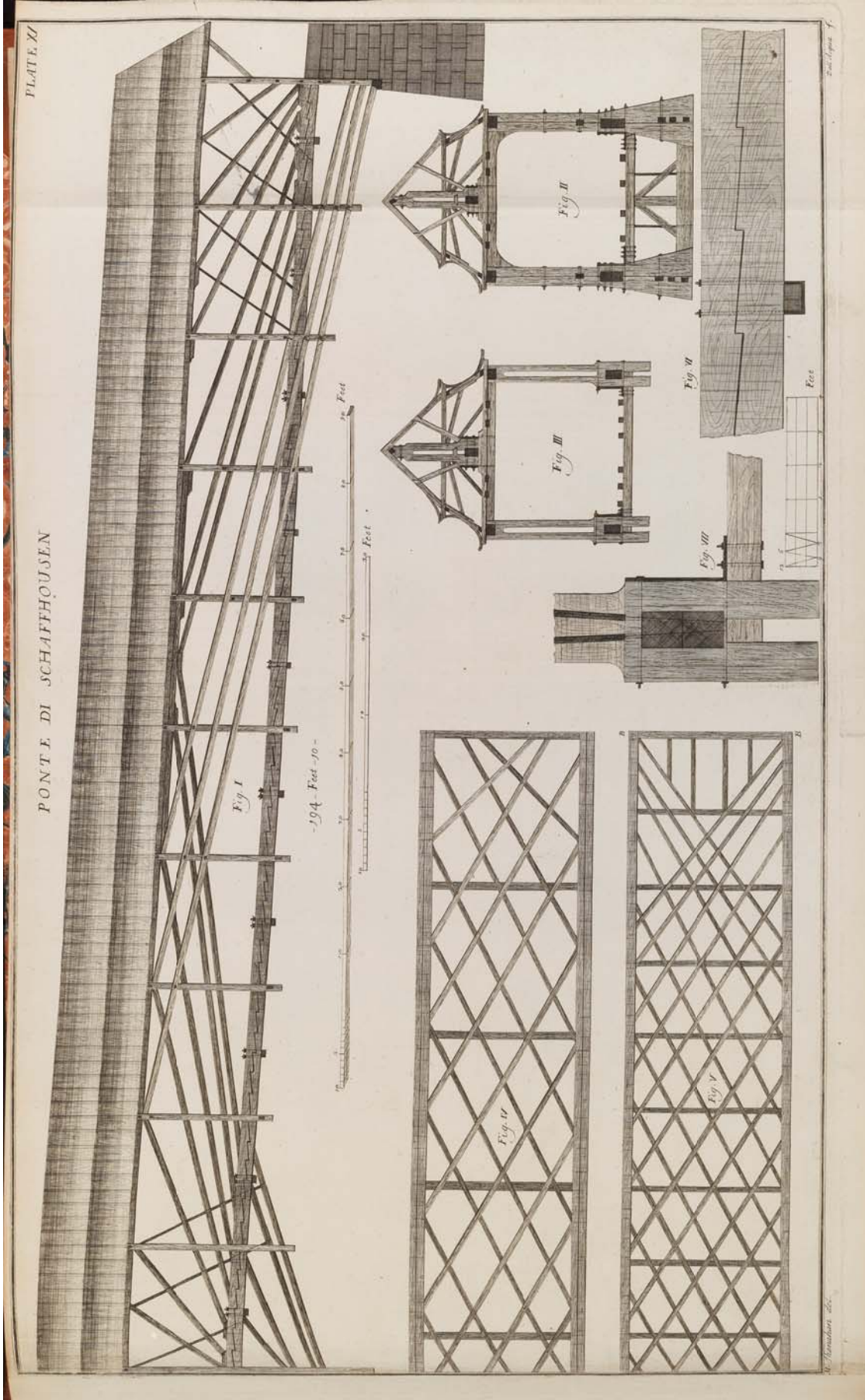


Figura 6. Disegno del noto ponte di Schaffhausen realizzato da Hans Ulrich e Johannes Grubenmann nel 1758. Schema ottenuto dalla sovrapposizione di quattro sotto-strutture (riferimento paragrafo 1.2). Impalcato formato da due elementi connessi mediante indentature e perni metallici passanti.

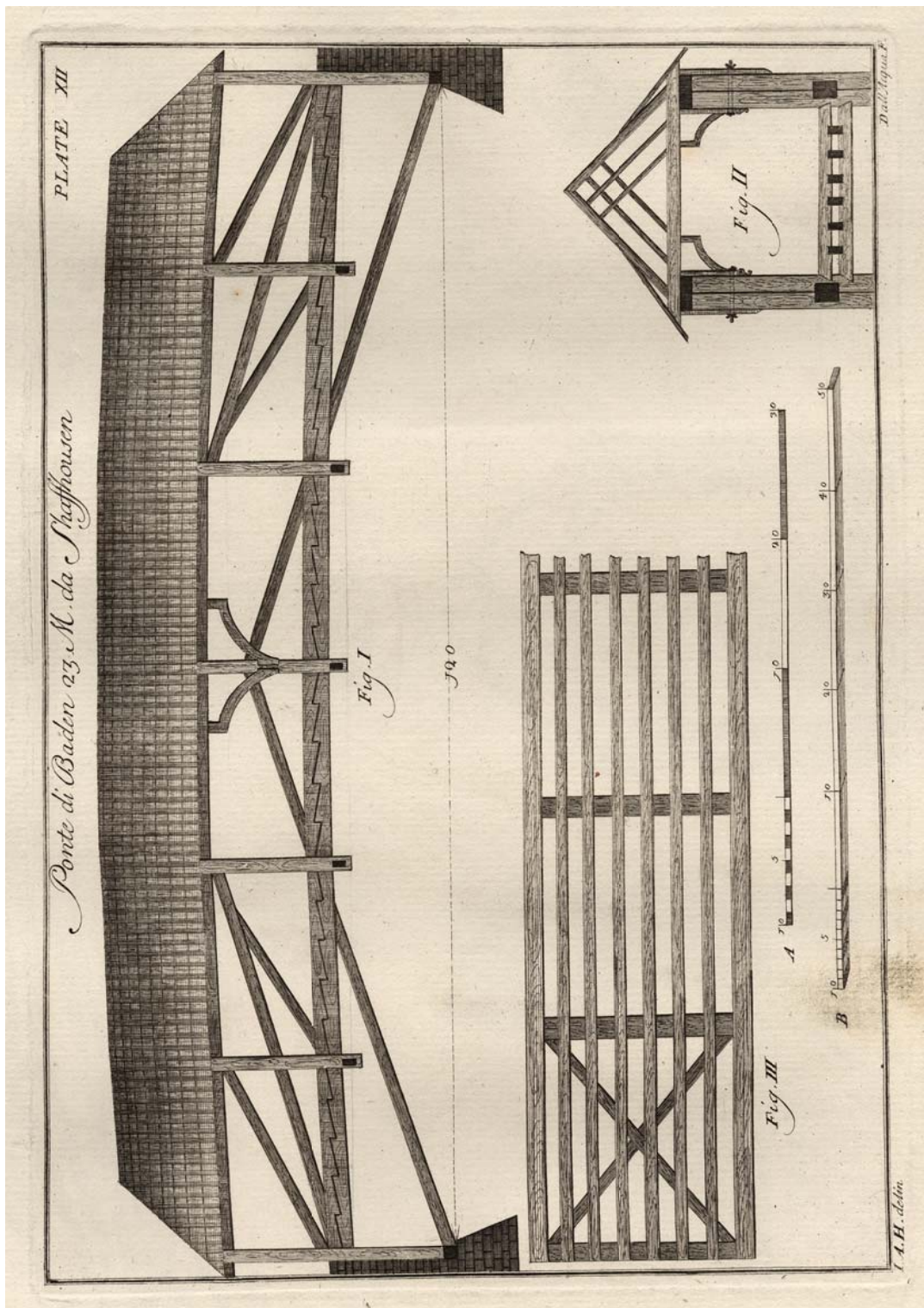


Figura 7. Schema strutturale non del tutto chiaro ottenuto dalla sovrapposizione di una struttura reticolare “impropria” e due puntoni di sostegno dell’impalcato. La trave di impalcato è composta dalla sovrapposizione di due elementi al fine di ottenere una sezione più resistente; l’intuizione dello scorrimento relativo tra i due elementi porta all’adozione di perni passanti di collegamento e alla lavorazione delle superfici di contatto indentate.

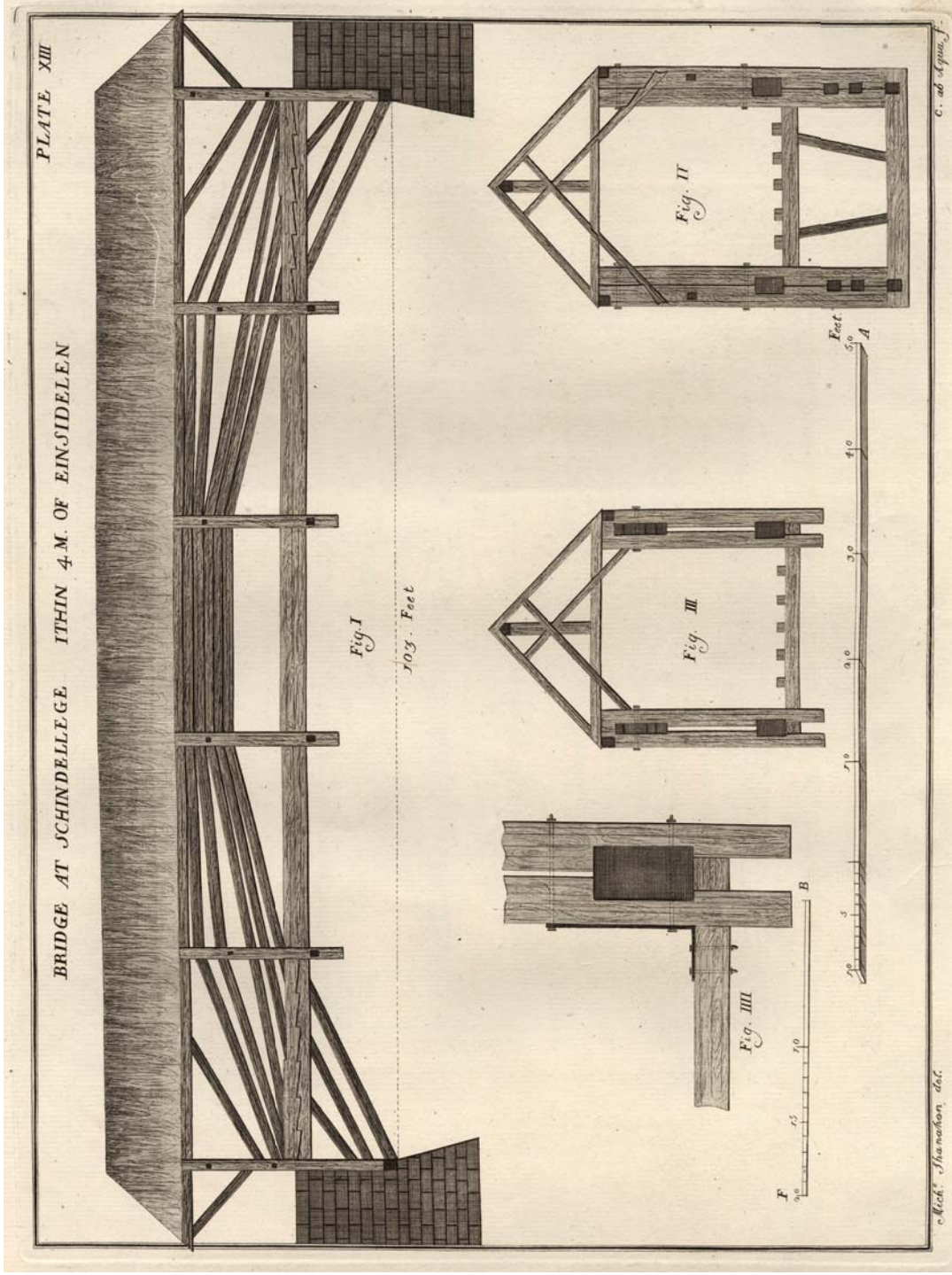


Figura 8. Ponte realizzato tra il 1764 ed il 1765 da Hans Ulrich Grubenmann e demolito nel 1946 dopo che nel 1939 era stato costruito un ponte in acciaio. Ponte con presenza sia di schema *sprengrwerk* che *hängwerk* di 31 metri di luce. Sistema reticolare in cui le diagonali formano una sorta di arco poligonale formato da una serie di elementi sovrapposti o ravvicinati. Trave di impalcato sorretta nella parte laterale da tre puntoni per lato.

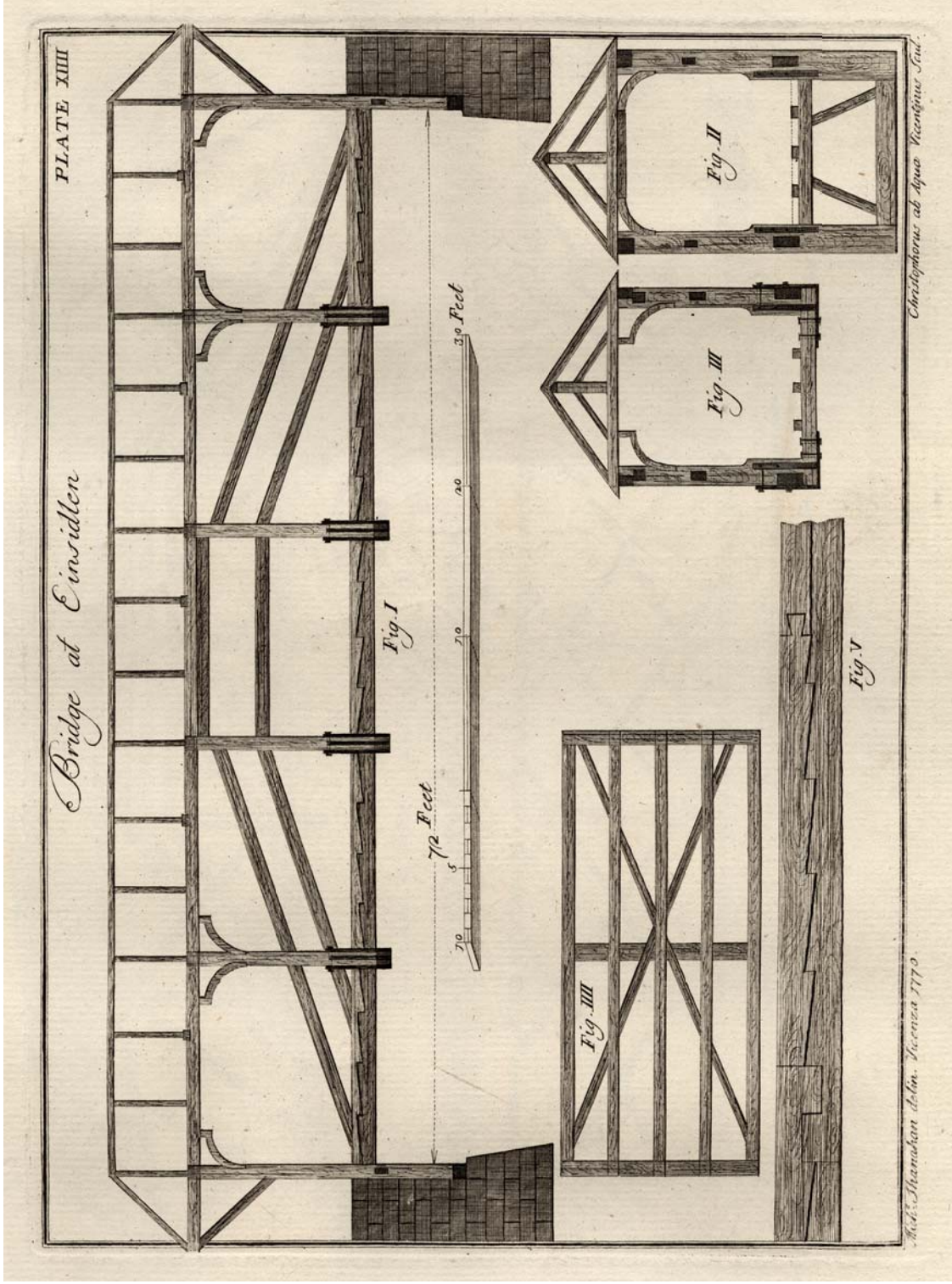


Figura 9. E' chiaro il percorso verso lo schema della trave reticolare. La campata centrale è però priva degli elementi diagonali. Il particolare rappresentato in fig. V mostra il profilo articolato dei due elementi che formano la trave di impalcato. Gli elementi diagonali intersecano i montanti invece che andare da nodo a nodo.

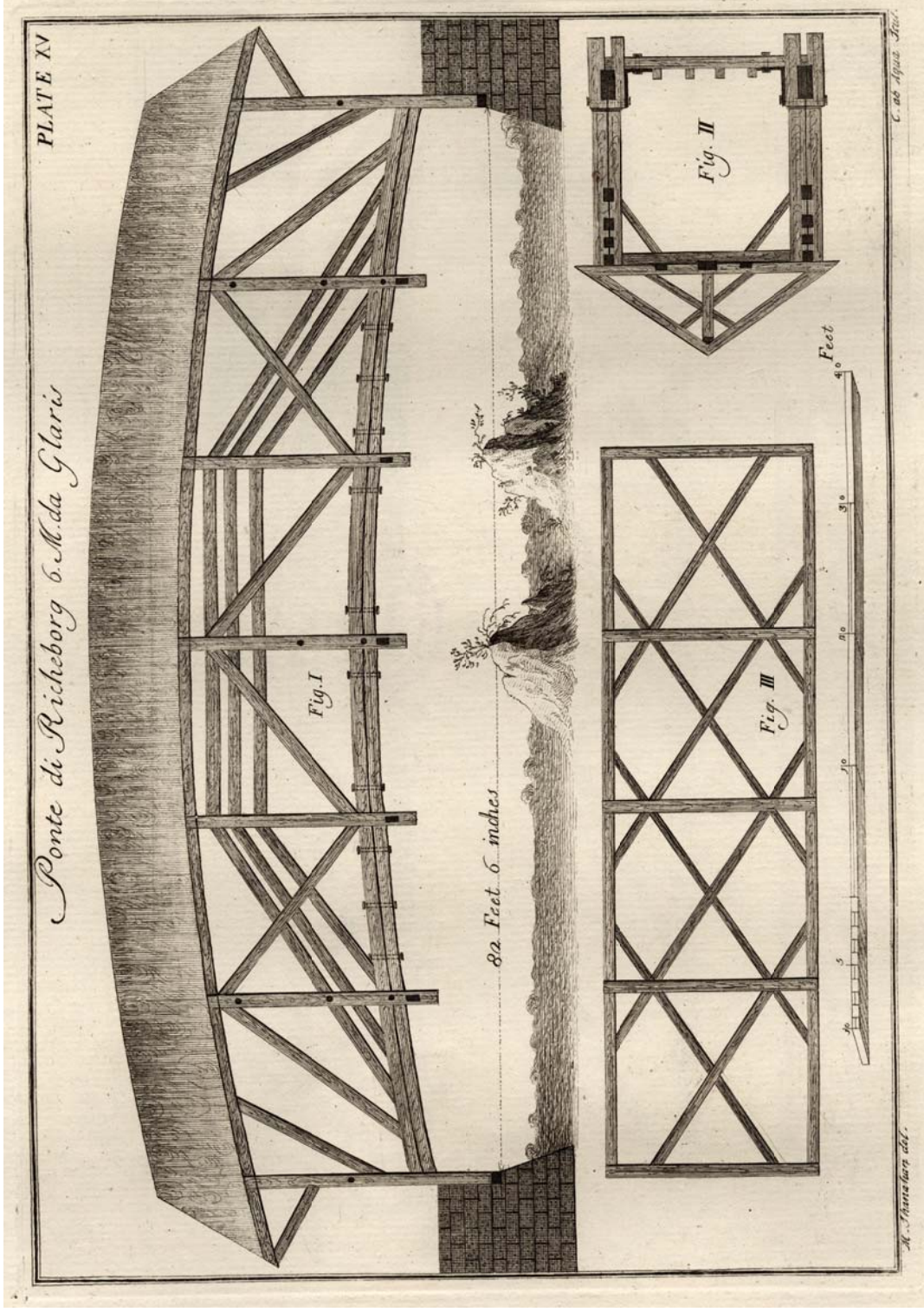


Figura 10. Schema ottenuto dalla sovrapposizione di uno schema a trapezio e di uno schema a maglia triangolare con elementi tesi e compressi; gli elementi diagonali appoggiano sull'impalcato. La trave di impalcato è formata dalla sovrapposizione di due elementi rettangolari il cui scorrimento relativo è impedito dalla presenza di perni passanti.

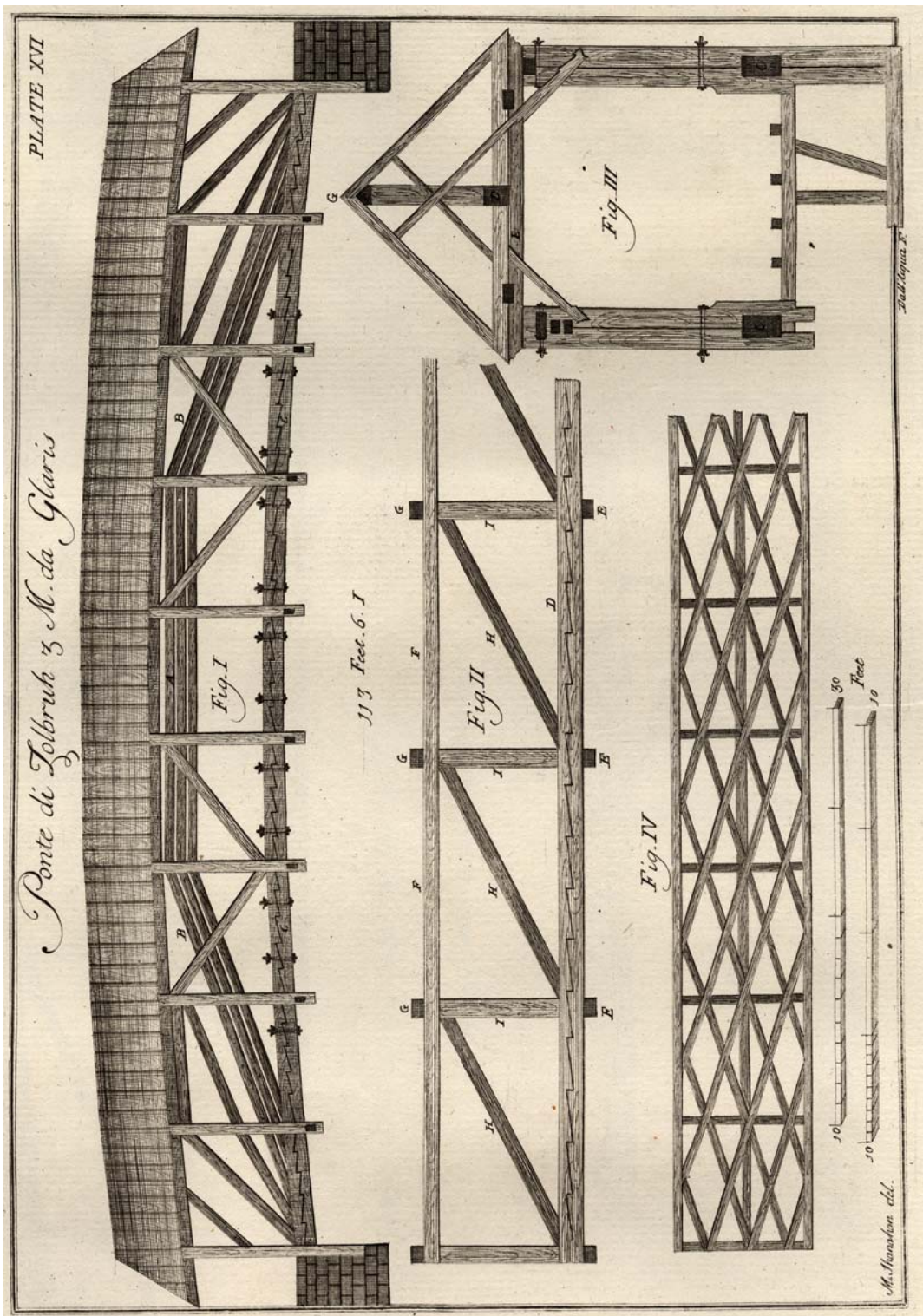


Figura 11. Schema che risulta dalla sovrapposizione di due schemi strutturali: uno che si sviluppa sull'intera campata e l'altro ripetuto due volte nelle parti esterne della campata. La trave di impalcato è formata da due elementi sovrapposti con giunto a dardo di Giove e perni passanti.

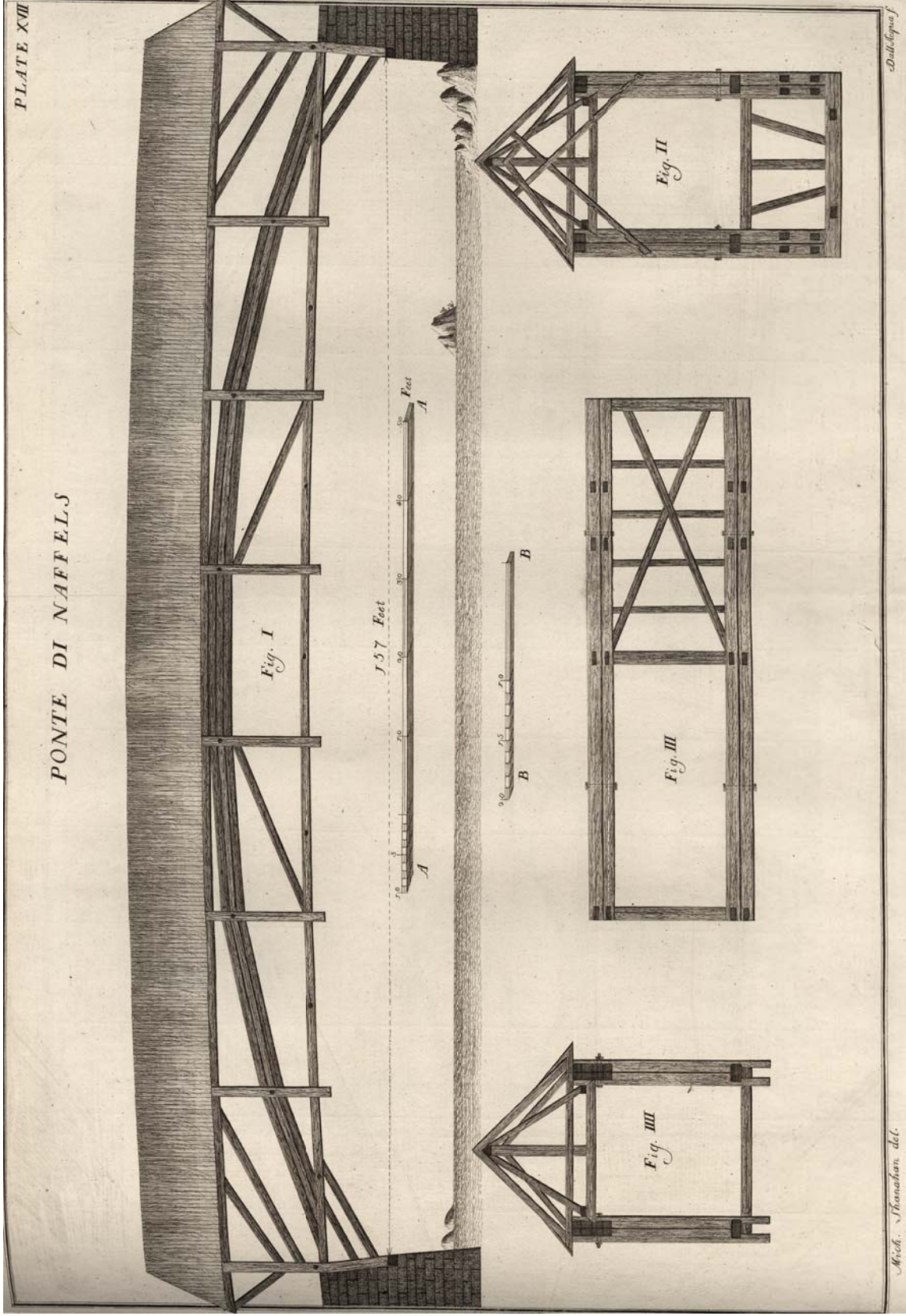


Figura 12. Schema strutturale ben leggibile in cui si identifica chiaramente l'arco poligonale al quale si aggiungono gli elementi diagonali presenti solo nelle due campate adiacenti a quella centrale ed in quelle esterne. La trave di impalcato, formata da due elementi, copre una luce di 157 piedi; non sono indicate le modalità di giunzione degli elementi.

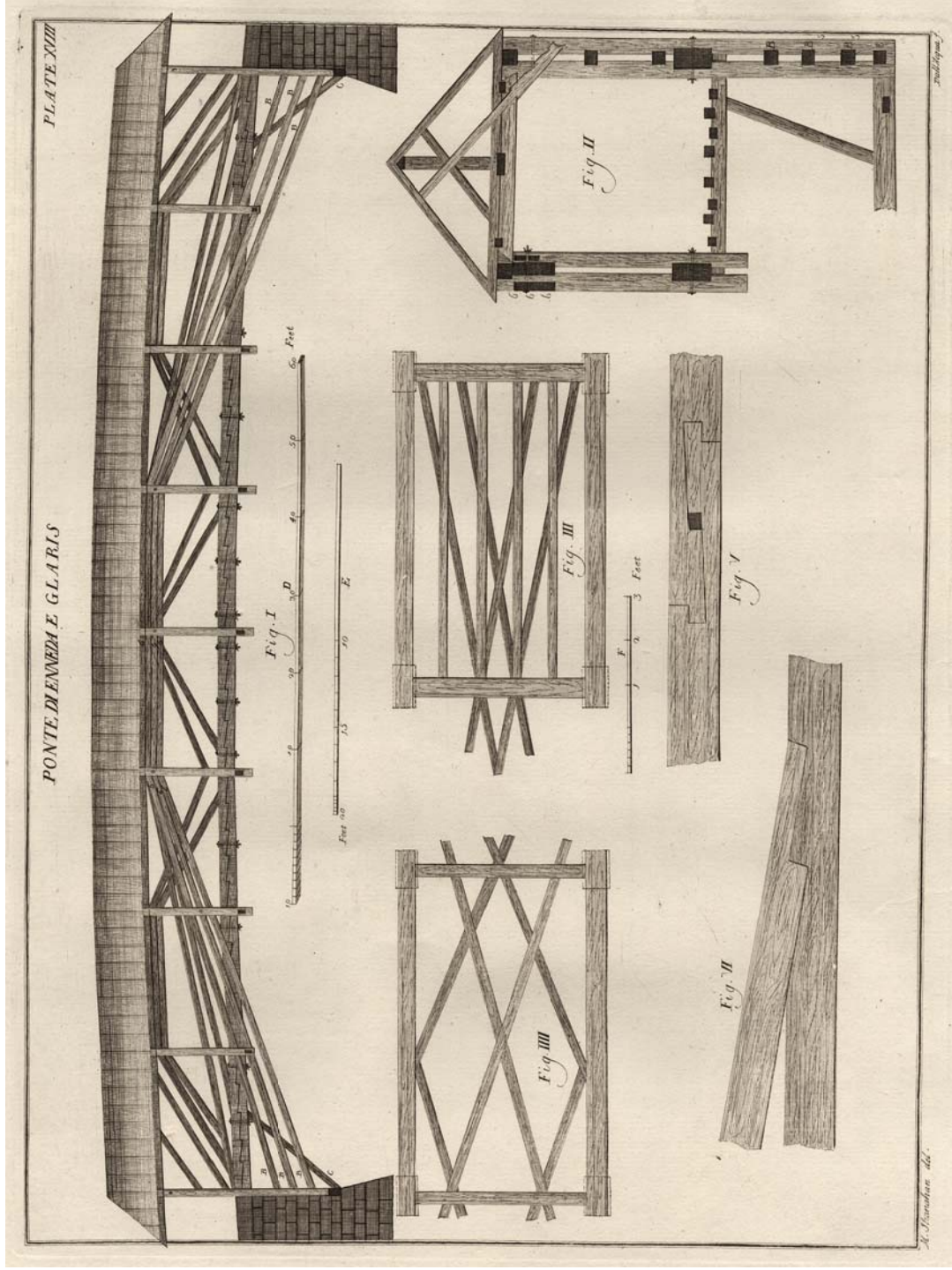


Figura 13. Ponte di Enneda, costruito sul Linth nel 1765 da Hans Ulrich Grubenmann e bruciato nel 1799. Lo schema strutturale del ponte di Enneda e Glaris è ottenuto dalla sovrapposizione di uno stesso schema ripetuto a due scale diverse. Si tratta di un trapezio esterno a cui si appende la struttura ed un poligono interno alla struttura principale, delimitato dall'impalcato e dalla copertura e ripetuto due volte, con una struttura più semplice nella parte centrale. Lo schema corretto della trave reticolare non è ancora del tutto chiaro; si colgono intuizioni e sperimentazioni di nuove soluzioni.

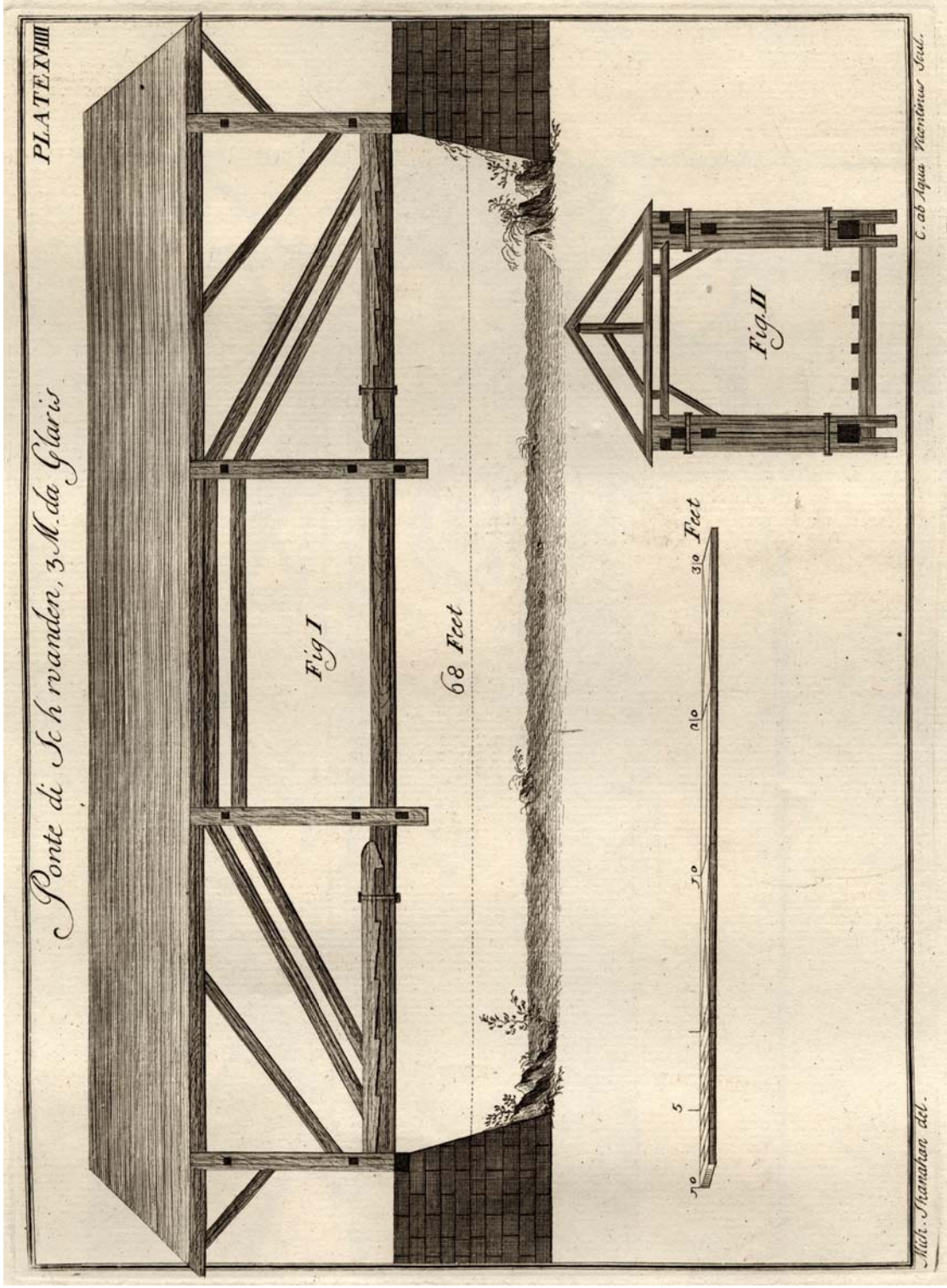


Figura 14. Lo schema del ponte di Schwanden consiste in un semplice schema a trapezio con trave di impalcato rinforzata nelle parti terminali.

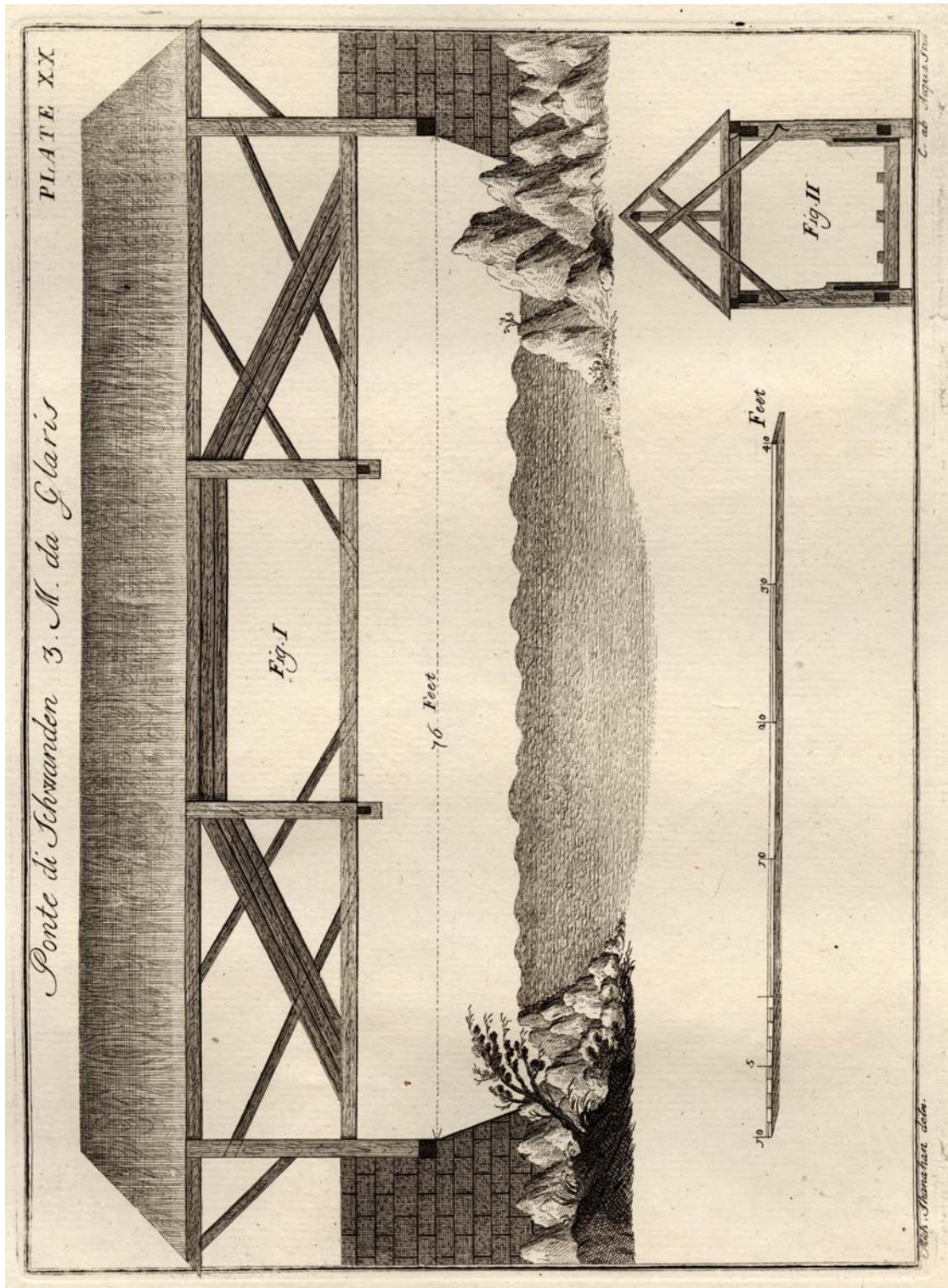


Figura 15. Apparentemente si tratta dello stesso ponte precedente, ma la luce indicata non è la stessa (a meno che non si faccia riferimento a due "piedi" diversi"), e lo schema strutturale presenta qualche differenza dovuta all'introduzione di due elementi diagonali tesi posti nella parte esterna della campata.

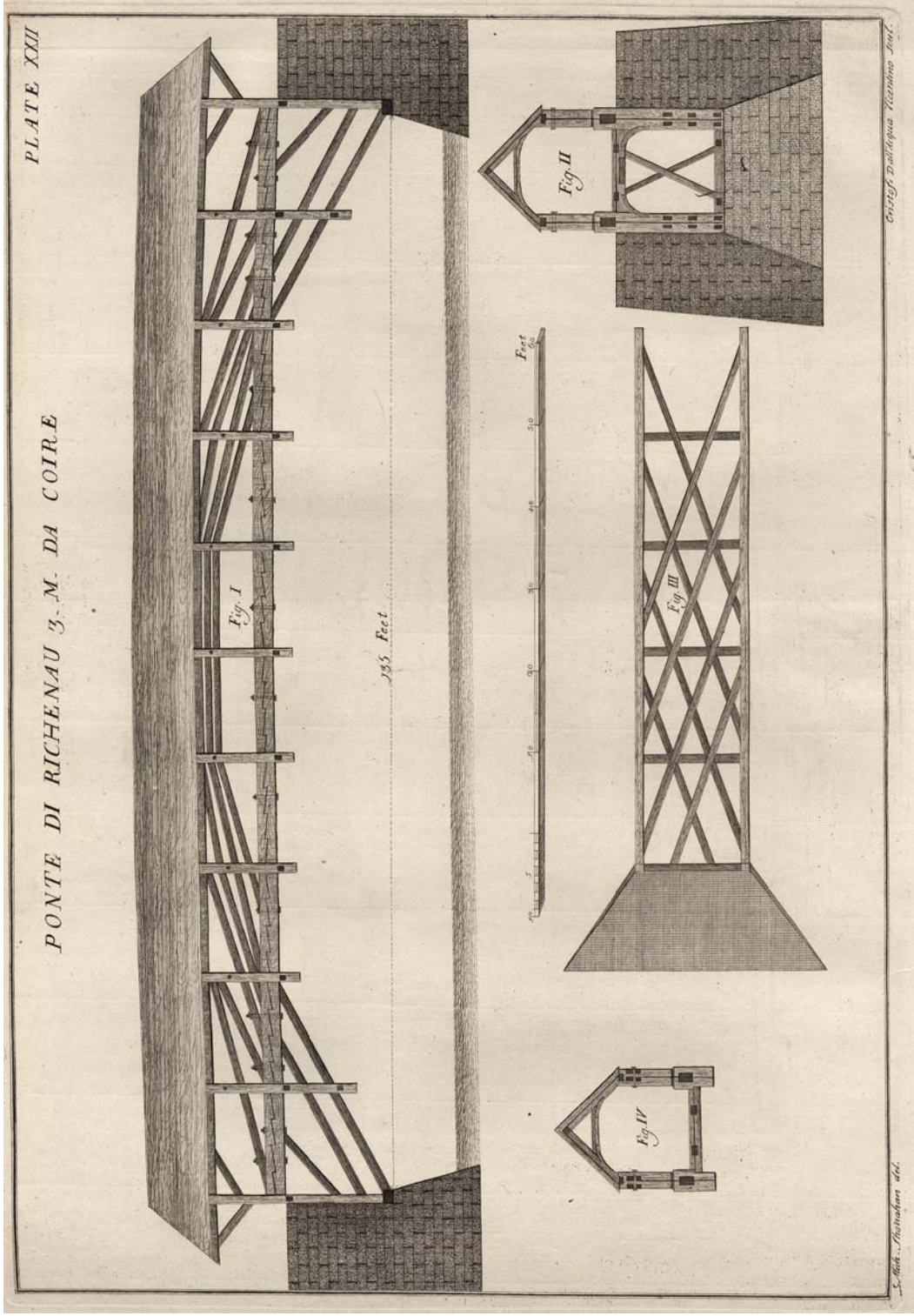


Figura 16. Anche in questo caso le due maglie centrali sono prive degli elementi diagonali. Combinazione di più schemi: all'arco poligonale si sovrappone una serie di tre elementi inclinati nella parte esterna della campata e una serie di tre puntoni di sostegno dell'impalcato. La trave di impalcato è formata da due elementi connessi con giunto a dardo di Giove ulteriormente serrati con perni passanti.

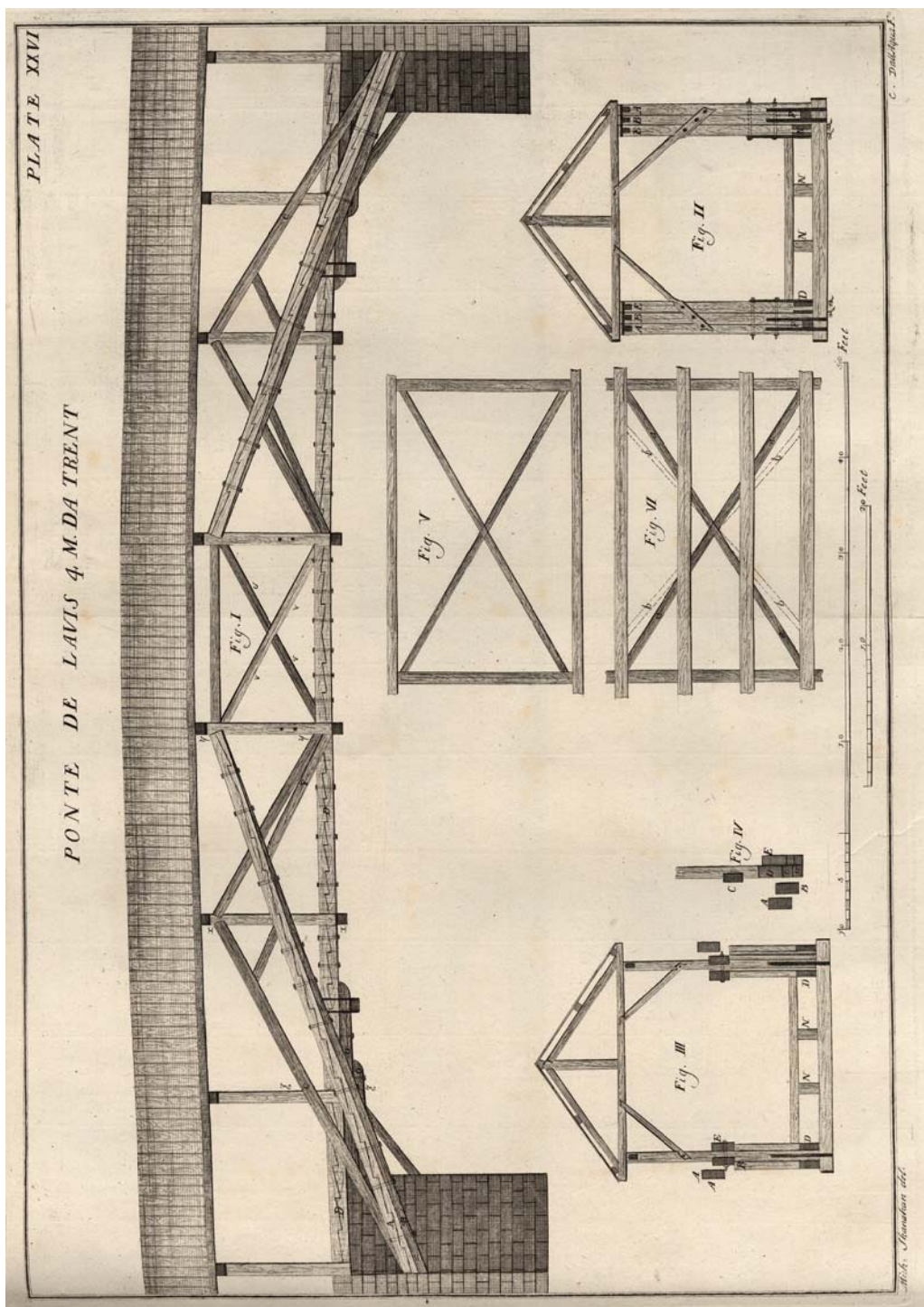


Figura 17. Schema strutturale adottato dato dalla sovrapposizione di due diverse soluzioni: una a capriata semplice impiegata nelle campate laterali cui si sovrappone una capriata palladiana avente la stessa luce del ponte. La capriata palladiana si trova sul livello esterno, nella parte intermedia si trovano le due capriate semplici, mentre la struttura dell'impalcato e quella di copertura sono situate nella parte interna. I puntoni della campata palladiana probabilmente avevano una sezione piuttosto consistente poiché sono formati da due elementi indentati posteriormente legati con perni passanti. Complessivamente si tratta di uno schema piuttosto insolito.

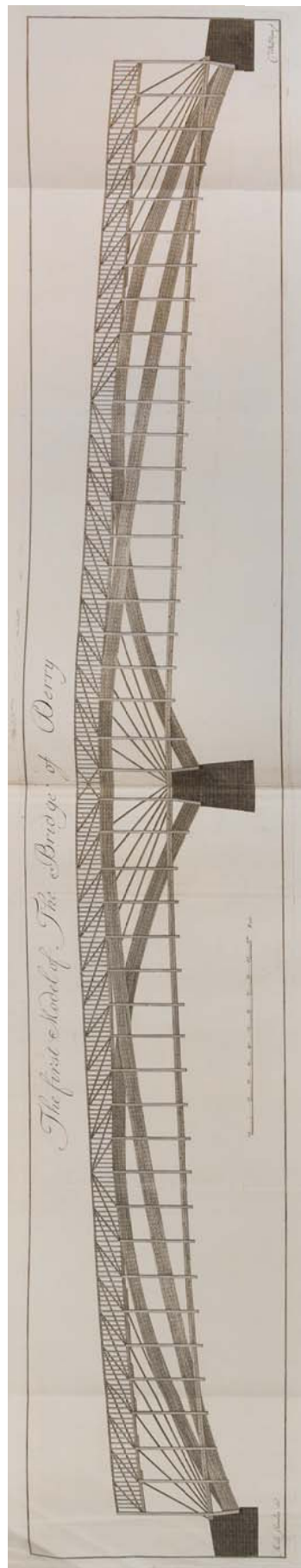


Figura 18. Progetto per il concorso per il ponte sul Derry organizzato da Frederick Hervey, probabilmente realizzato da Jean Grubenmann. Il richiamo alla struttura del ponte di Schaffhausen è evidente, anche in questo caso è presente una sovrapposizione di più schemi strutturali. Presenza ripetuta a diverse scale dell'arco di cui manca l'idea del dimensionamento.

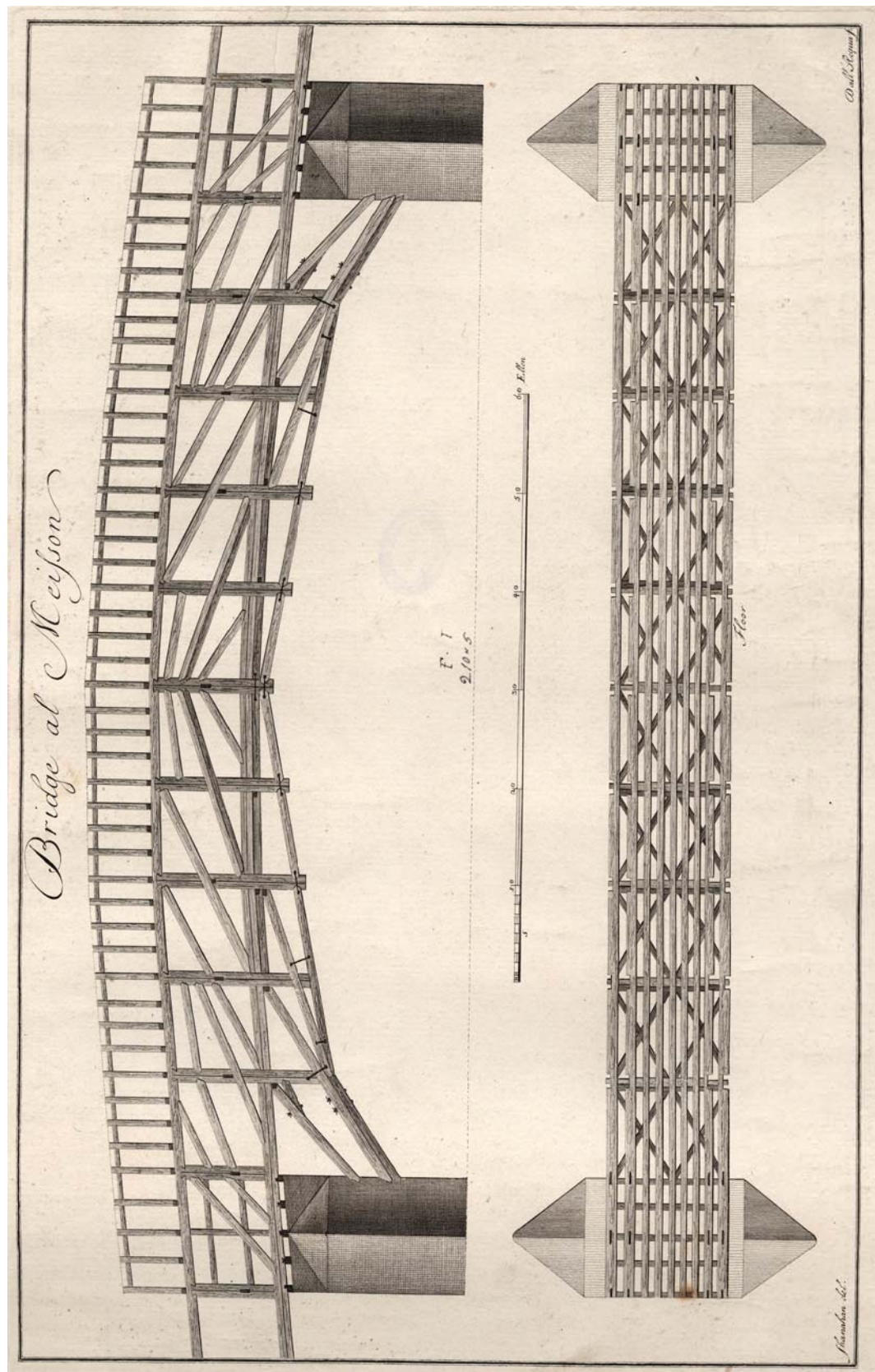


Figura 19. Schema strutturale poco chiaro. Una serie articolata di puntoni a sostegno dell'impalcato forma una soluzione intermedia tra puntoni ed arco poligonale. La struttura soprastante è risultato di idee molto confuse e di difficile lettura.

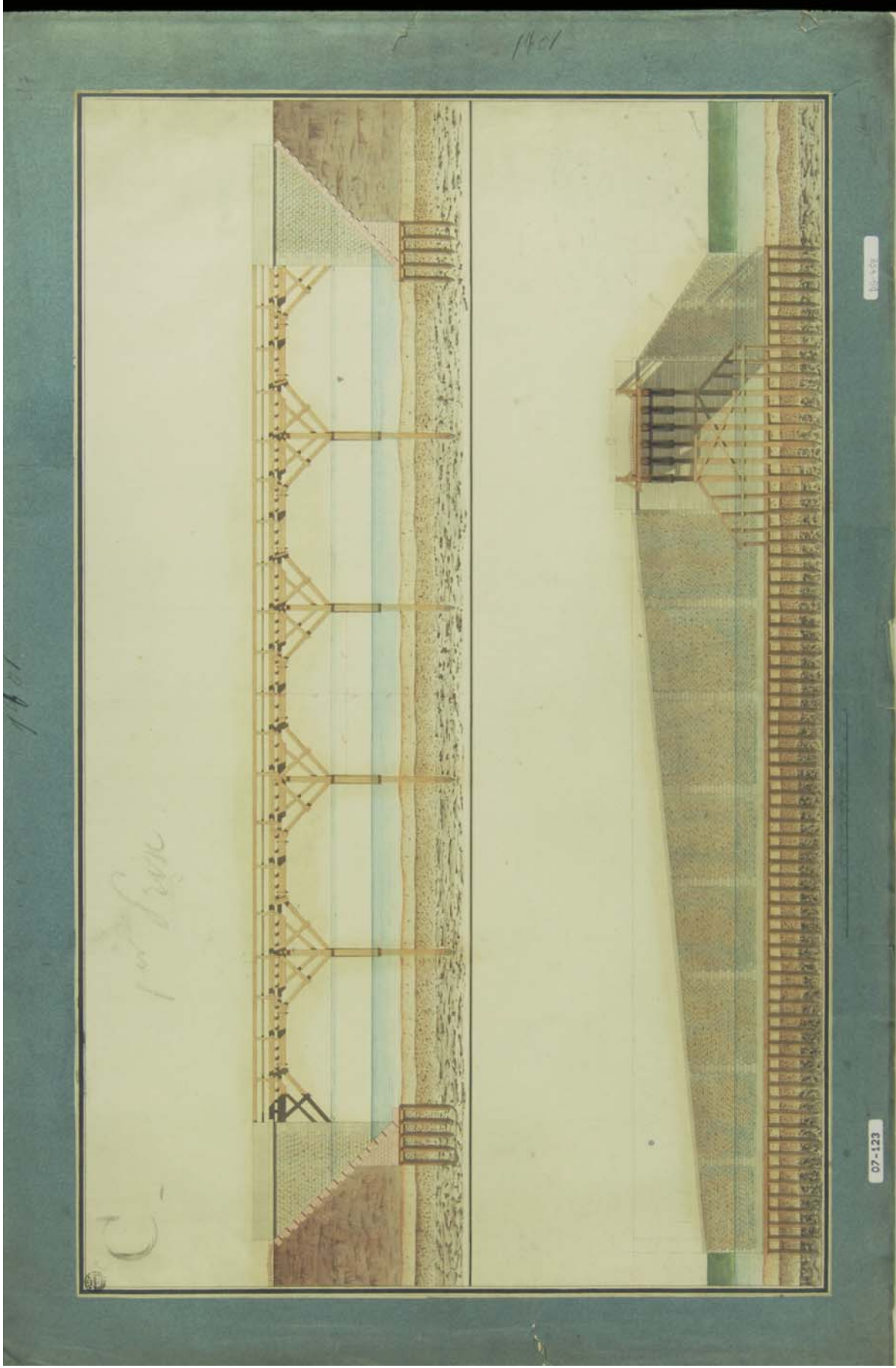


Figura 20. DG 458 – Denis Rosalie Lhost. Concours pont. 1[^] premio. Pont en charpente. Elevation et coupe. 1801

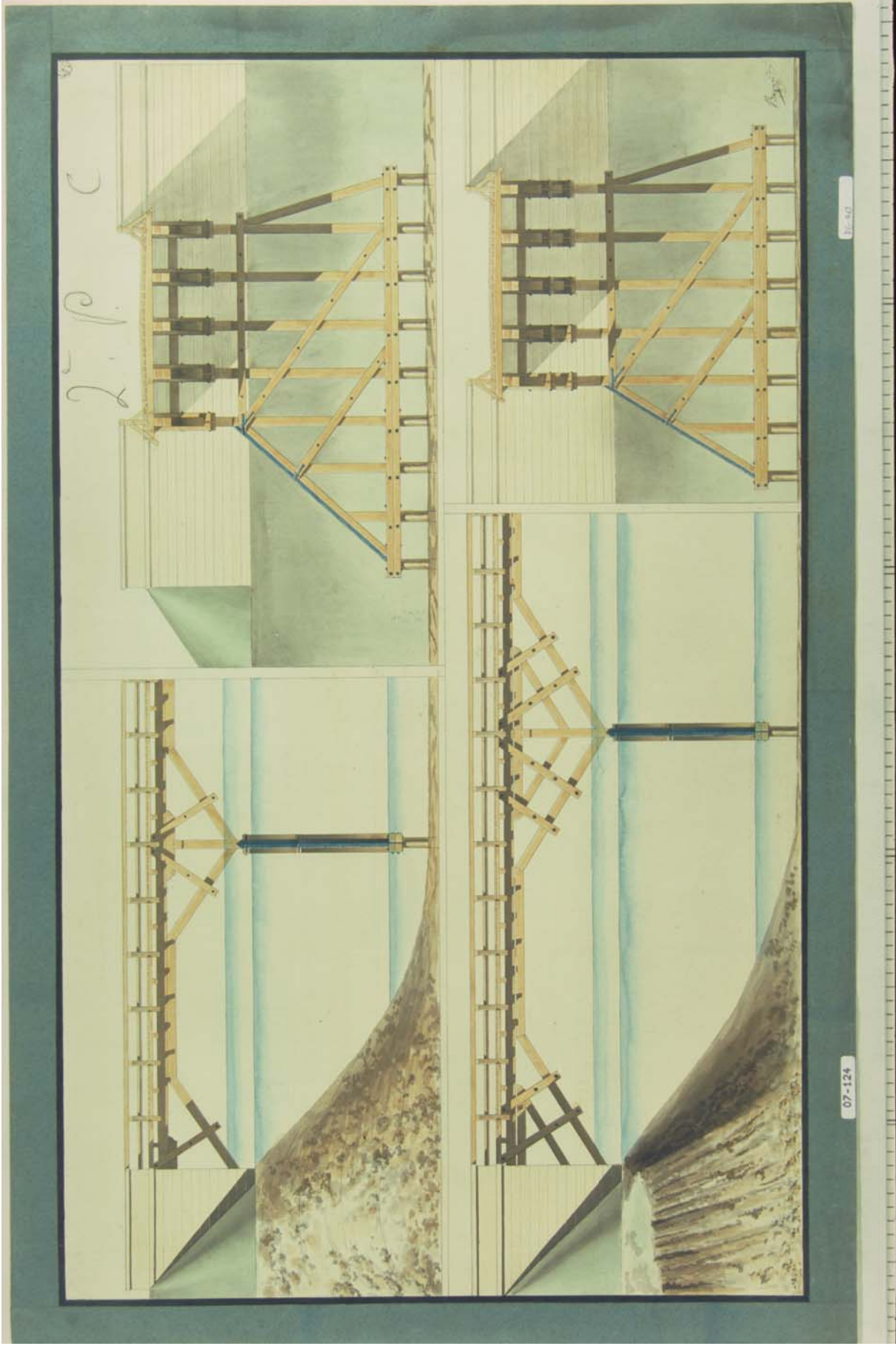


Figura 21. DG 461 – Ferdinand Jean Bayard de la Vingtrie. Concours pont. Pont en charpente. Elevation et coupes. 2^o premio. 1816

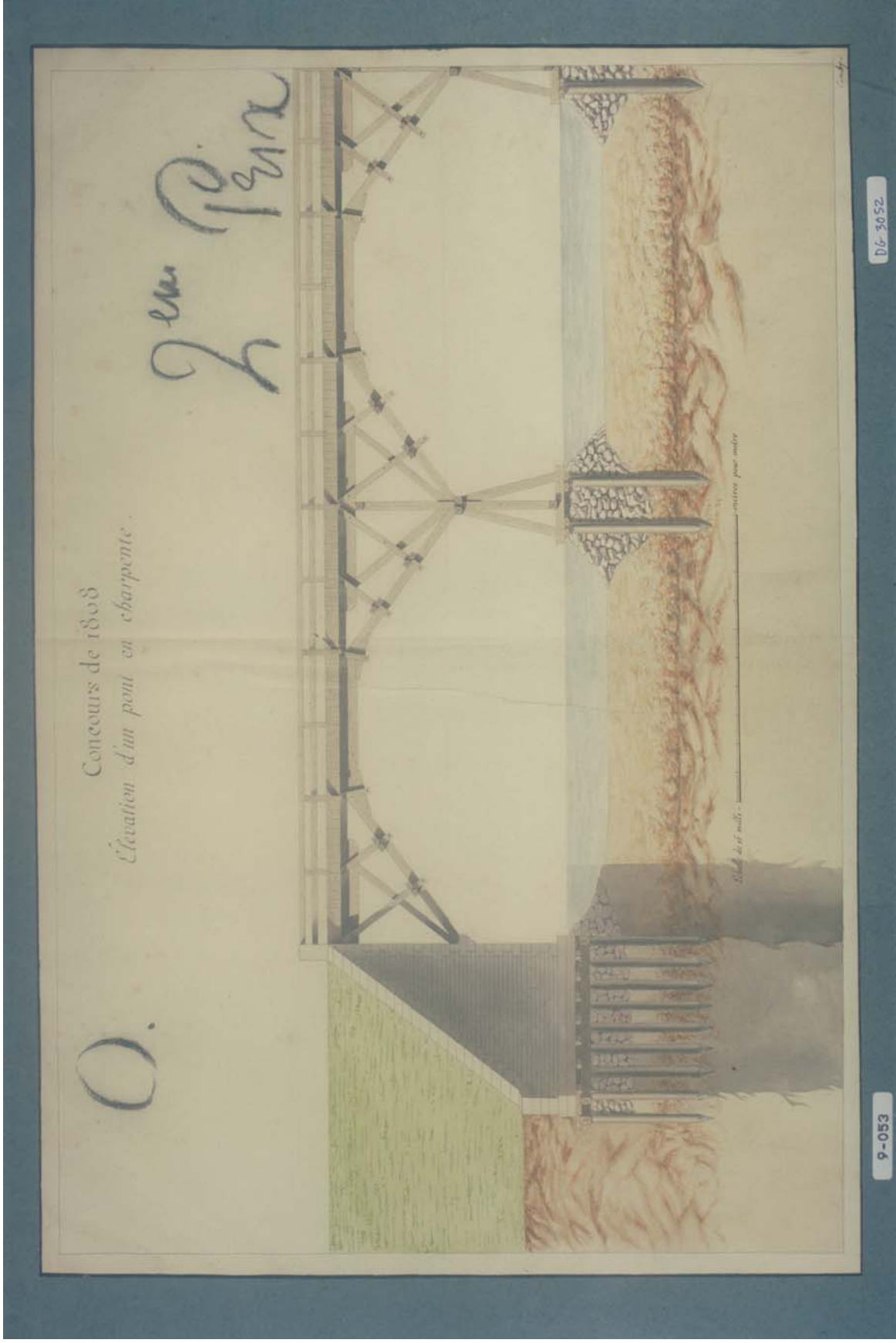


Figura 22. DG 3052 –Augustin Louis Cauchy. Concours pont. Elevation d'un pont en charpente. Si nota la presenza di elementi ulteriori tra puntoni e sottotrave. 1808

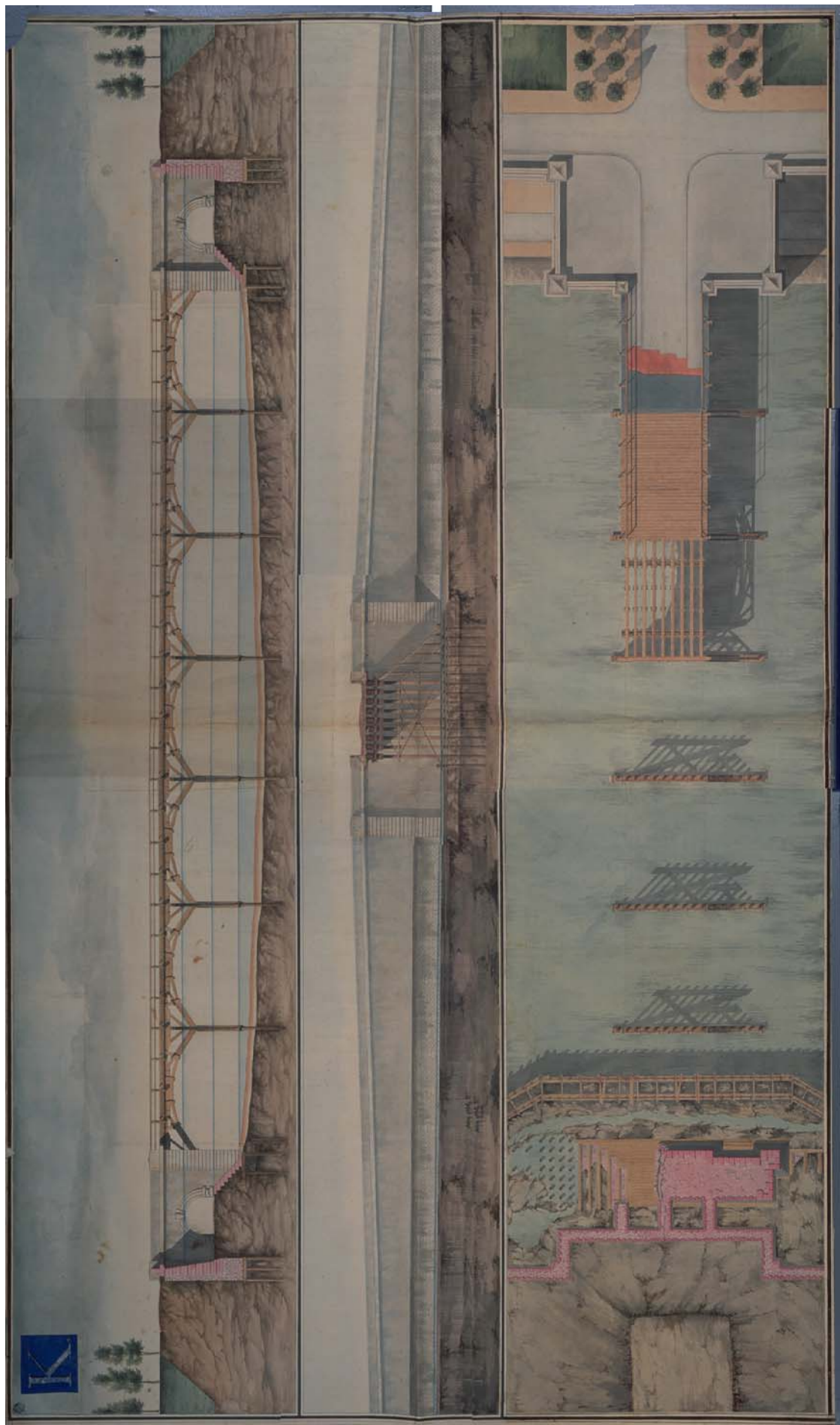


Figura 23. DG 1229 – Concours architecture. Projet de pont en bois. Arco e puntoni a sostegno dell'impalcato. S. D.

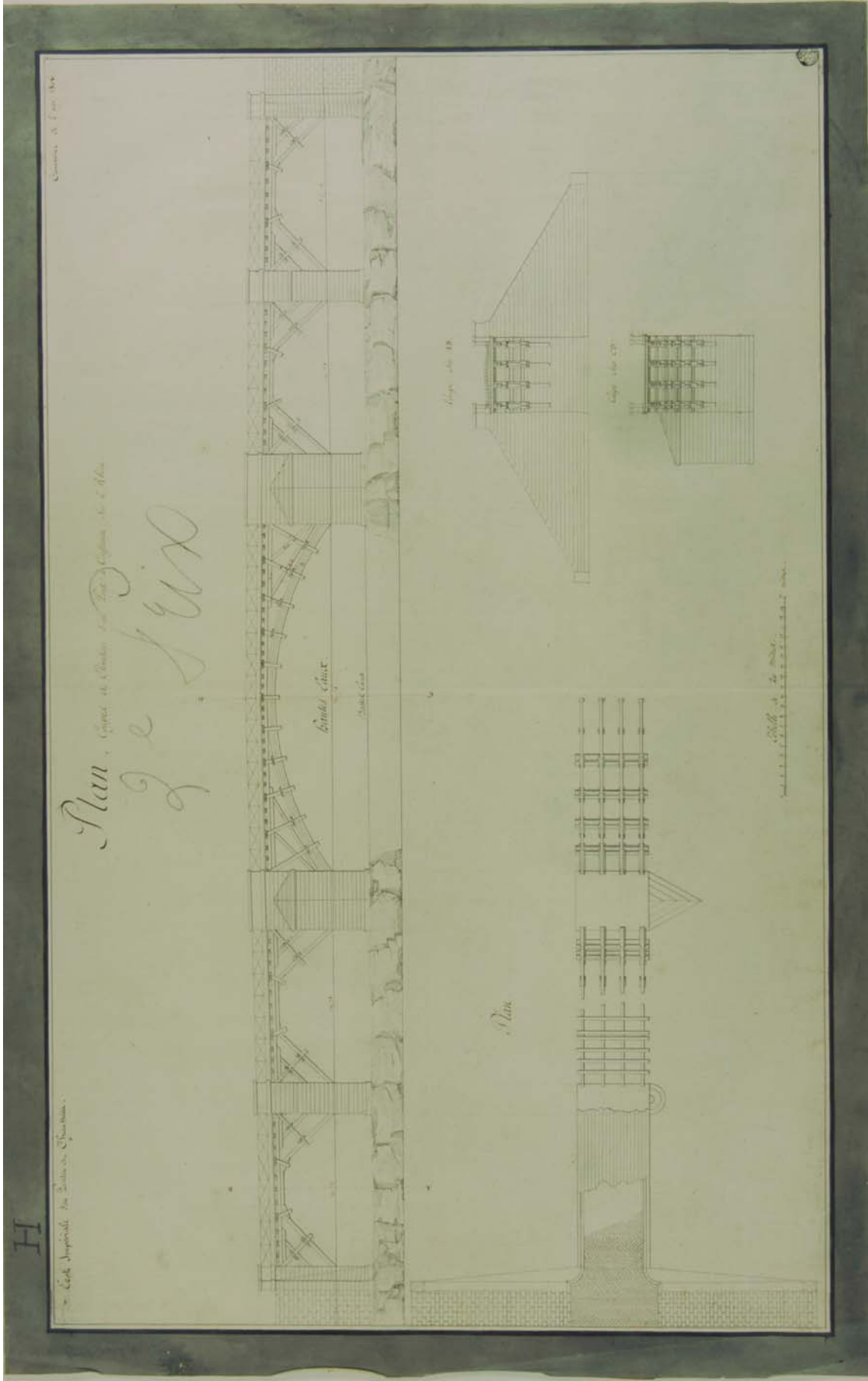


Figura 24. DG 466 – Louis Marie Martret-Preville. Plan Coupe et elevation d'un pont a construire sur le Rhône. 2[^] Prix de pont en bois ou charpente. Arco e puntoni a sostegno dell'impalcato. 1806

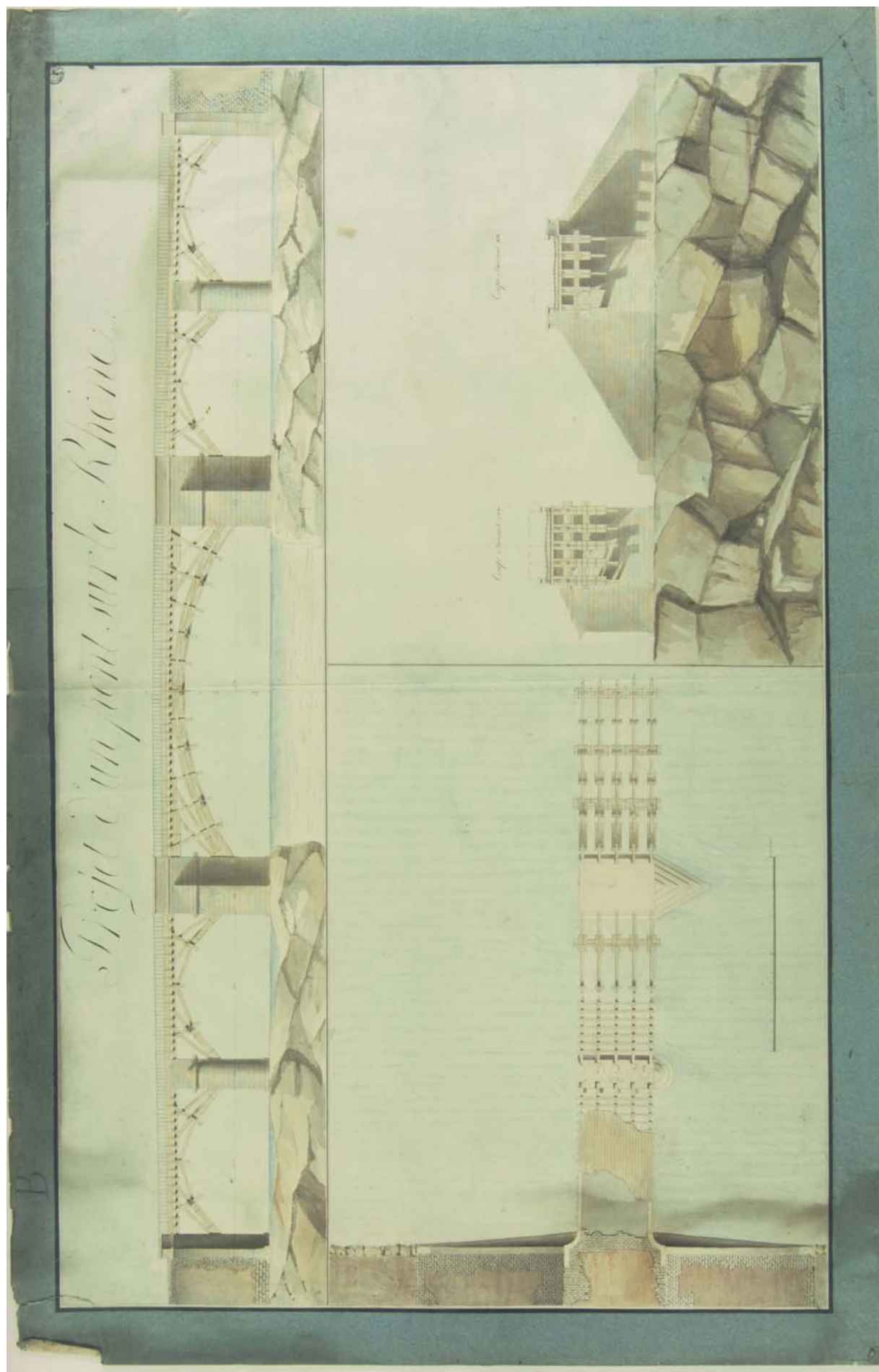


Figura 25. DG 452 – Florent Casimir Joseph Debut. Projet d'un pont sur le Rhône. Concours pont. 1806

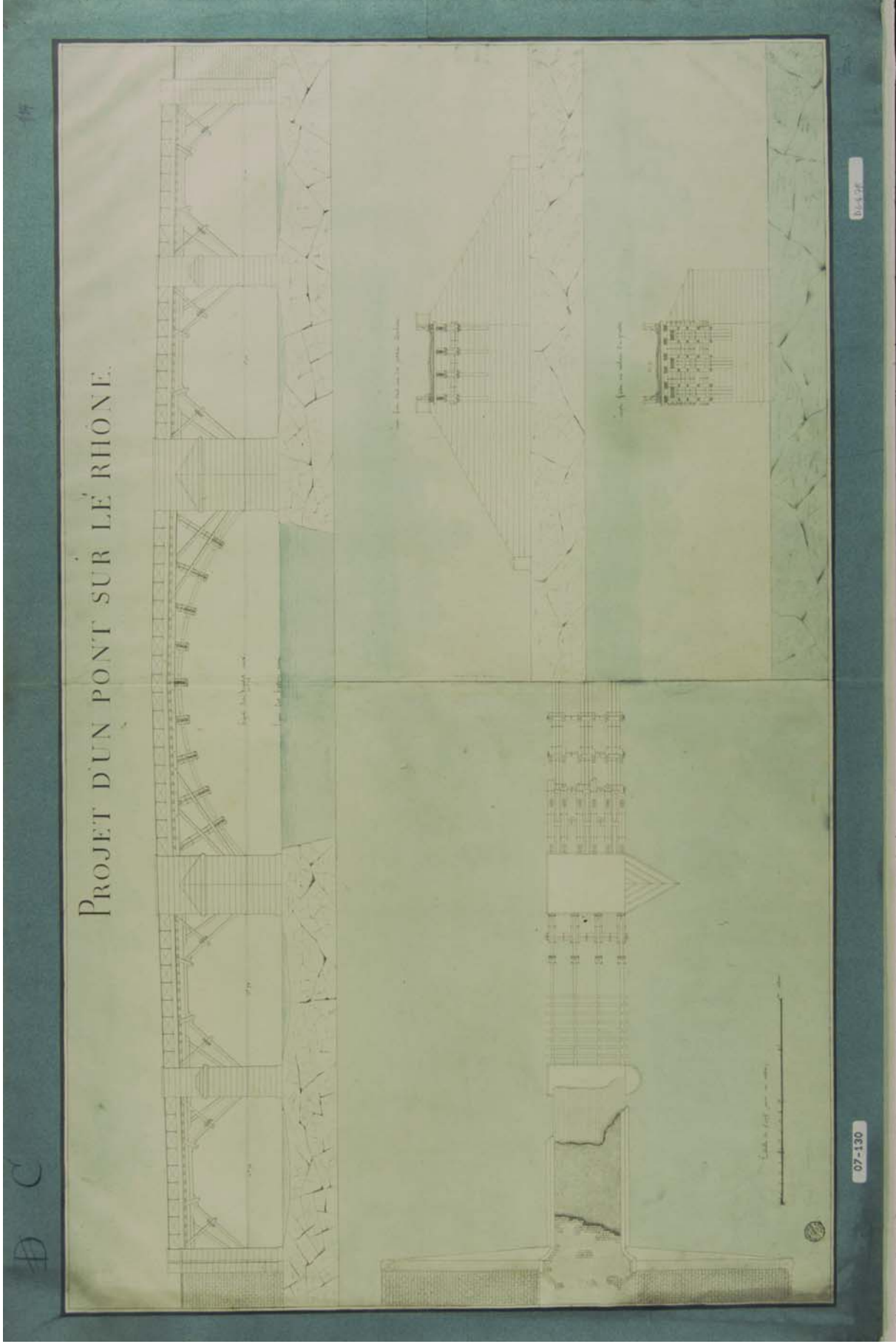


Figura 26. DG 478 – Victor Leroux. Projet d'un pont sur le Rhône. Concours architecture. 1806

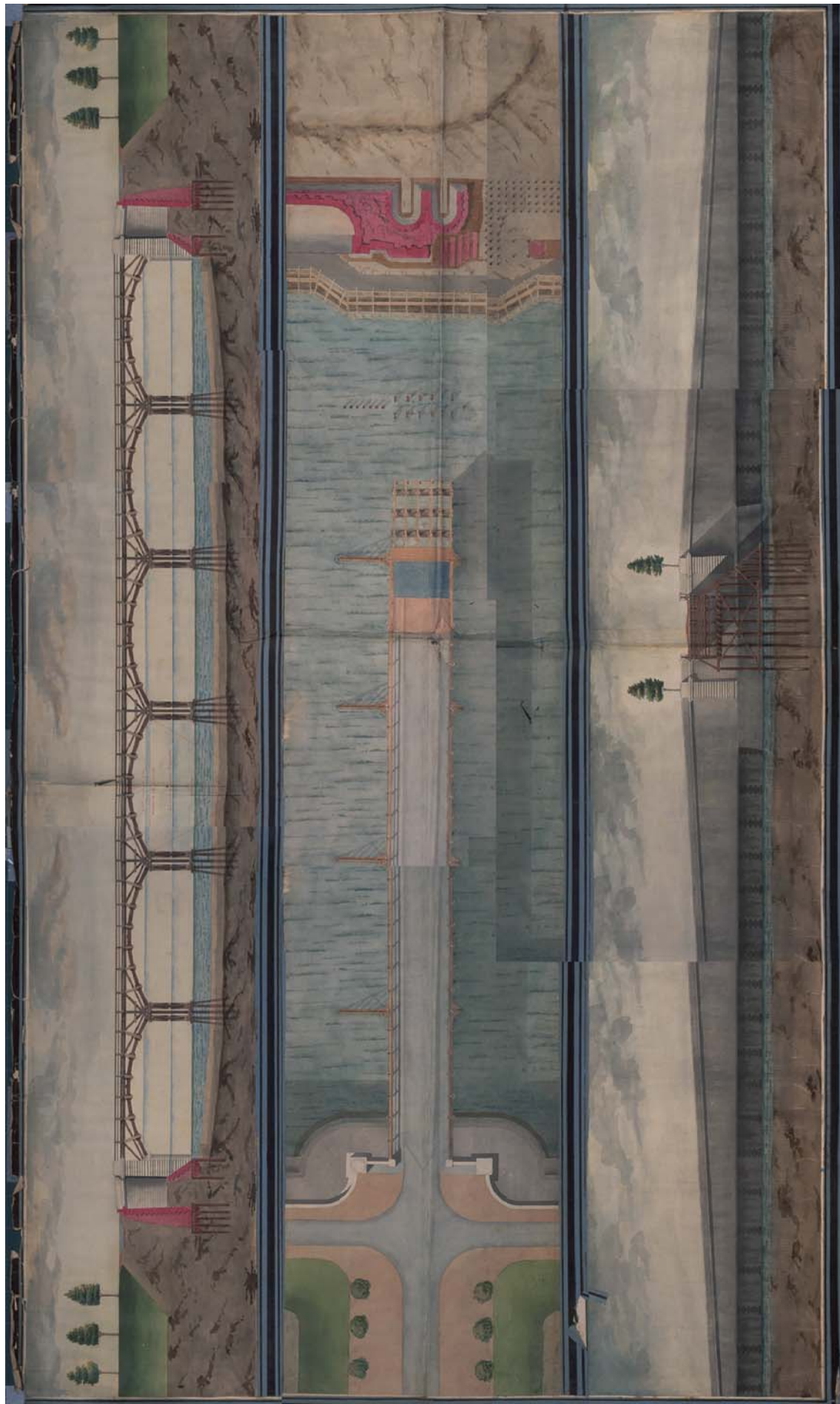


Figura 27. DG 497 – Pierre Advinez. Projet d'un pont en charpente. Elevation, plan et coupe. Concours pont. 17**

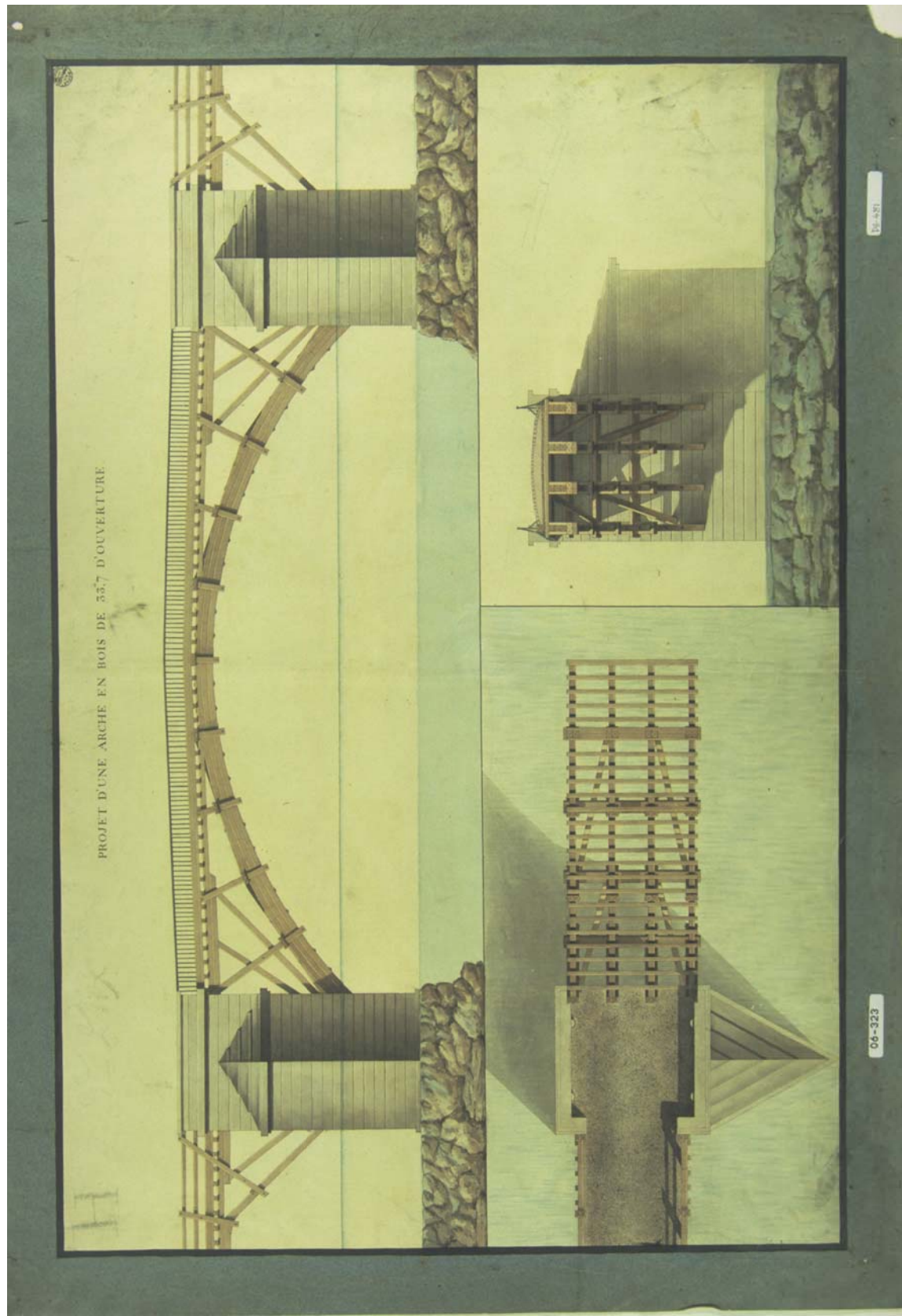


Figura 28. DG 481 – Charles Joseph Minard. Projet d'une arche en bois de 33,7 m d'ouverture. **Concours architecture.** Elevation, plan et coupe. Arco e puntoni a sostegno dell'impalcato. 1812

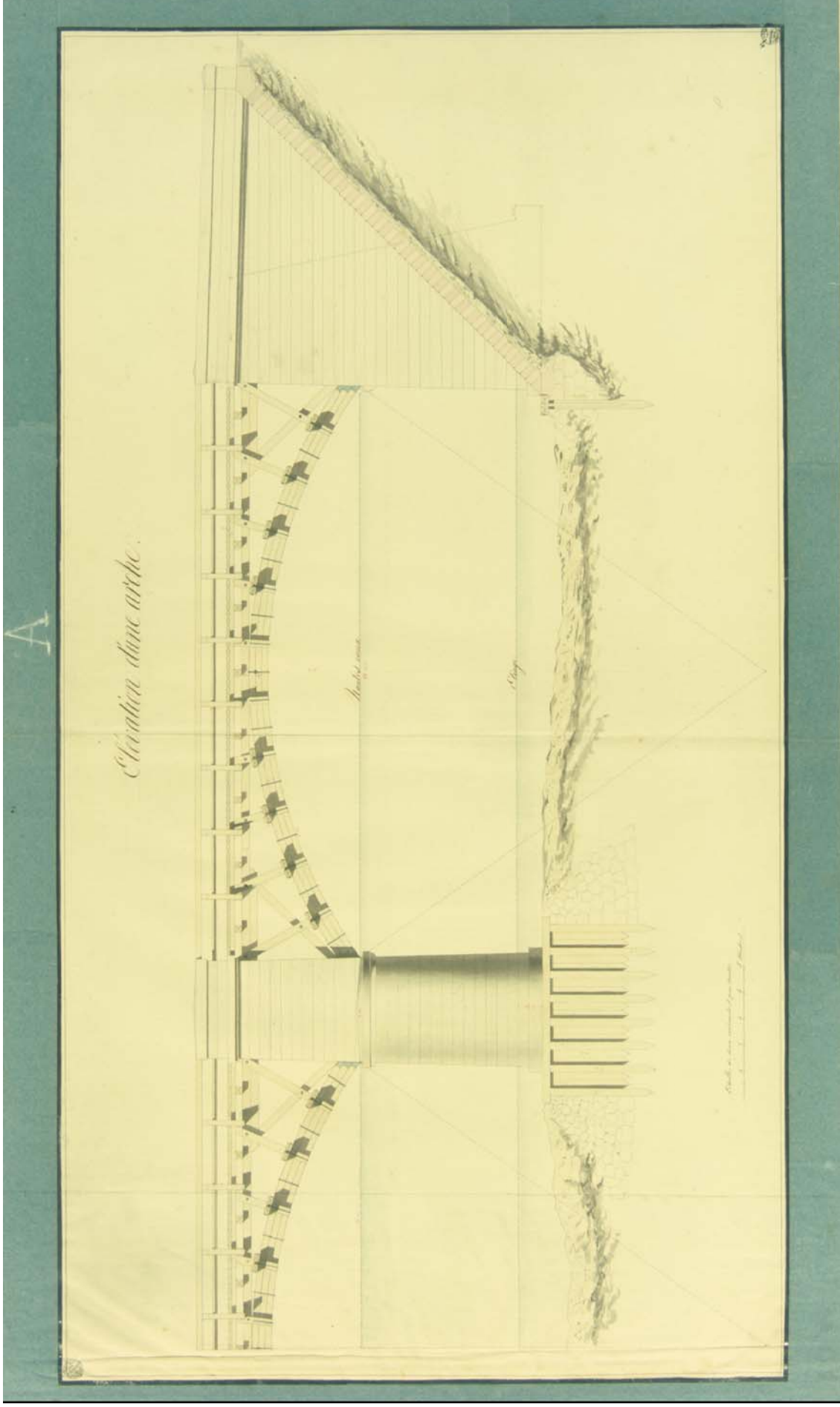


Figura 29. DG 454 – Pierre Frederic Leblanc. Concours architecture. Elevation d'une arche. 1812

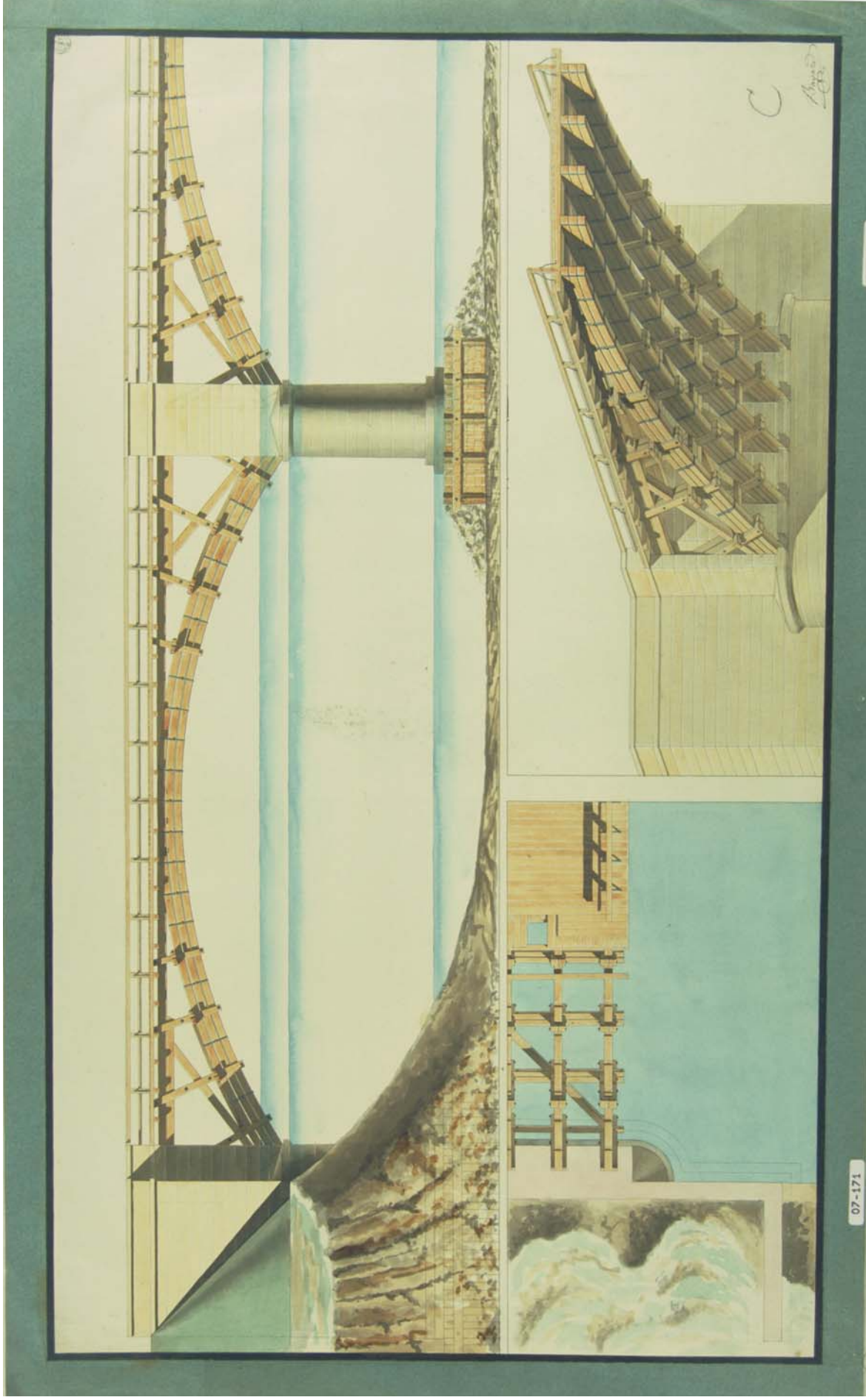


Figura 30. DG 752 – Ferdinand Jean Bayard de la Vingrie. **Concours architecture. Pont en charpente.** 1816

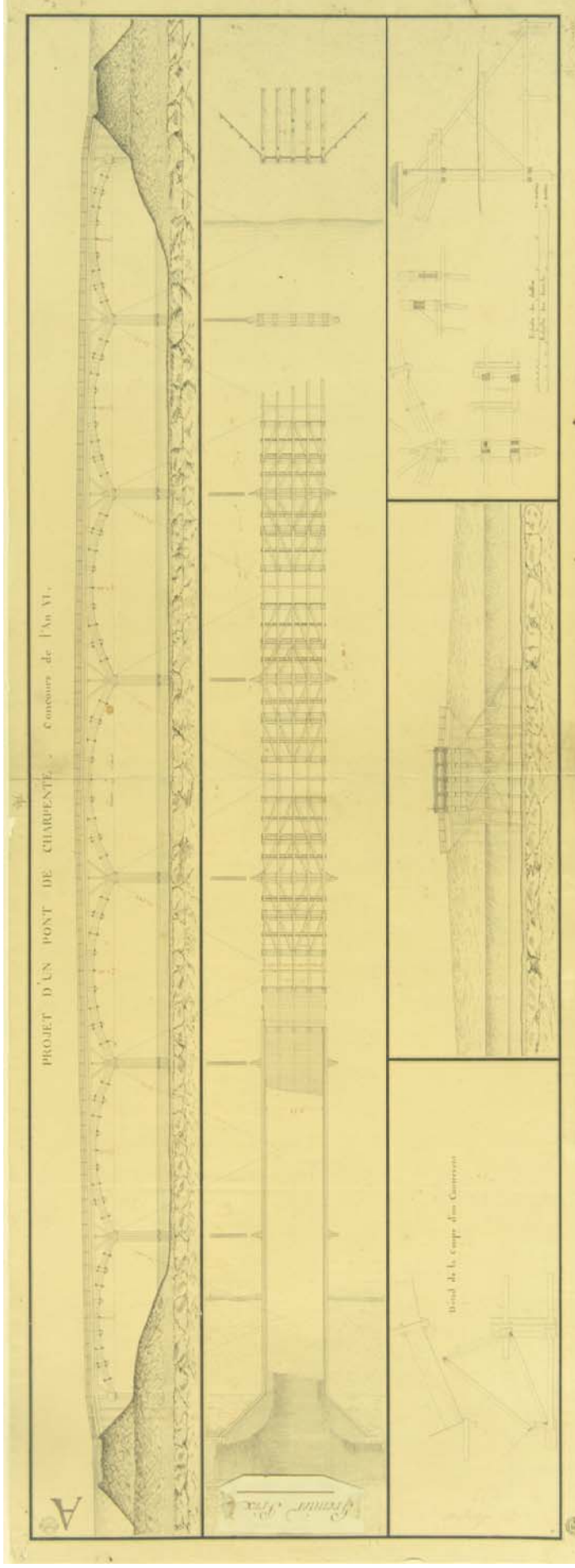


Figura 31. DG 468 – Benjamin Lenglier. Concours de l'An VI. Projet d'un pont en charpente. Elevation, plan, coupe et details. Première Prix. 1799

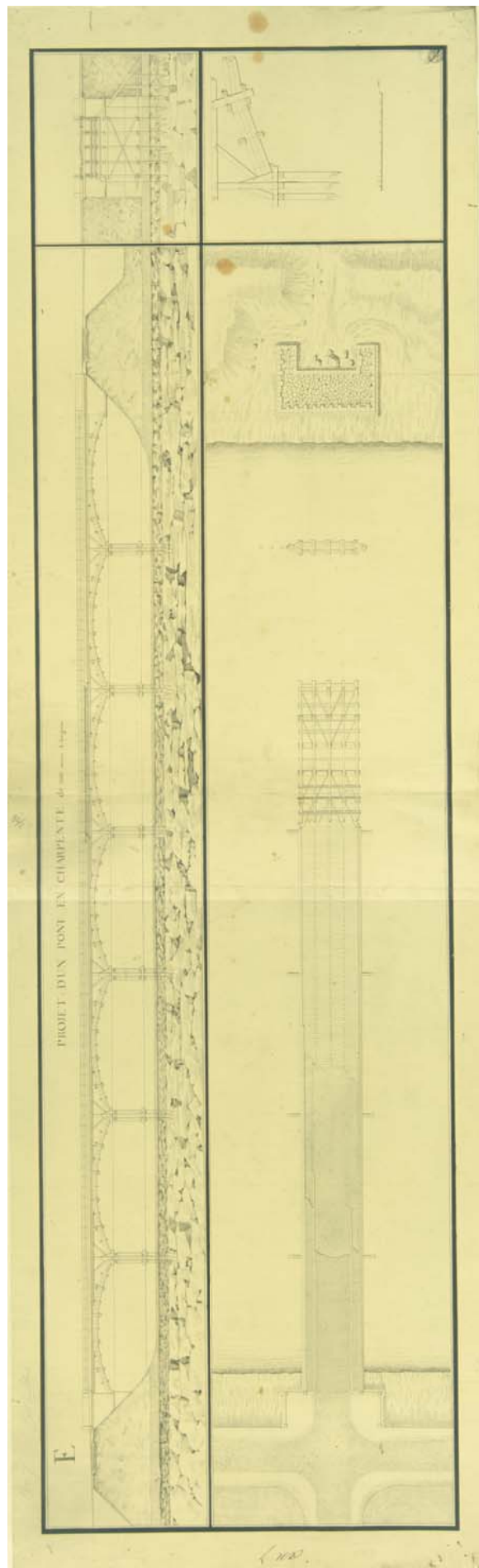


Figura 32. DG 470 – Projet d'un pont en charpente. Concours architecture. 1798-1799

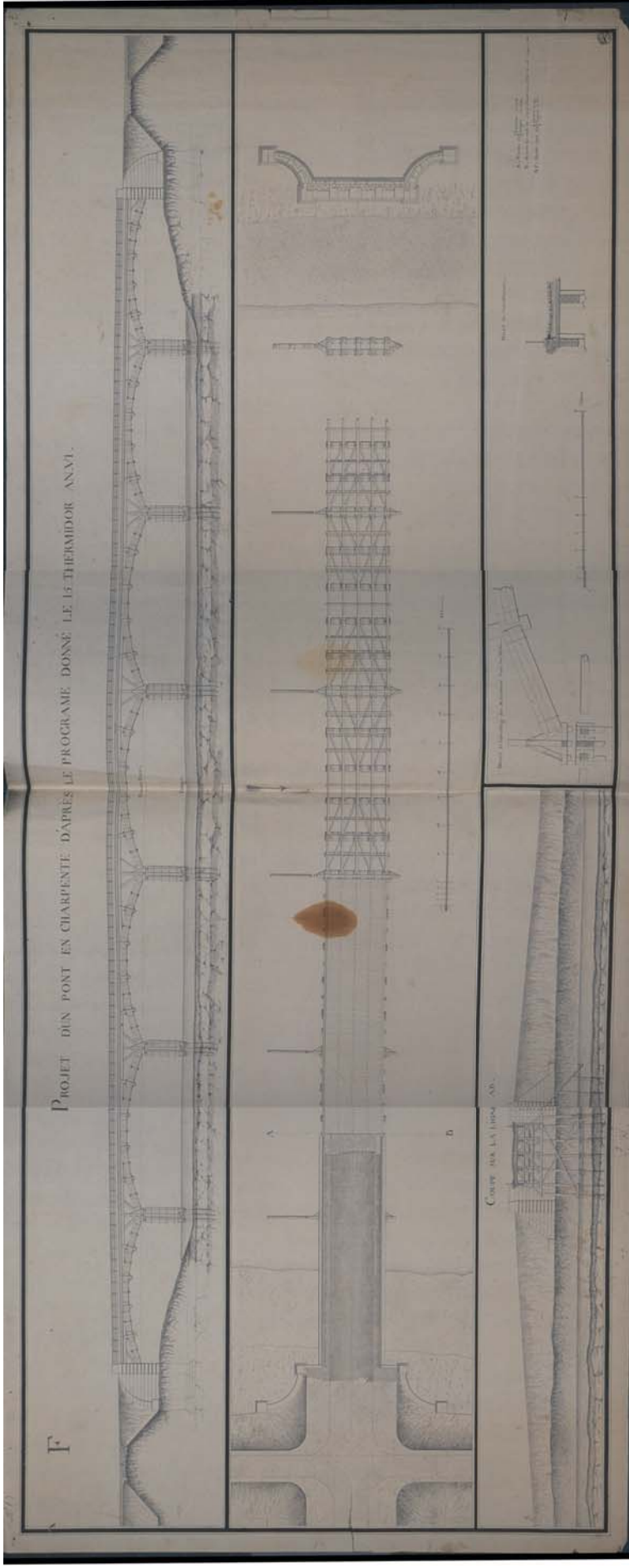


Figura 33. DG 472 – Projet d'un pont en charpente d'après le programme donné le 15 Thermidor AN VI.

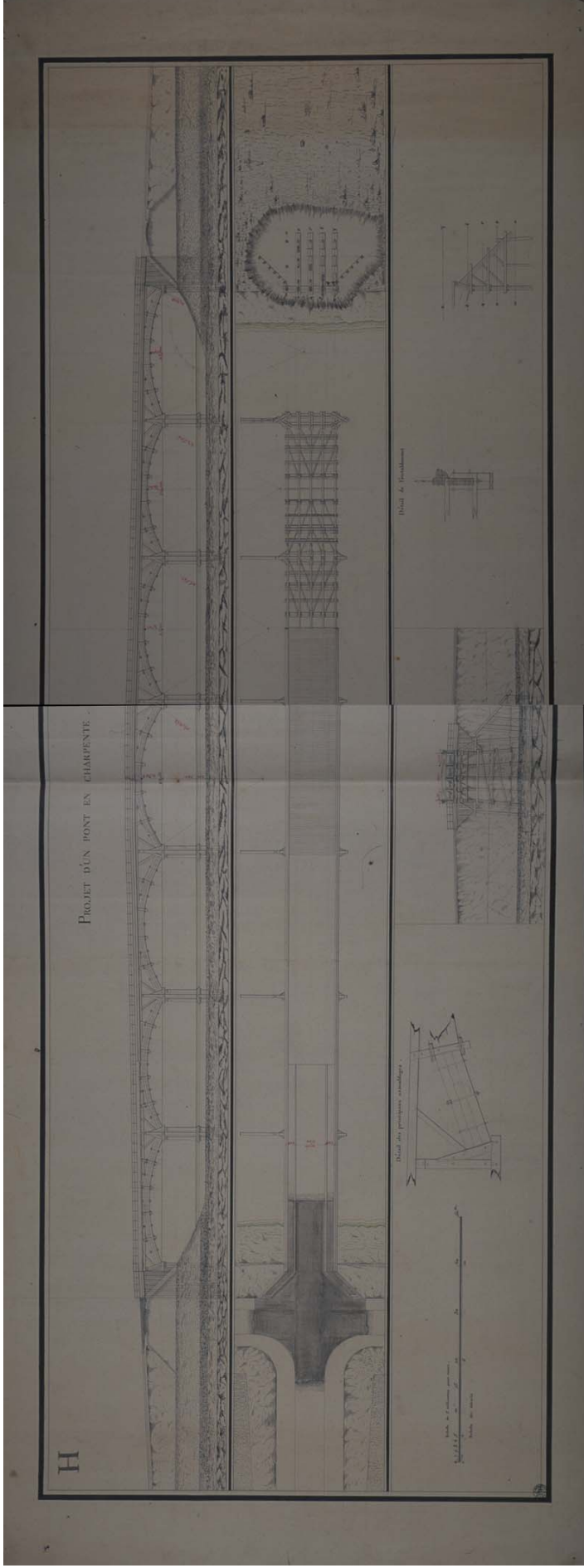


Figura 34. DG 473 – Louis Duval. Projet de pont en charpente. Elevation, plan coupe et details. **Concours architecture. 1798-1799**

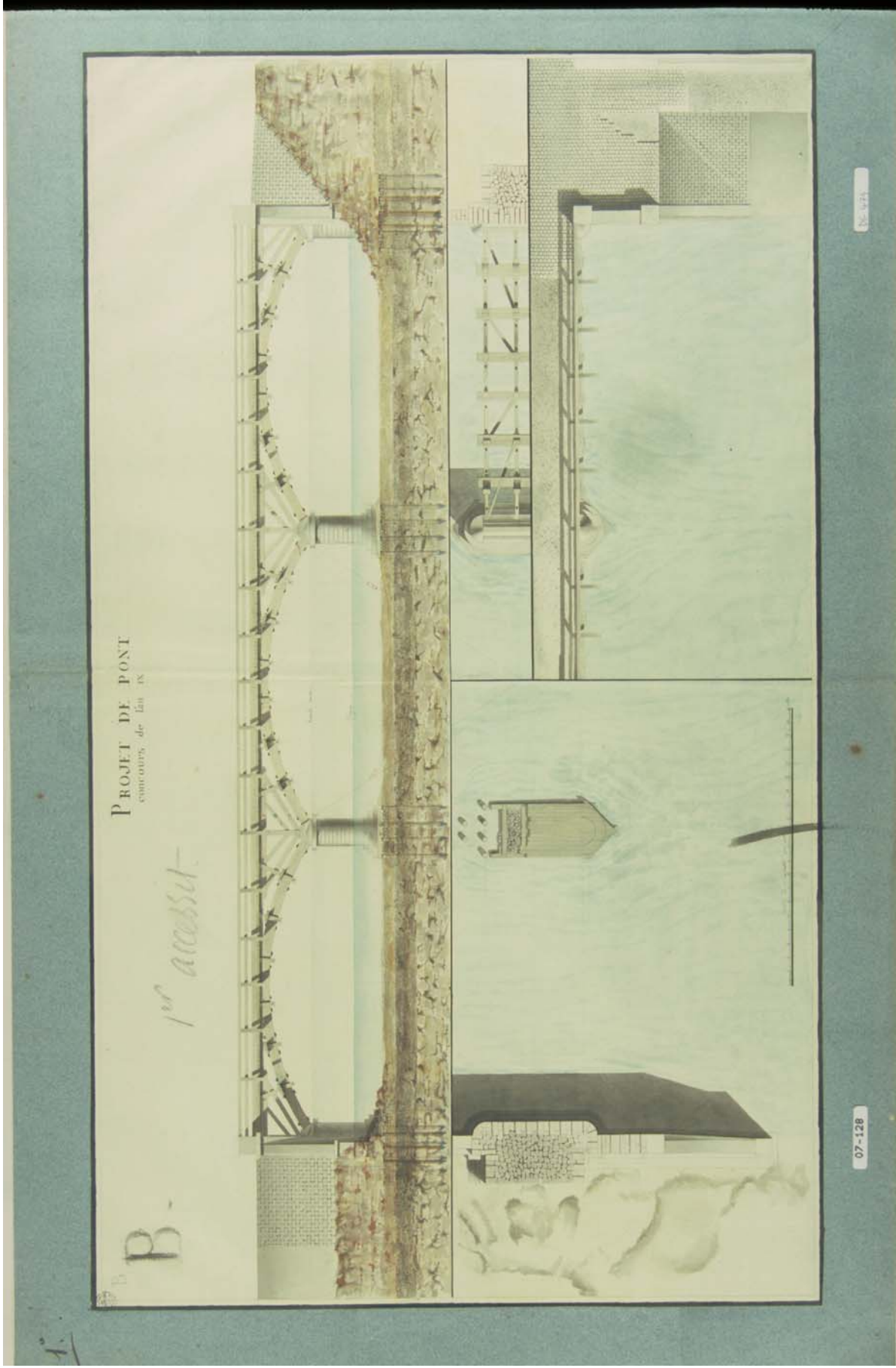


Figura 35. DG 474 – Alexandre Charles Louis Arcelot. Projet de pont en bois. Elevation, plan et detail de la construction. Concours pont. 1800-1801

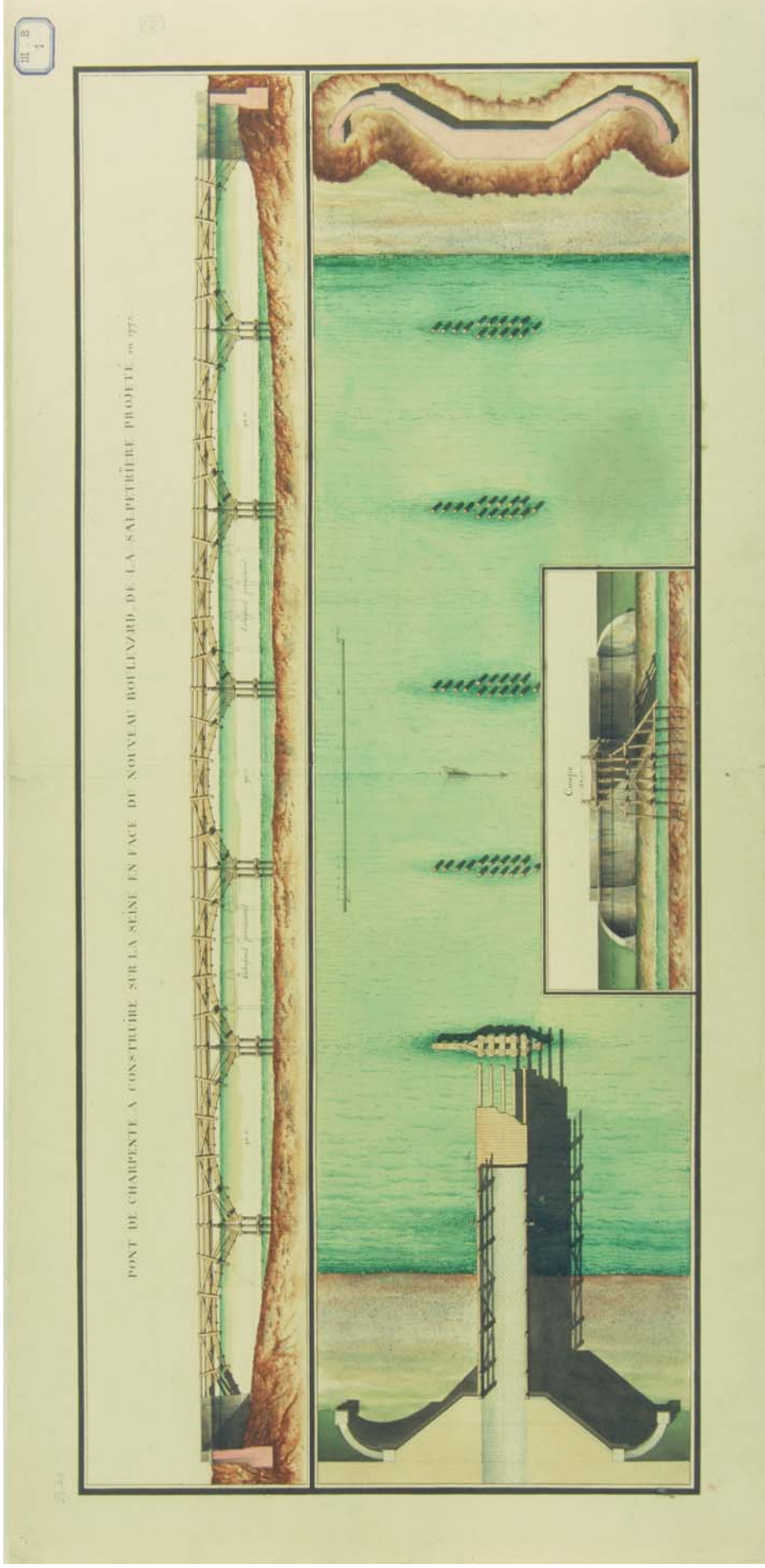


Figura 36. DG 793 – Pont de charpente à construire sur la Seine en face du nouveau boulevard de la Salpêtrière projeté en 1773. Concours architecture. 1773

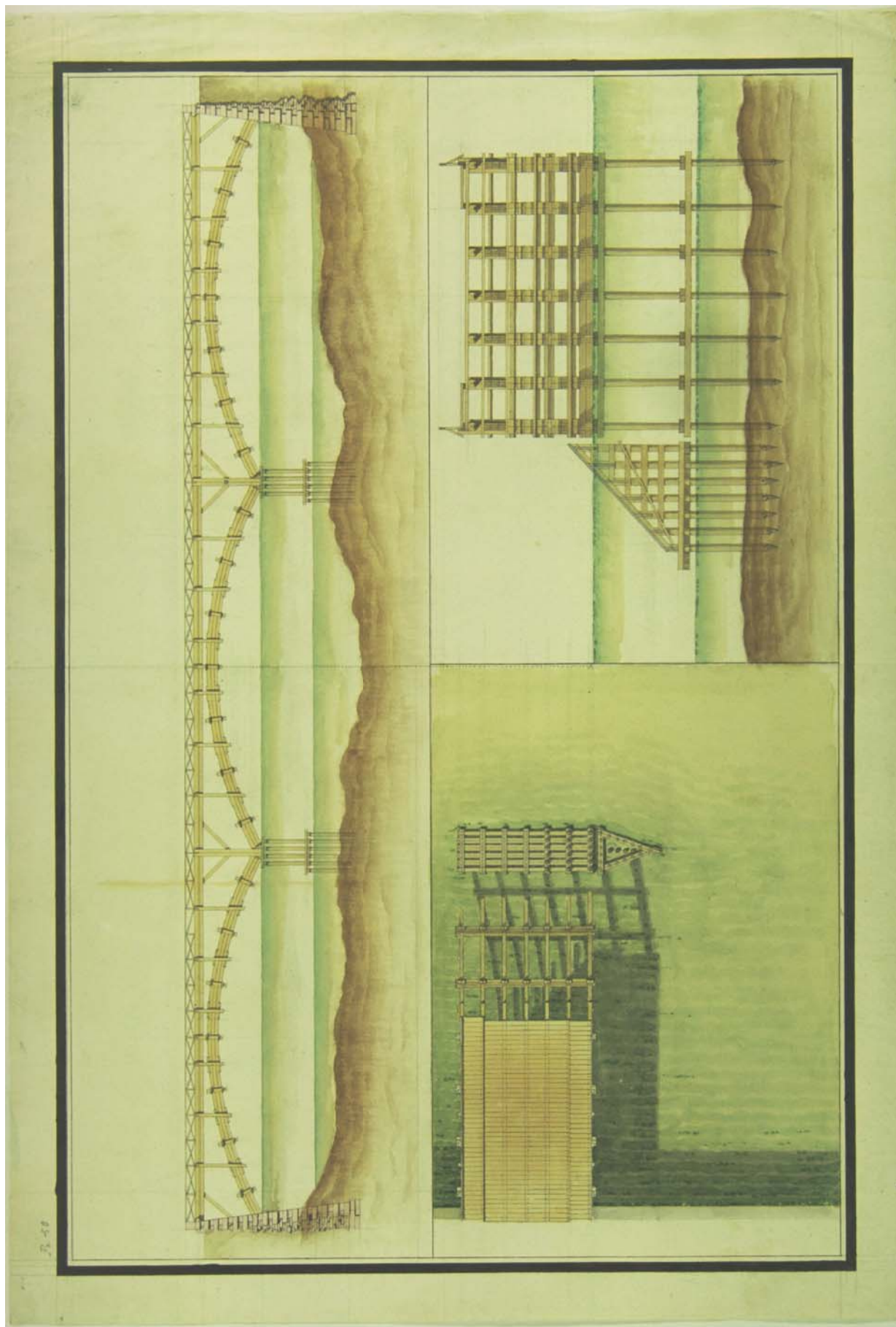


Figura 37. DG 3 – Projet de pont en charpente. Concours pont. Collegamenti verticali tra arco e impalcato. S.D.

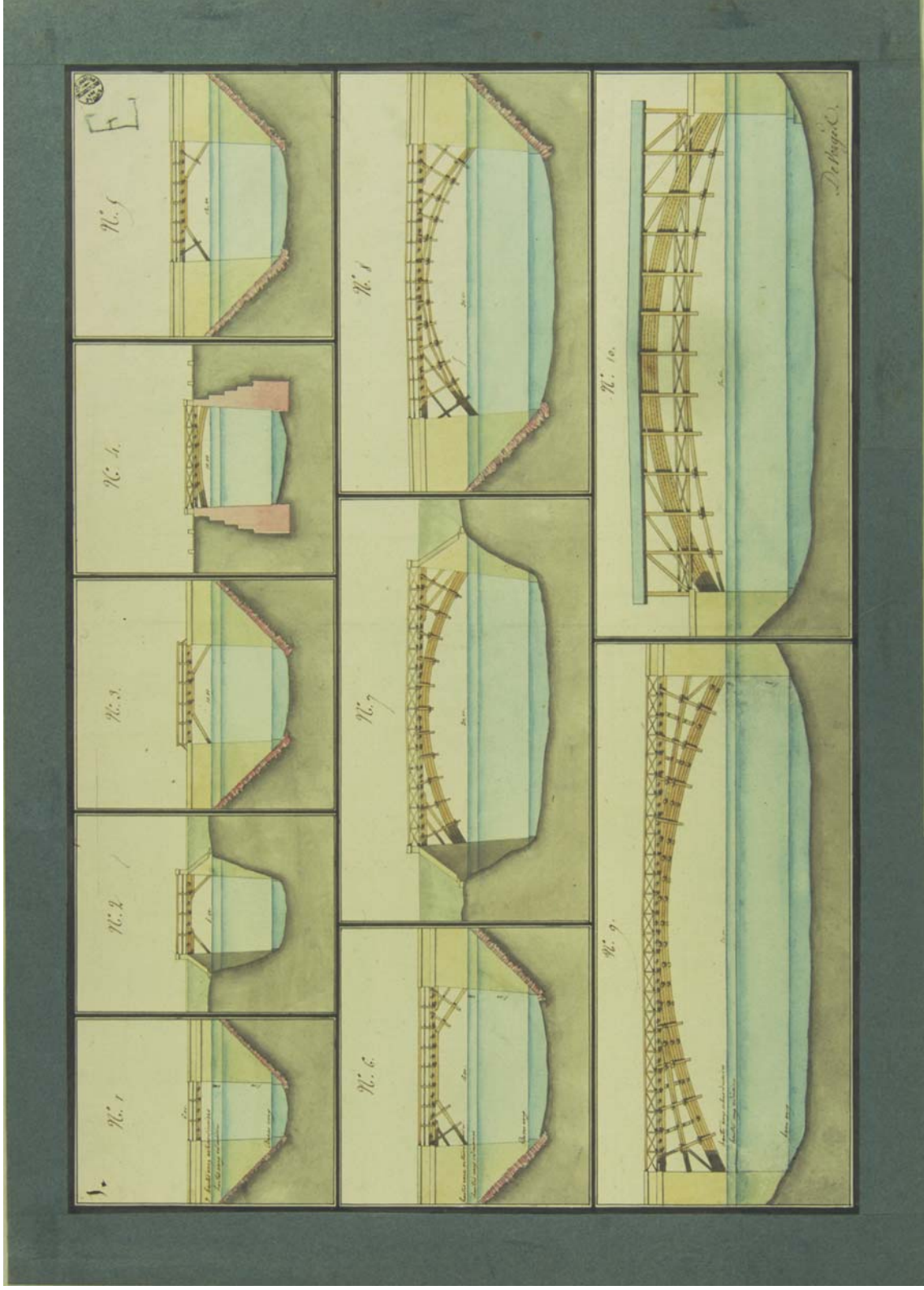


Figura 38. DG 2915 – Fortune Deverges. Concours architecture. Projet de dix ponts differents en charpente pour le Concours de l'École Nationale des Ponts et Chaussées. **Concours architecture. 1818**

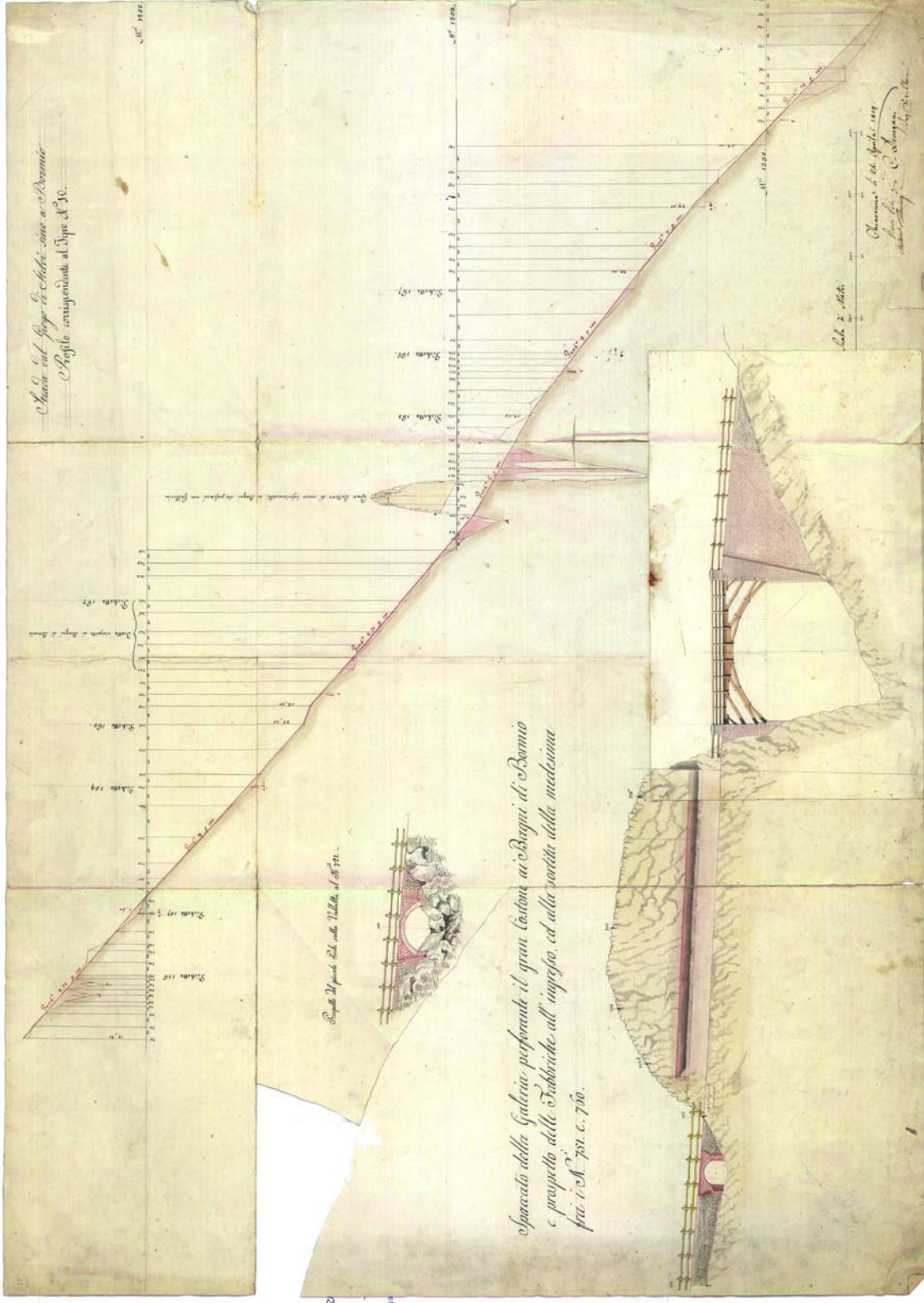


Figura 39. Carlo Donegani. PONTE DEI BAGNI DI BORMIO. Ponte realizzato su 26,5 metri di luce. Schema strutturale di arco sostenuto da puntoni, i puntoni più lunghi sono sostenuti da un arco poligonale a sette lati circoscritto ad una semicirconferenza. Impalcato rinforzato nella parte centrale con due ordini di sottotravi. 1819