

Zeitschrift: Matières
Herausgeber: École polytechnique fédérale de Lausanne, Institut d'architecture et de la ville
Band: 6 (2003)

Artikel: Vers une construction parfaite : machines et calcul de résistance des matériaux
Autor: Gargiani, Roberto
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-984489>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

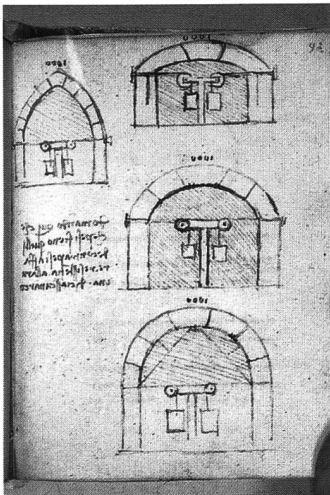
Download PDF: 26.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Vers une construction parfaite

Machines et calcul de résistance des matériaux

Roberto Gargiani



Leonardo da Vinci, dessin d'une machine pour calculer la résistance des arcs (Codice Foster II, Victoria and Albert Museum, f. 92r.).

A la charnière des XVI^e et XVII^e siècles, deux idées prédominantes de la construction, encore loin d'être antagonistes, se distinguent progressivement: d'une part, celle d'inspiration vitruvienne, qui tend à retrouver les règles d'une logique architecturale originelle, et que Palladio commence à corriger des abus, poursuivant la voie inaugurée par Brunelleschi; d'autre part, celle qui émane en même temps de la Science nouvelle de Galilée et qui entend vérifier, par l'expérience et le calcul, la correspondance entre formes constructives et matériaux. Chacune de ces idées vise le même but de perfection. La première, cependant, réaffirme et conserve l'image d'une logique architecturale soumise aux impératifs de la *venustas*, sans laquelle il est impossible de procéder sans commettre ni abus ni excès. La seconde, en revanche, s'oriente avec courage, ou insouciance, vers une construction libérée des canons esthétiques. La différence fondamentale entre ces deux idées réside dans la valeur attribuée aux matériaux: l'approche vitruvienne se fonde sur la croyance en des archétypes formels qui s'imposent indépendamment des caractéristiques des matériaux, affirmant dans le temps leur qualité à travers un processus de métamorphose (du bois à la pierre, au marbre, au métal). La seconde s'appuie sur le principe, établi par l'expérience et le calcul, que tout matériau possède une nature statique et physique propre qui détermine la forme résistante. Cette double nature de l'idée de construction parfaite ne sera pas comprise avant les XVIII^e et XIX^e siècles, lorsqu'il ne sera plus possible de confondre les projets de Carlo Lodoli ou d'Eugène-Emmanuel Viollet-le-Duc, empreints de théorie galiléenne, avec ceux de Marc-Antoine Laugier ou Gottfried Semper, de tradition vitruvienne. A l'aube du XVII^e siècle, les oppositions restent cependant souvent latentes, permettant aux principes qui feront éclater la règle de la *venustas* de venir se loger dans le lit culturel vitruvien.

Léonard de Vinci et Philibert de l'Orme: la résistance des structures

La question de la connaissance de la nature des matériaux et de la résistance des structures ne devient fondamentale pour la naissance d'une nouvelle culture architecturale qu'à partir des expériences menées avec rigueur scientifique par Léonard de Vinci, à la fin du XV^e siècle, et par De l'Orme, au milieu du XVI^e siècle.

Une observation de Léonard sur le *modo* d'Alberti pour calculer la vitesse des navires indique ce qui, de la science de celui-ci, est à la fois le paradigme et le fondement: «*établi après expérience*»¹. Il n'en reste pas moins que son idée d'expérience reste parfois énigmatique; peut-être est-elle en partie encore *mentale* comme l'énonce Niccolò Cusano en 1450. Et pourtant, le fait d'être illustrée par des dessins de structures soumises à des charges traduit déjà un véritable essai expérimental, que du reste Cusano avait préfiguré dans son *De Staticis experimentis*. Désormais, les objets choisis pour les démonstrations ne sont plus les corps d'or et d'argent plongés dans l'eau des XIII^e et XIV^e siècles, mais des arcs de pierre, des poutres en bois, des piliers de maçonnerie.

Léonard observe que force et résistance interagissent en modelant des formes que la géométrie euclidienne et la statique conventionnelle ne parviennent pas toujours à décrire; il découvre des formes générées par le mouvement et devine les origines constructives de certaines d'entre elles: il écrit «*uniformément difforme*» sur le dessin du profil d'une des quatre pièces en fer, qui une fois assemblées composeront une bombarde, voulant indiquer par cette définition l'imperceptible courbure donnée aux pièces afin de mieux recevoir les anneaux qui devront les maintenir ensemble².

Léonard réalise de véritables expériences qui tendent à vérifier la résistance des structures et des matériaux à travers l'analyse des conditions extrêmes de leur cassure, et construit à telle fin des appareils, précurseurs des *macchine divulsorie* qui se répandront en Europe aux XVII^e et XVIII^e siècles³. A partir d'observations sur les phénomènes de rupture, il pressent l'existence de la déformation des matériaux et s'approche de la compréhension de l'élasticité (il écrit «*se raréfier*», «*s'allonger*», «*se condenser*», «*se raccourcir*»). Du reste, cette force invisible, qu'il décrit de manière fort claire, «*contraint toutes les choses [...] à des mutations de forme*»⁴.

Il consacre en outre de nombreux dessins et réflexions à la statique de l'arc. Dans un croquis, notamment, il la représente en traçant en ses impostes deux lignes inclinées vers l'extérieur, ou "lignes obliques", pour exprimer une force "invisible": la poussée⁵. Toutes ses réflexions tournent autour de la détermination de la résistance nécessaire pour contrer cette force. «*Je demande: quelle est la force de contrepoids nécessaire pour résister à la ruine de chaque arc?*», inscrit-il à côté d'un dessin de quatre arcs à géométrie différente (un arc en plein cintre, un brisé et deux surbaissés, dont celui n'ayant que trois claveaux qui s'avère être presque une plate-bande)⁶. La présence à la fois des arcs surbaissés et de l'arc brisé dénote une méthode expérimentale qui entend explorer toutes les formes de construction dans le but de rechercher la plus parfaite, sans exclusive due à quelque préférence géométrique. La représentation des claveaux pour chaque arc prouve combien la technique constructive était considérée comme fondamentale pour la statique. L'expérience décrite par Léonard consiste à calculer la force nécessaire, le «*contrepoids*», pour s'opposer à une charge disposée au sommet des quatre arcs. A cette fin, il invente un dispositif composé de deux cordes attachées aux impostes au moyen d'un crochet et qui coulissent ensuite sur des poulies fixées à une poutre installée au centre des arcs. A l'extrémité de chaque corde vient se suspendre un contrepoids. Les valeurs ainsi obtenues pour les contrepoids auraient pu générer une table présentant les différents degrés de résistance des quatre types d'arcs, à l'instar de celle qu'esquisse Cusano pour les poids des matériaux. Ce dispositif, s'il avait effectivement été réalisé, aurait été considéré comme l'une des premières machines employées à vérifier la résistance des structures en arc.

De l'Orme, quant à lui, invente une charpente en bois composée de poutres et de planches assemblées et posées de chant, dont il teste la résistance dans la cour de sa demeure à Paris: «*estans lesdictes poutres pressees de telle sorte qu'on soulevoit toute la couverture, et enfondroit-on les murs du bastiment ou elles estoient. Et quelque presse et force de verins qu'on y sceut faire (encores que depuis ie me sois voulu efforcer de les rompre) iamais on ne les peut faire baisser de demy doigt*»⁷. Alors que De l'Orme réalise son expérience, Palladio s'applique à condamner les abus en architecture – frontons brisés, fûts de colonnes annelés, etc. –, le manque de respect de la nature des matériaux ne constituant pas un abus à ses yeux. Du reste, dans son architecture, il adopte des procédés de contrefaçon pour les matériaux en les enduisant d'un revêtement en plâtre, qui donne aux architraves en bois et aux colonnes de briques l'apparence de monolithes de marbre, et aux assises en briques l'allure de claveaux de pierre.

Vincenzo Scamozzi et Teofilo Gallaccini: la nature des matériaux

Au début du XVII^e siècle s'opère un changement radical concernant les valeurs que l'on peut attribuer aux matériaux. Dans *l'Idée dell'architettura universale* de Vincenzo Scamozzi et dans le *Trattato sopra gli errori degli architetti* de Teofilo Gallaccini, médecin et mathématicien qui s'est également intéressé à l'architecture militaire, le concept de matière est progressivement épuré de toute connotation étrangère aux propriétés physiques.

Scamozzi étudie la relation entre forme et matière en partant de considérations aristotéliennes pour parvenir à intégrer certains aspects fondamentaux de la science expérimentale naissante. Pour lui, la matière – bois, pierre, brique, métal, etc. – ne possède pas de forme propre; elle peut seulement en recevoir une; elle «*est confuse et informe*». Toutefois, les possibilités de formes sont limitées par ses caractéristiques: «*les matières ne sont pas toutes aptes à bien recevoir toutes les formes*». Scamozzi parvient à admettre la nécessité de ne pas faire «*violence à la matière*», principe qui constitue un des fondements de la nouvelle pensée constructive, valable jusqu'au XX^e siècle: «*[...] certaines formes – écrit-il – peuvent être appliquées à un type de matière, d'autres à plusieurs autres. [...] Ce que l'Architecte tente de réaliser en faisant violence à la matière n'est pas très honorable: car il pense toujours pouvoir réduire à sa volonté les choses créées par la Nature et leur donner des formes que lui a décidées*»⁸.

Gallaccini énumère les erreurs fréquemment commises dans la construction des édifices. Ces erreurs diffèrent, de par leur nature, des abus palladiens, en ce sens que souvent elles impliquent la qualité de la matière. Il affirme qu'il convient de «*porter grande diligence envers les matières, dont il faut faire la structure*»⁹, et montre la relation directe entre les caractéristiques d'un matériau et la réalisation d'éléments constructifs appropriés à ces mêmes caractéristiques. Il comprend comme erreur le dimensionnement des poutres en bois («*L'on se trompe souvent dans les longueurs, et dans les épaisseurs*»¹⁰), faisant allusion à la nécessité d'établir des règles fondées sur les connaissances statiques. Ses considérations sur la nature des matériaux en viennent à admettre que les formes de l'ornementation doivent émaner de procédés de fabrication propres à chaque matériau, abordant par là même une problématique que reprendront plus tard les «*rigoristi*» du XVIII^e siècle de la sphère lodolienne, et sur laquelle Semper fondera une partie importante de sa théorie, celle relative au «*Stoffstil*». Gallaccini signale clairement l'erreur qui consiste à vouloir transposer en pierre des ornements issus d'autres matériaux: «*[...] à chaque matériau correspondent des ornements de forme déterminée, que l'on ne peut inventer sans prendre*

une trop grande liberté et adhérer à des coutumes barbares ou à des fantaisies d'Orfèvres et d'Argentiers, de Maîtres Charpentiers ou de Stuccatori, de Graveurs ou de Peintres. [...] La manière de l'ornementation, propre au bois et au stuc, ne convient pas à la pierre. Aussi, pour le stuc et le bois, n'est-il pas inapproprié d'user d'une certaine liberté et d'y apporter quelques caprices de sa propre invention. Dans de telles œuvres, les ornements ajoutés sont tous postiches, sans lien réel avec l'ensemble et sans lui appartenir vraiment. Tous se lient pourtant avec le fer, les clous et la colle»¹¹. L'objectif de Gallaccini est «la perfection de la construction»¹².

Les machines pour le calcul de la résistance du bois, de Buffon à Carlo Lodoli

Au XVII^e siècle, le “difforme” de Léonard et l’“informe” de Scamozzi prennent peu à peu des significations complexes. La nouvelle science, qui s’est affirmée avec Galilée, démontre, sur la base de calculs, que l’on peut leur attribuer la valeur de forme parfaite, à l’instar du profil d’une poutre encastree à une extrémité, soumise à résistance maximale.

A Venise, Londres et Paris, les expériences vouées à déterminer la résistance des matériaux apparaissent avec la volonté de construire des navires militaires et marchands toujours plus parfaits et plus légers, conçus en utilisant le bois en sections minimales. Le Studio de Padoue, la Royal Society et l’Académie royale des Sciences font partie des plus grandes institutions européennes chargées de promouvoir et d’orienter de telles expériences, et d’en définir le cadre théorique général.

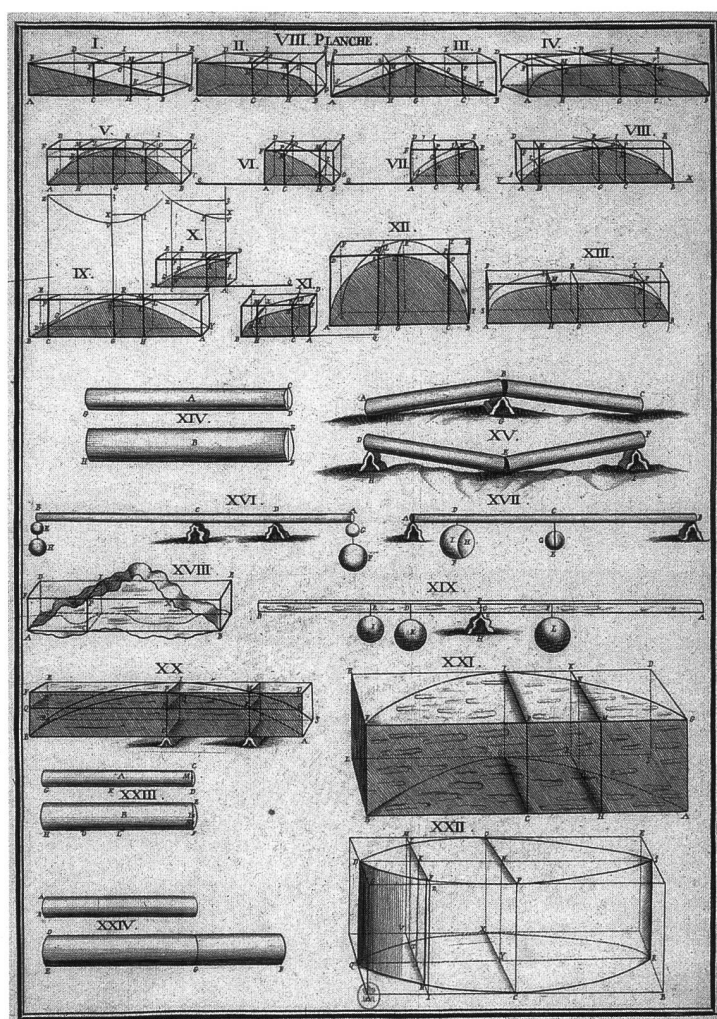
A la fin du XVI^e siècle, dans le cadre d’une étude sur le renforcement de la flotte navale, étude mandatée par l’Arsenal de Venise, Galilée met au point sa méthode de recherche sur la résistance des matériaux énoncée dans les *Discorsi*, qui contiennent dix-sept propositions concernant la rupture de barres, poutres et cylindres creux¹³. Il calcule, à partir de lois statiques, la résistance des corps sollicités soit par une charge verticale, soit par une traction; il établit la résistance des poutres par rapport à leur dimension et à leur position, et comprend de manière intuitive que leur capacité de résistance est meilleure si on les dispose de chant. Il n’arrive toutefois pas à analyser directement la structure des matériaux, qu’il déduit par hypothèse, négligeant l’effet des fibres sur la résistance, fibres qu’il suppose inextensibles. Il illustre le concept de résistance des matériaux par le biais de la charge de rupture, comme l’avait fait Léonard: il décrit un élément en forme de colonne, fixé par son extrémité supérieure, et auquel sont suspendues des charges toujours plus lourdes jusqu’à la rupture de l’objet.

A partir de Galilée, le concept de résistance des solides se développe suivant deux lignes directrices qui en de nombreux aspects se rejoignent. L’une tend à privilégier les mathématiques en tant qu’instrument permettant de définir une théorie générale; l’autre s’intéresse surtout à l’exploration, au moyen d’expériences concrètes, de la structure physique des matériaux. Cette seconde tendance aboutira à la mise au point des machines servant à établir la résistance des matériaux de construction, comme l’avait pressenti Léonard.

Un des derniers élèves de Galilée, le Suédois Paulus Wurtzius, développe les principes fragmentaires de son maître sur la résistance des solides dans une théorie résumée vers 1649 dans un essai inédit intitulé *Galilaeus Promotus de resistentiae Solidorum*. «Je dirai seulement – écrit-il à François Blondel, le 18 juillet 1661, à propos des recherches les plus récentes sur les matériaux –, sur ce que l’on a écrit, que toutes ces méditations ne peuvent



Galileo Galilei, dessin d'une poutre avec une extrémité libre et l'autre encastree dans un mur (G. Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche* intorno à due nuove scienze attenenti alla Meccanica e i movimenti locali, Leida, 1638, p. 114).



François Blondel, «Résolution des quatre principaux problèmes d'architecture», in Recueil de plusieurs traités de mathématiques de l'Académie royale des Sciences, Paris, 1676, planche VIII.

guère avoir d'autre usage qu'aux Navires, aux autres machines mobiles, où l'on recherche la légèreté: Que cela n'est pas tout à fait le sentiment de quelques personnes assez entendues au Bastiment [...].»¹⁴

Comme le confirme cette lettre, les premières expériences importantes sur la résistance des matériaux sont réalisées dans le cadre de la construction de navires et se concentrent donc sur le bois. La résistance est évaluée, suivant en cela Léonard et Galilée, en déterminant le poids qui provoque la rupture. En Angleterre, les recherches débutent au milieu du XVII^e siècle. La Royal Society, sollicitée par le ministère de la marine, charge John Evelyn d'une étude sur la sylviculture en vue d'élargir les connaissances générales et de favoriser la plantation d'arbres pour la construction de bateaux. Dans l'étude, présentée en 1662, Evelyn examine de multiples aspects du bois, allant de la nature des différentes essences à la coupe pour la réalisation d'éléments constructifs, aux lois forestières, et résume par là même la vaste littérature relative au sujet, sans pour autant mener aucune expérience personnelle. Il cite, parmi les sources littéraires anciennes, le traité de Vitruve. Plus tard, de mars 1663 à juillet 1664, les membres de la Royal Society procèdent à une série d'expériences – dans

lesquelles Evelyn est aussi impliqué – sur la résistance du bois, déterminée par la rupture de barres d’essences diverses (sapin, chêne, frêne). Ils parviennent à mettre en évidence l’importance de facteurs tels que l’âge de l’arbre, la présence de nœuds, la position de la barre (à plat ou sur la tranche) et la flexion avant la rupture¹⁵.

En France, entre 1669 et 1683, l’Académie royale des Sciences poursuit des recherches sur l’hydraulique et la résistance des matériaux, résumées dans l’ouvrage de l’abbé Edme Mariotte, publié à titre posthume en 1686, *Traité du mouvement des eaux et autres corps fluides divisé en V parties*. L’abbé y rapporte avoir effectué des expériences de rupture à échelle réduite avec des barres, des cylindres, des planches et des feuilles de petites dimensions et de matières différentes, qu’il dénomme, selon leur comportement au point de rupture, «*fragiles*» – bois sec, verre, marbre, acier – ou «*souples et pliantes*» – papier, fer blanc, corde¹⁶. Son but est d’établir une formule mathématique pour calculer la résistance des tubes des conduites d’eau, surtout en vue de travaux à exécuter dans le jardin de Versailles. Ses observations, ainsi que sa formation de naturaliste, le poussent à affirmer que les fibres d’un solide ne se cassent pas simultanément, comme l’avait supposé Galilée, mais réagissent différemment: celles qui sont les plus tendues se brisent avant les autres. Il en résulte que pour rompre une poutre disposée horizontalement, il faut, selon lui, une charge inférieure d’un tiers à celle que prévoit la théorie galiléenne. «[...] ces règles – ajoutet-il, introduisant l’explication de ses expériences de rupture – peuvent beaucoup servir aux Architectes pour les poutres, pour les saillies, etc.»¹⁷

Il faut attendre la fin du XVII^e et le début du XVIII^e pour que soient définies les premières tables qui résument les valeurs de résistance des poutres utilisées dans la construction de bâtiments, rapprochant ainsi la recherche sur les lois statiques et la pratique constructive. La table «pour avoir la grosseur des poutres, suivant leur longueur», proposée par Pierre Bullet dans *L’Architecture pratique* (1691), indique les valeurs de résistance des poutres en bois. Il s’agit là de la première table sur la résistance des poutres en fonction de leurs dimensions, qui restera inchangée au fur et à mesure des nombreuses réimpressions du traité jusqu’au XIX^e siècle. Notons toutefois que les critères adoptés pour établir cette table ne sont pas connus, puisque Bullet se borne à indiquer qu’elle «a été faite par une règle fondée sur l’expérience»¹⁸.

Les tables proposées en 1708 par Antoine Parent, membre de l’Académie royale des Sciences de Paris, viennent améliorer celle de Bullet; elles sont établies sur la base de seize essais de rupture de poutres en chêne et en sapin effectués en 1707. Les poutres sont disposées sur une machine appropriée, préparée pour provoquer leur cassure en simulant leur position dans les édifices: soit encastrées à une extrémité, à l’instar des consoles, soit aux deux, soit simplement appuyées. De toutes ces expériences, Parent fournit des notes sur la qualité du bois (dureté et séchage), les dimensions et la position de chaque poutre, ainsi que sur la charge supportée avant la rupture. Les résultats obtenus permettent de constituer des tables où les valeurs de résistance sont fixées par rapport aux dimensions de la poutre¹⁹.

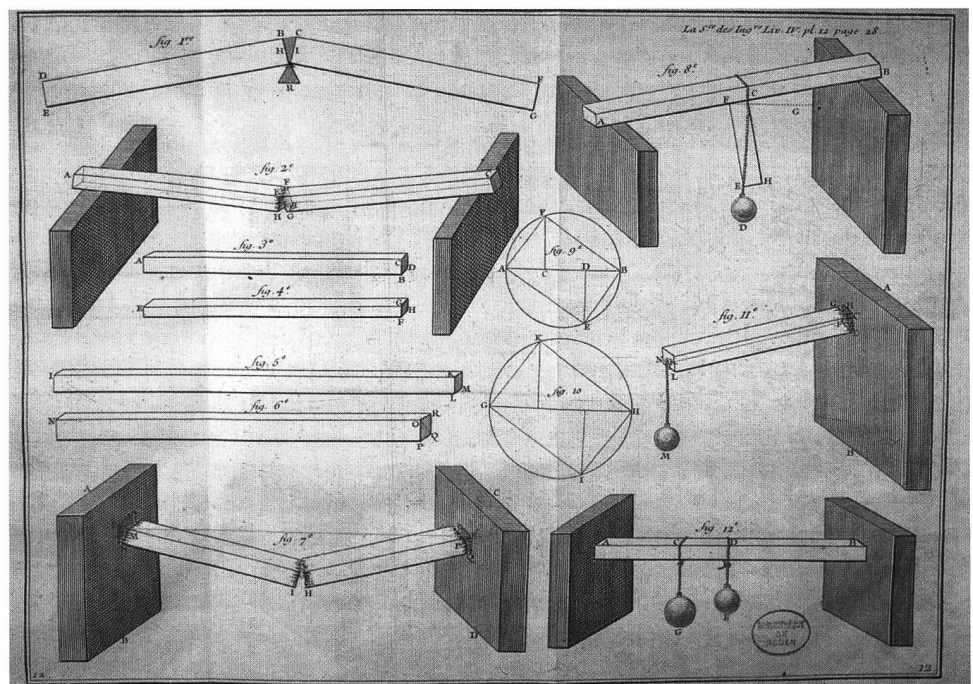
Suite aux intuitions de Cusano et grâce à Bullet et à Parent, des tables de nombres sont donc dressées sur la base soit de formules mathématiques, soit d’expériences pratiques, soit d’une synthèse des deux procédés. Ces tables représentent un changement radical dans la façon de concevoir la construction en architecture. En 1725, Bernard Forest de Bélidor fournit des tables relatives à la résistance des piédroits qui soutiennent les voûtes²⁰.

LIVRE I. DE LA THÉORIE DE LA MAÇONNERIE. 47

T A B L E
Pour trouver l'épaisseur qu'il faut donner aux revêtements de maçonnerie qui soutiennent des terrasses ou des remparts.

Hauteur de la terrasse ou du rempart, en toises.		Largeur de la terrasse ou du rempart, en toises.		Épaisseur de la maçonnerie, en toises.		Épaisseur de la maçonnerie, en toises.	
10.	6.	10.	10.	10.	10.	10.	10.
11.	13.	2.	4.	17.	1.4.	1.	11.
12.	20.	3.	11.	41.	7.0.	3.	3.3.
13.	27.	4.	18.	72.	15.6.	4.	6.7.
14.	34.	5.	25.	109.	28.4.	5.	10.1.
15.	41.	6.	32.	152.	45.2.	6.	13.5.
16.	48.	7.	39.	201.	66.0.	7.	16.9.
17.	55.	8.	46.	256.	91.8.	8.	20.3.
18.	62.	9.	53.	317.	122.6.	9.	23.7.
19.	69.	10.	60.	384.	158.4.	10.	27.1.
20.	76.	11.	67.	457.	209.2.	11.	30.5.
21.	83.	12.	74.	536.	275.0.	12.	33.9.
22.	90.	13.	81.	621.	346.8.	13.	37.3.
23.	97.	14.	88.	712.	423.6.	14.	40.7.
24.	104.	15.	95.	809.	505.4.	15.	44.1.
25.	111.	16.	102.	912.	592.2.	16.	47.5.
26.	118.	17.	109.	1021.	684.0.	17.	50.9.
27.	125.	18.	116.	1136.	780.8.	18.	54.3.
28.	132.	19.	123.	1257.	882.6.	19.	57.7.
29.	139.	20.	130.	1384.	989.4.	20.	61.1.
30.	146.	21.	137.	1517.	1101.2.	21.	64.5.
31.	153.	22.	144.	1656.	1218.0.	22.	67.9.
32.	160.	23.	151.	1801.	1340.8.	23.	71.3.
33.	167.	24.	158.	1952.	1468.6.	24.	74.7.
34.	174.	25.	165.	2109.	1601.4.	25.	78.1.
35.	181.	26.	172.	2272.	1739.2.	26.	81.5.
36.	188.	27.	179.	2441.	1882.0.	27.	84.9.
37.	195.	28.	186.	2616.	2030.8.	28.	88.3.
38.	202.	29.	193.	2797.	2184.6.	29.	91.7.
39.	209.	30.	200.	2984.	2343.4.	30.	95.1.
40.	216.	31.	207.	3177.	2507.2.	31.	98.5.
41.	223.	32.	214.	3376.	2676.0.	32.	101.9.
42.	230.	33.	221.	3581.	2850.8.	33.	105.3.
43.	237.	34.	228.	3792.	3031.6.	34.	108.7.
44.	244.	35.	235.	4009.	3218.4.	35.	112.1.
45.	251.	36.	242.	4232.	3411.2.	36.	115.5.
46.	258.	37.	249.	4461.	3610.0.	37.	118.9.
47.	265.	38.	256.	4696.	3814.8.	38.	122.3.
48.	272.	39.	263.	4937.	4025.6.	39.	125.7.
49.	279.	40.	270.	5184.	4242.4.	40.	129.1.
50.	286.	41.	277.	5437.	4465.2.	41.	132.5.
51.	293.	42.	284.	5696.	4694.0.	42.	135.9.
52.	300.	43.	291.	5961.	4928.8.	43.	139.3.
53.	307.	44.	298.	6232.	5169.6.	44.	142.7.
54.	314.	45.	305.	6509.	5416.4.	45.	146.1.
55.	321.	46.	312.	6792.	5669.2.	46.	149.5.
56.	328.	47.	319.	7081.	5928.0.	47.	152.9.
57.	335.	48.	326.	7376.	6192.8.	48.	156.3.
58.	342.	49.	333.	7677.	6463.6.	49.	159.7.
59.	349.	50.	340.	7984.	6740.4.	50.	163.1.
60.	356.	51.	347.	8297.	7023.2.	51.	166.5.
61.	363.	52.	354.	8616.	7312.0.	52.	169.9.
62.	370.	53.	361.	8941.	7606.8.	53.	173.3.
63.	377.	54.	368.	9272.	7907.6.	54.	176.7.
64.	384.	55.	375.	9609.	8214.4.	55.	180.1.
65.	391.	56.	382.	9952.	8527.2.	56.	183.5.
66.	398.	57.	389.	10301.	8846.0.	57.	186.9.
67.	405.	58.	396.	10656.	9170.8.	58.	190.3.
68.	412.	59.	403.	11017.	9501.6.	59.	193.7.
69.	419.	60.	410.	11384.	9838.4.	60.	197.1.
70.	426.	61.	417.	11757.	10181.2.	61.	200.5.
71.	433.	62.	424.	12136.	10530.0.	62.	203.9.
72.	440.	63.	431.	12521.	10884.8.	63.	207.3.
73.	447.	64.	438.	12912.	11245.6.	64.	210.7.
74.	454.	65.	445.	13309.	11612.4.	65.	214.1.
75.	461.	66.	452.	13712.	11985.2.	66.	217.5.
76.	468.	67.	459.	14121.	12364.0.	67.	220.9.
77.	475.	68.	466.	14536.	12748.8.	68.	224.3.
78.	482.	69.	473.	14957.	13139.6.	69.	227.7.
79.	489.	70.	480.	15384.	13536.4.	70.	231.1.
80.	496.	71.	487.	15817.	13939.2.	71.	234.5.
81.	503.	72.	494.	16256.	14348.0.	72.	237.9.
82.	510.	73.	501.	16701.	14762.8.	73.	241.3.
83.	517.	74.	508.	17152.	15183.6.	74.	244.7.
84.	524.	75.	515.	17609.	15610.4.	75.	248.1.
85.	531.	76.	522.	18072.	16043.2.	76.	251.5.
86.	538.	77.	529.	18541.	16482.0.	77.	254.9.
87.	545.	78.	536.	19016.	16926.8.	78.	258.3.
88.	552.	79.	543.	19497.	17377.6.	79.	261.7.
89.	559.	80.	550.	19984.	17834.4.	80.	265.1.
90.	566.	81.	557.	20477.	18297.2.	81.	268.5.
91.	573.	82.	564.	20976.	18766.0.	82.	271.9.
92.	580.	83.	571.	21481.	19240.8.	83.	275.3.
93.	587.	84.	578.	21992.	19721.6.	84.	278.7.
94.	594.	85.	585.	22509.	20208.4.	85.	282.1.
95.	601.	86.	592.	23032.	20701.2.	86.	285.5.
96.	608.	87.	599.	23561.	21200.0.	87.	288.9.
97.	615.	88.	606.	24096.	21704.8.	88.	292.3.
98.	622.	89.	613.	24637.	22215.6.	89.	295.7.
99.	629.	90.	620.	25184.	22732.4.	90.	299.1.
100.	636.	91.	627.	25737.	23255.2.	91.	302.5.

Ci-dessus et page suivante: Bernard Forest de Bélidor, «Table pour trouver l'épaisseur qu'il faut donner aux revêtements de maçonnerie qui soutiennent des terrasses ou des remparts» et planche de dessins de poutres (B. Forest de Bélidor, La Science des ingénieurs dans la conduite des travaux de fortification et d'architecture civile, Paris, 1729).



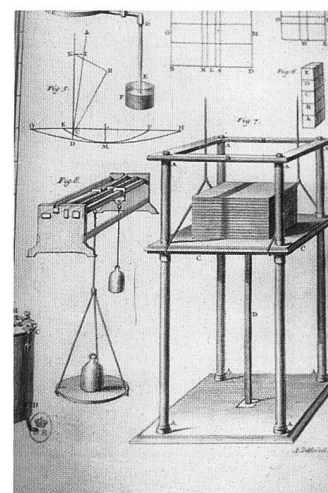
Il poursuit les expériences de Parent sur la résistance des poutres en bois, regardant celui-ci comme le seul qui ait «*parlé de la résistance des bois*», considérant aussi «*pour rien les propositions que quelques Architectes ont données, pour les poutres et solives selon leur portée, ayant pour maxime de ne rien admettre, qui ne soit démontré ou au moins expliqué par un raisonnement qui fasse valoir ce qu'on propose*»²¹. Cette critique s'adresse à la table de Bullet et à ses considérations encore empiriques. Bélidor mène aussi quelques expériences de rupture de poutres en chêne pour le compte de l'École de la Fère, afin de vérifier expérimentalement les principes de résistance – qu'il a lui-même établis par calcul mathématique – des poutres utilisées dans la construction²².

Il faudra attendre Petrus Van Musschenbroeck, professeur de philosophie et de mathématique à l'université d'Utrecht, qui revendique la compétence des physiciens pour le calcul des structures des édifices, pour assister à un certain développement des connaissances sur la résistance des matériaux en vue d'applications dans le secteur de la construction²³. Au cours des premières décennies du XVIII^e siècle, il entreprend des essais de rupture, à l'aide d'une machine de sa propre fabrication, sur différents types de bois (chêne, frêne, sapin, orme)²⁴. Il est sans doute le premier à mener des expériences de rupture sur des pierres, du marbre et des briques, ainsi que sur des éléments en bois disposés verticalement. Ces essais, qui serviront à définir la résistance des piédroits, sont exécutés au moyen d'une machine qui rompt des lattes aux dimensions réduites en les chargeant à l'aide d'une tablette coulissant sur quatre petites colonnes, sur laquelle sont disposés les poids – des lames de plomb carrées –, de manière à répartir uniformément la charge²⁵. A partir des valeurs issues de ces expériences, Van Musschenbroeck fait dériver par voie mathématique la résistance de poutres, pilastres, colonnes et murs de toutes dimensions. Et pour mettre en évidence les applications des recherches expérimentales au domaine de la construction, il donne l'exemple de maisons «*qui ont deux portes qui*

donnent sur le coin, de sorte que tout le Poids de la Façade repose sur le Jambage ou Poteau de ce coin». Il calcule la capacité d'un tel pilier à porter le poids de la façade selon l'essence de bois utilisée: maximale pour le chêne et minimale pour le frêne en raison de la différence de «fil du bois»²⁶.

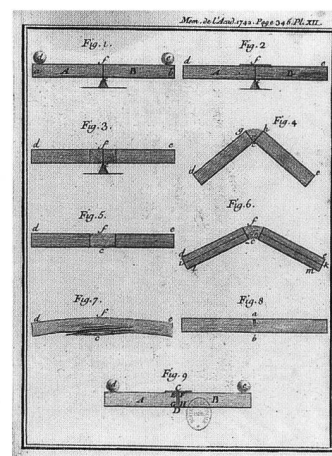
Mais la plus importante et la plus connue des séries d'expériences sur la résistance du bois est menée par Georges-Louis Leclerc, comte de Buffon, à partir de 1731, à la demande du ministre de la marine militaire française, Jean-Frédéric Phélypeaux, comte de Maurepas, qui exige de l'Académie royale des Sciences de Paris des recherches en vue d'augmenter la durée de résistance du bois utilisé pour la construction des navires de la flotte royale. En janvier 1734, Buffon entre à l'Académie pour collaborer aux recherches de l'agronome Henri-Louis Duhamel du Monceau sur l'arboriculture, entreprises en 1732 dans les forêts d'Orléans. Il conduit cependant seul une grande partie de ces recherches, dans les bois de son domaine à Montbard. Au début des années 1740, les deux chercheurs présentent indépendamment à l'Académie une série de rapports sur leurs observations et leurs expériences en matière de «bois de construction», qui intéressent, comme le souligne Duhamel du Monceau, les «architectures navales, civiles et militaires»²⁷. Avant d'abandonner les recherches sur la résistance du bois, reprises par Buffon, Duhamel du Monceau construit une machine rudimentaire pour rompre le bois et calculer la charge de rupture. «Je me proposai d'abord – rappelle-t-il en 1742 – de connoître quel poids il falloit pour rompre ces morceaux de bois dans leur entier, pour cela je les faisois porter de chaque bout de trois quarts de pouce sur deux bons pieds droits bien solides; je passois ces barreaux dans une boucle de fer carrée que je mettois précisément sur le trait du milieu, et cette boucle portoit un crochet où les poids étoient suspendus. [...]»²⁸

Dès avril 1740, Buffon poursuit ses essais; il fait rompre environ 100 poutres et solives et 300 barreaux au moyen d'une machine qu'il construit à partir de celle de Parent, Bélidor et Duhamel du Monceau²⁹. Il s'instruit en outre des expériences de rupture effectuées par les Anglais. Buffon réunit les résultats de ses travaux dans son rapport *Expériences sur la force du bois*, divisé en deux parties qu'il lit à l'Académie royale des Sciences le 12 novembre 1740 et le 15 mars 1741. Dans la première partie, il explique la finalité de ses recherches – «J'ai tâché de déterminer avec quelque précision la force du bois, et j'ai cherché les moyens de rendre mon travail utile aux Constructeurs et aux Charpentiers. Pour y parvenir, j'ai été obligé de faire rompre plusieurs Poutres et plusieurs Solives de différentes longueurs»³⁰ – et anticipe une description détaillée, digne du naturaliste passionné qu'il est des contributions de Stephen Hales, de la formation de l'arbre. Il parvient à rendre compte des caractéristiques et des irrégularités de la structure du tronc qui, à son avis, ébranlent les modèles théoriques élaborés sur la base de calculs et de principes découlant de la théorie galiléenne. Il enregistre l'accroissement de la flèche de la courbure des poutres en fonction de la charge, sans pour autant formuler d'hypothèse sur l'élasticité absolue. Il constate en outre l'impossibilité de faire dériver le comportement statique des poutres en bois de celui des barreaux et d'établir des formules mathématiques générales - comme le laissent supposer les tables de Parent, Bélidor ou Van Musschenbroeck -, cela en raison de la disposition des fibres qui font varier la capacité portante d'une poutre selon qu'elle est coupée au centre du tronc ou à proximité de l'écorce. «Ces remarques – écrit Buffon – font déjà sentir combien on doit peu compter sur les Tables calculées, ou sur les formules que différents Auteurs nous ont données de la force du bois qu'ils n'avoient éprouvée que sur des pièces dont les plus grosses étoient d'un ou deux pouces d'épaisseur, et dont ils ne



332 MÉMOIRES DE L'ACADEMIE ROYALE
CINQUIÈME TABLE,
Pour les pièces de huit pouces d'équarrissage.

Longueur des pièces.	Poids des pièces.	Charges.	Temps depuis le premier état jusqu'à l'effacement de la respiration.		Flèche de la courbure sans que s'échoue.
			Heures.	Minutes.	
10	331	27800	2	50	3
	330	27700	2	58	2 3
12	397	23000	1	30	3
	391	23000	1	23	2 11
14	461	20050	1	6	3 10
	459	19100	1	2	3 2
16	528	16800	0	47	5 2
	524	15950	0	30	3 9
18	594	13500	0	32	4 6
	593	12900	0	30	4 1
20	664	11775	0	24	6 6
	660	11200	0	28	6



donnent ni le nombre des couches ligneuses que ces barreaux contenoient, ni la position de ces couches, ni le sens dans lequel se sont trouvées ces couches lorsqu'ils ont fait rompre le barreau. [...]»³¹

Dans la deuxième partie de son rapport, Buffon fournit une série de tables, qui s'adressent plus particulièrement aux charpentiers et aux architectes, sur la résistance des poutres rapportées à leurs dimensions, leur poids, etc.³². Par la suite, il continue à se consacrer au bois, mais les *Expériences sur la force du bois* restent l'une des contributions de référence, qui s'impose dans la culture architecturale internationale et l'idée nouvelle de la construction³³.

Petrus van Musschenbroeck, *dessins de machines pour le calcul de résistance des matériaux* (P. Van Musschenbroeck, Cours de physique expérimentale et mathématique, Paris, 1769).

Dès la deuxième moitié du XVIII^e siècle sont entreprises des études en vue de déterminer aussi la résistance de différents types de fer qu'on emploie dans la pierre armée et pour consolider des coupoles. Ainsi Van Musschenbroeck s'occupe-t-il de la résistance des métaux (fer, plomb, étain, zinc, bronze, or, argent, cuivre) en raison de leurs multiples emplois, «pour lier et pour contenir ensemble les différentes parties des bâtimens, des tours, des vaisseaux, etc.»³⁴. Il construit même une machine, le pyromètre, pour mesurer la dilatation et la contraction des métaux sous l'effet thermique. Giovanni Poleni, quant à lui, engagé dans l'étude des causes de dégradation de la coupole de Saint-Pierre de Rome, vérifie à l'aide d'une machine, «conforme à l'idée de celle de Monsieur Musschenbroeck», la résistance à la traction des chaînes en fer qui seront utilisées pour sa consolidation³⁵.

Georges-Louis Leclerc, comte de Buffon, «Cinquième table, pour les pièces des huit pouces d'équarrissage» (De Buffon, «Expériences sur la force du bois. Second Mémoire», in Mémoires de Mathématique et de Physique, tirés des registres de l'Académie royale des Sciences de l'année MDCCXLI, Paris, 1744).

La machine de Buffon et ses expériences sur la force du bois rencontrent beaucoup d'écho en Russie, en Allemagne et en Angleterre. A Venise, durant la première moitié du XVIII^e siècle, elles sont connues dans le milieu qui gravite autour de Carlo Lodoli, le groupe des «*rigoristi*». Parmi les principales références de Lodoli, rapportées par les témoignages de deux de ses élèves – Francesco Algarotti et Andrea Memmo –, on trouve, outre l'œuvre de Galilée, les expériences des membres de l'Académie royale des Sciences spécialistes de mécanique, statique et résistance des matériaux. Avant même Pierre Patte, et avec une plus grande lucidité critique, Lodoli esquisse les grandes lignes d'une conception de l'architecture à la recherche de ses propres fondements dans ce nouvel horizon scientifique et technique, renonçant à admettre comme point de départ les implications théoriques de Vitruve. Selon la version la plus radicale de Lodoli, rapportée par Algarotti, la prise de conscience de la nature des différents matériaux, qui a mûri aussi grâce à l'utilisation de la «*macchina divulsoria*»³⁶, aboutit au principe d'utilisation des matériaux selon leurs propriétés physiques et mécaniques, selon leur «nature»: «Pour quelle raison la pierre représente-t-elle la pierre, le bois le bois, et chaque matière elle-même, et non une autre?», écrit Algarotti, anticipant des affirmations de Ruskin, Semper, Viollet-le-Duc et Loos, qui utilisent presque les mêmes termes³⁷. «De sorte que – poursuit Algarotti –, formellement différente étant la nature du bois de celle de la pierre, aussi différentes devront être les formes que tu donneras au bois et à la pierre.»

Henri-Louis Duhamel du Monceau, *planche de dessins de poutres* (in Mémoires de Mathématique et de Physique, tirés des registres de l'Académie royale des Sciences de l'année MDCCXLII, Paris, 1745).

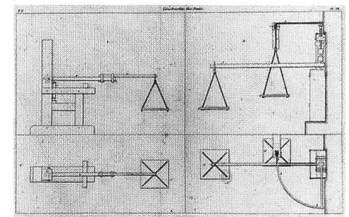
Dans le second volume des *Elementi d'architettura lodoliana*, Memmo conteste les affirmations d'Algarotti, qui «attribue à Monsieur de Buffon, comme s'il eût été le premier, la gloire d'avoir fait connaître, pour ainsi dire, la science du bois – la xylogologie», «alors qu'il était notoire depuis fort longtemps – poursuit-il – que le père Lodoli possédait la «*macchina divulsoria*», et ce bien avant Monsieur de Buffon. Il faisait du reste voir à tous les expériences qu'il avait en grande partie transcrites»³⁸.

Les machines pour le calcul de la résistance de la pierre: le chantier de l'église de Sainte-Genève à Paris

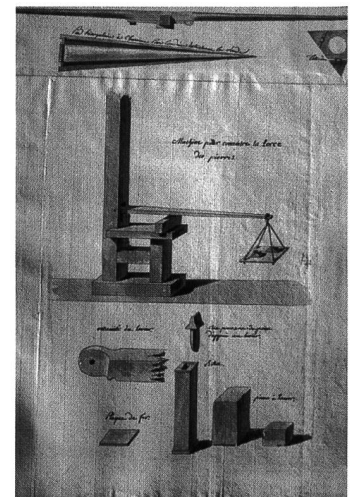
Dans les années 1760, l'absence de données expérimentales sur la résistance de la pierre est plusieurs fois évoquée. Dans une lettre à Algarotti, Tommaso Temanza suggère d'étendre les essais de résistance: «*Outre les propriétés générales de la pierre, si différentes par son organisation propre à celles du bois, l'on voudrait considérer les propriétés particulières de ses différents types: car certainement il n'est pas moindre différence de pierre à pierre, qu'il n'en est de bois à bois.*»³⁹ Laugier ne s'intéressera à la résistance des matériaux qu'après la publication de son célèbre *Essai sur l'Architecture*, apologie la plus passionnée de la métamorphose des matériaux, élevée au rang de principe de création architecturale. Dans ses *Observations sur l'Architecture*, écrites en 1765, après un séjour à Venise qui lui permet d'entrer en contact avec la culture des "rigoristi", il témoigne de sa connaissance des expériences effectuées sur le bois et de l'absence d'essais analogues sur la pierre que déplore Temanza. «*Nos connoissances – écrit-il – sont assez certaines sur la force du bois qui porte de bout. Elles le sont bien moins sur la force de la pierre qui porte de même. Nous jugeons de la densité de ces deux matières par leur pesanteur. Mais nous ignorons à quel point elles diffèrent par la ténacité de leurs parties. C'est pourtant cette ténacité qui doit principalement décider de leur force. Le bois est un amas de parties longues et fibreuses, fortement liées ensemble. Il résiste peu au ciseau et à la scie. Il fait au marteau une bien plus grande résistance [...]. La pierre est tout au contraire. Elle fait beaucoup de résistance au ciseau et à la scie, et elle se divise en éclats au moindre coup de marteau [...]. Il y a donc moins de ténacité dans la pierre que dans le bois. Donc à densité égale, le bois portant de bout doit avoir plus de force que la pierre dans la même position. Car c'est la ténacité des parties qui fait leur résistance. Il seroit question de s'assurer par des expériences du degré de ténacité des parties de la pierre, afin de connoître avec exactitude la charge qu'elle peut porter. [...] Tout se borne après-tout à inventer le genre d'épreuve. Dès qu'on l'aura déterminé, on pourra çavoir ce qu'une colonne de tel diamètre est capable de supporter; et alors l'Architecte ne marchant plus à tâtons, sera en état d'établir des voûtes sûrement sur les constructions les plus légères.*»⁴⁰

Laugier écrit ces mots peu de temps avant le début des essais sur la résistance des pierres, réalisés à l'aide de machines dans le cadre de la construction de l'église Sainte-Genève à Paris, projetée par Soufflot et dont les travaux ont débuté en 1755. Suite aux critiques de Patte, formulées en 1770 à propos des fondements statiques du projet de la coupole, et suite aux réponses de Jean-Rodolphe Perronet qui prend position en faveur de Soufflot (sans toutefois offrir aucune preuve de ses assertions), Emiland-Marie Gauthey démontre, en 1771, le dimensionnement correct des colonnes et des piédroits du projet. Mais la justesse de ses calculs dépend de la résistance, inconnue, des supports verticaux aux compressions résultantes du poids des ouvrages de couverture. L'objection de Patte envers le dimensionnement insuffisant des piédroits est donc légitime et fondée (bien que centrée non pas sur le problème de la compression de la pierre, mais sur celui de l'équilibre des forces), si l'on considère que les données sur la résistance de la pierre, circulant à l'époque et déduites directement d'expériences de rupture, sont encore celles de Van Musschenbroeck, et donc imparfaites pour évaluer le cas de l'église parisienne. Le même Gauthey reconnaîtra le fondement de l'objection concernant la compression des piliers⁴¹.

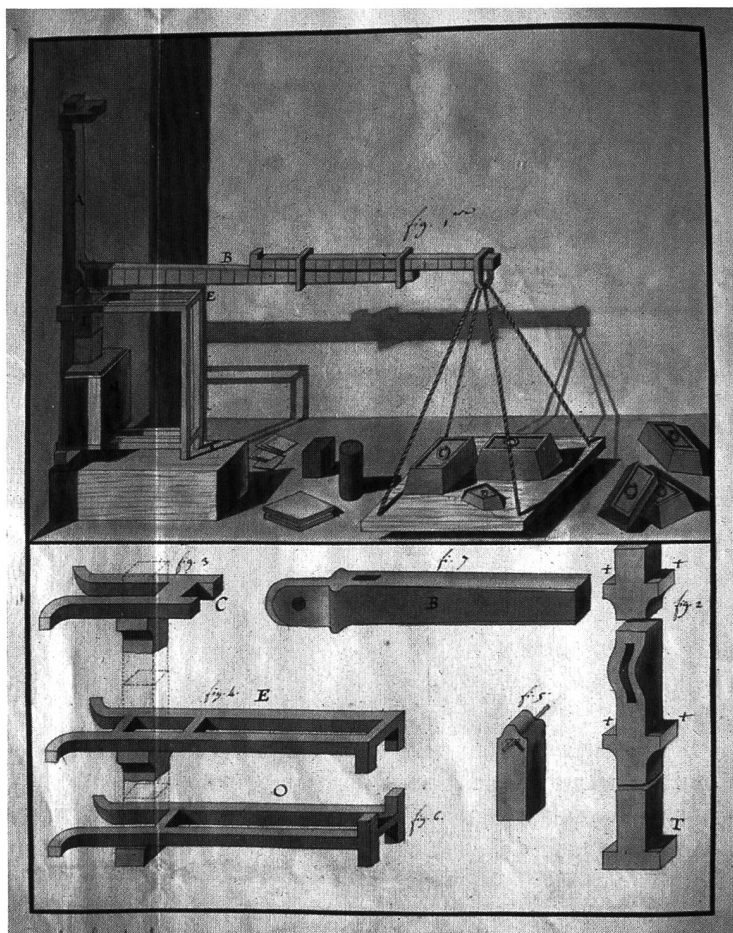
Les critiques de Patte conduisent Soufflot à vérifier directement les caractéristiques des matériaux de l'église. Il utilise une première machine en juillet 1771 pour contrôler la



Emiland-Marie Gauthey, machine pour le calcul de résistance des matériaux conçue pour le chantier de l'église Sainte-Genève à Paris (in *CŒuvres de M. Gauthey. Tome premier. Traité de la construction des Ponts, Paris, 1809.*)



Dessin d'une machine pour le calcul de résistance des matériaux (in *Machine pour connaître la force des pierres*, in *Collection de dessins relatifs à l'art de l'ingénieur, vol. V, manuscrit, Ecole nationale des Ponts et Chaussées, Paris, Ms 206(5), f. 46.*)



Dessin d'une machine pour le calcul de résistance des matériaux (in Description de la Machine cy jointe servant a connoitre la force des pierres, manuscrit, Ecole nationale des Ponts et Chaussées, Paris, Ms 20).

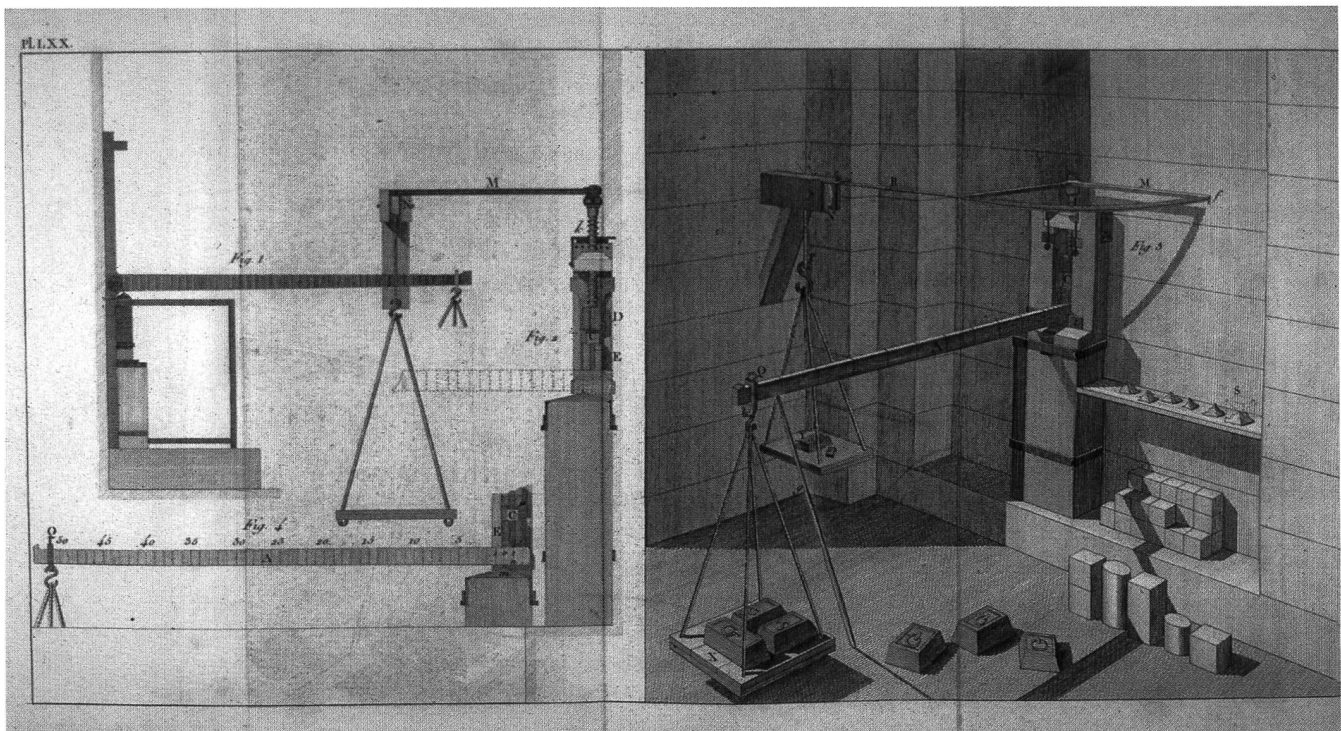
résistance des barres métalliques, qui dans l'église constituent l'armature des claveaux des platebandes déjà réalisées⁴². En 1773, Gauthey entreprend les premières expériences importantes de rupture de la pierre pour en établir les valeurs de résistance, et ainsi pouvoir vérifier le bien-fondé de ses propres hypothèses de calcul sur la stabilité de l'église de Soufflot et, plus généralement, pour combler une lacune des connaissances fondamentales relatives à la construction. A Chalon-sur-Saône, où il réside, il construit une machine⁴³. Il fait préparer des échantillons de pierre de deux qualités (tendre et dure) et de dimensions différentes. Il s'assure que chaque type d'échantillon ait des propriétés physiques les plus identiques possibles et effectue les expériences trois fois pour chaque type. Malgré les précautions prises, les trois résultats présentent «quelquefois une très grande variation», ce qui contraint Gauthey à choisir, comme valeur finale, la moyenne mathématique calculée entre les deux valeurs les plus proches, corrigée au cas où la troisième valeur s'écarterait significativement des deux autres. Gauthey explique cette différence entre les valeurs obtenues avec la machine comme provenant «ou de ce que les deux lits de la pierre n'étoient pas bien parallèles, ou de ce que le billot n'appuyoit pas bien également, ou de ce que les morceaux de pierre, quoique pris dans le même bloc, n'étoient pas parfaitement homogènes»⁴⁴. Afin d'étudier l'influence de la configuration géométrique des claveaux sur la résistance de la pierre, il choisit des dimensions précises d'échantillons. Pour une hauteur

donnée, il varie la surface, et vice versa. Le but est de contrôler expérimentalement les critères de coupe des pierres pour arriver à déterminer la forme parfaite du claveau.

D'après les essais effectués, et malgré les valeurs discordantes que Gauthey ne manque pas de souligner, il en résulte que *«le poids que portent les pierres, avant que d'être écrasées»* est proportionnel à la superficie de réaction (*«la surface de la base»*)⁴⁵. Cette conclusion démontre l'incidence des modes de fabrication de la surface horizontale du claveau sur la résistance de la pierre. Et, dans ce sens, l'observation de Gauthey au sujet des modalités de rupture des échantillons est emblématique: *«Lorsque le lit supérieur est un peu concave, alors, la pression se faisant sur les arêtes, les arêtes s'éclatent bientôt, et la surface qui porte étant diminuée de largeur, finit de s'écraser d'autant plus facilement, que cette concavité est plus grande»*⁴⁶. Ainsi les diagnostics qui seront émis, sur la base de l'étude fondamentale de Jean-Baptiste Rondelet sur les dégradations de l'église de Soufflot, tourneront effectivement autour de la fabrication de la surface d'assise des claveaux et des modalités de mise en œuvre.

Gauthey entreprend aussi des expériences de rupture avec des briques, des marbres et des porphyres. En vue d'étudier la résistance de la pierre utilisée pour les architraves, les consoles ou les "clefs pendantes" des cathédrales gothiques, il effectue différents types d'essais sur des échantillons soumis à la traction, disposés sur deux appuis et en saillie. En 1774, alors que sont rendus publics les résultats de ses expériences, Gauthey estime que les valeurs de résistance des matériaux ne sont pas altérées de façon significative par les phénomènes de frottement qui apparaissent dans certains mécanismes de sa machine durant les essais de charge. La même année, Soufflot se rend à Chalon-sur-Saône pour voir la machine de Gauthey afin d'en construire une semblable, avec l'assistance de Rondelet; sur demande du même Soufflot, une autre machine est mise au point par Perronet à l'École des Ponts et Chaussées, *«à laquelle il adapta un appareil qui la rendait propre à reconnaître aussi la force de cohésion des métaux»*⁴⁷. Après avoir effectué des essais de rupture sur la pierre de Saillancourt, Perronet conçoit avec cette pierre le pont de Neuilly-sur-Seine doté de seulement cinq arcs, réduisant ainsi le nombre de piliers. A peu près à la même époque, Pierre Contant d'Ivry mène aussi des expériences sur la pierre en vue de construire la coupole de l'église de la Madeleine à Paris. La possibilité de transformer les piliers des coupoles en systèmes ponctuels et de parvenir ainsi à une structure de colonnes isolées supportant les linteaux, cela si possible sans murs, est désormais étroitement dépendante de la connaissance exacte de la résistance de la pierre à la compression.

Une quatrième machine, elle aussi vouée à déterminer la résistance des pierres de l'église Sainte-Geneviève, est encore mise au point par Rondelet, qui dirige le chantier après la mort de Soufflot; il prend des précautions particulières dans le but de réduire le phénomène de frottement présent dans celles de Gauthey, Soufflot et Perronet. *«[...] je suis obligé d'observer – écrit-il de sa machine installée sur le chantier de l'église transformée en Panthéon – que cette machine fatiguée par une infinité d'expériences précédentes ne donne plus de résultats justes, parce qu'elle a été forcée, il y a environ quatre ans, par des expériences que j'ai faites sur des tringles de fer, sur des pierres et des bois d'une trop grande superficie de base»*⁴⁸. De l'avis de Gauthey, la machine de Rondelet aurait en partie paré aux inconvénients des précédentes, étant donné que pour celle-ci *«les solides de pierre, mis en expérience, sont pressés par le moyen d'une vis [...] dans une direction constamment verticale»*⁴⁹. Toutefois, la mesure des valeurs de résistance ne peut encore être effectuée directement, toujours en



Jean-Baptiste Rondelet, dessin d'une machine pour le calcul de résistance des matériaux (J.-B. Rondelet, *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*, Paris, vol. III, 1805).

raison du frottement que Rondelet tente de corriger par le calcul. Reste une autre marge d'imprécision due à l'opération de graissage des pièces de la machine, plus ou moins minutieuse et répétée à des intervalles plus ou moins réguliers.

Soufflot avait conçu les dernières versions du projet de coupole sur la base des valeurs de résistance résultant des données obtenues grâce à sa machine, et grâce également à celles de Perronet et de Gauthey. Au-delà des questions de style, il est évident que le caractère "gothique" des frêles structures à l'ancienne de l'église de Sainte-Geneviève, qui a fini par s'imposer comme la clé d'interprétation de l'œuvre, cache une réalité constructive en évolution, fondée toujours plus sur la recherche des valeurs de résistance des matériaux, sur les défauts et les erreurs de calcul et de mise en œuvre des structures.

«Il était assez prouvé – écrit Navier en 1809 à propos de l'église – que la tour du dôme et les arcs doubleaux qui la portent, avaient assez d'épaisseur pour soutenir l'action de ses voûtes; mais, en comparant le peu de surface des piliers avec les masses énormes dont ils sont chargés, on pouvait craindre que la pierre dont ils étaient construits ne leur présentât pas assez de résistance, et qu'elle ne vînt à s'écraser sous leur poids. On n'avait alors aucun moyen de juger exactement de la valeur de cette objection.»⁵⁰

Pendant que les bâtisseurs français s'engagent dans une recherche scientifique sur la nature des matériaux et qu'ils attendent Viollet-le-Duc pour traduire leurs conclusions en une nouvelle conception de l'architecture, à Venise les résultats donnés par les premières machines françaises pour calculer la résistance des matériaux ébranlent violemment les fondements de la théorie de l'architecture. Avec la "macchina divulgatoria", les "rigoristi" ne brisent pas seulement les matériaux pour étudier leur réelle résistance; ils posent en effet

les prémisses d'une rupture de toute la charpente théorique du vitruvianisme, s'en prenant à l'anthropomorphisme et à l'idée d'imitation des formes du bois dans les constructions en marbre, tout autant qu'à l'image vitruvienne la plus éloquente: le temple. Nul hasard si au XIX^e siècle, après la découverte de la nature physique et des divers degrés de résistance du bois et de la pierre, les théoriciens de l'architecture les plus radicaux, de Heinrich Hübsch à Viollet-le-Duc, réfutent la thèse vitruvienne sur l'origine du temple dorique en marbre, comme les "rigoristi" l'avaient déjà fait. C'est cette origine qu'Antoine-Chrysostôme Quatremère de Quincy, dernier grand héritier de la tradition vitruvienne, s'obstine à défendre afin de sauvegarder un principe essentiel de la culture "Beaux-Arts": l'imitation des formes indépendamment de la nature des matériaux.

Au début du XIX^e siècle, les essais de rupture sont effectués de manière beaucoup plus systématique à l'aide de nouvelles machines, afin d'établir avec exactitude la résistance du fer et de la fonte, matériaux destinés à remplacer le bois et la pierre. Au milieu du siècle, les instruments de calcul analytique s'affinent, les machines se perfectionnent, les matériaux artificiels deviennent plus homogènes et commencent à être connus à tout point de vue. Cusano, Alberti et Scamozzi avaient annoncé que la matière n'a pas de forme, qu'elle peut seulement la recevoir. Dans le fait de recevoir, elle est toutefois contaminée par quelque chose qui sera toujours étranger à sa nature: l'idée. Lodoli semble avoir pressenti le caractère encore fragmentaire de la science galiléenne, quand il réfute la notion de "système" que certains de ses contemporains emploient pour caractériser ses idées sur l'architecture. Peut-être, après Lodoli, a-t-on voulu conclure trop prématurément la phase de l'*Ut eruas et destruas* sans atteindre l'annulation de l'idée? Ou la phase de l'*Ut plantes et aedifices* n'était-elle peut-être qu'une approche de la construction parfaite, sans toutefois jamais y parvenir pour ne pas perdre la faculté de se «faire comprendre», comme l'écrit Semper? Aujourd'hui, alors que l'univers des idées a été détruit de manière irréversible après le long délire des XIX^e et XX^e siècles, la matière peut s'exhiber telle qu'elle est, "confuse et informe", au-delà des valeurs fournies par les machines et des images sans grâce dévoilées par le déracinement lodolien des certitudes.

Traduit de l'italien par Emanuela Torchia

Notes

- ¹ Augusto Marinoni, *Leonardo da Vinci. I manoscritti dell'Institut de France. Il manoscritto G. Trascrizione diplomatica e critica*, Florence, Giunti Barbèra, 1989, p. 81, transcription f. 54r.
- ² Augusto Marinoni, *Il Codice Atlantico della Biblioteca Ambrosiana di Milano. Trascrizione diplomatica e critica*, Florence, Giunti Barbèra, 1975, vol. I, p. 86, transcription f. 41r.
- ³ Léonard de Vinci a laissé une description, accompagnée d'un dessin, d'une de ces machines conçues pour calculer la résistance des structures et qu'il appelle «Expérience de la force capable d'agir sur la longueur d'un fil de fer» (Léonard, *Il Codice Atlantico, op. cit.*, 1976, vol. III, p. 224).
- ⁴ Augusto Marinoni, *Leonardo da Vinci. I manoscritti dell'Institut de France. Il manoscritto A. Trascrizione diplomatica e critica*, Florence, Giunti Barbèra, 1990, p. 70, transcription f. 34r.
- ⁵ Augusto Marinoni, *Leonardo da Vinci. I manoscritti dell'Institut de France. Il manoscritto H. Trascrizione diplomatica e critica*, Florence, Giunti Barbèra, 1986, p. 39, transcription f. 36v.
- ⁶ *I Manoscritti di Leonardo da Vinci. Vol. II. Il Codice Forster II,2 nel "Victoria and Albert Museum"*, Rome, Libreria dello Stato, 1934, p. 148.
- ⁷ Philibert de l'Orme, *Nouvelles Inventions pour bien bastir et à petits fraiz*, Paris, F. Morel, 1561, f. 39r.
- ⁸ Vincenzo Scamozzi, *L'Idée dell'architettura universale*, Venise, 1615, vol. II, p. 174.
- ⁹ Teofilo Gallaccini, *Trattato sopra gli errori degli architetti (1621)*, Venise, G. Pasquali, 1767, p. 9.
- ¹⁰ *Ibid.*, p. 11.
- ¹¹ *Ibid.*, p. 45.
- ¹² *Ibid.*, p. 61.
- ¹³ Galileo Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla Meccanica e i movimenti locali*, Leida, Elzeviri, 1638.
- ¹⁴ La lettre est publiée dans François Blondel, «Résolution des quatre principaux problèmes d'architecture», in *Recueil de plusieurs traités de mathématiques de l'Académie royale des Sciences*, Paris, Imprimerie Royale, 1676, p. 71.
- ¹⁵ Cf. John Evelyn, *Sylva, or a Discourse of Forest-Trees, and the Propagation of Timber in His Majesty's Dominions*, Londres, J. Martyn, 1679, p. 203.
- ¹⁶ Edme Mariotte, *Traité du mouvement des eaux et autres corps fluides divisé en V parties*, Paris, E. Michallet, 1686, p. 388.
- ¹⁷ *Ibid.*, p. 382.
- ¹⁸ Pierre Bullet, *L'Architecture pratique, qui comprend le détail du Toisé, et du Devis des Ouvrages de Massonnerie, Charpenterie, Menuiserie, Serrurerie, Plomberie, Vitrierie, Ardoise, Tuille, Pavé de Grais et Impression*, Paris, E. Michallet, 1691, p. 222.
- ¹⁹ Antoine Parent, «Expériences pour connoître la résistance des bois de Chêne et de Sapin», in *Mémoires de Mathématique et de Physique, tirés des registres de l'Académie royale des Sciences de l'année MDCCVII*, publié avec *Histoire de l'Académie royale des Sciences. Année MDCCVII*, Paris, J. Boudot, 1708, pp. 512-16.
- ²⁰ Cf. Bernard Forest de Bélidor, *Nouveau cours de Mathématique à l'usage de l'artillerie et du génie où l'on applique les Parties les plus utiles de cette Science à la Théorie et à la Pratique des différents sujets qui peuvent avoir rapport à la guerre*, Paris, C. Jombert, 1725, p. 497.
- ²¹ Bernard Forest de Bélidor, *La science des ingénieurs dans la conduite des travaux de fortification et d'architecture civile*, Paris, C. Jombert, vol. II, 1729, Livre IV, p. 8.
- ²² *Ibid.*, pp. 15, 16.
- ²³ Petrus Van Musschenbroeck, *Essai de Physique, avec une description de nouvelles sortes de Machines pneumatiques*, Leyden, S. Luchtman, 1739, vol. I, p. 19.
- ²⁴ *Ibid.*, p. 355.
- ²⁵ Petrus Van Musschenbroeck, *Cours de physique expérimentale et mathématique*, Paris, Guillyn, 1769, vol. II, p. 171.
- ²⁶ Petrus Van Musschenbroeck, *Essai ...*, *op. cit.*, p. 358.
- ²⁷ «Registres de l'Académie», assemblée du 25 février 1739, f. 32r (cit. in L. Hanks, *Buffon avant l'«Histoire Naturelle»*, Paris, Presses universitaires de France, 1966, p. 148, note 32).
- ²⁸ *Ibidem*. Duhamel du Monceau résume ses expériences sur le bois, en donnant également des indications pour son utilisation dans la construction, dans son livre *De l'exploitation des Bois ou moyens de tirer un parti avantageux des taillis, demi-futaies et hautes-futaies, et d'en faire une juste Estimation: Avec la Description des Arts qui se pratiquent dans les Forêts: Faisant partie du Traité complet des Bois et des Forêts*, Paris, H.L. Guerin et L.F. Delatour, 1764, 2 vol.
- ²⁹ De Buffon, «Expériences sur la force du bois», in *Mémoires de Mathématique et de Physique, tirés des registres de l'Académie royale des Sciences de l'année MDCCXL*, publié avec *Histoire de l'Académie royale des Sciences. Année MDCCXL*, Paris, Imprimerie Royale, 1742, (pp. 453-67), pp. 459-61.
- ³⁰ *Ibid.*, p. 453.
- ³¹ *Ibid.*, p. 457.
- ³² Cf. de Buffon, «Expériences sur la force du bois. Second Mémoire», in *Mémoires de Mathématique et de Physique, tirés des registres de l'Académie royale des Sciences de l'année MDCCXLI*, publié avec *Histoire de l'Académie royale des Sciences. Année MDCCXLI*, Paris, Imprimerie Royale, 1744, pp. 292-334.
- ³³ Sur la résistance du bois, voir Babuti Desgodetz, *Essai sur la soli-*

dité économique dans la fonte des bois de construction et quelques autres objets relatifs à l'assemblage et établissement de nos planchers, 1766, manuscrit, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPeC), Paris, Ms 56. Dans le *Traité de la force des bois*, publié en 1782, Le Camus de Mézieres, se servant aussi de l'essai inédit de Desgodetz, résume les recherches sur la résistance statique du bois.

34 Petrus Van Musschenbroeck, *Cours ...*, op. cit., vol. II, p. 97.

35 Giovanni Poleni, *Memorie Istoriche della Gran Cupola del tempio Vaticano, e de' danni di essa, e de' ristoramenti loro, divise in libri cinque*, Padova, Stamperia del Seminario, 1748, colonna 82. Dans les forges, construites dans sa demeure, près de Montbard, entre 1768 et 1772 environ, Buffon entreprend une série d'expériences pour déterminer la qualité du fer et établir la résistance d'anneaux, en adoptant les critères d'expérimentation appliqués pour le bois (cf. «Quatrième Mémoire. Expériences sur la ténacité et sur la décomposition du Fer», in *Cœuvres complètes de M. Le C.^{te} de Buffon. Introduction à l'Histoire des minéraux*, Paris, Imprimerie Royale, vol. VII, 1774, pp. 57-97). En 1786, Charles-Louis Aubry présente de son côté à l'Académie des Sciences, Inscriptions et Belles-Lettres de Toulouse, un rapport avec des tableaux récapitulatifs de ses expériences de rupture de barres en bois et en métal «employé comme support» (cf. Charles-Louis Aubry, *Mémoires sur différentes questions de la science des constructions publiques et économiques*, Lyon, Dombey, pp. 1-102).

36 L'appareillage nécessaire "pour rompre différentes sortes de bois" est défini comme "macchina divisoria" par Algarotti, qui cite la première partie du rapport «Expériences sur la force du bois» de Buffon (Francesco Algarotti, *Saggio sopra l'Architettura* (1756), in Giovanni da Pozzo, *Francesco*

Algarotti. *Saggi*, Bari, Laterza et Figli, 1963, p. 39).

37 *Ibid.*, p. 37.

38 Andrea Memmo, *Elementi d'architettura lodoliana, ossia l'arte del fabbricare con solidità scientifica e con eleganza non capricciosa*, vol. II, Zara, Fratelli Battana, 1834, p. 46.

39 Francesco Algarotti, lettre à Tommaso Temanza, 1^o avril 1760, in *Opere del Conte Algarotti. Edizione novissima*, Venise, C. Palese, vol. VIII, 1792, p. 300.

40 Marc-Antoine Laugier, *Observations sur l'Architecture*, La Haye, 1765, pp. 294-96.

41 Emiland-Marie Gauthey, *Dissertation sur les dégradations survenues aux piliers du dôme du Panthéon françois, et sur les moyens d'y remédier*, Paris, H.L. Perronneau, année VI, pp. 17, 18.

42 *Expériences faites par M. Soufflot à S.te Geneviève en juillet 1771 sur la force du fer forgé, tiré longitudinalement pour produire ce que l'on appelle la « force absolue »*, manuscrit, ENPeC, Ms 2175.

43 Emiland-Marie Gauthey, «Mémoire sur la charge que peuvent porter les Pierres», in *Observations et Mémoires sur la Physique, sur l'Histoire naturelle et sur les Arts et Métiers*, vol. IV, novembre 1774, (pp. 400-14), pp. 402, 403. Le manuscrit du mémoire, daté de 1773, avec en annexe le dessin de la machine, est conservé aux archives de l'ENPeC, Ms 2177.

44 *Ibid.*, p. 403.

45 *Ibid.*, p. 404.

46 *Ibid.*, p. 405.

47 Témoignage de Gauthey, in Navier, *Oeuvres de M. Gauthey. Tome premier. Traité de la construction des Ponts*, Paris, Firmin Didot, 1809, p. 269. Pour la description de la machine de Soufflot, voir Rondelet, *Mémoire historique du Panthéon français*, Paris, année V de la République, pp. 65, 66. Le

registre intitulé *Description de la Machine cy jointe servant à connoître la force des pierres* contient un dessin en perspective et en couleur ainsi que la description de la machine (manuscrit, s.d., ENPeC, Ms 20). Selon le témoignage de Perronet, la machine de Gauthey est installée à l'Ecole royale des Ponts et Chaussées sur intervention du même Perronet (voir Perronet, *Projet d'une Arche en pierre, de trente-six pieds d'ouverture, faite à l'imitation des ponts de charpente, pour épargner l'emploi de la pierre et du moellon*, Paris, Magimel, 1793, p. 12). Toujours dans le même contexte, Perronet soutient que même Soufflot aurait effectué des expériences de rupture avec la «même machine» (*Ibidem*, p. 12, note (*)). Perronet construit une autre machine, elle aussi installée à l'Ecole royale des Ponts et Chaussées. En 1774-75 sont menées des expériences sur des pierres, des troncs en bois et des barres de fer disposés verticalement (*Machine pour connoître la force de la pierre et celle du bois debout. Experiences faites en 1774 et 1775 pour connoître la force de la pierre, celle du bois debout et celle du fer, posé vericalement*, s.a., manuscrit, ENPeC, vol. XIII-233, feuilles 307-13. Le rapport contient le dessin et la description de la machine). Le 20 décembre 1778, des essais sont effectués sur des cylindres en plâtre, en présence de Perronet (*Ecole royale des Ponts et Chaussées. Experiences faites en présence de Mr Perronet sur la résistance de différents cylindres de plâtre*, manuscrit daté du 20 décembre 1778, ENPeC, Ms 2176). En janvier 1825, la machine de Perronet est utilisée par Duleau en vue d'établir la résistance de prismes de «béton de sable, non contenus latéralement» (cf. *Extrait du tableau des expériences faites à l'Ecole des Ponts et Chaussées, avec la Machine de M. Perronet, pour écraser des prismes de béton de sable, non contenus latéralement*, sl., sa. [1825]). Sur

les recherches menées auprès de l'École royale des Ponts et Chaussées, voir aussi: *Expériences faites en 1774 et 1775 pour connoître la force de la pierre et celle du fer posé verticalement*, manuscrit, ENPeC, Ms 2974; *Expériences sur différentes natures de pierres*, s.a., manuscrit, ENPeC, Ms 2176; *Expériences sur la résistance de pierres, des bois, de différente nature*, s.a., manuscrit, ENPeC, Ms

2176. Parmi les documents conservés dans les archives de l'école concernant les expériences sur la résistance des matériaux, voir *Résultat général des expériences de Messieurs Muchembrock [sic], Buffon et autres sur la force d'une poutre, ou de bois quelconque*, s.a. [1750 environ], manuscrit, ENPeC, Ms 2944. Le *Traité analytique de la résistance des solides* de Pierre-Simon Girard, publié en

1798, résume la première série d'expériences sur la résistance des matériaux traditionnels de construction.

⁴⁸ Rondelet, *Mémoire historique...*, *op. cit.*, p. 65.

⁴⁹ Navier, *Œuvres de M. Gauthey...*, *op. cit.*, p. 270.

⁵⁰ Navier, *Eloge historique de M. Gauthey*, in Navier, *Œuvres de M. Gauthey ...*, *op. cit.*, p. XXI.