



Les ponts

DES PLATE-FORMES INDISPENSABLES



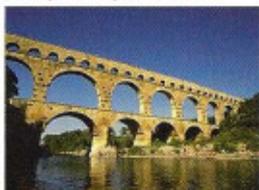
Que ce soit pour chasser, étendre son territoire, ou migrer, l'homme a toujours eu besoin de se déplacer. Le franchissement d'obstacles tels que les rivières ou les ravins est donc très vite devenu un problème, d'abord résolu en posant quelques pierres dans le lit de la rivière puis des troncs d'arbre enjambant l'obstacle. Ce système convenait très bien pour le passage d'hommes, mais très vite, le besoin s'est fait sentir de transporter du bétail, de la nourriture ou d'autres objets, rendant nécessaire l'élargissement des ponts. On posa alors deux troncs côte à côte avec des branches en travers pour former une plate-forme. Les premiers ponts voient donc le jour et avec eux une science qui va considérablement évoluer à travers les siècles.

LES PREMIERS PONTS : LES PONTS À ARCHES

LES ROMAINS, PREMIERS INGÉNIEURS

Après avoir conquis la quasi-totalité du monde connu, les Romains comprirent très vite que la survie de leur empire dépendait de la bonne communication au sein de celui-ci. Ils entreprirent alors de quadriller l'empire avec des routes et des ponts.

Ils constatèrent rapidement que le bois n'était pas le meilleur matériau pour franchir les rivières et se tournèrent donc vers la pierre pour concevoir les premiers ponts à arches. Certains, comme le **pont du Gard** par exemple, sont encore



visibles de nos jours. Ces ponts sont faits de travées (l'espace entre 2 piliers) en forme d'arche semi-circulaire, similaires aux voûtes des églises romanes. En effet, les Romains ont découvert que les arches offrent une meilleure résistance et une plus grande portée. Ainsi, tout le poids du pont est porté par l'arche qui transmet cette force vers le sol le long du demi-cercle. La

construction de ces ponts était de plus assez aisée. On asséchaît la partie de la rivière où le pilier devait être construit à l'aide d'une doison étanche. Ensuite on bâtissait la voûte qui était soutenue par une structure en bois reposant sur le pilier en construction, jusqu'à ce que la clé de voûte soit placée. L'arche tient alors toute seule. Les deux moitiés de l'arche s'appuient l'une contre l'autre s'empêchant mutuellement de tomber et on peut dès lors retirer la structure de soutien.

Ce type de construction permet en théorie de faire des travées aussi grandes que l'on veut, ce qui va augmenter d'autant la hauteur du pont et limiter les possibilités en pratique. Ainsi, les travées des ponts à arches construites par les Romains mesurent en moyenne 10 mètres.

LE MOYEN ÂGE : LES FRÈRES PONTIFES

Par la suite, la construction n'a pas connu d'évolution jusqu'au Moyen Âge. L'église catholique, alors de plus en plus puissante, sera à l'origine de la deuxième vague de construction de ponts qui débute environ en l'an 1000 et dont le but est de faciliter les déplacements des pèlerins et des voyageurs. À ce moment-là, plusieurs communautés de moines commencèrent à bâtir des ponts.

En particulier, l'une d'elles désirant construire un pont au-dessus de la Durançe décida de fonder l'ordre des frères pontifes dont le but était d'améliorer les chemins de pèlerinage. L'ordre des frères pontifes connut un rayonnement très important dès le XIII^e siècle en France et en Grande-Bretagne. Les principales avancées de cette époque sont le rabaissement du niveau des ponts et l'augmentation de la taille des travées. Pour ce faire, les moines construisent leurs arches non pas en forme de demi-cercle mais en arc de cerce ou en ellipse. Le très célèbre **pont d'Avignon**,



partiellement détruit pour défendre la ville, en est un parfait exemple. Le principe est le même que pour les arches en demi-cercle. La clé de voûte permet à l'arche de se maintenir et le poids du pont est supporté par les arches seules. Mais étant donné que les arches rejoignent le pilier obliquement, la force transmise par l'arche vers le sol n'est pas verticale. Ceci ne pose pas de problème au niveau des piliers puisque les forces des 2 arches s'opposent. En revanche, le

problème se pose aux extrémités du pont où ces forces ne sont pas compensées. Comme le sol ne peut encaisser ces forces, le pont est alors instable. Il est donc nécessaire de construire aux extrémités ce que l'on appelle des culées qui sont capables de supporter ces forces.

LA RENAISSANCE ET SES INNOVATIONS

La Renaissance a été le théâtre de nombreuses avancées scientifiques. La construction des ponts évoluera elle aussi pendant cette période. La principale invention sera celle de la poutre-treillis par l'architecte italien



Palladio à la fin du XV^e siècle. Le principe en est simple : une structure en poutre-treillis est constituée

de poutres en bois reliées entre elles par leurs extrémités afin de former des triangles. Cette forme permet de fabriquer une structure bien plus rigide qu'une poutre seule.

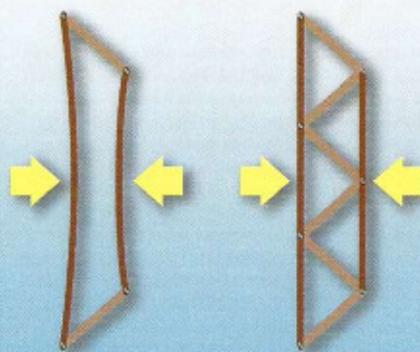
Pour en comprendre l'intérêt, il suffit d'imaginer le comportement de deux poutres placées l'une à côté de l'autre, lorsqu'un poids s'exerce sur l'ensemble. Si les deux poutres sont simplement réunies à leurs extrémités, elles sont instables car elles peuvent se tordre sous l'effet du poids. Par contre, lorsqu'on fixe d'autres poutres entre les deux poutres principales, on empêche ce phénomène. Ces structures sont dites autoportantes car elles n'ont pas besoin de pilier intermédiaire, il suffit de les soutenir aux extrémités.

Cette innovation a d'ailleurs permis de rallonger la longueur des travées. Cependant, cette technique fut très peu utilisée pendant la Renaissance car, à l'époque, elle était alors jugée trop audacieuse. Il faudra donc attendre le XVIII^e siècle et la croissance commerciale des États-Unis pour voir réapparaître cette technique. Ainsi, les ponts construits pendant la période de la Renaissance sont presque tous des ponts à arche. La principale innovation est alors l'esthétique des ponts qui intéressa beaucoup d'architectes. On peut retrouver



d'ailleurs cette recherche d'esthétique sur le **pont du Rialto** à Venise ou sur le Pont-Neuf à Paris.

Principe de la poutre-treillis



Structure instable à deux poutres

Structure rigide en poutre-treillis

LES PONTS MODERNES

LE XIX^e SIÈCLE DU FER

La fin du XVIII^e siècle voit apparaître un nouveau matériau pour la construction des ponts, le fer. Au XIX^e siècle, on faisait fondre le minerai de fer pour fabriquer la fonte. Ce matériau n'était cependant pas très utile pour la construction de ponts à cause de sa fragilité. Il se casse lorsqu'il est soumis à des forces trop importantes. On remplaça alors la fonte à la fin du XVIII^e siècle par le fer puddlé qui est du fer dont on a enlevé certaines impuretés (le **pont Maria Pia**, à Porto, en est un exemple). Ce nouveau matériau est



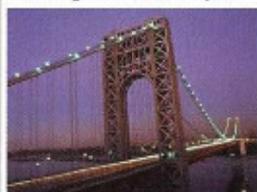
meilleur car il se tord au lieu de casser. Lorsqu'on essaie de tordre une barre en fonte, en appliquant une force suffisamment grande, la barre va se fissurer puis casser. Si l'on essaie de faire la même chose avec une barre en fer puddlé, elle va adopter une forme courbe puis reprendre sa forme initiale lorsqu'on la relâche. On dit que le fer puddlé a un comportement élastique alors que la fonte a un comportement fragile.

Ce matériau n'est malgré tout pas utilisé très longtemps dans la construction des ponts car il est à l'origine de très nombreuses catastrophes. En effet, les ponts en fer ne résistent pas au temps et s'effondrent très facilement. Le passage répété de trains crée notamment des phénomènes cycliques qui fatiguent rapidement le fer, qui se fragilise, et finit par rompre. Aux États-Unis, un pont sur

4 s'est effondré ou s'est fissuré au bout d'un an. Le problème du fer puddlé réside dans le fait que sa limite d'élasticité est faible : la force nécessaire pour tordre une barre de fer de manière définitive est plutôt faible. Ainsi, dans des conditions extrêmes, certaines poutres en fer se tordent (on dit qu'elles flambent) ce qui fragilise la structure et entraîne le flambement d'autres poutres. Le pont s'effondre alors comme un château de cartes. La construction des ponts en fer s'est achevée en 1879 avec la catastrophe du pont du Tay en Écosse. Ce pont en poutre-treillis en fer puddlé s'est effondré lors d'une violente tempête au passage d'un train postal, les poutres en fer n'ayant pas résisté aux rafales de vent qui atteignaient alors 160 km/h. En réalité, cette catastrophe est imputée non pas au matériau mais à son concepteur qui aurait mal estimé la force du vent lors de ses calculs. Néanmoins, cette catastrophe fut celle de trop et plus aucun pont en fer puddlé ne fut construit ensuite.

LE XIX^e, L'ÈRE DE L'ACIER ET DU BÉTON

De même que la fin du XVIII^e siècle a vu la naissance du fer puddlé, la fin du XIX^e sera témoin de l'**essor de l'acier**, également obtenu à partir



du minerai de fer. Il a des propriétés proches de celles du fer puddlé : il est rigide et a un comportement élastique. Cependant sa limite d'élasticité est bien plus grande que celle du fer puddlé et il résiste beaucoup mieux aux efforts répétés tels que le passage des trains. C'est

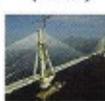
Les plus longs

Pont de Normandie (France)



Pont à haubans de 2 141 m.

Pont Rion-Antirion (Grèce)



Pont à haubans de 2 885 m.

Pont d'Akashi (Japon)



Pont suspendu de 3 800 m.

Pont du Golden Gate (États-Unis)



Pont suspendu de 2 737 m.

Le viaduc de Millau



343 m
hauteur du pilier le plus haut du viaduc

un matériau connu depuis longtemps puisqu'il était utilisé par les forgerons pour fabriquer des armes en Inde et en Chine plus de 2000 ans auparavant. Ce n'est qu'au milieu du XIX^e siècle que l'on est parvenu à produire de l'acier en quantité industrielle et il faudra attendre la chute de son prix à la fin du siècle pour que l'acier remplace définitivement le fer puddlé et la fonte. La première invention déterminante avec l'acier est la poutre en I. Les ingénieurs ont remarqué que lorsqu'on tord une poutre, ce sont les parties situées le plus à l'extérieur qui se déforment le plus. L'acier situé au cœur de la poutre se déforme peu et intervient donc très peu dans son comportement général. Les ingénieurs ont donc décidé de supprimer au maximum l'acier situé au cœur de la poutre car il est inutile et de le rajouter à l'endroit où la poutre se déforme le plus, permettant ainsi de rigidifier celle-ci. En effet, plus la quantité d'acier à déformer est grande, plus il est difficile de déformer la poutre. Avec la poutre en I, les ingénieurs ont donc créé, avec la même quantité d'acier, une poutre extrêmement rigide mais qui garde un comportement élastique. Durant la même période, le **béton** va aussi voir le jour. Ce nouveau matériau



ne va pas être utilisé tout de suite dans la construction car c'est un matériau fragile. Il résiste très bien à la compression mais quand on l'étire ou le tord, il se fissure. Cependant, on découvre un peu plus tard la technique de la précontrainte : le béton va être comprimé avant d'être utilisé. Ainsi, en étirant du béton précontraint, celui-ci ne se fissure pas puisqu'en réalité, il est encore en compression. En calculant la force de traction maximale que va subir le béton, on peut au préalable comprimer celui-ci avec une force supérieure à celle que l'on a calculée. Cette compression est en général réalisée à l'aide d'une grande tige en acier : on la fait traverser le béton dans sa longueur, puis on l'accroche à des plaques aux extrémités que l'on serre

contre le béton avec des boulons. Enfin, la dernière grande découverte de cette période est le béton armé. Les ingénieurs ont découvert qu'en plaçant des tiges en acier (les armatures) dans le béton, celui-ci pouvait être étiré sans se fissurer. Ce sont les tiges en acier qui résistent à cette force d'étirement et non le béton. Toutes ces découvertes vont permettre aux constructeurs de concevoir des ponts de plus en plus grands à l'aide de techniques toujours plus innovantes. Même si l'on continue à utiliser la poutre-treillis avec les poutres en I, petit à petit, on va commencer à associer cette technique avec d'autres que l'on avait abandonnées. L'arche va donc faire son grand retour.

Le principe est le même qu'avec les ponts en pierre sauf que ces nouveaux matériaux n'obligent plus à faire passer la route au-dessus de l'arche en remplissant l'espace séparant l'arche de la route avec de la pierre. On peut maintenant éviter la structure en liant la route à l'arche avec, par exemple, une structure en poutre-treillis ou des câbles, autre innovation rendue possible par l'acier. On trouve ainsi parmi les ponts modernes plusieurs modèles différents de ponts à arche : le tablier (partie du pont sur laquelle est construite la route ou la voie ferrée) peut être au-dessus de l'arche, reposant sur des poutres fixées sur l'arche ; en dessous de l'arche, soutenu par des câbles accrochés à l'arche ; ou dans une position intermédiaire (la partie centrale du tablier sous l'arche et les extrémités au-dessus, comme pour le **pont d'Harbour à Sidney**). Les



structures peuvent aussi bien être en acier qu'en béton. Ces innovations vont permettre d'augmenter considérablement la longueur des travées en arche, qui passent ainsi de quelques dizaines de mètres à quelques centaines de mètres. Les découvertes du béton et de l'acier, en plus de repousser les limites des techniques déjà connues, vont permettre d'inventer de nouvelles techniques encore plus efficaces.

Types de ponts à arche avec tablier

Tablier au-dessus de l'arche



Tablier en dessous de l'arche



Tablier en position intermédiaire

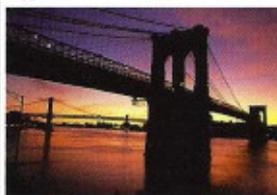


LES PONTS À POUTRE-CAISSON

En partant du même constat que pour les poutres en I, les ingénieurs ont l'idée de construire des ponts dont le tablier serait porté uniquement par une poutre gigantesque mais creuse. Cette idée va permettre de construire des ponts de portée moyenne en diminuant considérablement le nombre de piliers par rapport aux ponts construits avec des poutres traditionnelles. Le principal avantage des ponts à poutres-caissons est lié à la simplicité de la construction. La poutre-caisson est construite en petits morceaux puis assemblée sur le chantier. Les moyens mis en œuvre sont minimes. Ainsi, la construction se résume à la montée des piliers et à l'assemblage des morceaux de poutre en partant de chaque pilier et en avançant de manière symétrique pour ne pas apporter de déséquilibre. On appelle cela de la construction par encorbellement. Ce type de pont convient parfaitement pour les autoroutes ou les voies ferrées.

LES PONTS SUSPENDUS

L'invention du pont suspendu a permis de rallonger de façon considérable la portée des ponts, rendant possible le franchissement de larges estuaires. Après quelques essais avec des chaînes puis des câbles en fer puddlé, le pont suspendu n'est devenu courant qu'avec l'apparition des câbles en acier dont



le **pont de Brooklyn** à New York est le premier bénéficiaire.

Le principe des ponts suspendus est simple : on accroche un câble au sommet de 2 piliers faits en poutre-treillis en acier, puis on fixe à ce câble d'autres câbles verticaux (les suspentes) qui soutiennent le tablier du pont. Les suspentes transfèrent alors le poids du tablier au câble principal qui transfère cette même force aux 2 piliers. Le câble principal tire donc les piliers vers lui ce qui a pour effet de tordre les piliers. Pour contrer cet effet, il faut tirer les piliers dans l'autre sens avec des câbles accrochés à leur sommet et que l'on tend dans l'autre sens. Dans la pratique, on utilise un câble unique

accroché au sol d'un côté du pont et que l'on tire de l'autre côté jusqu'à ce que l'on ait la tension désirée. Cette technique a permis de construire des ponts gigantesques très célèbres comme le pont de Tancarville en France ou le **Golden Gate** à San Francisco



dont la travée principale mesure plus d'1 kilomètre. Malgré les grandes qualités des ponts suspendus, ceux-ci ont un ennemi redoutable : le vent. Les longs tabliers se comportent comme des rubans de papier : ils peuvent se tordre dans tous les sens, en particulier sous l'influence du vent. Le problème des suspentes c'est qu'elles empêchent le tablier de descendre mais pas de monter et dans certaines circonstances, le vent peut soulever le tablier. C'est le phénomène à l'origine de la **catastrophe de Tacoma**.



À l'époque de sa construction, les ingénieurs voulaient faire des travées toujours plus longues. Cependant, le tablier du pont de Tacoma était trop souple par rapport à sa longueur et il ondula dès que le vent soufflait, lui valant le surnom de « Galoping Gertie ». Cette particularité constituait d'ailleurs une attraction pour les utilisateurs et les touristes jusqu'au jour où le tablier ondula tellement qu'il se décrocha et alla s'écraser dans la rivière qu'il traversait. Après cette catastrophe, tous les tabliers des ponts suspendus ont été renforcés par des structures en poutre-treillis.

LES PONTS À HAUBANS

Le pont à haubans est le successeur des ponts suspendus. Les suspentes ne sont plus fixées à un câble porteur mais directement aux piliers et deviennent des haubans. C'est le développement des tabliers en poutre-caisson, plus rigides et de forme trapézoïdale, qui a permis de réduire le nombre de câbles nécessaires à son soutien. La forme

trapézoïdale permet aussi de donner une forme d'aile d'avion à l'envers au tablier. Ainsi, lorsque le vent souffle sur le pont, il tire le tablier vers le bas de la même manière que le vent qui s'écoule sur une aile d'avion, tire l'avion vers le haut. Les ponts à haubans ont de nombreux avantages. Ils sont plus esthétiques, plus faciles à construire mais surtout, ils coûtent beaucoup moins cher que les ponts suspendus puisqu'ils utilisent beaucoup moins de matériaux. Deux techniques sont utilisées pour la construction de ponts à haubans. La plus fréquente est la construction par encorbellement. C'est celle qui a été utilisée pour la construction du **pont de Normandie**.



On construit d'abord les piliers puis on commence à assembler le tablier morceau par morceau, chaque morceau correspondant à un hauban. On fixe d'abord le hauban au pilier puis le morceau de tablier (un voussoir) au hauban. On fixe ensuite le voussoir au tablier déjà assemblé et on tend le hauban. Il faut bien faire attention de tendre les haubans en même temps de chaque côté d'un pilier, sinon le tablier tire plus d'un côté que de l'autre, ce qui tord le pilier qui risque de se fissurer. L'autre technique est celle utilisée pour la construction du **viaduc de Millau**,



un pont multi-haubanné constitué de 7 jeux de haubans. On construit d'abord les piliers sur lesquels va être posé le tablier qui est assemblé aux extrémités du pont. Ensuite, on pousse le tablier au-dessus du vide jusqu'au premier pilier. Le bout de tablier qui pend dans le vide est rigidifié par le premier jeu de haubans déjà fixé. On pousse ainsi le tablier de chaque côté du pont jusqu'à ce que les 2 parties se rejoignent. À ce moment, seuls les 2 jeux de haubans centraux sont fixés et le tablier est tordu entre chaque pilier. On fixe donc les autres jeux de haubans dans le but de l'aplâtrer et de le rigidifier.

Principe de la poutre en I

