Mario Salvadori

Comment ça tient ?

Traduit de l'anglais par Nadine Aucoc

Éditions Parenthèses

/ Mario Salvadori – Comment ça tient ? / ISBN 2-86364-636-2
www.editionsparentheses.com

Couverture :

Illustration d'après Katsuhiro Otomo, *Akira* (Éditions Glénat).

Remerciements

Je tiens à remercier :
George R. Collins, professeur d'histoire de l'art à l'université de Columbia, qui a bien voulu lire mon manuscrit, qui m'a fourni de précieux renseignements et m'a indiqué la bibliographie indispensable à la rédaction des chapitres historiques ;
Stephen Gardner, mon collègue à l'université de Columbia, sans l'aide de qui je n'aurais pas pu écrire le chapitre sur la cathédrale de Beauvais ;
Stephen Murray, de l'université de l'Indiana, qui m'a permis de lire, avant sa publication, son étude sur la reconstruction de la cathédrale de Beauvais ;
Saralinda Hooker et Christopher Ragus, pour leurs illustrations qui ont clarifié et donné toute sa signification au texte ;
David Christie de Hardesty and Hanover à New York, qui m'a permis d'utiliser des photographies de ponts, pour les figures 9.15 et 9.16 ;
La MIT Press, grâce à qui j'ai pu utiliser les figures 7.17 et 16.6 de l'ouvrage de Roland J. Mainstone, *Developments in Structural Form*, qui ont inspiré les dessins des figures 13.10 et 14.4 de ce livre ;
John Wiley & Sons, pour l'autorisation qu'ils m'ont donnée d'utiliser les figures 3.29 et 5.1 de l'ouvrage de Harry J. Cowan, The *Masterbuilders*, qui ont inspiré les dessins des figures 13.5 et 14.4 de ce livre ;
L'American Society of Civil Engineers, qui m'a permis de reproduire au chapitre 17, quelques éléments de leur étude n° 2823, ASCE Convention, Dallas, Texas, 25-29 avril 1977 ;
Shirley Branner, qui m'a autorisé à utiliser le dessin de la reconstruction de l'intérieur de la cathédrale de Beauvais du professeur Robert Branner, décédé ; Kenneth Snelson qui m'a également autorisé à utiliser la photographie de l'une de ses sculptures ;
je remercie également Edwin F. Barber, mon éditeur à W. W. Norton, pour sa patience et pour sa dédicace ;
Frederick Noonan, pour toute l'attention qu'il a apportée à la lecture de mon manuscrit ;
et Pearl Kaufman, pour son assistance éclairée.

COLLECTION PUBLIÉE
AVEC LE CONCOURS DE LA RÉGION PROVENCE-ALPES-CÔTE D'AZUR

COPYRIGHT © 1980, W. W. NORTON & COMPANY, INC., NEW YORK.

Édition originale : *Why buildings stand up*.

COPYRIGHT © 2005, ÉDITIONS PARENTHÈSES, 72, COURS JULIEN, 13006 MARSEILLE

ISBN 2-86364-636-2 / ISSN 1279-7650

/ Mario Salvadori – Comment ça tient ? / ISBN 2-86364-636-2
www.editionsparentheses.com

Préface

Ce livre a été écrit pour tous ceux qui apprécient les chefs-d'œuvre en matière de construction.

Inspiré par l'instinct inné de l'homme qui le pousse à vouloir construire, j'ai étudié, enseigné et imaginé des structures pendant une partie de ma vie. Maintenant, j'écris pour partager avec mes lecteurs, la passion que j'éprouve pour leur perfection.

Dans ce livre, chacun retrouvera l'historique des monuments les plus célèbres, et saura la façon dont ils ont été construits. En règle générale, les chapitres sur la technologie de l'architecture, précèdent ceux qui concernent les technologies particulières, mais certains préféreront peut-être se documenter sur les chefs-d'œuvre de l'architecture avant de connaître le secret de l'équilibre de leur construction.

L'architecture étant un heureux compromis entre l'art et la technique, je laisse le lecteur en tirer lui-même les conclusions.

Mario Salvadori

/ Mario Salvadori – Comment ça tient ? / ISBN 2-86364-636-2

www.editionsparentheses.com

 ISBN 2-86364-636-2

Chapitre 1

Les structures

L'aube de l'architecture

Si on la compare aux autres activités humaines, l'architecture est un art relativement jeune, dont les origines remontent à environ 10 000 ans. L'homme venait de découvrir l'agriculture et cessait de parcourir le monde à la recherche de sa propre subsistance. Jusque-là, ces nomades exposés aux intempéries vivaient sous des sortes de tentes en peaux de bêtes, et se regroupaient en petites tribus.

Lorsqu'ils devinrent sédentaires, les tentes furent remplacées par des abris plus solides, et les feux de bois par un foyer permanent au centre de la maison. Des huttes furent construites dans les régions fertiles. On assistait à la naissance du village, et les contacts entre les familles devinrent plus faciles et plus fréquents. Il fut alors nécessaire de créer des voies de communication traversant parfois rivières et ravins, et pour cela de fabriquer de rudimentaires passerelles avec des troncs d'arbres, ainsi que des ponts suspendus à l'aide de lianes.

Les constructions plus importantes servaient à la fois de lieu de culte et de point de rencontre pour discuter des problèmes du village. Il est d'ailleurs intéressant de constater que les besoins matériels de l'homme ayant été souvent complémentaires de ses besoins spirituels, la plupart des grandes réalisations archéologiques ont été motivées par des aspirations religieuses.

10 000 ans représentent plus de 300 générations, mais nous qui avons été témoins des énormes changements apportés à nos cultures par la révolution industrielle, nous savons parfaitement que l'architecture n'a pas beaucoup évolué, surtout depuis 6 000 ans. Cette constance dans la construction ne doit pas nous surprendre si nous réalisons que l'architecture répond à des impératifs purement physiologiques qui n'ont pas changé depuis l'apparition de l'homo sapiens, il y a environ 3 millions d'années. Notre alimentation est pratiquement la même que celle de nos ancêtres préhistoriques, nous dormons sur des surfaces horizontales (certes plus confortables aujourd'hui qu'alors), nous nous protégeons des intempéries, et nous procréons comme eux. Dans le domaine des arts et des sciences humaines, l'architecture est restée un élément très conservateur, puisqu'elle correspond encore à l'heure actuelle aux besoins éternels de l'homme. Même si nos aspirations spirituelles ont quelque peu changé, et se sont

/ Mario Salvadori – Comment ça tient ? / ISBN 2-86364-636-2

www.editionsparentheses.com

exprimées à travers différents rites, elles demeurent pratiquement les mêmes aujourd'hui qu'aux temps préhistoriques.

La concentration urbaine fut donc à l'origine des changements en architecture, d'ailleurs plus quantitatifs que qualitatifs. Par centaines et ensuite par milliers, les hommes se sont rassemblés dans des villages, puis dans des villes, où ils se sentaient plus en sécurité face à l'ennemi et où ils pouvaient exercer les métiers de commerçants ou d'artisans. Ainsi, l'explosion démographique amena tout naturellement à construire des bâtiments de plus en plus importants, et à clore des espaces de plus en plus vastes. À titre d'exemple, en 2 000 av. J.-C., les villes minoennes de Crète possédaient déjà des maisons à quatre étages, et certaines habitations des quartiers populaires de Rome en comptaient une dizaine.

Quant à nous qui sommes les héritiers de ces bâtisseurs, nous nous prenons pour les êtres les plus individualistes de l'histoire humaine. Et pourtant… Nous nous rassemblons dans de vastes salles pour assister au même spectacle, et nous vivons dans des sortes de « ruches » contenant des centaines d'appartements identiques ! Nous avons une certaine nostalgie de la nature et de la forêt… mais la plupart d'entre nous trouvent, malgré tout, les grandes artères de la ville plus efficaces et mieux adaptées à notre façon de vivre ! Aux États-Unis, plus de 75 % de la population vit dans des villes de plus de 100 000 habitants, et à l'heure actuelle une vingtaine de cités dans le monde comptent au moins 7 millions d'individus dont trois (New York, Chicago et Los Angeles) aux États-Unis. Il faut donc se rendre à l'évidence, l'isolement relatif de la campagne ne correspond plus exactement à notre mode de vie depuis son développement socioculturel.

L'essentiel de la science et de la technologie est de répondre aux véritables besoins de l'humanité. Et si l'architecture n'a pas beaucoup évolué dans ses aspects fonctionnels, elle a en revanche subi une fantastique révolution technique qui, grâce aux découvertes industrielles et scientifiques, lui a permis de satisfaire aux exigences de la ville.

Fonction et structure

Le but d'une construction est de remplir une *fonction*. Et la fonction de la plupart des constructions est de créer des espaces clos (pouvant communiquer entre eux), destinés à protéger les individus contre les intempéries. Beaucoup ont une destination privée : ce sont les appartements. D'autres, moins nombreux, ont une destination publique, culturelle ou religieuse. Murs et toits ont d'une part une fonction commune : séparer l'extérieur de l'intérieur, et d'autre part, une fonction propre : les toits ayant pour but de protéger les bâtiments contre la neige et la pluie, et les murs devant être percés de fenêtres et de portes, pour laisser circuler librement l'air et l'homme. Par analogie avec le corps humain, *l'enveloppe fonctionnelle* d'un bâtiment est appelée sa *peau*. À l'intérieur de cette peau, la séparation des espaces nécessite la construction de planchers, de cloisons, d'escaliers ou d'ascenseurs.

/ Mario Salvadori – Comment ça tient ? / ISBN 2-86364-636-2
www.editionsparentheses.com

Le rôle des *éléments structuraux* est de soutenir la construction. Ainsi, colonnes, poutres et planchers (la structure proprement dite) rendent possible la fonction architecturale. Si l'on prend l'exemple des tentes de nos ancêtres, les composants fonctionnels et structuraux étaient nettement séparés. L'espace intérieur, fait de peaux de bêtes, représentait l'élément fonctionnel, alors que le mât central et les cordes qui le maintenaient représentaient les éléments structuraux. Encore une fois, par analogie avec le corps humain, la composition structurale est appelée *ossature* ou *structure* du bâtiment.

C'est dans le développement de la structure que l'architecture a subi une révolution. Nos gratte-ciel, atteignant maintenant des hauteurs de près de 460 m, et nos stades couverts, mesurant quelquefois jusqu'à 215 m, exigent des structures incomparablement plus complexes et plus solides que celles du passé. Le développement a demandé à la fois de nouvelles connaissances théoriques de conception et de nouveaux matériaux de construction.

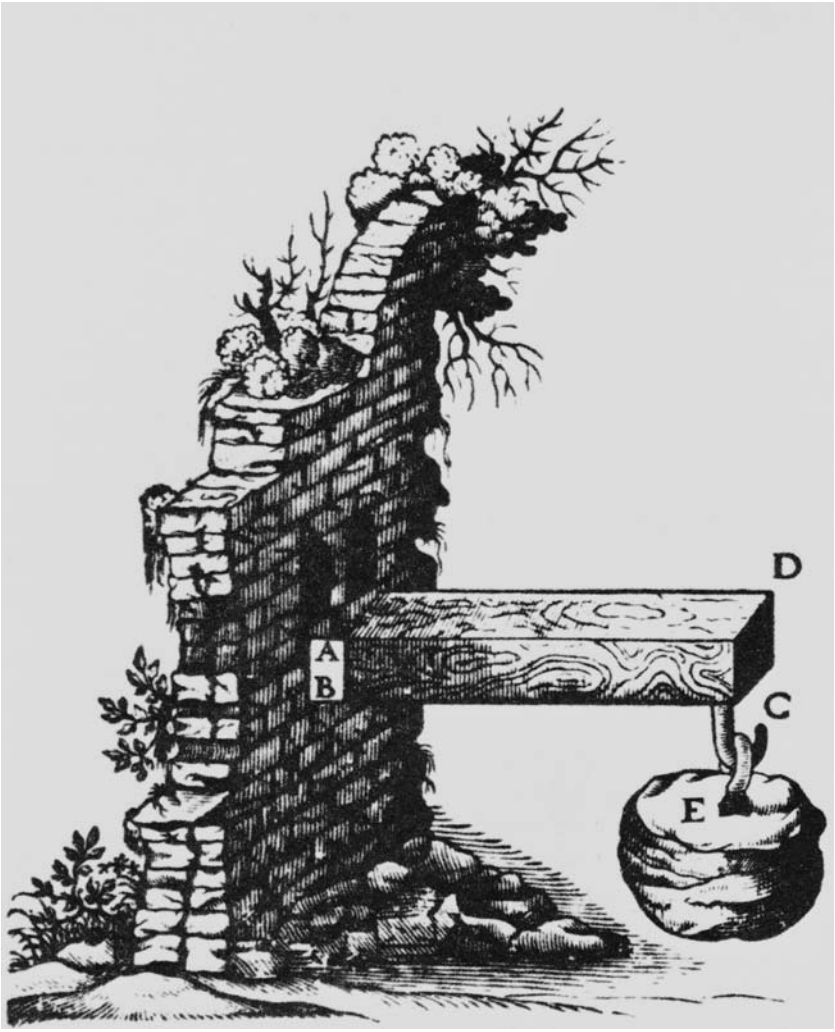
Pour construire, dans le passé on procédait par expériences successives. Chaque constructeur voulait aller plus loin que son prédécesseur, jusqu'à ce que, face à l'échec, il s'aperçoive qu'il avait dépassé les limites de son système de structure. Ainsi, l'audacieux dôme de Sainte-Sophie, à Constantinople, l'un des plus importants de l'Antiquité, dont la première réalisation remonte à 537 av. J.-C., s'effondra deux fois ! Reconstruit pour la troisième fois, il tient encore debout aujourd'hui… Il en est de même pour la cathédrale gothique de Beauvais, qui s'affaissa deux fois avant que les maîtres maçons des XIVe et XVIe siècles comprennent les possibilités réelles et les limites de ce type d'édifice. À la fin du XVe siècle, Léonard de Vinci connaissait parfaitement la façon dont une poutre travaille. En revanche, le grand physicien Galilée, que l'on appelle souvent le père de la physique moderne, pensait qu'une *poutre en console* (du genre de celles qui supportent les balcons) avait tendance, sous l'action d'une lourde charge à son extrémité, à pivoter autour du bord inférieur encastré dans le mur porteur [B dans la fig. 1.1]. 150 ans avant lui, Léonard de Vinci savait qu'une telle poutre au contraire tend à pivoter autour de son axe à mi-chemin entre sa surface supérieure et celle de sa base [1].

Aujourd'hui, la théorie mathématique des structures, partie essentielle de la physique, a permis de battre tous les records en matière de construction. Ces triomphes ont été obtenus grâce à l'usage des ordinateurs, merveilles électroniques capables d'effectuer des millions d'opérations à la seconde, tout en prenant simultanément des décisions logiques [2]. Les plans ainsi calculés étaient impossibles à obtenir il y a seulement vingt ans, non par manque de connaissances théoriques, mais parce qu'ils auraient demandé des années ou même des siècles de calculs à la main. Cependant, l'ordinateur « infaillible » est

[1] Ceci fut seulement redécouvert au début du XIXe siècle, par le physicien et mathématicien français Henri Navier (1785-1836).

[2] L'ordinateur peut, par exemple, comparer le résultat d'un calcul avec un nombre donné et, en fonction des résultats (s'il est plus petit, égal à, ou plus grand que le nombre donné), continuer, s'arrêter ou recommencer les calculs, en tenant compte du résultat obtenu.

/ Mario Salvadori – Comment ça tient ? / ISBN 2-86364-636-2
www.editionsparentheses.com



1.1 Théorie de la poutre de Galilée (*Due Nuove Scienze*, 1638).

/ Mario Salvadori – Comment ça tient ? / ISBN 2-86364-636-2

www.editionsparentheses.com

programmé par des hommes qui ne le sont pas. Aussi l'ingénieur compare-t-il toujours le résultat obtenu par ordinateur à celui que sa propre expérience lui suggère.

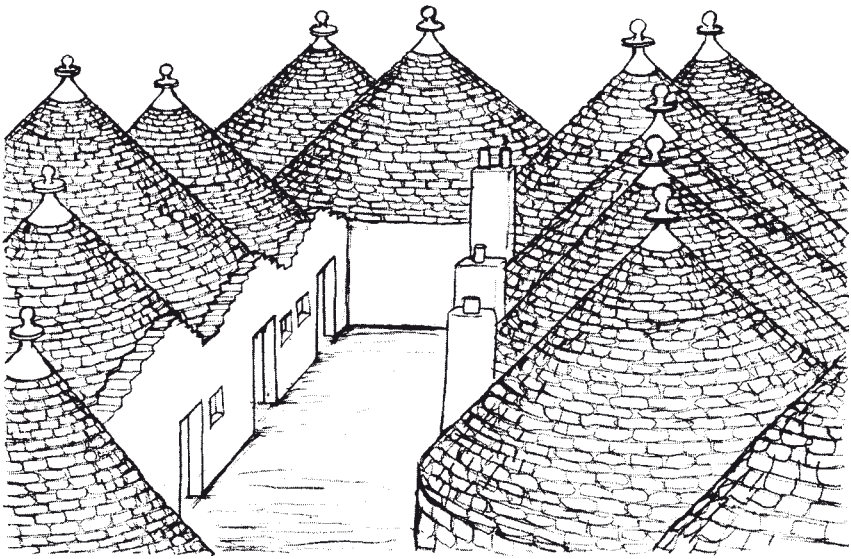
Le développement du matériel de construction n'est pas allé de pair avec les besoins correspondant à la réalisation des concepts théoriques d'avant-garde. Excepté pour le béton armé et précontraint, ou l'acier à haute résistance, les matériaux que nous utilisons sont très semblables à ceux qu'utilisaient nos ancêtres. Bois, pierre, maçonnerie et brique dominent encore la construction et doivent être utilisés dans un but compatible avec leurs propriétés qui sont demeurées pratiquement inchangées depuis des siècles. Ainsi, tandis que l'aspiration du genre humain à atteindre le ciel (le fameux « complexe de la Tour de Babel ») nous conduit à bâtir des édifices de plus en plus élevés, nous constatons que l'un des plus grands de notre époque (la Sears Tower à Chicago) n'est que trois fois plus haut que la pyramide de Khéops vieille de 5 000 ans. Notre plus grand hall couvert (le Louisiana Superdôme) a une portée de 207 m, qui n'est que quatre fois et demie celle de 45 m du dôme du Panthéon construit à Rome il y a 1 800 ans.

La supériorité des matériaux modernes présente de gros avantages sur le plan économique, compte tenu de leur dimension. Nos grands édifices sont extrêmement légers et leur coût de construction est moins élevé que par le passé. Le dôme de Saint-Pierre (la plus grande église de la chrétienté), dont la portée est de 42 m, possède en réalité non pas un, mais deux dômes en brique, et pèse environ 678 kg/m². Alors que le dôme du CNIT [3] (palais des expositions à Paris), double dôme en béton et cinq fois plus grand que celui de Saint-Pierre, pèse seulement 140 kg/m².

On pourrait alors supposer que la forme et la taille des édifices dépendaient essentiellement de la qualité des matériaux de construction. Bien que ce soit relativement exact à notre époque, il est tout de même très intéressant de constater que les doctrines spirituelles et religieuses ont eu une énorme influence sur la construction traditionnelle. Prenons comme exemple les Indiens de Patagonie : vivant à l'extrême pointe de l'Amérique du Sud, sous un des pires climats du monde, et exposés à un vent permanent et infernal soufflant de l'Antarctique, ils étaient capables de construire de magnifiques dômes en pierre pour leurs églises et cela, sans l'aide des moyens mécaniques dont nous disposons à l'heure actuelle. Pendant ce temps, eux-mêmes vivaient à l'air libre, et dormaient derrière des brise-vent faits de dalles de pierre verticales ! Malgré l'environnement hostile, un profond respect pour leurs dieux leur interdisait de construire leurs maisons comme les églises. Si maintenant nous nous tournons vers les pays arabes, leurs croyances religieuses les obligent à orienter leurs maisons vers La Mecque, exactement comme le mihrab à l'intérieur des mosquées.

[3] Centre national des industries et des techniques.

/ Mario Salvadori – Comment ça tient ? / ISBN 2-86364-636-2
www.editionsparentheses.com



1.2 Les *trulli* de l'Italie du Sud.

Dans la plupart des constructions, les buts fonctionnels et structuraux sont atteints grâce à des composants de natures diverses. Ainsi, un *curtain wall* [4] est fait de minces étais verticaux en métal, ou meneaux, dans lesquels s'encastrent les grands panneaux de verre qui constituent la majeure partie de la surface du mur. Le mur rideau, construit en fonction de l'éclairage et du conditionnement de la température, ne peut se maintenir par lui-même. Il est supporté par un cadre, en acier ou en béton, qui constitue l'ossature de la construction. Par ailleurs, aussi bien dans l'architecture traditionnelle que dans les projets modernes, et tout spécialement lorsqu'il s'agit de très grandes surfaces, la structure peut devenir tellement importante qu'elle peut prendre le pas sur la demande fonctionnelle du bâtiment lui-même. Tel est le cas des grands espaces couverts par des dômes en béton. Dans la construction traditionnelle en brique, les fenêtres et les portes jouent à la fois le rôle de composants fonctionnels et structuraux. Dans certaines villes de l'Italie du Sud, les *trulli*, de forme ronde, couverts d'un dôme, et dont la structure est entièrement en pierre sans composants fonctionnels séparés, sont l'exemple typique de l'intégration de la structure et du fonctionnel dans le logement traditionnel [fig. 1.2].

La plus grande réussite des constructions modernes a été de pouvoir supporter des charges sans être gênées par des obligations fonctionnelles.

[4] *Curtain wall* : mur rideau.

/ Mario Salvadori – Comment ça tient ? / ISBN 2-86364-636-2

www.editionsparentheses.com

Prenons l'exemple des ponts. Sous l'Empire romain, toutes les routes menaient à Rome, parce que les Romains reliaient à la capitale les provinces les plus éloignées, grâce à un réseau routier de 80 000 km. Le voyage de Londres et de Bagdad jusqu'à la Ville éternelle imposait de franchir d'innombrables rivières sur un type de pont, vulgarisé par les Romains (qui pourtant n'en étaient pas les auteurs), le pont en arche, en brique ou en pierre, et dont la portée pouvait atteindre 30 m. De nos jours, la fabrication de câbles d'acier à haute résistance a permis aux ingénieurs modernes de concevoir des ponts suspendus, d'une portée de 1 800 m. Nous faisons donc soixante fois mieux que les Romains en matière de ponts, cependant, nous sommes limités à des réalisations plus modestes dans d'autres types de construction.

Y a-t-il un espoir d'aller encore plus loin ? Si nous prenons en considération les facteurs économiques, et si nous nous en tenons à l'acier, la seule façon de dépasser nos limites actuelles est d'en améliorer la résistance. Ceci est faisable, mais uniquement dans les limites de sa composition moléculaire. En matière de construction, comme dans d'autres domaines, les désirs humains sont souvent contrecarrés par les lois de la nature.

Architectes et ingénieurs

Bien que les composants fonctionnels et structuraux de l'architecture soient le plus souvent distincts, la structure a toujours eu une influence décisive sur l'architecture. Indépendamment du fait que ceci soit inévitable, nous devons prendre en considération que la structure obéit aux lois de la nature et ne peut pas toujours s'accommoder des désirs de l'architecte. En revanche, cette structure, cependant nécessaire, est souvent cachée et ne semble pas contribuer à l'architecture qu'elle supporte : elle est à l'architecte, ce que l'avocat est à l'accusé, un démon nécessaire ! En définitive, la structure est onéreuse. Pas démesurément, si on la compare au coût du reste de la construction, mais onéreuse tout de même. La plupart du temps, le coût de la structure représente le 1/4 ou le 1/5 du coût global, mais dans certains cas, que ce soit pour un pont ou pour une très grande surface, c'est l'élément essentiel du prix de revient.

La structure est souvent une cause de friction entre l'architecte et son ingénieur. Un bon architecte aujourd'hui doit être un « généraliste ». Non seulement il doit parfaitement connaître la distribution de l'espace, les techniques de construction et tout ce qui concerne l'équipement électrique et mécanique, mais il doit avoir également des connaissances en matière de finances, d'immobilier, de relations humaines et de sociologie. De plus, c'est un artiste qui se doit d'exprimer ses goûts personnels et avoir un sens profond de l'esthétique.

L'ingénieur, lui, est par sa formation et sa mentalité un pragmatique. C'est un spécialiste en ce qui concerne certains aspects spécifiques de la technique, mais un spécialiste parmi tant d'autres. Profitant du développement de certaines techniques nouvelles, les ingénieurs contemporains se spécialisent : certains en béton armé, d'autres uniquement en couverture d'une certaine forme.

/ Mario Salvadori – Comment ça tient ? / ISBN 2-86364-636-2
www.editionsparentheses.com

Le dialogue entre l'architecte et l'ingénieur devient alors difficile, ces deux personnalités étant vouées à se heurter. Aussi, le client dont l'architecte fait l'effort de « comprendre » la structure, et dont l'ingénieur apprécie le côté esthétique de l'architecture, peut s'estimer heureux ! En dernier ressort, l'architecte est le chef de l'équipe de construction et à lui seul reviennent la responsabilité et la gloire du projet. Les ingénieurs sont sous ses ordres. Ne dit-on pas d'ailleurs qu'un ingénieur est un fou qui peut faire pour un dollar ce que n'importe quel autre fou peut faire pour deux ?…

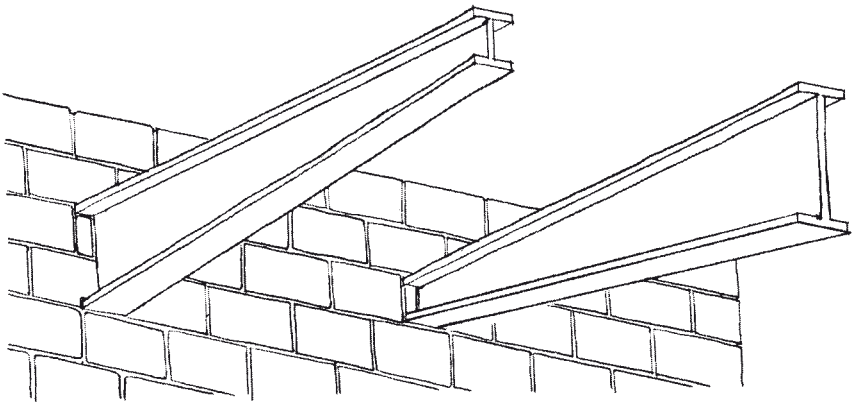
La structure et le profane

Quelle est la place du profane au milieu de cette controverse professionnelle ? Avant tout, il est l'homme pour lequel la construction a été réalisée, ou l'un de ceux qui l'utiliseront. Bien que son rôle ne soit pas déterminant, on devrait lui accorder plus d'importance. Nous pouvons d'ailleurs constater que l'intérêt du public pour l'architecture s'est considérablement développé durant ces dernières années. Nous savons par le psychologue que notre environnement a une très grande influence sur l'efficacité de notre travail et sur notre comportement. Le sociologue nous a appris que les plans de nos immeubles favorisent ou préviennent les crimes. L'écologiste a prouvé que la construction crée la pollution. L'économiste a insisté sur le fait que l'énergie nécessaire au chauffage d'un bâtiment dépend essentiellement de sa conception. Quant à l'historien en architecture, il n'hésite pas à dire que notre ville est le reflet de notre culture… Ainsi, le profane est non seulement conscient de l'apparence et de l'impact esthétique des édifices, mais il s ait parfaitement faire la différence entre un appartement bien ou mal conçu. De plus, il est tout à fait concerné par les économies d'énergie et la réduction de la pollution. À l'heure actuelle, tous les aspects essentiels de l'architecture intéressent le grand public, qui participe de plus en plus au développement de nos villes, immeubles, parcs et monuments.

En revanche, en ce qui concerne la structure proprement dite, peu de profanes cherchent à comprendre le pourquoi et le comment du travail des forces, et beaucoup se jugent incompétents en la matière. Est-il donc indispensable d'avoir un esprit scientifique et d'acquérir des connaissances techniques pour comprendre l'influence des problèmes fondamentaux de la structure ? Si l'on se tourne vers le passé, les édifices, même les plus grands et les plus audacieux, étaient construits par des artisans qui n'avaient pas de connaissances théoriques et bâtissaient grâce à leur intuition des principes de structure. Dans la vie quotidienne, nous avons tous ce genre d'intuition. Ainsi, nous savons parfaitement qu'à la base d'une construction les piliers doivent être plus larges qu'à son sommet, puisqu'ils supporteront les poids accumulés des différents étages. Nous comprenons également comment une arche travaille, ainsi que l'a décrit Léonard de Vinci : « Une arche est faite de deux pièces de moindre résistance, qui, s'appuyant l'une sur l'autre, forment un ensemble solide. » Sans aucune connaissance théorique, nous sommes prêts à dire qu'une console (comme celle qui supporte un balcon) est « correcte », si elle est plus étroite du côté opposé à la partie encastrée, et « incorrecte » dans le cas inverse [fig. 1.3]. Nous pouvons

/ Mario Salvadori – Comment ça tient ? / ISBN 2-86364-636-2

www.editionsparentheses.com



1.3 Poutres cantilever, correcte et incorrecte.

même en avoir une appréciation esthétique et dire dans le premier cas que la poutre est « belle », et « laide » dans le second. De plus, nous savons que les lois physiques en matière de construction n'ont pas changé depuis des siècles, et qu'au Japon par exemple, le pont suspendu Akashi-Kaikyo, de 1780 m de long, travaille exactement comme les passerelles rudimentaires d'il y a mille ans !

Une autre raison subtile nous attire vers le monde des structures. Exprimant l'un des nombreux aspects de la créativité humaine, une structure est un « artefact » qui ne peut être conçu sans un profond respect des lois de la nature. Lorsque le célèbre ingénieur italien, Pier Luigi Nervi, l'un des pionniers du béton moderne et le dernier des grands maîtres constructeurs, vit le pont George Washington à New York, son premier mot fut : « Dire qu'avant qu'il soit construit l'homme n'avait jamais vu d'aussi jolies courbes ! » Ceci, naturellement, n'implique pas qu'une structure correcte soit nécessairement belle, mais plus exactement que la perfection structurale conduit inévitablement à la beauté.

Indépendamment du fait qu'elle remplit une fonction, l'architecture adresse un message au profane, à travers ses formes variées et significatives. Aucun passant ne confond une église avec une prison ! En revanche, il n'est peut-être pas aussi évident qu'une structure ait son message propre : ce peut être un message de force ou d'élégance, de gaspillage ou d'économie, de laideur ou de beauté, mais sans elle l'architecture ne peut exister.

Nous pouvons donc conclure que les qualités essentielles de la structure sont l'utilité, l'économie, l'énergie et la sécurité, sans pour autant oublier son aspect créatif et esthétique. Ce n'est d'ailleurs pas sans raison que certains grands esprits du passé se sont consacrés à son étude, et que chacun de nous, plus ou moins consciemment, est intéressé par la découverte des mystères de ses lois.

/ Mario Salvadori – Comment ça tient ? / ISBN 2-86364-636-2

www.editionsparentheses.com

Chapitre 2

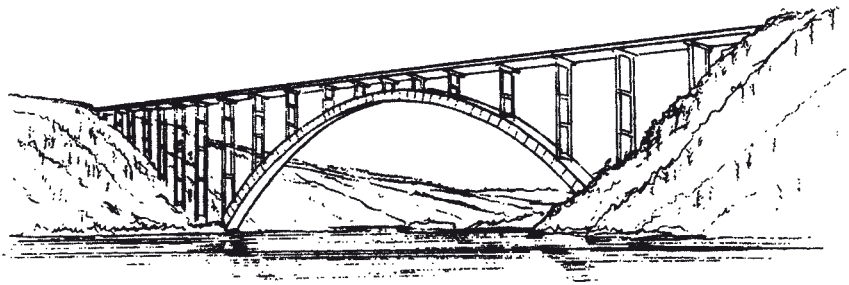
Les pyramides

Que sont-elles ?

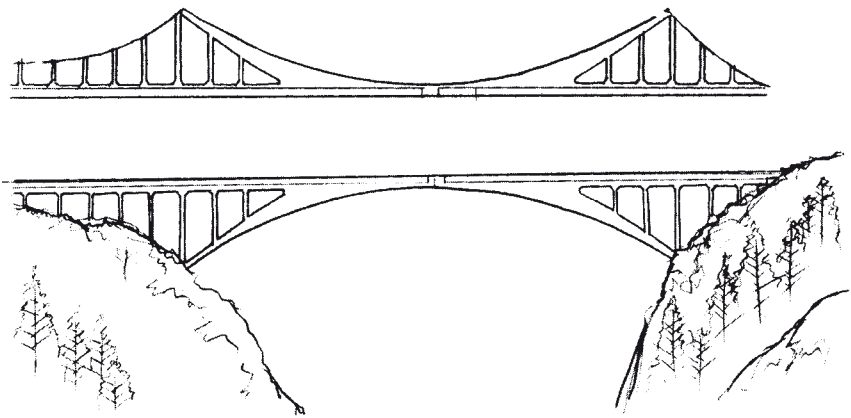
Montagnes artificielles, elles semblent avoir toujours été là, sur la rive ouest du Nil. Mais que sont-elles ? Des tombes, certainement ; ou bien des cénotaphes : sortes de tombeaux qui n'étaient pas destinés à contenir le corps des pharaons. Peut-être aussi des instruments astronomiques établissant le nord magnétique. Ou encore de gigantesques édifices publics, destinés à donner un emploi à des centaines ou des milliers de paysans durant les crues d'automne du Nil, lorsque sur des milliers de kilomètres ses rives ne pouvaient être cultivées. Ont-elles été des temples au dieu-soleil, adoré par la puissante élite du clergé d'Héliopolis qui avait supplanté celle de Memphis, et avait gouverné le pays sous couvert du pharaon ? Finalement, on peut se demander si elles n'ont pas été tout cela, et plus encore peut-être, puisqu'elles furent construites sur une période de 2 500 ans, et plus particulièrement sous l'Ancien Empire, qui dura 500 ans, de -2686 à -2181.

Trois pyramides surpassent les quatre-vingts connues à ce jour : la pyramide de Khéops, comme Hérodote la nommait (ou Khoufoui pour lui donner son nom égyptien), la pyramide de Khéphren (Khâfrê), qui n'a que 6,70 m de moins que celle de Khéops, mais dont le volume est de 15 % inférieur, et celle de Mykérinos (Menkaourê), qui n'est que le 1/10 des deux autres. Ces pyramides représentent le plus grand ensemble de monuments construits par l'homme et le plus célèbre de l'Histoire. Monuments religieux, gage de respect des Égyptiens, ils veillent « silencieux », dans le silence du désert africain — 13 millions de tonnes de blocs de calcaire, mystère des mystères, adressant un message perpétuellement changeant à travers les siècles, les plus vieux monuments du monde et en même temps les plus grands ! Forteresses qui ont su résister aux attaques des musulmans à la recherche de leurs trésors mythiques. Source d'inspiration pour les troupes de Napoléon, qui exhortait ses soldats en disant « Du haut de ces pyramides, quarante siècles vous contemplent ». But convoité des aventuriers et des archéologues cherchant à pénétrer dans la Chambre du Roi. Trésors incalculables, pillés par les voleurs du Moyen Empire qui, de -2133 à -1786, pénétrèrent dans les chambres pourtant bien cachées, et dérobèrent des milliers et des milliers d'objets en or, contraignant les prêtres d'Héliopolis à reboucher maintes et maintes fois leurs entrées. Elles furent enfin une course inépuisable de récits

/ Mario Salvadori – Comment ça tient ? / ISBN 2-86364-636-2
www.editionsparentheses.com



9.5 Pont à arche de Krk en Yougoslavie.

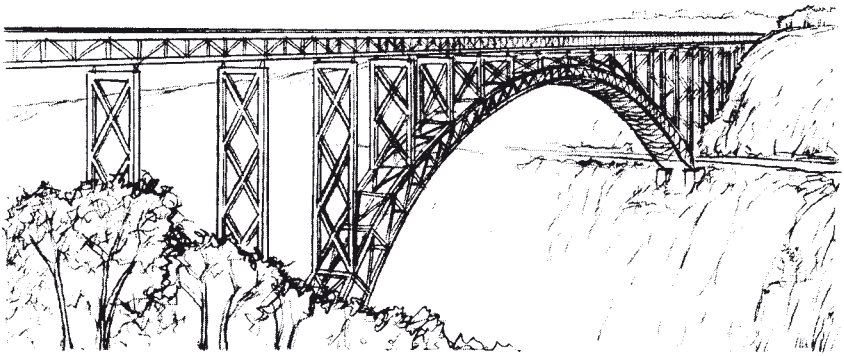


9.6 Pont en béton de Maillart.

plus légers) préfabriqués sur le terrain même, et montés au sommet du cintre, où leurs barres d'armature sont soudées. Les blocs sont alors « collés » les uns aux autres par un solide mortier. L'un des plus grands ponts en béton armé à une arche est celui qui relie l'île de Krk, dans l'Adriatique, à la Yougoslavie — sa portée est de 390 m [fig. 9.5]. Pour supporter le tablier, des montants verticaux de longueurs différentes ont dû être placés au-dessus de l'arc (ceux-ci agissent à l'inverse des tiges de suspension métalliques des ponts suspendus). Le poids du tablier, joint à celui des véhicules, appuie sur les montants qui sont alors comprimés ; quant au tablier, il est maintenu par une série de poutres de rigidité reliant les montants entre eux. Ces poutres, résistantes à la flexion, et le tablier lui-même contribuent à la rigidité totale du pont à arche unique, et agissent comme les armatures rigides d'un pont suspendu. Les ponts très élégants de l'ingénieur suisse Robert Maillart ont une arche unique en béton très mince (quelquefois 18 cm d'épaisseur seulement, sur une distance d'environ 100 m), qui partage avec les poutres et dalles en béton du tablier la tâche de supporter les charges. Une figure renversée d'un pont de Maillart ressemble exactement à un

/ Mario Salvadori – Comment ça tient ? / ISBN 2-86364-636-2

www.editionsparentheses.com



9.7 Le pont New River Gorge en Virginie occidentale.

pont suspendu, rendant parfaitement explicite le comportement à la fois opposé et analogue de ces deux sortes de ponts [fig. 9.6].

Les plus grands ponts à arche du monde sont aujourd'hui construits en acier. Ils ressemblent aux ponts en béton armé, travaillent comme eux et ont généralement l'avantage d'être plus légers, grâce à la haute résistance de l'acier en compression. À l'heure actuelle (1980), le plus long de tous est le New River Gorge Bridge, dans l'ouest de la Virginie — sa portée est de 520 m environ [fig. 9.7]. Auparavant, c'était le Kill Van Kull Bridge, reliant Staten Island à New Jersey, mais pas de beaucoup : il n'avait à dessein, que 1,50 m de plus que le célèbre pont en acier à l'entrée du port de Sydney en Australie, uniquement pour permettre aux États-Unis de se vanter de posséder le pont à arche le plus long du monde !

Les ponts de chemin de fer

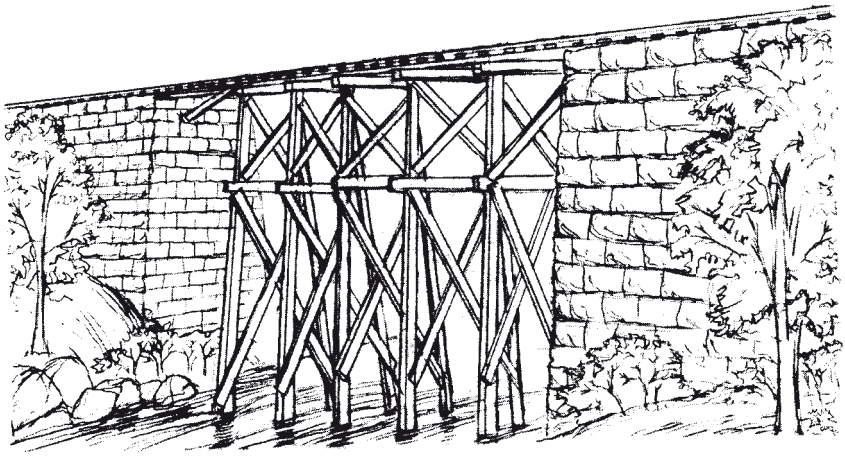
L'époque héroïque de construction des ponts coïncida avec l'expansion des chemins de fer en Grande-Bretagne et aux États-Unis. La première locomotive moderne, la Rocket, fut inventée et construite par George Stephenson, en 1829, et le premier convoi de passagers fut inauguré en Angleterre en 1825. Mais le plus grand exploit du rail fut la traversée de l'Ouest américain au XIXe siècle — soit la réalisation des réseaux de chemins de fer de Baltimore et de l'Ohio, de l'Érié, et de la Pennsylvanie, et le premier transcontinental, l'Union Pacific, terminé en 1860.

Si l'on oublie la violence et les mésaventures qui caractérisèrent cette région, on éprouve une certaine nostalgie pour les vieux chemins de fer, dont la meilleure preuve est l'engouement pour les jeux électriques, quel qu'en soit leur prix ! Enfants et parents sont également passionnés, pour le plus grand bonheur de chacun.

Pour transporter les charges sans précédent des locomotives et de leurs wagons, au-dessus des gorges profondes ou des larges rivières, il fallait de toute urgence construire toutes sortes de nouveaux ponts, dont il

/ Mario Salvadori – Comment ça tient ? / ISBN 2-86364-636-2

www.editionsparentheses.com

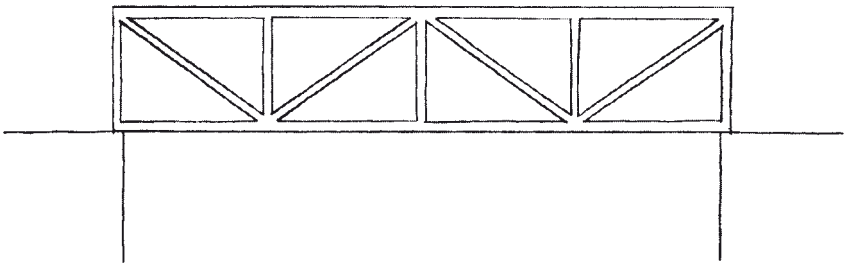


9.8 Chevalets en bois.

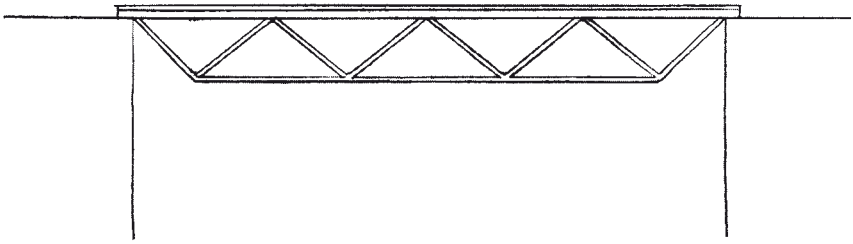
était nécessaire d'augmenter la résistance. Après avoir construit quelques travées en bois, la plupart du temps en forme de *chevalets* [fig. 9.8], semblables à d'immenses tours en madriers reliés entre eux par des grosses poutres plus courtes, le nouveau métal miraculeux, l'acier, fut universellement adopté. Arcs d'acier, armatures, ponts cantilever — levants, basculants et tournants — poussèrent comme des champignons dans tout le pays. Après l'exemple de l'Angleterre, la France construisit vers 1840 le plus grand réseau ferroviaire d'Europe. Puis ce fut le tour de l'Allemagne, de l'Italie et de la Russie. L'écartement des voies fut standardisé à une largeur de 1,4827 m vers 1880, et, pour environ cent ans, le chemin de fer régna en maître sur le monde ! Cet écartement est curieusement celui des roues de diligence.

Le *pont métallique à poutres en treillis* était la structure la plus courante pour permettre aux voies ferrées de franchir rivières et vallées. Nous analyserons donc en premier lieu la façon la plus ingénieuse d'augmenter la portée des poutres, ce qui suppose l'usage de barres d'acier rigides, travaillant seulement en tension ou en compression. Le poids propre d'une poutre à longue portée, dont la charge est croissante, augmente rapidement mais pas en proportion des charges qu'elle doit supporter. Nous avons vu au chapitre 5, l'efficacité d'un profilé en I, à condition que son épaisseur soit augmentée et que les membrures soient les plus écartées possible. C'est donc à partir de là que l'idée du treillis a germé. Pour alléger l'âme, pourquoi ne pas y percer des trous ? Finalement, étant donné les dimensions de la poutre, elle devient un élément pratiquement impossible à fabriquer ; dans ces conditions, pourquoi ne pas la construire sur place, en réalisant un treillis fait de tiges d'acier verticales et obliques, reliant la barre supérieure à la barre inférieure [fig. 9.9] — ce qui donne une poutre à âme ajourée. Dans ce système, les *mailles ou trous* créés par les tiges de l'âme doivent avoir une forme triangulaire, car, ainsi que l'a dit le célèbre constructeur de ponts à grande portée, John Roebling, le triangle est « la figure

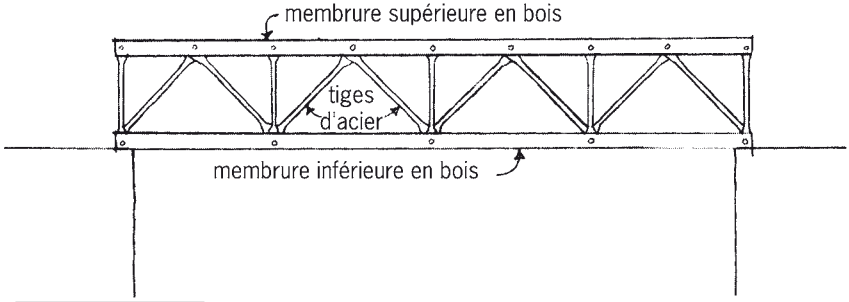
/ Mario Salvadori – Comment ça tient ? / ISBN 2-86364-636-2
www.editionsparentheses.com



9.9 Pont métallique à poutres en treillis.



9.10a Poutrelle d'acier.

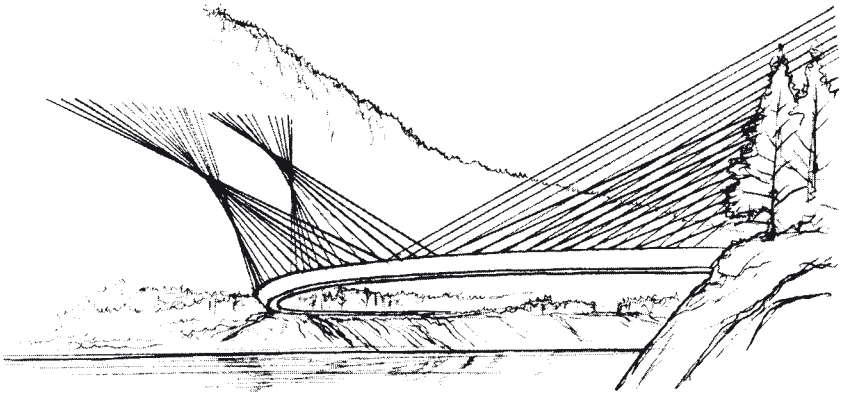


9.10b Poutrelle d'acier avec membrures (ou tirants) en bois.

géométrique la moins déformable ». On obtient ainsi un *treillis triangulé* qui peut être aussi épais que nécessaire, et nettement moins lourd qu'une poutre à âme pleine.

Puisqu'un treillis maintenu à ses extrémités n'est rien d'autre qu'une poutre ajourée en I, sa membrure supérieure ou *tirant* est en compression, tandis que sa membrure inférieure travaille en traction (chapitre 5). Les barres de l'âme de la poutre subissent une traction et une compression équivalant à celle de la poutre en treillis elle-même, et travaillent en tension ou en compression, en fonction de leur inclinaison. Par ailleurs, puisque toutes les barres du treillis sont soit tendues, soit comprimées, elles travaillent de manière plus efficace que les différentes couches d'une poutre dans laquelle le matériau

/ Mario Salvadori – Comment ça tient ? / ISBN 2-86364-636-2
www.editionsparentheses.com



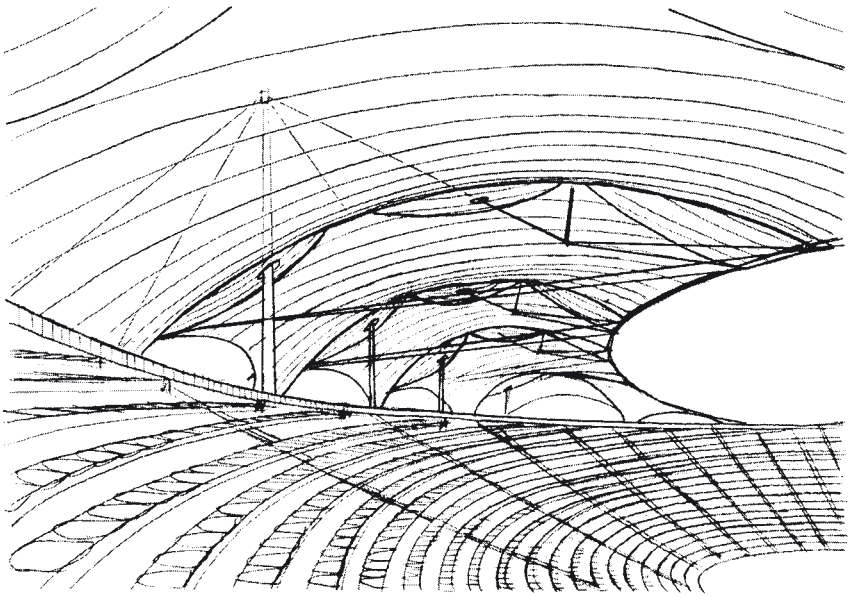
15.3 Le pont suspendu Ruck-a-Chucky de T. Y. Lin (projet).

pour les déchirer. Et, qui plus est, ils sont « autonettoyants », car la poussière n'y adhère pas, et ils ne s'enflamment qu'à des températures supérieures à 538°C. On ne peut pas les couper, même avec une hachette, et on peut en faire varier la transparence, de la luminosité la plus totale, jusqu'à la plus complète opacité. Leurs propriétés réfléchissantes en font d'excellents isolants contre la chaleur du soleil en été, tandis que leur transparence en laisse pénétrer les rayons en hiver. Une fois encore, la chimie est venue à l'aide de l'ingénieur.

L'usage de ces nouveaux tissus miracles est limité par deux impératifs. Le premier est leur coût : ils sont environ trois à quatre fois plus chers que les vinyles moins résistants, bien que leur durée de vie, supérieure à 20 ans, compense cet inconvénient. Le second est leur résistance : aussi élevée qu'elle puisse être, elle n'est pas suffisante pour franchir de grandes distances (car plus la portée est importante, plus la membrane doit être rigide). Pour surmonter ce dernier obstacle, il n'y avait rien de mieux à faire qu'à regarder la nature ! L'araignée nous ayant montré comment tisser une toile de fils fins mais solides, sur des distances énormes par rapport à leur diamètre, nous avons également tissé des toiles avec des câbles en acier, capables de supporter des charges aussi lourdes que celles d'un pont suspendu. Le pont suspendu Ruck-a-Chucky, proposé par T. Y. Lin, qui fut le maître du béton précontraint aux États-Unis, devait être soutenu par des câbles ancrés en plusieurs endroits sur les deux rives du fleuve, tout comme s'il était pris dans une gigantesque toile d'araignée [fig. 15.3]. Lorsqu'un réseau de câbles est arrimé à différents points d'ancrage, il est facile d'y suspendre la membrane synthétique, qui peut alors être tendue parfaitement entre les câbles. L'architecte allemand Frei Otto, a été l'un des pionniers de ce type de toiture, qui consiste en un réseau de câbles fins, suspendus à des câbles beaucoup plus gros, qui eux-mêmes sont soutenus par des mâts en acier ou en aluminium. Après avoir construit la tente du pavillon de l'Allemagne de l'Ouest, à l'Exposition de Montréal en 1967, il réussit l'exploit de couvrir les 75 000 m² du stade olympique de Munich [fig. 15.4], en 1972. Cette immense couverture est

/ Mario Salvadori – Comment ça tient ? / ISBN 2-86364-636-2

www.editionsparentheses.com



15.4 Structure tendue du stade olympique de Frei Otto, à Munich.

soutenue par neuf mâts en compression, de 80 m de haut, et par des câbles de précontrainte dont la capacité atteint jusqu'à 4 500 t (l'araignée, en l'occurrence, n'est pas facile à imiter — ce toit a nécessité 40 000 heures de calculs et de dessins). Aujourd'hui (1980), la plus grande surface recouverte par une tente se trouve à La Mecque. Ce projet de Horst Berger, destiné à abriter les pèlerins musulmans, occupe une surface de 93 000 m² soit 9,3 ha.

L'une des caractéristiques à la fois élégante et indispensable des couvertures à membranes précontraintes est leur forme géométrique. Si l'on tient un mouchoir par deux coins opposés, et si l'on essaie de le précontraindre en tirant sur les deux autres coins, on s'aperçoit que le mouchoir est parfaitement tendu, en tirant deux coins vers le haut et les deux autres vers le bas. Il prend alors la forme d'une selle, comme nous pouvons le voir sur la figure 15.5. Heureusement, ce genre de *surfaces en selle*, qui sont les seules surfaces capables de tendre une membrane, sont effectivement d'un aspect agréable.

En améliorant sans cesse et avec succès la formule des toitures de plus en plus vastes, soutenues par des éléments tendus, on en est arrivé à ce que le réseau de câbles devienne le principal composant structural, et à ce que la membrane soit remplacée par d'autres matériaux. En 1950, un projet étonnamment astucieux, destiné à supporter un réseau de câbles, fut suggéré par l'architecte polonais Nowicki, pour le « Cow Palace » à Raleigh, en Caroline du Nord. Son principe, la simplicité même, est une extension de celui utilisé pour le traditionnel « fauteuil de directeur » [fig. 15.6a], soit un siège en toile, monté sur quatre pieds croisés, en bois, et pivotant à leur point de jonction (à l'avant et à l'arrière

/ Mario Salvadori – Comment ça tient ? / ISBN 2-86364-636-2

www.editionsparentheses.com

essentiel de comprendre que la technologie est souvent un composant nécessaire de l'art, qui lui-même aide la technologie à servir mieux l'humanité.

Ce n'est nulle part plus vrai qu'en architecture et en structure — mariage dans lequel la science et l'élégance ne font plus qu'un pour répondre à certains besoins physiques et spirituels fondamentaux de l'humanité.

/ Mario Salvadori – Comment ça tient ? / ISBN 2-86364-636-2
www.editionsparentheses.com

Table

Préface 5

Chapitre 1
Les structures 7

Chapitre 2
Les pyramides 17

Chapitre 3
Les charges 31

Chapitre 4
Les matériaux 45

Chapitre 5
Poutres et poteaux 57

Chapitre 6
L'habitat 73

Chapitre 7
Les gratte-ciel 87

Chapitre 8
La tour Eiffel 103

Chapitre 9
Les ponts 119

Chapitre 10
Le pont de Brooklyn 139

Chapitre 11
Les structures à résistance de forme 151

Chapitre 12
La cathédrale inachevée 175

Chapitre 13
Les dômes 193

/ Mario Salvadori – Comment ça tient ? / ISBN 2-86364-636-2
www.editionsparentheses.com

Chapitre 14
Hagia Sophia (Sainte-Sophie) 213

Chapitre 15
Tentes et ballons 225

Chapitre 16
Couvertures suspendues 243

Chapitre 17
Message de la structure 253

/ Mario Salvadori – Comment ça tient ? / ISBN 2-86364-636-2
www.editionsparentheses.com