

# VIVE LES PONTS !

par  
Edgard  
Thirion



LES ARMATURIERS





# VIVE LES PONTS !

par  
Edgard  
Thirion



LES ARMATURES



*À Éliane, mon épouse  
À nos 3 fils, Frédéric, Jérôme et Guillaume, armaturiers de métier, à qui j'ai transmis le virus des ponts  
À tous les ouvriers et ingénieurs, anonymes et célèbres, sans qui tout cela n'aurait pu exister*

La couverture et la page de garde de ce livre présentent des signes gravés dans la pierre, relevés sur le pont médiéval de Pont-Saint-Esprit (Gard, France). C'est le plus vieux de tous les ponts sur le Rhône reliant la Provence au Languedoc. Il a longtemps constitué un point de passage obligé sur le fleuve. Il est composé de 26 arches (19 grandes et 7 petites). Sa construction fut voulue et décidée par le frère de saint Louis, le comte de Poitiers et de Toulouse Alphonse de Poitiers. Elle commença en 1265 pour s'achever en 1309. D'après l'architecte Viollet-le-Duc, elle fut confiée à la branche pontife des Hospitaliers (la branche des constructeurs de ponts, formée par ces moines-soldats pour faciliter les pèlerinages).

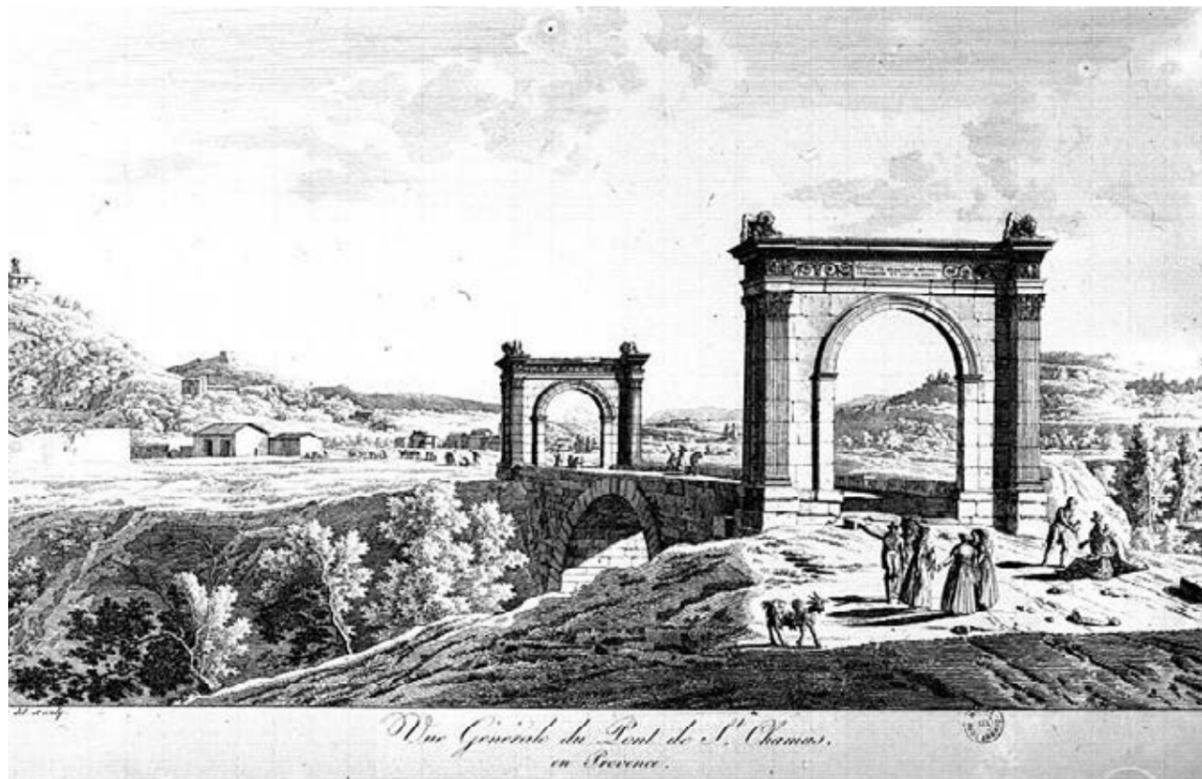
Aurais-je autant d'amour et de passion  
pour vous conter "Les Ponts"  
que j'en ai eu pour les construire ?

**AVERTISSEMENT**

Cet essai n'est pas une encyclopédie exhaustive sur l'art des ponts. Il constitue un regard passionné, curieux et pédagogique sur ces ouvrages qui ont marqué ma vie professionnelle et personnelle.

# Le Pont !

Cette ligne, ce trait, cette lame de sabre  
qui permet le passage du Nord au Sud,  
de l'Orient à l'Occident.



**Le Pont !** Aérien et puissant, le pont s'élance au-dessus du fleuve, de ses arches élevées ou basses, le pont saute le fleuve ou la ravine.

**Le Pont !** Il rassemble car il est l'élan qui donne un passage vers le divin. Il est lié au mot "Liberté" puisqu'il permet au voyageur de passer d'une rive à l'autre.

**Le Pont !** Il est pourtant plus et souvent mieux qu'une simple construction utilitaire ; c'est presque toujours un élément essentiel du paysage, qu'il souligne les traits d'une vallée ou qu'il détermine l'ordonnement de la cité qu'il dessert. Expression de l'humain dans le décor naturel, œuvre d'art pour peu qu'il soit bâti comme il devrait l'être ! Il y a, c'est vrai, des ponts sans grand intérêt, mais bien peu sont laids, et bien plus nombreux, par contre, sont ceux remarquables par leur qualité architecturale.

**Le Pont !** Édifié par les hommes pour les hommes, n'a pas comme la cathédrale ou le château, de géniteur identifié. Il est une œuvre collective, jugée d'utilité publique. Un partage.

**Le Pont !** Au-delà d'une utilité évidente, est comme tous les ouvrages des hommes, porteur de poésie, trait d'union dans le paysage et repère dans le temps.

**Le Pont !** C'est la victoire de l'homme sur l'eau ou plutôt des victoires et des défaites successives dans la guerre d'usure qui est celle de l'homme et de l'eau.

**Le Pont !** "Symbole" universel, est la synthèse de nombreux symboles.

# Remontons le temps...

**Le pont a traversé les temps, évoluant et s'adaptant au gré de l'apparition de nouveaux matériaux, d'esprits curieux, de défis humains et techniques !**

Des origines à l'époque Romaine

Du Moyen Âge à la Renaissance

Du XVIII<sup>e</sup> siècle au monde moderne

La maîtrise technique, l'imagination débridée

**Si on s'intéresse à l'évolution technologique des ponts, deux grandes périodes vont retenir notre attention : la période romaine et la période contemporaine.**

L'Empire romain, qui a occupé la majeure partie de l'Europe, maîtrisait parfaitement les techniques de construction. Le pont était un outil d'expansion, de représentation, d'affirmation de la puissance. Le pont le plus représentatif de cette période est le pont en arc en plein cintre, le matériau de construction de base étant la pierre.

Puis, pendant plus de 2000 ans, la conception des ponts n'a pas évolué significativement. La période contemporaine a commencé par la révolution industrielle et l'avènement du chemin de fer, des routes et des ponts,

alors que les connaissances théoriques ont considérablement progressé. Cette nouvelle ère pour les ponts a commencé il y a un peu plus de 200 ans. Elle est marquée par le développement des ponts en béton armé puis en précontraints, des ponts suspendus de grandes portées et des ponts à haubans, tous nés de l'intelligence humaine, grâce à l'apparition de l'acier.

La forme des ponts va évoluer en fonction des matériaux disponibles. Jusqu'au XXI<sup>e</sup> siècle, deux matériaux ont principalement influencé la forme : la pierre et l'acier. De nouveaux matériaux issus de l'industrie de la construction ont été introduits et les méthodes et moyens de calculs ont évolué. Des prototypes de ponts ont été construits avec un béton à ultra-hautes performances. Des ponts ont également été construits avec des matériaux composites, assemblages de résines et de fibres de carbone, pouvant résister à des efforts extrêmement élevés. Des formes nouvelles sont apparues.

## **L'histoire des ponts est en continuelle évolution.**

Le pont, magnifié par les romains, a connu une longue traversée du désert. Mais avec les extraordinaires progrès dans la connaissance des sciences physiques et dans celle des matériaux, le pont est devenu un ouvrage d'art. Les ingénieurs ont permis aux architectes, en repoussant toujours les limites des contraintes techniques, de laisser libre cours à leur imagination pour créer de véritables œuvres d'art, parfois des chefs-d'œuvre.

"L'homme n'est pas fait pour construire des murs mais pour construire des ponts."

Lao-Tseu

# Les premiers ponts : du bois et de la pierre

**L'art de construire les ponts remonte vraisemblablement aux temps les plus reculés. Il semble évident que le premier de tous les ponts a été un arbre couché par le vent, resté arrimé en travers d'un cours d'eau, ou alors une arche en pierre naturelle, sculptée dans la roche par l'érosion.**

Le regard de l'homme, vivant de chasse et de cueillette, s'est porté au-delà de l'horizon. Les animaux et les fruits qu'il convoite de l'autre côté d'une rivière ou d'un ravin excitent son imaginaire.

Des pierres posées sur le lit d'un ruisseau, un arbre jeté entre deux rives... c'est ainsi qu'est certainement né le concept du pont.

Il est probable que l'art de fabriquer des ponts "rudimentaires" fut découvert et redécouvert par les générations, jusqu'à ce qu'il soit enfin établi et reconnu en tant que tel. Aujourd'hui, dans des lieux reculés du monde, des tribus montagnardes se déplacent encore d'un village à l'autre grâce à des ponts en corde rustiques qui enjambent gorges et torrents. Ces ponts primitifs sont en fait les avatars des lianes et des plantes grimpantes que les premiers hommes ont sûrement utilisées...



© Marc Sadler - Fotolia.com

À mesure que l'homme a créé des outils de plus en plus perfectionnés, il a dû tout naturellement reproduire ce pont primitif, abattre des arbres pour les placer en travers des cours d'eau, après les avoir convenablement façonnés, établir des appuis intermédiaires quand la largeur du lit l'exigeait et aboutir ainsi, progressivement, à la construction de véritables ponts en charpente.

Pendant des milliers d'années au cours de la période paléolithique, nos ancêtres ont mené une vie nomade et errante, chassant et cueillant leur nourriture. Avec la sédentarisation et l'invention de l'agriculture, des chemins réguliers entre les villages devinrent nécessaires pour échanger graines et nourriture et, bien sûr, pour se servir chez les voisins ! S'il existait un raccourci, l'homme trouva des moyens pour franchir un cours d'eau ou ouvrir une clairière dans la forêt. À cette époque, le pont en bois devait être assez large et robuste pour résister au passage du bétail, plat et solide pour permettre le transport de la nourriture et des matériaux, et enfin mobile pour pouvoir être escamoté face à l'ennemi.

Les troncs d'arbres étroits se transformèrent en doubles poutres plus espacées, sur lesquelles on fixait des rondins qui formaient une travée. Ces travées furent rabotées, à l'âge du bronze, au moyen d'outils aiguisés ou de haches. Les interstices furent bouchés avec un mélange de branches et de terre, dans le but de niveler la plateforme.

Pour les passages au-dessus des cours d'eau, les piles de soutènement étaient constituées de pierres entassées à même le fond. Parfois, des pieux étaient enfoncés dans le lit de la rivière pour former un cercle qu'on remplissait alors de pierres pour obtenir un batardeau grossier, mais au moins étanche et sec.

La structure des ponts primitifs se composait donc essentiellement de montants et de linteaux, en bois ou en pierre, ou encore combinant ces deux matériaux. Un peu plus tard apparut le simple pont suspendu fait de cordes et de bambous...



© LU0810 - Fotolia.com

Pont suspendu

## Babylone la pionnière...

Hérodote, historien grec du <sup>v</sup>e siècle avant notre ère, nous laisse le plus ancien commentaire sur un pont, construit à Babylone au-dessus du fleuve Euphrate quelques centaines d'années auparavant. Ce premier pont, au sens moderne du terme, aurait été édifié par Sémiramis, reine guerrière. Il reliait les palais de Babylone, situés de part et d'autre du fleuve. Pour l'édifier, le cours d'eau fut détourné afin de mettre en place des fondations faites de blocs de pierre maintenus entre eux par des barres de fer. Cent piles en pierre soutenaient des poutres en bois de cèdre, de cyprès et de palmier qui formaient une voie de plus de 10 mètres de largeur et de 180 mètres de longueur. On retirait ce plancher chaque soir, par crainte de l'envahisseur.

# Les ponts voûtés

C'est vraisemblablement au IV<sup>e</sup> millénaire avant notre ère que l'homme découvre les secrets de la construction en arc. Dans la vallée du Tigre et de l'Euphrate, les Sumériens commencent à utiliser l'adobe, brique d'argile séchée au soleil, pour édifier leurs palais, leurs temples, leurs remparts... Peu abondante, la pierre devait être importée de Perse, ce qui limitait son utilisation.

Du module de brique dépendaient les principes de construction employés. Après quelques hésitations, les Sumériens inventèrent donc la voûte en arc et en berceau pour les constructions monumentales, ce qui marqua l'apogée de leur civilisation. Ainsi, les ruines de l'arche en brique de Ctésiphon et la porte d'Ishtar de Babylone témoignent de ce génie architectural mésopotamien.



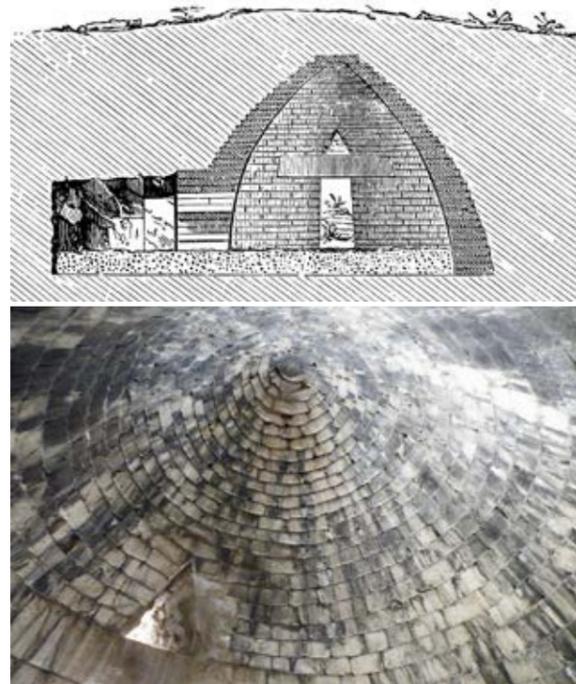
Ctésiphon (Irak), aujourd'hui

Cependant, dans l'architecture égyptienne, la construction en pierre selon le principe montants-linteau dominait, même si l'arc en encorbellement était déjà connu et fréquemment utilisé pour construire les

passages et pour soutenir les galeries de secours ou d'aération dans les pyramides. Vers 2500 av. J.-C., les Égyptiens maîtrisaient l'arc et l'utilisaient couramment.

**L'arc constitue l'une des plus grandes découvertes architecturales.** Il est au cœur de la technique de construction utilisée durant les siècles qui suivirent et sa forme si distinctive donnera naissance aux ponts les plus splendides jamais construits par l'homme.

## Les voûtes à pierres horizontales ("en encorbellement")



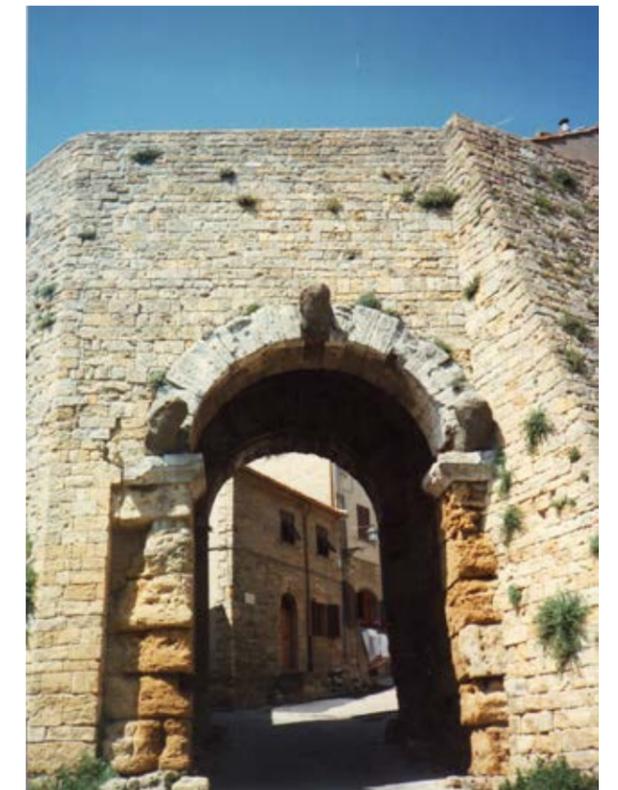
Trésor d'Atrée, tombe d'Agamemnon (Mycènes, Grèce)

Les premières voûtes sont constituées de pierres horizontales posées en saillie les unes sur les autres (disposition dite "en encorbellement"). À Abydos (Égypte), dans le palais d'Ozymandias (environ 2500 ans avant notre ère), on rencontre une voûte de ce type. Idem à Thèbes, dans le temple d'Amon-Rê. Toutefois, la plus belle voûte antique est probablement celle du trésor d'Atrée, une impressionnante tombe située à Mycènes, en Grèce, et construite autour de 1250 avant J.-C. Elle est formée d'une pièce semi-souterraine à plan circulaire avec une couverture à section ogivale. Avec une hauteur intérieure de 13,5 m et un diamètre de 14,5 m, elle a été le plus grand et le plus large dôme dans le monde pendant plus d'un millénaire, jusqu'à la construction des thermes de Mercure à Baïes et du Panthéon de Rome, tous deux en Italie.

## Les voûtes à joints convergents

Des voûtes à joints convergents (dont les joints sont perpendiculaires à la surface de l'intrados qui est la face intérieure de la voûte), typiques des ponts en maçonnerie, existent déjà dans divers monuments de l'Égypte antique. En Nubie, dans l'une des pyramides de Méroé, on trouve une véritable voûte en plein cintre composée de voussoirs régulièrement appareillés. À Gebel Barkal, deux portiques donnant accès à des pyramides sont couverts l'un par une voûte en ogive, le second par une voûte en plein cintre, exécutées l'une et l'autre avec voussoirs à joints convergents.

Plus récemment, en Italie, on trouve un élément de l'enceinte étrusque de la ville de Volterra, datant du III<sup>e</sup> ou II<sup>e</sup> siècle avant J.-C., la Porta All'Arco, qui reprend ce principe de construction d'un arc.



La Porta All'Arco (Volterra, Italie)

## Les ponts mycéniens

Il subsiste en Argolide, dans le Péloponnèse (Grèce), trois ponts, dont le pont mycénien de Kazarma, construits suivant la technique des voûtes en encorbellement, à l'aide d'un

empilement de pierres très grossièrement taillées. Ces ponts ont été probablement construits vers -1300 av. J.-C., à l'époque mycénienne (âge du bronze).



Pont mycénien de Kazarma (Grèce)

## Les premiers ponts ?

En dehors du pont de Babylone, Hérodote évoque le vaste pont flottant construit par le souverain perse Xerxès (environ 500 av. J.-C.). Il était constitué de deux rangées parallèles de 360 bateaux fixés ensemble et à la berge, ancrés dans l'Hellespont, le détroit des Dardanelles. Il devait servir à faire passer une armée de deux millions d'hommes et de chevaux sur l'autre rive, pour combattre les Grecs. La traversée dura sept jours et sept nuits !

Grands bâtisseurs de ponts, les Perses s'essayèrent à toutes les techniques : arc, cantilever (porte-à-faux en anglais) et poutres. Ainsi, en Iran, le pont qui enjambe le Dez à Dezfoul (Khuzestan), daterait de 259 après

notre ère. Composé de 20 arcs en voussoirs légèrement en ogive, évoquant le futur style gothique, il mesure 375 mètres de long. De petits arcs en plein cintre confèrent au pont un style islamique, ce qui laisse planer le doute sur ses origines.



Pont sur le Dez à Dezfoul (Iran)

Les Grecs, malgré leur gloire, ne s'illustrèrent pas dans la construction des ponts. C'était avant tout un peuple de marins. Utilisant uniquement la structure à montants et à linteau, ils bâtirent quelques-uns des temples, monuments et cités les plus grandioses (comme le Parthénon ou le Temple de Zeus). Mais, tout comme leurs prédécesseurs étrusques, les Grecs étaient tout à fait capables de construire des arches. On trouve notamment des exemples de construction d'arcs en voussoirs...

En Chine, la construction des ponts semble avoir évolué plus rapidement que dans les civilisations sumérienne et égyptienne. Des récits datant de l'époque de l'empereur Yoa

(2300 avant notre ère) évoquent les traditions de construction. Les Chinois utilisaient de nombreuses techniques : la simple poutre à montants et à linteau, la poutre cantilever, les ponts suspendus à cordes...

Pour les travées plus longues et lorsqu'il fallait ménager un large passage à la navigation, on recourait à la poutre cantilever ou au pont suspendu par des câbles. Mais, dans les villes et pour franchir les rivières longeant d'importantes voies commerciales, on préférait le pont cantilever, de structure plus rigide. Dans les siècles qui suivirent, la technique de l'arc domina, imitée et adaptée du Moyen Orient, découverte par les Chinois en sillonnant les routes de la soie ouvertes sous la dynastie Han vers le 1<sup>er</sup> siècle avant notre ère.



Le pont de Zhaozhou (ou pont d'Anji) achevé vers l'an 605, est considéré comme le pont en maçonnerie à arc segmentaire (à voûte surbaissée) et à tympan ouvert le plus ancien du monde

# L'art roman

C'est aux Romains que l'on doit la reprise de la technique de la voûte, son perfectionnement et sa généralisation partout en Europe pour la construction des ponts. Un empire aussi puissant s'appuyait sur une voirie fiable, praticable en toutes saisons et dotée de constructions plus solides que les simples ponts de bois.

Le plus ancien ouvrage voûté romain serait un égout connu sous le nom de Cloaca Maxima, exécuté sous le règne de Tarquin l'Ancien, le cinquième des sept rois légendaires de la Rome antique. Sa construction a été entreprise 600 ans environ avant notre ère (la Cloaca Maxima est le "grand égout" collecteur qui, dans la Rome antique, desservait le Forum Romanum et débouchait sur le Tibre).



La Cloaca Maxima (Rome, Italie)

Les ponts romains "académiques" sont robustes, construits en plein cintre (c'est-à-dire avec une voûte en arc de cercle). Ils reposent sur des piles épaisses, d'une largeur égale à environ la moitié de l'ouverture de la voûte.

L'une des plus anciennes réalisations recensées de la voirie romaine est le pont Milvius, construit sur le Tibre par le consul Caius Claudius Nero en - 2061 av. J.-C. Situé à quelques kilomètres de Rome, à l'endroit où la via Flaminia et la via Cassia se rejoignent pour franchir le fleuve, il constituait le passage quasi obligatoire d'accès à Rome pour tout voyageur venant du nord. Du fait de cette position stratégique, le pont Milvius fut le théâtre de nombreuses luttes...



Le pont Milvius (Rome, Italie)

C'est en Espagne et au Portugal que l'on peut observer des ouvrages parmi les plus spectaculaires de l'art Roman, tels que le pont de Mérida, dans l'Estrémadure, et surtout le pont d'Alcantara, érigé sur le Tage en 103 et 104 après J.-C.

Au III<sup>e</sup> siècle apparaissent les ponts à arc surbaissé, ou ponts segmentaires. Le pont de Limyra, situé en Lycie, une région de la Turquie actuelle, en est un des premiers représentants. L'ouvrage mesure 360 mètres de longueur et possède 26 arcs segmentaires et deux semi-circulaires.

**Les Romains furent donc de très grands bâtisseurs, de véritables génies de la construction qui surent ériger la construction des arches à la hauteur d'une science et d'un art. Ils bâtirent des cités et des voies reliant l'Europe à l'Asie et à l'Afrique du Nord. Ils furent les premiers véritables ingénieurs et, comprenant que leur puissance était fondée sur l'existence de voies de communication efficaces et permanentes, la construction de routes et de ponts devint pour eux une priorité.**

Les Romains comprirent aussi, comme les Chinois plus tard dans le temps, que les structures en bois, surtout celles installées dans l'eau, étaient moins durables et plus vulnérables. Aussi préféraient-ils la pierre pour construire les édifices prestigieux et stratégiques.

Cependant, ils avaient aussi appris comment pérenniser les structures en bois. Ils les faisaient tremper d'abord dans l'huile et la résine pour prévenir les risques de moisissure sèche et les recouvraient d'alun pour les rendre résistantes au feu. Ils apprirent également à apprécier les qualités des différentes essences de bois : le chêne servait au travail de soubassement en profondeur et l'aune était adapté aux pieux enfoncés dans l'eau, tandis que le pin, le cyprès et le cèdre convenaient mieux pour la superstructure.

Ils savaient aussi apprécier les différentes qualités des pierres qu'ils extrayaient. Le tuf,

roche volcanique jaune, se prêtait correctement à la compression, mais il fallait le protéger de la désagrégation due aux intempéries au moyen d'un enduit à la chaux. Le travertin, plus dur, pouvait être laissé à nu mais résistait mal au feu. Quant aux matériaux les plus durables, tels le marbre, on devait les importer de régions éloignées comme la Grèce, voire d'Égypte et d'Asie Mineure (Turquie). Mais surtout, la grande innovation des Romains dans le domaine des matériaux fut la découverte du mortier de chaux et du ciment pouzzolanique. Ces nouveaux matériaux servirent de mortier pour la pose des briques et des pierres. On les mélangeait souvent à de la chaux calcinée et à des moellons pour obtenir un béton étanche.

Les Romains découvrirent que les arcs en voussoirs autorisaient une portée plus grande que celle de n'importe quelle poutre en pierre sans appui et qu'ils offraient une meilleure résistance.

Pour construire les voûtes en plein cintre, les Romains orientaient toujours la poussée partant de la voûte directement vers la pile de soutènement, ce qui impliquait la construction de piles massives. Si elles étaient assez larges et bâties à environ un tiers de la travée de la voûte, deux piles pouvaient alors soutenir une voûte sans étayage des côtés. On pouvait ainsi construire un pont d'une rive à l'autre, une travée à la fois, sans avoir à achever la totalité du soubassement avant de commencer à ériger les voûtes. Les Romains imaginèrent un procédé pour construire les fondations sur le

lit des cours d'eau à l'intérieur d'un batardeau, enceinte sèche et étanche formée d'une double rangée de pieux en bois remplie d'argile pour faire office de joint d'étanchéité. Une fois le batardeau vidé de son eau, il ne restait plus qu'à construire le soubassement de fondation à l'intérieur. Cependant, les piles massives réduisaient souvent la largeur du chenal, augmentant le débit de l'eau près des piles, donc l'effet d'érosion. Pour y remédier, les piles étaient équipées de becs, parties saillantes qui fendaient l'eau pour l'empêcher d'user les fondations.

L'arche en pierre reposait sur une structure en bois soutenue par les piles et appelée "cintre", structure à la surface supérieure de laquelle on donnait exactement le profil en demi-cercle de la voûte. Par ailleurs, des arcs parallèles en pierre placés bout à bout formaient toute la largeur de la chaussée. La voûte en plein cintre permettait, lorsque les pierres étaient taillées à l'identique, de se passer de mortier pour les maintenir ensemble une fois la clef de voûte mise en place. Enfin, les forces de compression induites assuraient une stabilité à la travée.

Les Romains ont aussi bâti de nombreux ponts en bois qui n'ont pas résisté à l'épreuve du temps.

Que reste-t-il aujourd'hui de leurs constructions ? Quelques ponts en pierre à Rome, ainsi que quelques exemples en France, en Espagne, en Afrique du Nord, en Turquie et dans d'autres anciennes colonies romaines. Des vestiges qui se classent parmi les

structures les plus innovantes étant donné les limites techniques de l'époque.



*Le pont aqueduc de Ségovie (Espagne) construit sous Trajan entre 98 et 117. C'est l'un des monuments les plus imposants et les mieux conservés de l'Antiquité romaine (813 m de long, 128 arches et 28,5 m de hauteur)*

Pour illustrer l'époque romaine, j'ai choisi un ouvrage situé juste à côté de chez nous...

## "Le Pont Flavien" de Saint-Chamas (Bouches-du-Rhône, France)



Ce pont, même petit et un peu perdu dans la nature, possède sa fierté. On oublierait presque qu'il a été construit pour le confort des voyageurs. Le chemin est bien là pour le rappeler, ce chemin qui emprunte sans crainte son tablier.

Saint-Chamas, port jadis prospère au nord de l'étang de Berre, est à mi-chemin entre Marseille et Arles. On entre dans la ville, venant de l'Est, après avoir franchi la Touloubre...

Marseille, fondée vers 600 av. J.-C. par des colons grecs venus de Phocée, aura au cours des siècles étendu son domaine vers l'Ouest, jusqu'au Rhône et même au-delà. Cependant, en 49 avant J.-C., la ville fut conquise par César. Elle perdit ses territoires et la région de l'étang de Berre fut attribuée à la colonie romaine d'Arles fondée quelques années plus tard.

À la fin du 1<sup>er</sup> siècle avant notre ère, le notable local qui fait construire le Pont Flavien est d'origine indigène, comme l'atteste la racine celtique de son nom : Donnius. L'inscription qui nous l'a transmis affiche un degré achevé de romanisation, une adhésion définitive à la culture véhiculée par le nouveau pouvoir. Cette inscription est gravée sur les faces externes des arcs, dans un cartouche ménagé au centre d'une frise de façon qu'elle puisse être lue par quiconque emprunte le pont.

L. DONNIVS C. F. FLAVOS FLAMEN ROMAE ET AVGVSTI TESTAMENTO FIEREI IVSSIT ARBITRATV C. DONNEI VENA ETC. ATTEI RVFEI.

On traduit, en développant les abréviations : L(ucius) Donnius Flavus, F(ils) de C(aius), flamine de Rome et d'Auguste, a ordonné par testament qu'on fasse (ce monument), sous la direction de C(aius) Donnius Vena et de C(aius) Attius Rufus.

Le généreux notable a sûrement reçu la qualité de citoyen romain, avec les privilèges que cela implique, puisqu'il porte trois noms à la romaine : prénom (Lucius), nom (Donnius) et surnom (Flavus : d'où l'appellation Pont-Flavien). Il occupe dans une cité voisine, Arles sans doute, une charge fort honorifique à caractère religieux mais également politique, puisqu'il est prêtre (flamine) du culte de l'empereur (Auguste), auquel on associait celui de la métropole (Rome).

Ce riche commanditaire, important personnage de l'élite municipale, possédait certainement de

vastes domaines et une résidence de campagne aux alentours de Saint-Chamas.

L. Donnius Flavus ne vit pas se construire le monument : il en charge par testament deux exécuteurs, également citoyens romains. Le premier, C. Donnius Vena, lui est apparenté, et son surnom gaulois trahit également une origine indigène. Le second, C. Attius Rufus, porte un nom romain parfaitement banalisé.

Ainsi fut construit ce "petit pont" d'une seule arche de 12,5 m d'ouverture à une hauteur de 6,5 m et large de 5,1 m. Un petit bijou.

À chaque extrémité s'élève un Arc de 6,40 m dont les pilastres sont d'ordre corinthien.

Certains pensent que Flavus fut enterré dans l'une des culées. Mais qui le croirait ?

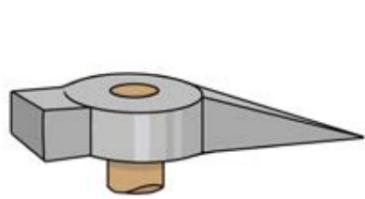


"Le Pont Flavien" de Saint-Chamas

**Avant d'aller plus loin, il vous faut connaître les outils employés, les types de construction, bref le langage des ouvrages.**

## Outils

Pour la taille des pierres, on employait jusqu'au début du xx<sup>e</sup> siècle les outils suivants (ceux des Romains, à part la qualité du métal, ne sont pas très différents) :



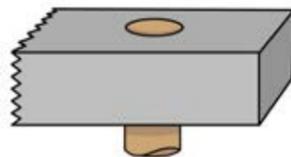
**le têtou**  
lourd marteau qui servait à ébaucher la taille



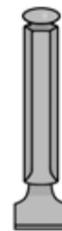
**le poinçon**  
permettait d'exécuter les refouillements (action de creuser la pierre)



**la tranche**  
servait à parfaire



**la boucharde**  
terminait la taille de certains parements

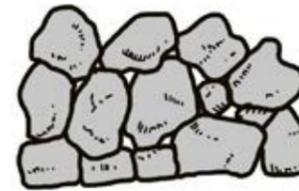


**le ciseau**  
servait à exécuter les ciselures et à régulariser les faces de joints

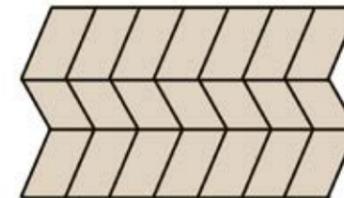
## Appareils

Définition de l'appareil dans la construction : *taille et disposition des pierres ou des briques d'une construction. Dans les appareils de pierre formant des assises régulières, on distingue le grand, le moyen et le petit appareil, selon que la hauteur visible des blocs mis en œuvre est respectivement de plus de 35 cm, de 35 à 20 cm et de moins de 20 cm.*

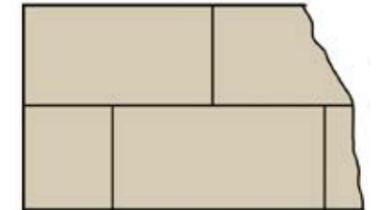
L'appareil est donc l'art de tracer et de disposer les pierres dans une construction :



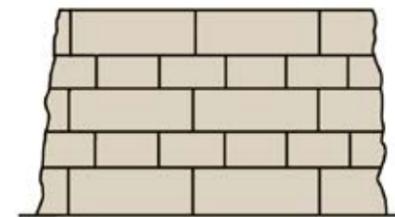
**appareil pélasgique\* ou cyclopéen**  
gros blocs, irréguliers, non taillés, posés les uns sur les autres



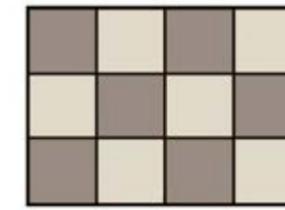
**appareil grec de consolidation**  
série d'assises transversales plus ou moins inclinées



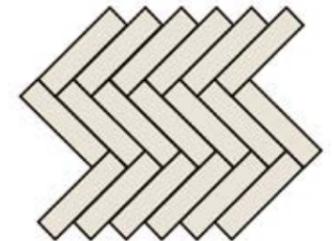
**grand appareil**  
grandes pierres taillées, les assises sont égales, les joints réguliers et fins



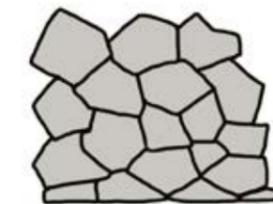
**appareil moyen**  
pierres de dimensions moyennes, entre 20 et 35 cm, les assises sont horizontales



**appareil réticulé**  
utilise des pierres taillées en carré ou en losange disposées en damier



**appareil en feuille de fougère**  
l'Opus Spicatum des Romains, les lits de pierres ou de briques sont alternativement inclinés



**Opus Incertum**  
utilise des pierres de dimensions variables. Les joints sont irréguliers et ne forment jamais d'assises

\* "Pélasges" est le nom donné par les Grecs anciens aux premiers habitants de la Grèce, avant les grandes invasions achéennes, éoliennes et ioniennes. L'étymologie de ce nom reste incertaine. Ce peuple a laissé des traces en Grèce, en Italie et en Asie mineure. Ce peuple, de souche Aryenne, était déjà parvenu à un stade de civilisation quand la Grèce fut envahie. Ils construisaient des digues et canaux, protégeaient leurs cités par d'énormes murailles, faites de blocs entassés sans ciment dits "blocs pélasgiques ou cyclopéens" parce que les Grecs attribuaient la construction aux cyclopes.

# Fondations

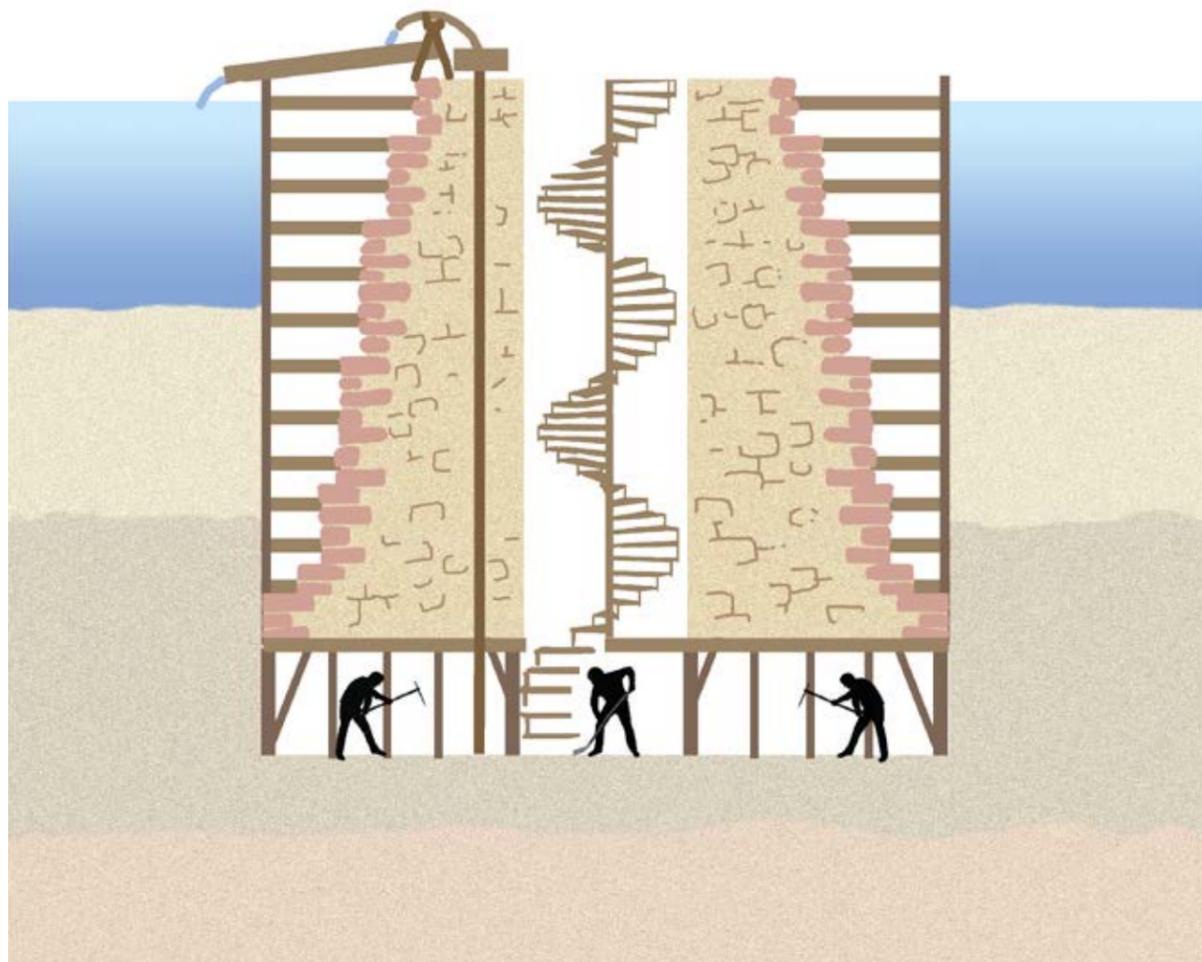
Les fondations destinées à construire les piles d'un pont sont essentielles pour la solidité de l'ouvrage et dépendent du type de terrain. On distingue trois types de fondations :

## 1 | Les fondations reposant directement sur le sol

On réalise une fouille pour mettre à nu la couche de terrain sur laquelle on souhaite fonder l'ouvrage et on construit directement sur le sol la fondation projetée (radier, semelle ou massif).

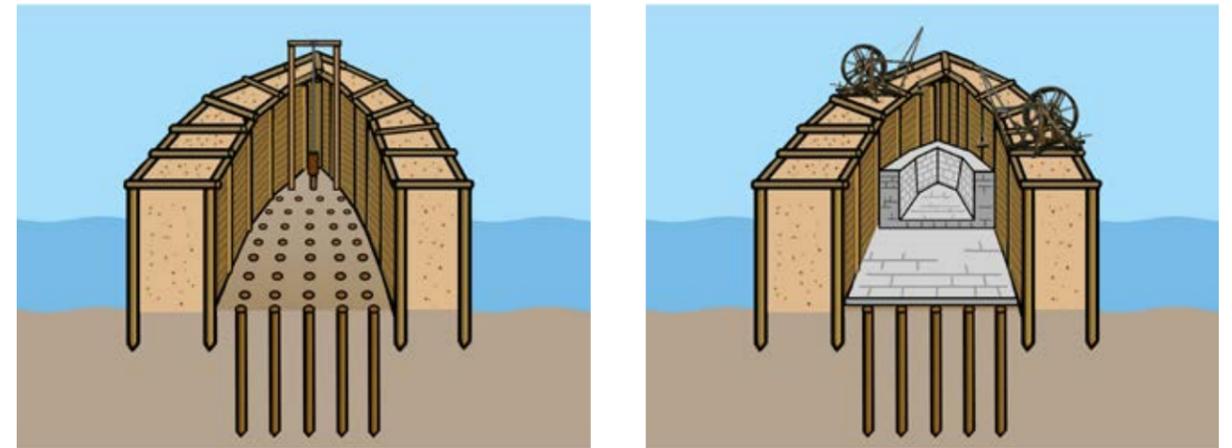
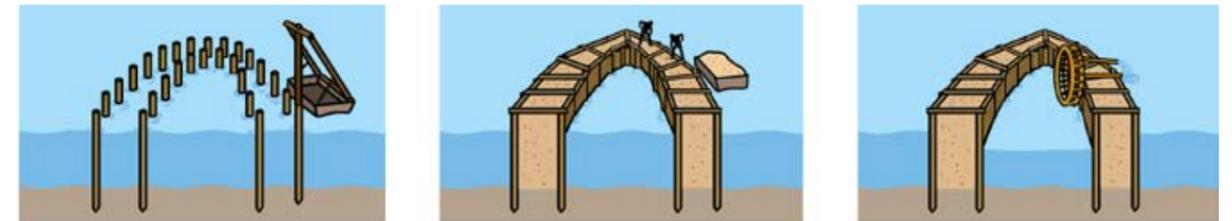
## 2 | Les fondations sur caissons

- havage : on fabrique un caisson à la surface du sol puis on creuse le terrain à l'intérieur du caisson de façon à ce qu'il s'enfonce sous l'effet de son poids.
- fonçage à l'air comprimé lorsqu'il faut traverser des terrains durs. Le caisson est fermé à sa partie supérieure par un plafond traversé par une ou deux cheminées d'accès. L'intérieur du caisson est mis sous pression d'air, de façon à empêcher l'eau de remonter à l'intérieur. On peut alors travailler à sec.



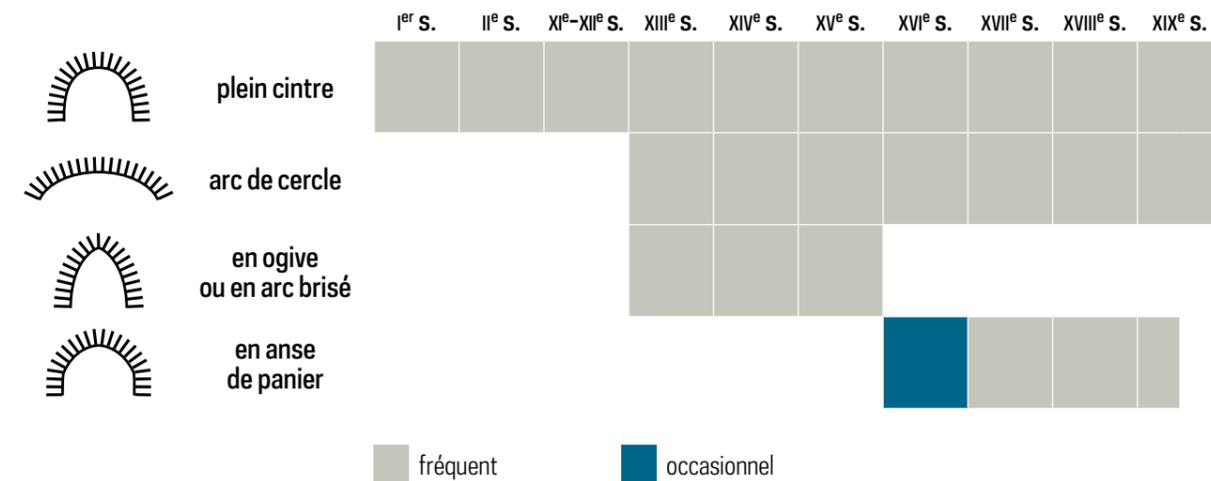
## 3 | Les fondations sur puits ou pieux

Pieux préfabriqués battus ou foncés dans le sol, pieux moulés dans des chemises métalliques, pieux moulés dans le sol sans tubage, puits qui peuvent être remplis de béton...



# Type de construction

Ce tableau représente les différentes voûtes employées depuis le 1<sup>er</sup> siècle de notre ère.

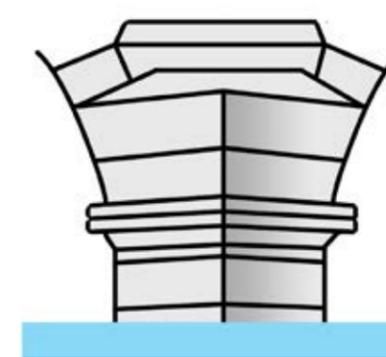


On remarquera qu'il y a peu d'évolution car les ouvertures sont au maximum de 50 m.

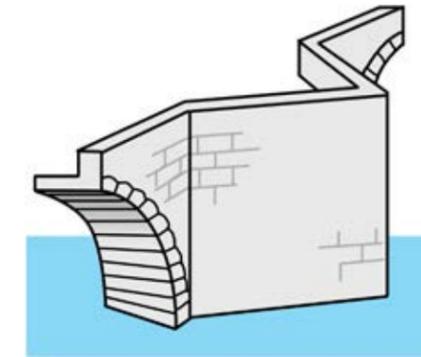
À partir du milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, les ponts vont connaître "une nouvelle vie", grâce aux nouveaux matériaux : béton, béton armé, précontrainte, aciers.

# Avant-bec et arrière-bec

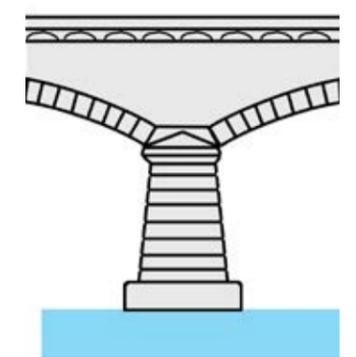
Éperon placé en amont ou en aval d'une pile de pont et destiné à améliorer son profil hydrodynamique, à écarter les corps flottants.



pont romain (Sommières)

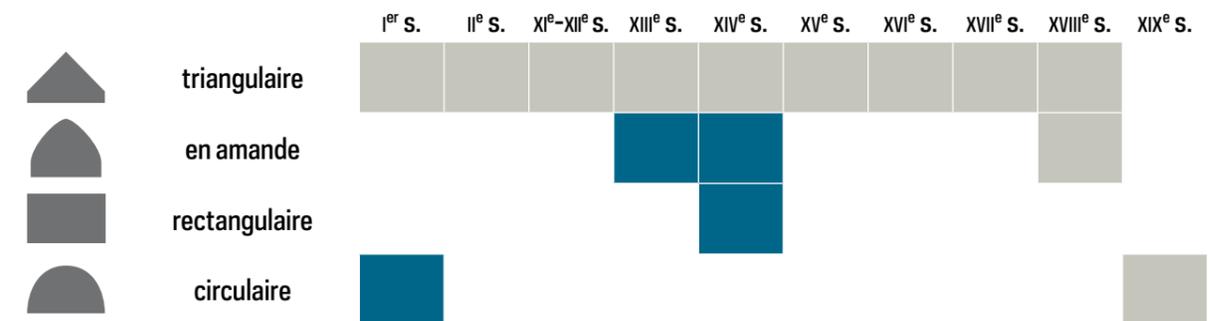


médiéval (XII, XIV et XV<sup>e</sup> siècles)

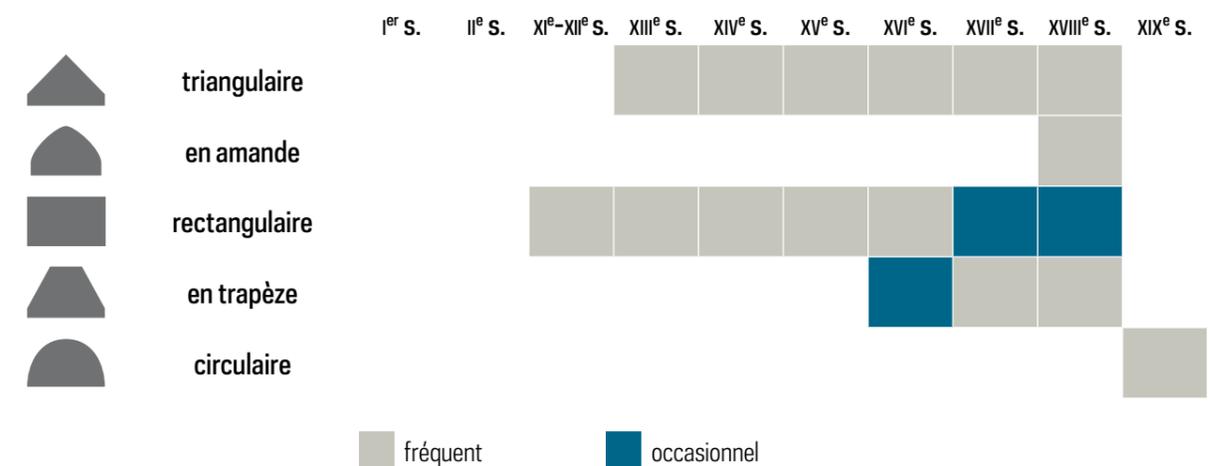


pont Louis Philippe, Paris (XIX<sup>e</sup> siècle)

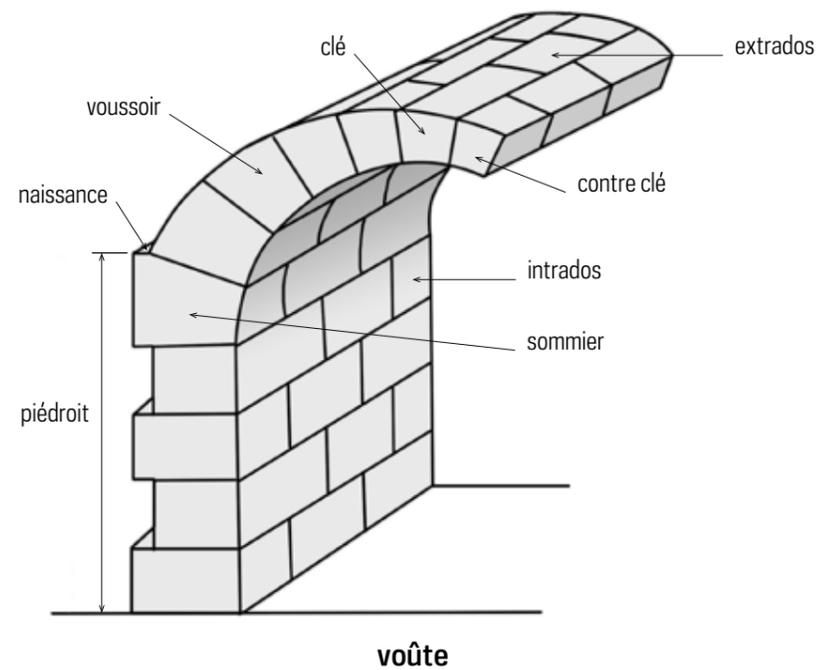
## Avant-bec



## Arrière-bec

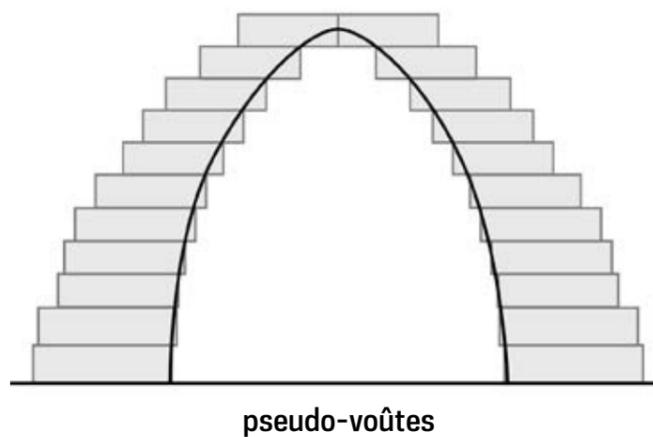


## Voussoirs - Voûtes



Une voûte est une construction destinée à recevoir un espace vide. Elle aurait été inventée par Démocrite d'Abdère en 400 avant Jésus-Christ selon Diodore de Sicile et Strabon. Il est également possible qu'elle soit d'origine étrusque.

Les voûtes transmettent à leurs appuis leur poids et les charges qu'elles supportent. Les actions qui en résultent peuvent être décomposées en forces verticales et horizontales.

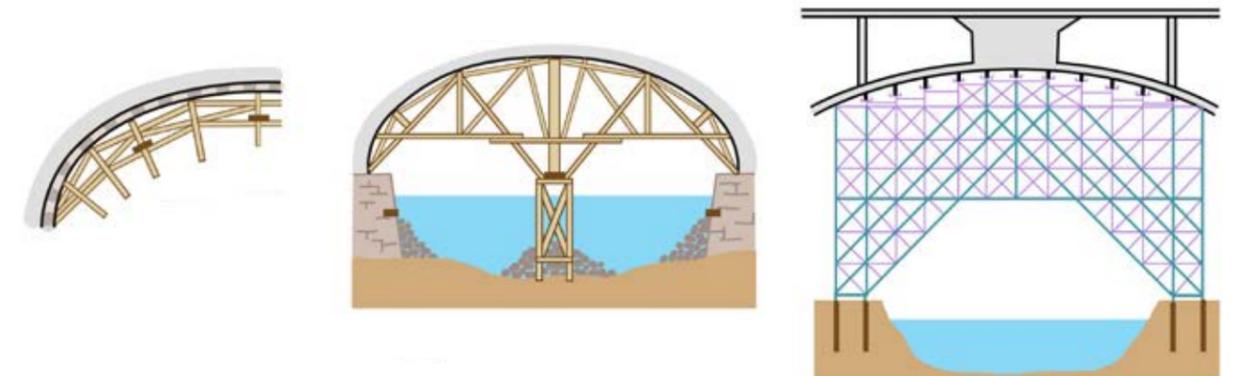


Les pseudo-voûtes sont des empilages à joints horizontaux, les matériaux le plus souvent employés sont des schistes ou calcaires.

Ce type de construction est antérieur de plus d'un millénaire à la voûte : le trésor d'Atrée (tombeau d'Aganemnon) à Mycènes (1400 avant Jésus-Christ).

## Cintres

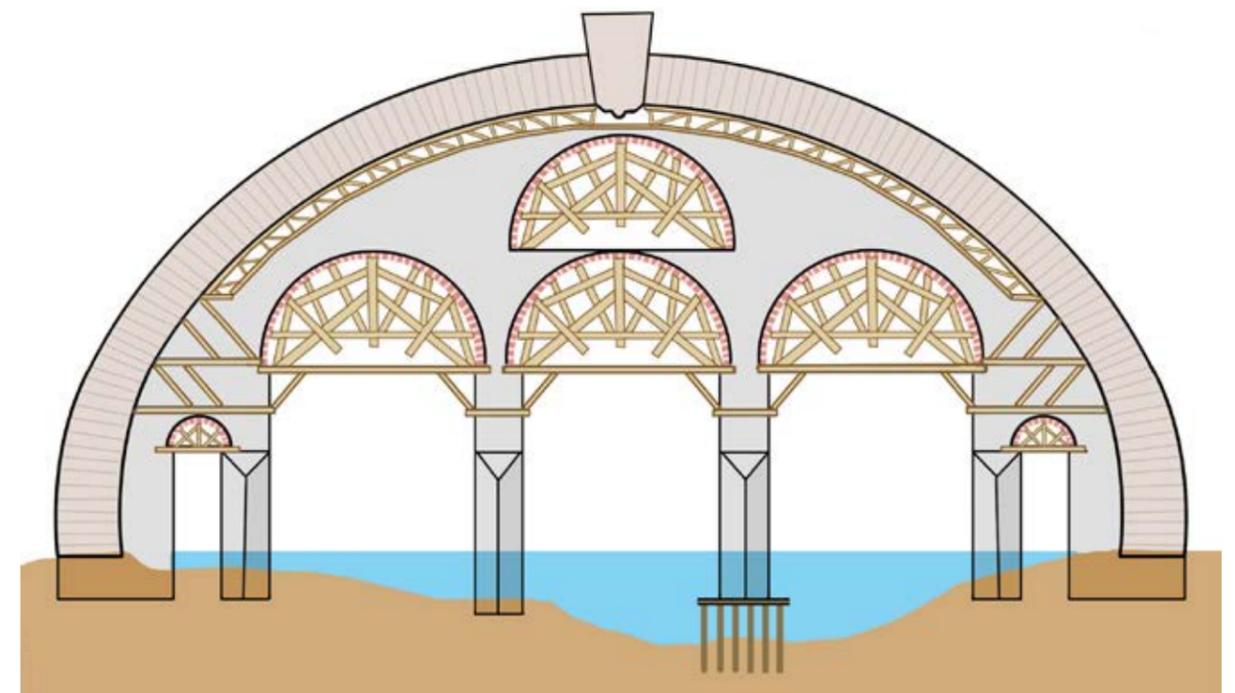
Échafaudage, le plus souvent en bois, sur lequel la voûte est construite. Ce sont des ouvrages provisoires, onéreux et difficiles à construire correctement. À toute époque, les chutes de cintres ont été nombreuses, entraînant souvent des pertes en vies humaines.



retourné  
(xviii<sup>e</sup> siècle)

fixe  
(xix<sup>e</sup> siècle)

en tubes métalliques  
(2<sup>e</sup> moitié du xx<sup>e</sup> siècle)



cintre en maçonnerie  
Pont de Lavar (1773 à 1791), Pont de Gignac

# Le Moyen Âge

**Avec la chute de l'Empire romain, la lumière du progrès s'est éteinte provisoirement sur le monde. Huns, Wisigoths, Saxons, Mongols... ne laissèrent guère de traces de constructions au cours de leurs incursions à travers l'Europe et l'Asie, marquées par les pillages et les destructions. C'est aux avancées du christianisme et à la puissance de l'Église que l'on doit la nouvelle vague de construction de routes et de ponts, vers l'an 1000 de notre ère.**

On construit donc peu de ponts en Occident avant le XI<sup>e</sup> siècle, mais le Moyen Âge voit l'édification de nombreux ouvrages aux formes variées et hardies. Ils se composent d'arches souvent très inégales, dont les voûtes sont en arc peu surbaissé, en plein cintre ou en ogive, cette dernière forme permettant de diminuer les poussées. Ils reposent sur des piles épaisses aux extrémités très saillantes. Les largeurs entre murs sont faibles et le passage présente toujours des rampes et des pentes très fortes.

En France, parmi les ponts médiévaux les plus remarquables, on mentionnera le célèbre pont Saint-Bénézet dit Pont d'Avignon sur le Rhône (1177-1187), l'ancien pont de Carcassonne sur l'Aude (1180), le Petit-Pont à Paris sur la Seine (1186), ou encore le pont Valentré

également appelé pont du Diable à Cahors sur le Lot (1231).

En Italie du Nord, près de Lucca, vivait une congrégation de moines, dans une vaste demeure appelée l'hospice Saint-Jacques. Habiles charpentiers et maçons, ces moines avaient bâti eux-mêmes leur prieuré. En 1244, l'empereur du Saint Empire Romain Germanique Frédéric II demanda à l'hospice de construire un pont au-dessus de l'Arno pour les pèlerins et les voyageurs. Manifestement, l'hospice tirait grand bénéfice de leur passage pour que l'empereur en vienne à prononcer un tel décret. Ils créèrent une coopérative pour bâtir le pont. Après cette construction, leur réputation se répandit en Italie puis en France et éveilla parmi les ordres religieux un grand intérêt pour la construction des ponts.

Ainsi, en France, une communauté de moines bénédictins désirant ériger un pont sur la Durance fonda **l'ordre des frères pontifes** qui, dès le XIII<sup>e</sup> siècle, rayonna en France et en Grande-Bretagne. En dehors de ses devoirs spirituels, cet ordre aidait voyageurs et pèlerins en construisant des ponts le long des chemins de pèlerinage, en mettant des bateaux à la disposition des pèlerins et en les accueillant dans des lieux bâtis pour eux sur la rive. Les frères pontifes s'efforcèrent d'égaliser et de poursuivre la magnifique entreprise des bâtisseurs romains.

Le Pont d'Avignon, le plus célèbre et désormais légendaire pont de cette période, fut érigé par les frères de Saint-Jacques du Haut-Pas, dont

l'hospice se situait autrefois sur les berges de la Seine, à Paris. On leur doit aussi le Pont Saint-Esprit, sur le Rhône également, mais leur chef-d'œuvre reste le Pont d'Avignon, une réalisation superbe et unique pour l'époque. Au fil des siècles, sa beauté a inspiré bien des artistes.

Quelles sont donc les spécificités de ce pont ? Ses voûtes n'épousant pas la forme d'un demi-cercle mais d'une ellipse, il offrait une portée plus importante et grâce à une meilleure stabilité, la partie surmontant la clef avait pu être amincie. Ainsi, des piles plus étroites et une voûte plus haute permettaient d'élever la chaussée pour la mettre hors d'atteinte des crues du Rhône, et cela favorise aussi la circulation fluviale. Conjointement, au-dessus des piles et dans les tympans, de petites arches de soutènement pouvaient recevoir le trop-plein des crues printanières.



*Sur le pont d'Avignon, on y danse, on y danse,  
Sur le pont d'Avignon, on y danse, tous en rond*

Une légende nous raconte que le créateur de ce pont serait un jeune berger du nom de Bénézet, à qui Dieu serait apparu en 1178, lui ordonnant de bâtir le pont. En réponse à l'évêque d'Avignon, qui lui demandait une preuve de cette intervention divine, le garçon se serait contenté de ramasser un énorme rocher et de le porter à l'endroit même où le pont devait être érigé.

Plus vraisemblablement, le Pont d'Avignon aurait été conçu par Frère Benoît, qui avait auparavant dirigé les travaux du Pont Saint-Esprit et de nombreux autres ponts. Malgré ses 390 mètres de longueur et ses 20 travées, ce pont élancé fut construit en l'espace de dix ans, ce qui est extraordinaire pour l'époque. À noter également les variations de la largeur de l'ouvrage. Au point le plus large, le pont mesurait 4,80 mètres, mais à l'endroit où fut bâtie la chapelle, au-dessus de la deuxième pile, la largeur ne dépasse pas 1,95 mètre. À quoi servait cet entonnoir ? À faciliter la défense du pont, naturellement, mais peut-être aussi à "sécuriser" le péage des pèlerins.

Malheureusement, il ne subsiste aujourd'hui que 4 travées sur les 20 initiales, ainsi que la chapelle, où le présumé créateur du pont fut enterré et, plus tard, canonisé pour devenir Saint Bénézet.

Au même moment, en Grande-Bretagne, un autre moine bénédictin, Peter de Colechurch, s'apprêtait à construire le premier pont en maçonnerie sur la Tamise. Une campagne enthousiaste fut lancée pour obtenir des fonds et tous les habitants de la ville y contribuèrent avec

générosité. À ce propos, la liste des donateurs resta affichée dans la chapelle du pont jusqu'au XVI<sup>e</sup> siècle. La popularité du Vieux Pont de Londres, achevé en 1206, devint telle qu'on ne tarda pas à y construire habitations et entrepôts.

Après de telles réalisations, les villes continuèrent de "parrainer" et de favoriser la construction de ponts et de routes, mais sans pouvoir toujours compter sur la participation des frères pontifes, souvent engagés dans des projets de longue haleine. Ceci favorisa l'apparition de guides de maîtres-maçons, qui se constituèrent pour offrir leurs services dans toute l'Europe.

Peu à peu, les "ténèbres" du Moyen Âge et de la féodalité cédèrent le pas à la lumière d'une nouvelle époque : la Renaissance.

Le Ponte Vecchio est le pont-rue piétonne-galerie marchande le plus ancien, le plus célèbre



Ponte Vecchio (Florence, Italie)

et le plus touristique de la ville de Florence en Italie dont il est l'emblème. Construit vers la fin de cette période, il marque un tournant au cours du Moyen Âge. Sur ce pont couvert, érigé en 1345, s'alignaient échoppes d'orfèvres et galeries de joailliers, par la suite surmontées d'un couloir reliant les palais royaux à ceux du gouvernement, les Offices au palais Pitti. Les piles, d'une épaisseur de 6 mètres, supportent encore actuellement les bâtiments en surplomb, ainsi que les travées du pont. La principale innovation est la portée de ses arcs, extrêmement peu profonds par rapport à ceux construits jusqu'alors.

Le Ponte Vecchio a été bâti comme un arc en voussoirs, procédé inhabituel à l'époque chez les constructeurs de ponts qui, avec les connaissances de l'époque, ne pouvaient pas déterminer mathématiquement la poussée. Cette réalisation reste donc un mystère, à l'instar de l'arc en voussoirs du Pont d'Avignon.

## Le Pont Valentré

La cité médiévale de Cahors, capitale du Quercy, n'est accessible par la terre qu'en venant du nord, par la route de Limoges. Cette situation exceptionnelle en faisait, au Moyen Âge, une ville facile à défendre.

Au XIV<sup>e</sup> siècle, le franchissement de la rivière (le Lot) était commandé par trois ponts fortifiés : à l'est, le pont neuf, bâti de 1251 à 1283, au sud un pont antique et finalement à l'ouest, le plus récent : le pont Valentré.



Le Pont Valentré (Cahors, France)

C'est le seul pont fortifié qui subsiste aujourd'hui en France. Long de 138 m, large de 5 m, constitué de 6 grandes arches ogives de 16,50 m, il est splendide. Les piles sont épaisses de 7 m et sont prolongées, en amont et en aval, par des avant-becs triangulaires très aigus.

Les becs remontent jusqu'au parapet pour former des refuges pour les piétons.

Trois tours carrées, à quatre étages, sont édifiées sur les piles extrêmes et sur la pile centrale. Elles sont hautes de 40 m au-dessus de l'étiage.

Les deux tours d'extrémité sont identiques : arbalétrières en forme de croix de Lorraine aux deux premiers étages, mâchicoulis au troisième. Ce sont à l'évidence des ouvrages de défense.

La tour centrale, un peu moins haute, n'offre que trois étages. C'était vraisemblablement un poste de commandement.

La première pierre fut posée par Maître G. de Sabanac, premier consul, le 17 juin 1308. L'ouvrage put être utilisé vers 1350 et a été terminé après 1580.

Ouvrage militaire, le pont Valentré a permis d'arrêter les Anglais pendant la guerre de cent ans, et Henri de Navarre, lors du siège de Cahors en 1580. Sur l'ouvrage se lisent encore les témoins des phases de construction.

On remarquera les trous de boulins pour accueillir les cintres en bois des arches mais aussi les vestiges de la passerelle de service, qui traversait chacune des piles par un passage voûté dans l'avant-bec.



En 1879, lors de sa restauration, une pierre a été scellée portant un diabolin sculpté au sommet de la tour médiane, afin de perpétuer la légende qui veut que l'architecte chargé de la construction n'ait pu terminer qu'après avoir passé un pacte avec le diable, qui tourna au désavantage de celui-ci. Pour se venger, il ne cessa d'écorner la tour jusqu'à sa restauration.

# La Renaissance

En Occident, entre le <sup>xv</sup><sup>e</sup> et le <sup>xvi</sup><sup>e</sup> siècle, les architectes des célèbres ponts de Florence, Venise et autres villes italiennes s'inspirèrent donc de formes régulières empruntées au passé, mais leur posture qui consistait à être davantage artistes que constructeurs les a conduits souvent à abuser des superstructures et autres décorations. Il suffit d'observer le pont du Rialto sur le Grand Canal à Venise pour s'en convaincre.

Le pont devient un élément central de grands projets d'urbanisme. En France, les premiers architectes de renom apparaissent, comme Jacques II Androuet du Cerceau à qui l'on doit le pont Neuf de Paris qui, commencé en 1578, ne sera achevé qu'en 1604 du fait des guerres de religion. Il facilite le passage entre le palais du Louvre et l'abbaye de Saint-Germain-des-Prés, il jouxte le monument érigé à la gloire d'Henri IV situé sur la pointe en aval de l'île de la Cité et constitue le pont en service le plus ancien de Paris. C'est à cette époque qu'est introduit l'arc en anse de panier, courbe à trois ou plusieurs centres, sans jamais toutefois se substituer à la courbe en plein cintre.

Durant la Renaissance naît la science moderne, grâce notamment au génie et à la curiosité de Copernic, Léonard de Vinci, Galilée et grâce à Michel Ange, Filippo Brunelleschi et Andrea Palladio pour l'art et l'architecture. Jamais, depuis Homère, Aristote et Archimède, n'avaient été réalisées de si grandes découvertes en sciences et en mathématiques, ni de si grandes œuvres d'art et d'architecture.

En effet, la Renaissance constitue une période de quête permanente de la vérité, d'explication des phénomènes naturels, de plus grande prise de conscience de soi ainsi que d'analyse rigoureuse des cultures grecque et romaine. La construction des ponts est enfin considérée, surtout en Italie, comme un art à part entière. Les deux dimensions, esthétique (ornementation et harmonie des proportions) et pratique (stabilité et pérennité de l'œuvre), reçoivent une égale attention.

Pour la première fois, la conception des ponts est le fait d'architectes, comme Léonard de Vinci, Palladio, Brunelleschi et même Michel Ange, tous désireux d'expérimenter de nouvelles formes.

À cet égard, les apports essentiels de la Renaissance furent l'invention du système à poutres-treillis, mis au point par Palladio à partir notamment de la technique de construction des combles à planchers suspendus, et l'avènement de l'analyse structurelle, avec le premier livre écrit sur le sujet et publié par Galilée en 1638 ("Dialogues sur la nouvelle science").

En fait, Palladio bâtit peu de ponts, car ses idées sur les modèles à poutres-treillis étaient souvent jugées trop audacieuses et son travail tomba dans l'oubli jusqu'au <sup>xviii</sup><sup>e</sup> siècle. Son grand traité "Quatre Livres d'architecture", paru en 1570 et dans lequel il appliquait à la construction des ponts quatre systèmes de poutre-treillis, devait influencer les futurs bâtisseurs de ponts, lorsque la poutre-treillis

remplaça la voûte romaine, jusqu'alors prédominante.

En marge de ces artistes œuvrèrent aussi d'autres constructeurs de ponts, plus habiles techniciens, avant tout soucieux d'économiser main-d'œuvre et matériaux, mais néanmoins dignes d'être cités, comme Bartolomeo Ammannati, Antonio da Ponte et bien sûr Androuet du Cerceau.

## Le pont du Rialto (Venise, Italie)

*Le Rialto est formé d'une seule arche en vousoirs d'environ 26 mètres de long, dont la clef de voûte culmine à environ 8 mètres. D'une largeur dépassant légèrement 22 mètres, il se compose d'une voie centrale bordée de deux rangées latérales de boutiques et, sur la partie extérieure longeant les parapets, d'une petite allée. Deux ensembles d'arcs (six de part et d'autre de la grande arche centrale) supportent le toit et enserrent les vingt-quatre boutiques. Sa construction dura trois ans et demi, dont deux pendant lesquels furent mobilisés tous les tailleurs de pierre de la cité.*



En Italie, mais aussi dans toute l'Europe, furent érigés des ponts d'une conception tout autant nouvelle et hardie. En Bohême, par exemple, pour franchir la Moldau à Prague, on construit, à partir de 1357, le Pont Charles, ouvrage le plus long au-dessus d'un cours d'eau, le plus monumental et un des plus majestueux de la Renaissance. Sa construction s'étala sur un siècle et demi. Orné de statues représentant saints et martyrs, il se termine sur chaque rive par une imposante tour de garde.

Parallèlement à Paris s'achevait le pont Neuf, bel exemple des débuts de la Renaissance française, conçu par Jacques II Androuet du Cerceau. Construit à la fin du XVI<sup>e</sup> siècle et terminé au début du XVII<sup>e</sup>, il doit son nom à la nouveauté que constituait à l'époque un pont dénué d'habitations et pourvu de trottoirs protégeant les piétons de la boue et des chevaux. Deuxième pont en pierre construit à Paris, il ne représente pas, de par sa conception et sa construction, une avancée architecturale majeure, même s'il tient une place particulière dans le cœur des Parisiens. Ses deux bras, qui relient l'île de la Cité aux rives gauche et droite de la Seine, constituèrent une entreprise d'envergure. Ainsi, bien que toutes les voûtes soient construites en plein cintre et non en voussoirs, il n'en est pas deux identiques, variant par leur portée (de 9 à 18 mètres), mais aussi, en amont et en aval, par leurs arches, bâties sur une inclinaison de 10 %. Par ailleurs, Jacques II Androuet du Cerceau voulait faire du pont une voie dégagée, sans maisons ni échoppes, ce qui déplut aux Parisiens, qui

réclamèrent boutiques et habitations et, plus tard, finirent par obtenir gain de cause. Il fallut alors modifier les quelques piles à faible portée.

Le pont Neuf, aujourd'hui vieux de quatre cents ans, était devenu le centre commercial de la ville, ainsi que la principale voie d'accès conduisant vers l'île de la Cité, grouillante d'activité. Toutes sortes de commerces s'y installèrent : libraires, pâtisseries, jongleurs, marchands ambulants... en envahissant littéralement la chaussée. Près de deux cents boutiques foraines se nichèrent dans tous les recoins, le long du trottoir. Le bras de la rive gauche du pont Neuf, plus long, fut largement reconstruit en 1850 avec une fidélité scrupuleuse, après de multiples réparations apportées à ses médiocres fondations. En revanche, le bras de la rive droite, plus court, n'a pas bougé et, complètement débarrassé de ses boutiques, sert aujourd'hui de voie routière.

Non loin du pont Neuf, construits aux derniers temps de la Renaissance française durant le XVII<sup>e</sup> siècle, on trouve le pont Royal et le pont Marie, tous deux encore debout aujourd'hui.

Le pont Royal fut, à Paris, le premier pont à comporter des voûtes elliptiques et à utiliser un caisson ouvert pour ménager un compartiment de travail sec dans le lit du fleuve. Les fondations des piles furent conçues et construites sous la direction de François Romain, pasteur flamand expert dans la résolution des problèmes de fondation et auquel, d'ailleurs, l'architecte François Mansart

et le constructeur Jacques Gabriel feront appel pour d'autres œuvres. François Romain inventa une machine pour draguer le lit du fleuve et le préparer à recevoir le caisson.

La Renaissance fut un siècle d'immenses progrès. Pour la première fois, le pont fut considéré comme une œuvre d'art. Désormais, le bâtisseur de ponts se devait de réunir trois fonctions : architecte, théoricien et maître d'œuvre de la construction.

perplexes quant aux procédés employés pour réussir à imprimer aux arcs une courbe aussi gracieuse.

En Asie, les ponts voûtés chinois atteignent l'apogée de leur splendeur dans le Fujian avec des arcs très fins. Le pont de Xiao construit en 1470 a une hauteur libre de 7,2 m avec une épaisseur d'arc de seulement 20 cm, la moitié d'un arc normal. Il est toujours en service et supporte le trafic actuel. Un autre pont



Le pont Santa Trinita (Florence, Italie)

Démonstration éclatante des compétences techniques acquises, le pont Santa Trinita à Florence, avec ses arcs elliptiques, conçu par Bartolommeo Ammannati en 1567, laisse encore de nos jours de nombreux spécialistes

remarquable de cette époque est celui de Gaopo, situé dans le Yongding et construit en 1477. Sa portée est de 20 m et son arc n'a que 60 cm d'épaisseur, sans aucun mortier de liaison !

## Le Pont-Neuf de Toulouse, l'histoire d'une obstination

Au *xv<sup>e</sup>* siècle, le mauvais état du pont de la Daurade fit envisager son remplacement. La construction du nouveau pont fut initiée par les Capitouls (nom donné à Toulouse aux magistrats municipaux), mais elle ne commença réellement qu'en 1541, lorsque le roi François Ier décida d'en financer la construction par un impôt exceptionnel sur la région.

En 1542, six experts maçons et charpentiers venant d'Agen, de Moissac et de Montauban furent appelés pour dresser un projet du pont. Munis d'une longue barre de fer, ils montèrent sur une barque et sondèrent le lit du fleuve pour y reconnaître les meilleurs sites afin d'implanter les piles. Ils dressèrent leurs rapports préconisant de construire un pont à sept piles et huit arches de pierres.

Le grand conseil de la ville accepta cette proposition et, dès 1543, passa le marché à plusieurs maçons et charpentiers associés, dirigés par le célèbre architecte Toulousain Nicolas Bachelier.

En 1544, la première pile fut achevée (car elle était accessible à pieds secs depuis la rive gauche).

Par contre, pour construire les piles suivantes, il fallait faire des batardeaux, c'est-à-dire créer une enceinte étanche afin que l'on puisse la vider et commencer à construire la pile. À l'époque, ces batardeaux étaient constitués de planches verticales battues dans le sol entre lesquelles on remplissait l'intervalle d'argile. La réussite d'une telle opération supposait que l'enceinte soit plantée suffisamment profondément pour que l'eau ne remonte pas par-dessous. Elle supposait aussi que l'on puisse écoper au fur et à mesure des infiltrations.

Sur cet ouvrage, lors de l'exécution des fondations des culées, les maçons n'ont pu battre profondément les

planches et il a fallu dix années avec dix campagnes successives pour obtenir le résultat recherché.

On passa à la deuxième pile : un nouveau charpentier fut désigné, Jean Maignien pour la construction du batardeau. Un an plus tard, il n'arrivait toujours pas à assécher la pile. La ville désigna deux nouveaux charpentiers avec un maçon et enfin, en décembre 1555, on put poser la première pierre. Quelques jours plus tard, l'eau envahit le batardeau et le disloqua.

Qu'importe, la ville était terrassée et un nouveau marché fut passé en mai 1556 avec Jean Bayard (bourgeois de la ville de Puylaurens qui comptait sans doute, en s'improvisant entrepreneur, s'assurer de confortables bénéfices).

Malgré toutes les avances reçues, huit mois plus tard, le premier batardeau n'avancait guère. En février, deux experts furent nommés et s'aperçurent que Bayard n'avait même pas approvisionné en totalité le chantier. Après procédure, il fut jeté en prison en 1557.

En 1561, une pile fut achevée tant bien que mal. Inutile de préciser qu'aucun entrepreneur de métier ne se présentait pour continuer le marché, et la ville fut forcée de faire travailler le chantier "en régie".

En 1571, l'administration royale qui accordait d'année en année une reconduction d'impôt pour cet ouvrage ruineux (rappelons qu'il fut commencé en 1542, soit déjà 29 ans plus tôt) décida de créer une commission spéciale chargée d'assurer la direction des travaux, jugeant que la gestion des Capitouls manquait de rigueur. On décida même de réduire à six le nombre de piles.

En 1579 fut lancée la cinquième pile (deux générations déjà).

De 1585 à 1597, le chantier s'arrêta car la guerre civile faisait rage.

Dominique Bachelier, architecte (le fils de Nicolas), dut présenter avec ses associés charpentiers des maquettes de la réalisation qu'il envisageait.

Cette fois, la pile était fondée sur des pieux battus dans le lit car on ne pouvait atteindre le niveau des marnes compactes. Une réussite... mais la pile n'avait pas la solidité requise. En 1610, elle s'est séparée en deux, les crues de la Garonne ayant eu raison d'elle.

De 1610 à 1612, il a fallu reconstruire la cinquième pile et en 1619 réparer la quatrième. Quant au voûtement, il fut réalisé en deux phases : la première de 1614 à 1619, la seconde de 1626 à 1632.

Quatre-vingt-dix ans se sont écoulés. Que de moyens mis en œuvre pour tenter de dompter cette eau indisciplinée !



© Julien Boyer - Malzac - Fotolia.com

# Le XVIII<sup>e</sup> siècle, l'âge de raison

**C'est au XVIII<sup>e</sup> siècle, essentiellement grâce aux innovations des ingénieurs français et britannique Jean-Rodolphe Perronet et John Rennie Mackintosh, que la construction des arches en maçonnerie atteint une sorte de perfection. Cependant, sept mille ans après la construction de la première arche en encorbellement en Mésopotamie, apparaissent un nouveau matériau de construction, le fer, et une nouvelle technique, la poutre-treillis en bois. Ils allaient bientôt devenir les principaux éléments de construction.**

On assiste à la naissance du génie civil en tant que métier. À Paris s'ouvre la première école de travaux publics, l'École de Paris, fondée sous le règne de Louis XV. Son directeur, Jacques Gabriel, a conçu le pont Royal. Celui-ci est chargé de recueillir et de consigner toutes les informations et connaissances sur la science et l'histoire des ponts, des bâtiments, des routes et des canaux. Il était inévitable que l'architecture du bâtiment et le génie civil deviennent deux domaines de compétence distincts. Il apparaissait clairement que l'instruction générale dispensée en matière de génie civil par le corps des ponts et chaussées, à l'École de Paris, s'avérait insuffisante pour les projets de grande envergure. Une formation spécifique sur la construction des ponts s'imposait.

C'est ainsi que naît à Paris, en 1747, l'École des ponts et chaussées. Daniel-Charles Trudaine fut le fondateur et Jean-Rodolphe Perronet, jeune et brillant ingénieur, à la fois le professeur principal et le directeur.

À la suite de la création du corps des ponts et chaussées en 1716, un arrêt du conseil du roi décide donc en 1747 de la mise en place d'une formation spécifique des ingénieurs d'État, l'École royale des ponts et chaussées, fondement de la future École nationale des ponts et chaussées. Il s'agit alors du début du contrôle progressif et efficace par l'État de la construction des routes, ponts et canaux et de la formation des ingénieurs du génie civil.

Auparavant, seigneurs, guildes et ordres monastiques partageaient avec l'État cette compétence et le recrutement des techniciens se faisait au coup par coup. En 1775, l'École prend le nom d'École nationale des ponts et chaussées.

Jean-Rodolphe Perronet, le premier directeur, qui exerce cette fonction de 1747 à 1794, est un ingénieur, administrateur et érudit participant notamment à l'élaboration de "l'Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers", dirigée par Denis Diderot et Jean le Rond d'Alembert.

Sans professeurs, la petite cinquantaine d'élèves, dont Lebon, Bernardin de Saint-Pierre, Pierre-Simon Girard, Riche de Prony, Méchain et Brémontier, pratique l'auto-apprentissage dans

des domaines aussi divers que la géométrie, l'algèbre, la mécanique, l'hydraulique... La visite de chantiers, les collaborations d'apprentissage auprès de savants et la participation au levé de la carte du royaume complétaient leur formation, qui durait quatre à douze ans.



## Du rôle de l'État

*En France, la construction et l'entretien des routes, des ponts et des canaux est restée très longtemps la seule compétence des autorités locales, seigneurs, communautés, associations de marchands ou ordres monastiques qui percevaient souvent un droit de péage destiné à financer les travaux effectués par leurs soins.*

*Ce n'est qu'à partir de la Renaissance que se manifeste une volonté de prise en main par l'État des voies de communication et de leurs infrastructures avec les lettres patentes de 1508 enjoignant aux trésoriers de France "de voir ou faire voir et visiter tous chemins, chaussées, ponts, pavés, ports et passages du royaume".*

*La tentative de coordination des tâches de construction et d'entretien des routes et des ponts du royaume sera menée près d'un siècle plus tard par Sully, pour lequel Henri IV crée un office de grand voyer de France qui finalement ne connaît guère plus de succès.*

*Le grand voyer de France était, pendant l'Ancien Régime, le grand officier de la couronne de France responsable des routes royales, des alignements urbains, des places publiques, de l'embellissement des villes en général.*

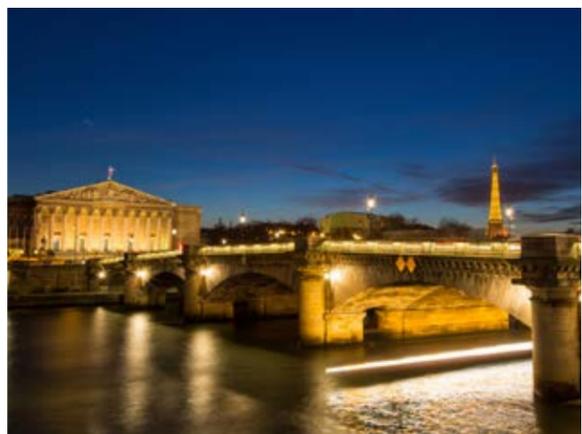
*Cette charge a donc été érigée en grand office de la couronne par Henri IV pour Sully en 1599.*

*Il faudra attendre Colbert et la fin du XVII<sup>e</sup> siècle pour qu'une politique à la fois dirigiste et efficace en matière d'aménagement du territoire voie le jour.*

Jean-Rodolphe Perronet fut plus tard surnommé le "père des ponts modernes", du fait de son génie créatif et des beaux ponts en arches de maçonnerie qu'il a conçus au cours du XVIII<sup>e</sup> siècle. Pour les voûtes, il choisit la courbe d'un arc de cercle de rayon supérieur à celui de l'arc en anse de panier. Pour accentuer l'élancement de l'arche, il surélève considérablement les reins de celle-ci au-dessus des piles.

Il fut le premier à comprendre que la poussée horizontale de l'arche se transmet aux culées par le biais des voûtes et que les piles doivent non seulement supporter la charge verticale, mais aussi résister à l'écart entre les poussées des voûtes adjacentes. Il en conclut donc que, si les poussées des arches s'équilibrent et que toutes les arches sont mises en place avant de retirer le cintre, on peut diminuer nettement la taille des piles.

De son œuvre, il ne reste aujourd'hui que son dernier ouvrage, le célèbre pont de la Concorde à Paris, qu'il entreprit vers l'âge de 80 ans. Il s'agit d'une construction en arches de pierre d'une élégance rare.



*Le pont de la Concorde (Paris, France) et le palais Bourbon qui accueille l'Assemblée Nationale*

Le reste de l'Europe ne pouvait qu'admirer et imiter ces grandes avancées réalisées, en France, dans la construction des ponts.

De l'autre côté de la Manche, un jeune Écossais du nom de John Rennie Mackintosh poursuit la voie tracée par les grands ingénieurs français. Il était d'ailleurs considéré comme le successeur de Perronet, devenu un vieillard lorsqu'il commença sa carrière. Brillant mathématicien, mécanicien de génie et pionnier du génie civil, il avait travaillé dans sa jeunesse pour James Watt à la construction des premières meules à vapeur d'Abbey Mills, à Londres et, plus tard, avait conçu les canaux et les systèmes de drainage pour assécher les marécages du Lincolnshire.

John Rennie Mackintosh bâtit son premier pont en 1779, sur la rivière Tweed à Kelso, en Écosse. L'entreprise était modeste : un rapport hauteur/portée de 1/6 et une travée

à arches semi-elliptiques traditionnelle. Pour la conception, il puisa son inspiration dans des manuels et des thèses traitant du sujet, ainsi qu'à travers les discussions sur les arches et les voussoirs qu'il eut avec son mentor, le Dr Robison de l'université d'Édimbourg. Selon Rennie, les ponts devaient être surmontés d'une chaussée plane, rompant ainsi avec la tradition anglaise des poutres en forme de dos-d'âne. Ce parti pris audacieux fit l'unanimité auprès des citoyens, des fermiers et des marchands qui empruntaient ces voies pour transporter matériel et bétail.

Le pont de Kelso fut le précurseur des nombreux et célèbres ponts que Rennie allait construire, dont ceux de Waterloo, Southwark et le Nouveau Pont de Londres ("New London bridge"). Importante innovation, le cintre des arches du pont de Waterloo fut assemblé sur la berge, puis transporté sur des barges pour être mis en place. Ce procédé original et inédit permit d'installer l'ossature de chaque travée en l'espace d'une semaine. À ce rythme, Rennie parvint à diviser par deux la durée de la construction.

**Les innovations de John Rennie Mackintosh (arches semi-elliptiques, procédé de construction astucieux et technique de préfabrication rapide), ainsi que les découvertes de Jean-Rodolphe Perronet (arcs en voussoirs, piles moins massives et compréhension mathématique de la poussée des arches), transformèrent définitivement les théories sur la construction des ponts.**

## **Le pont de Gignac (Hérault, France)**



*Les états du Languedoc décidèrent de construire un pont sur l'Hérault, pour faire passer la route de Montpellier à Lodève. Le directeur de travaux publics du Languedoc, Bertrand Garripuy, proposa de construire un pont monumental pourvu de trois arches seulement. L'arche maîtresse devrait avoir un peu plus de 50 m d'ouverture, encadrée par deux arches pleins cintres de 26 m.*

*Il fallut pas moins de 36 ans pour construire cet ouvrage, 5 ingénieurs se succédant à la tâche, de 1774 à 1810. Mais que sont 36 ans pensent l'eau et le pont, quand le résultat consacre à un tel niveau les évolutions depuis l'époque Romaine ?*

*Le pont de Gignac est l'aboutissement d'une culture. Ce pont fut peut-être le chant du cygne de la construction des ponts routiers en maçonnerie. Un hymne à la gloire des ingénieurs.*

*Ses dimensions, son appareil, sa corniche horizontale... lui confèrent un aspect de puissance invincible.*

## Les facteurs de destruction et de dégradation d'un pont

Au XVIII<sup>e</sup> siècle, l'ingénieur Gauthey ne recense pas moins de 543 ponts, réalisés entre 1700 et 1789, soit un ensemble tout à fait considérable si on le compare aux quelque 774 ponts antérieurs au XVIII<sup>e</sup> siècle ! Sur ces 543 ponts, les trois-quarts environ sont en maçonnerie, un quart en charpente. Un inventaire du Ministère des Travaux Publics, daté de 1873, nous renseigne sur les résultats de la première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle.

Près de 836 ouvrages sont réalisés entre 1800 et 1848. Les ponts de pierres se taillent toujours la part du lion avec 467 unités mais on remarque aussi l'importance prise par les ponts suspendus, au nombre de 158.

Le faible coût des ouvrages suspendus conduit à leur multiplication rapide tandis que les ponts métalliques demeurent peu nombreux, leur prix de revient n'étant guère inférieur à celui des ponts en maçonnerie.

Importés d'Angleterre en 1823, de nombreux ponts suspendus seront par la suite conçus et réalisés par le secteur privé sous le régime de la concession et en rupture avec le monopole traditionnel de l'administration des ponts et chaussées. Avec les ponts suspendus se précise ainsi la possibilité de nouvelles relations plus souples que par le passé entre l'État et l'initiative privée.

L'initiative privée permet de faire évoluer les techniques et l'économie. À la suite d'une série d'accidents, comme la chute du pont de la

Basse chaîne à Angers en 1850, la construction de ponts suspendus va se ralentir. En effet, une troupe militaire traversant au pas cadencé le pont de la Basse-Chaîne, pont suspendu sur la Maine à Angers, provoqua la rupture du pont par résonance et la mort de 226 soldats. Depuis, le règlement militaire interdit en France de marcher au pas sur un pont.



Catastrophe du pont de la Basse chaîne à Angers, en 1850

Un des facteurs les plus importants est lié au phénomène de **résonance**. Ce phénomène apparaît lorsqu'une vibration est appliquée sur l'objet et que cette vibration atteint exactement la même fréquence que la fréquence de résonance du matériau, appelé fréquence propre. En effet, la fréquence propre est la fréquence d'oscillation d'un système lorsqu'il est en évolution libre, c'est-à-dire sans force excitatrice extérieure ni forces dissipatives (frottements ou résistances, par exemple). Lorsque cela arrive, il y aura à chaque période, un gain d'énergie, ce qui entraînera une amplification des oscillations. La vibration prendra donc elle aussi de l'amplitude ce qui peut engendrer de graves dégradations, voire même la destruction pure et simple. Il peut se manifester à la suite d'un coup de vent, d'un séisme et même lors d'une marche au pas cadencé d'une troupe !



Un pont qui entre en résonance, c'est une vision inimaginable !

## Quelques ponts tristement célèbres...

**Pont de pierre à Tours (Indre-et-Loire, France)**, construit de 1765 à 1810, long de 434 m avec 15 arches de 24,30 m. À la débâcle du 25 janvier 1789, 3 piles et 4 arches s'effondrèrent par une crue de 7 m.

**Le pont d'Andrezieux (Loire, France)**, le 17 octobre 1907 sur la Loire, construit en 1847, en remplacement d'un pont semblable construit en 1831 et également emporté en 1846.

**Le Pont sur la Tay** au Sud de Dundee en Écosse (le plus grand pont du monde à l'époque, 3 150 m). La catastrophe eut lieu le 28 décembre 1879. Mis en service en 1878 après 6 ans de travaux, 84 voyageurs périrent.

### **Pont suspendu à Saint-Denis-de-Pile (Gironde, France)**

Lors des essais en 1931, 16 camions pesant au total 120 tonnes firent casser les suspentes (il y eut 10 morts et 17 blessés graves).

### **Le Tacoma-Bridge (Washington, États-Unis)**

Il s'écroula 4 mois après son achèvement par un vent de 70 km/heure, le 7 novembre 1940.

## Les ponts de charpentiers

**Les États-Unis, avec leur vaste réseau routier et fluvial et en raison de leur croissance commerciale au XVIII<sup>e</sup> siècle, allaient devenir au siècle suivant le "pays des ponts de bois".**

Comme il n'existait pas de tradition de la construction en pierre dans ce pays neuf, les premiers bâtisseurs de ponts employèrent le matériau le plus abondant et le plus économique : le bois. Ils produisirent des structures de bois parmi les plus remarquables bien qu'ils n'en fussent pas les inventeurs.



*Pont en bois de Wettingen, sur la rivière Limmat, à l'ouest de Zurich (Suisse)*

Les frères Grubenmann, en Suisse, furent les premiers à concevoir des ponts à poutres-treillis presque totalement en bois. Celui de Wettingen, sur la rivière Limmat, passait pour leur plus bel ouvrage. Le pont forme une arche parabolique à laquelle était fixée une poutre-treillis en bois. La portée du Pont de Wettingen

(près de 120 mètres) dépassait largement celle des ponts en bois de l'époque.

De leur côté, Timothy Palmer, Louis Wernwag et Theodore Burr, nommés les "charpentiers bâtisseurs de ponts de l'Amérique du Nord", plus intuitifs que scientifiques, imaginèrent l'arc à poutres-treillis pour obtenir une portée plus grande que celle de toute autre construction en bois, découvrant par là même la dernière des trois formes fondamentales de pont. Le premier à populariser cette trouvaille en Amérique fut Timothy Palmer, un Yankee de la Nouvelle Angleterre. En 1792, il bâtit sur la rivière Merrimack un ouvrage composé de deux arcs en treillis, semblable à l'un des systèmes à treillis de Palladio, à la différence près que l'arc de Palmer constituait la principale structure d'appui.

Parmi les ouvrages de Timothy Palmer, citons le "pont permanent", construit en 1806 sur la rivière Schuylkill. Une fois l'ouvrage achevé, le président de la compagnie suggéra d'y ajouter un revêtement pour empêcher le bois de pourrir et de se détériorer avec le temps. Palmer fit mieux : il recouvrit aussi les côtés, enfermant complètement le pont, donnant ainsi naissance au pont couvert, si caractéristique des ponts américains. Cette couverture empêchait la neige de pénétrer et de s'entasser sur le tablier, ce qui écartait tout risque d'effondrement.

De son côté, Louis Wernwag, immigrant allemand de Pennsylvanie, bâtit au cours de sa vie vingt-neuf ponts de type poutres-treillis. Ces ponts,

à la différence de ceux de Palmer, associaient parfaitement l'arc et la poutre-treillis dans une structure mixte. Son plus célèbre pont fut le "Colosse", juste en amont du "pont permanent", de Palmer. Deux paires d'arches parallèles, reliées par une poutre-treillis multiple, soutenaient la chaussée. La poutre-treillis elle-même servait de renforcement et se composait de lourds montants et de diagonales légères. Ces diagonales étaient constituées de barres de fer pour la première fois employées pour un pont de grande portée. En son temps, le "Colosse", avec ses 91 mètres, était le plus long pont en bois des États-Unis. Détruit par un incendie en 1838, il fut remplacé par un pont suspendu.

Theodore Burr, quant à lui, fut le plus célèbre des trois. Il mit au point un système de poutre-treillis basé sur le simple système à treillis de Palladio. Très proche du vrai pont à poutres-treillis, ce système se révéla pourtant instable sous les charges mobiles. Burr consolida alors la poutre-treillis par un arc. C'est l'arc qui fut ajouté à la poutre-treillis et non l'inverse, système offrant le double avantage de la rapidité d'assemblage et de l'économie, et qui demeura longtemps en vogue aux États-Unis pour la construction des ponts en bois.

En 1820, le principe de la poutre-treillis avait été amplement exploré et, bien qu'il demeurât théoriquement inexploité, il avait été largement éprouvé dans la pratique.

Ce fut Ithiel Town qui imagina et bâtit le premier véritable pont à poutres-treillis, qu'il breveta

sous le nom de Town Lattice. Pour la première fois, les poutres-treillis ne subissaient ni l'action d'un arc, ni aucune poussée horizontale. Simple à construire (quelques jours suffisaient pour l'assembler à l'aide de clous), il offrait aussi la solution la moins onéreuse. Pour en faire la promotion, Town lança le slogan "built by the mile and cut by the yard" (construit au kilomètre et coupé au mètre).

**Mais peu à peu, avec l'avènement du chemin de fer, la construction des ponts aux États-Unis allait prendre deux orientations distinctes : une école continua à ériger des structures à poutres-treillis plus minces, tandis que l'autre se lançait dans l'aventure de la fonte et du fer puddlé, forme primitive de l'acier.**

La première poutre-treillis brevetée incorporant du fer dans une structure en bois fut celle de William Howe, pionnier de ce type de ponts aux États-Unis. Les membrures et le contreventement diagonal étaient en bois, tandis que les éléments verticaux se composaient de barres de fer en tension. Une conception qui allait perdurer jusqu'au siècle suivant.

Par la suite, le système du constructeur Pratt inversa les forces de la poutre-treillis Howe en soumettant les éléments verticaux en bois à une compression et les éléments diagonaux en fer à une traction. Ce n'est qu'en 1847 que fut construite la première poutre-treillis entièrement en fer, par l'ingénieur civil

américain Whipple : la poutre-treillis bow-string. Plus tard, Fink, Bollman, Bow et Haupt aux États-Unis, ainsi que Cullman et Warren en Europe, firent de la poutre-treillis un véritable art, associant bois, fer et câbles en torons afin d'obtenir des ponts légers, mais assez solides pour supporter des voies ferrées.

# Pontife I

“De quelles poutres, de quelles pierres, de quel béton bâtir les ponts pour qu’ils puissent unir des rives différentes ? Comment une même matière, bois ou fer, peut-elle toucher à la fois droite et gauche, France et Allemagne, terre et paradis ? Même mystère de simplicité dans le **trait d’union**, dont voici trois exemples.

Si le **chien-loup** associe deux canidés, l’un *latrans*, l’autre *lupus*, l’un sauvage, l’autre domestiqué, reste qu’un ancêtre commun les rapproche ; déjà plus difficile à percevoir, le **clair-obscur mêle** deux lumières contraires, dont l’une éblouit, dont la seconde aveugle ; maximisation à la fois du mystère et de la simplicité du trait, **Jésus-Christ fait tenir ensemble** un prénom sémite avec un adjectif grec ; ainsi fonde-t-il une ère où des peuples parlant indo-européen laisseront les cultes de leur terre et de leur père pour se convertir à la religion d’une autre culture, d’une autre famille de langues ; il fait plus que traduire cette conversion, **il la ponte**.

Trait d’union matérialisé, **le pont réunit de même des altérités**. Sur le Bosphore, il met en court-circuit l’Europe et l’Asie. Je ne sais s’il **convertit, traduit, transmute ou transsubstantie**, reste que **sa matière, sa substance, bois, pierre ou béton, s’adapte à des rivages sans rapport. Autant dans le trait qui lie deux mots que dans le tablier qui rapproche deux rives, je soupçonne de l’universel**. Sur le pont de Kehl, on danse à la fois en Allemagne et en France, ni en France, ni en Allemagne. Ni l’une ni l’autre et les deux à la

fois. Logique diabolique sur le pont du Diable, à Cahors, sur le Lot, ou logique divine sur le pont des Anges, sur le Tibre, à Rome. Les deux, une fois encore. Car si la bataille fait rage sur le pont d’Arcole ou sur celui de la rivière Kwai, **l’amour joint** la femelle au mâle en un acte que nul ne peut qualifier de masculin ni de féminin.

L’aise, la paix, la sérénité, comme le bonheur, **la conciliation**, l’enchantement et l’extase ne se moque-t-il pas de la logique ? Le cœur a des rigueurs que la rigueur ne connaît pas.

Sans pont donc, pas de chemin ; entendez par là de connexion d’un point, tel, à un autre, tout autre ; Sans pont donc, pas de méthode ; entendez par elle, un chemin du même à l’autre . . .”

Michel Serres  
*L’art des ponts, homo pontifex*

## Les ponts modernes du XIX<sup>e</sup> siècle à nos jours

**Au début du XIX<sup>e</sup> siècle, architectes et ingénieurs bénéficiaient d’une longue pratique de la construction des ponts en pierre et en bois. Mais la voûte de pierre et mortier, malgré son antériorité, relève encore d’un certain empirisme, ce qui fait dire à Paul Séjourné, dans la première phrase de son ouvrage “Grandes Voûtes” (dont les 6 tomes sont publiés entre 1913 et 1916) : “On fait une voûte d’après les voûtes faites : c’est affaire d’expérience”.**

Les formules courantes, déduites de l’observation et de la pratique, étaient nombreuses. L’épaisseur à la clef, celle des reins, des piles ou des culées, étaient déduites simplement de l’ouverture du pont. Augustin de la Hire en 1695, puis en 1712 tente une première approche du calcul des voûtes, calcul qui consiste à vérifier, a posteriori, que la voûte dessinée sera stable, et que les matériaux qui la constituent ne s’écraseront pas sous le poids. Il met en évidence deux notions qui, un siècle plus tard, se révéleront extrêmement fécondes :

- la courbe des pressions : c’est l’enveloppe de la résultante des actions qui s’exercent sur un joint quelconque de la voûte,

- la rupture par blocs : la voûte est supposée se casser en trois blocs indépendants qui se séparent par glissement, le frottement est supposé nul.

Ces hypothèses, fausses, permirent néanmoins d’approcher le calcul des culées. En 1810, Louis-Charles Boistard montre, à la suite de nombreux essais, que la rupture des voûtes se produit par la rotation de quatre blocs. Ces résultats permettent à Méry de publier en 1840 une méthode de vérification des voûtes qui allait être utilisée pendant tout le XIX<sup>e</sup> siècle et l’est encore parfois de nos jours. En 1867, Durand-Claye améliore cette méthode, mais sa proposition connaît moins de succès car elle nécessite des calculs laborieux.

## La résistance des matériaux, vers une approche scientifique

Pour que de nouvelles formes de ponts naissent, il fallait progresser globalement sur la qualité des matériaux et leur connaissance ! La mécanique avait pris sa forme quasi définitive avec Joseph-Louis Lagrange. Galilée (résistance des poutres-consoles et des poutres sur appuis simples), Hooke (hypothèse d'allongement ou de raccourcissement d'un barreau de fer proportionnel à l'effort axial, Bernoulli (équation de la courbe déformée), Euler (la charge critique), Coulomb (poussée des terres), Young (coefficient de proportionnalité de la loi de Hooke)... de nombreux scientifiques font potentiellement progresser l'art de la construction des ponts.

On commence vraiment à pratiquer la résistance des matériaux avec le Résumé des leçons données à l'école des Ponts et Chaussées, sur l'application de la mécanique à l'établissement des constructions et des machines, professé par Navier à Paris en 1833. Navier, Lamé, Cauchy, Clapeyron, Barré de Saint-Venant, Boussinesq développent ensuite la Théorie de l'Élasticité, qui permettra d'asseoir la résistance des matériaux (RDM) sur des bases solides.

Le XIX<sup>e</sup> siècle voit se développer et se diversifier la formation, la documentation et la diffusion du savoir sur les ponts. Les Écoles d'arts et métiers d'Angers et de Châlons sont créées dès le premier Empire. L'École des arts et manufactures (Centrale de Paris) est créée en 1829. De très nombreuses publications technico-scientifiques naissent : les Annales

des Mines, les Annales des Ponts et Chaussées, les Annales de la voirie vicinale, les Annales de la Construction, Le Portefeuille du Conducteur, le journal Le Génie Civil... À la fin du siècle, les écoles d'application de l'École polytechnique ouvrent leurs portes aux élèves-ingénieurs non-fonctionnaires et d'autres écoles d'ingénieurs sont créées.

## Du fer à l'acier



Viaduc de Garabit (Cantal, France) avec sa portée de 164 m, un ouvrage ferroviaire entièrement métallique, construit par la société Gustave Eiffel & Cie et achevé en 1884

**Le fer** est plus résistant que la pierre. Il offre une résistance à la traction faible, mais nettement plus élevée que celle de tout autre matériau disponible avant la production de masse de l'acier. Le tout premier grand pont en chaîne de fer a été construit en Chine environ 600 ans av. J.-C. (Lan Chin, dans la province du

Yunnan, avec une portée d'environ 60 mètres). En Europe, les premiers ponts métalliques (en **fonte**) sont construits en Angleterre au milieu du XVII<sup>e</sup> siècle. Le premier, l'Iron Bridge, est conçu par Thomas Farnolls Pritchard et construit en 1779. Une trentaine d'ouvrages en fonte sont ainsi construits outre-Manche avant 1830.

Tous s'inspirent étroitement des formes et des techniques employées pour les ponts maçonnés, mais la plupart auront une très faible durée de vie, car la fonte est un matériau fragile.

Aux États-Unis, les poutres triangulées se développent avec rapidité, en s'inspirant des ponts en bois. En Europe, les ouvrages pionniers sont le viaduc de Crumlin, en Angleterre, et celui de Fribourg, en Suisse (1857).

Le fer, se substituant à la fonte, a aussi été employé pour construire des arcs, mais il a surtout permis de créer des arcs triangulés, notamment pour les deux grands viaducs d'Eiffel : le pont Maria Pia à Porto (Portugal) en 1877 et le viaduc de Garabit (Cantal, France) en 1884.

Les ponts en fer furent le théâtre des pires catastrophes de l'histoire des ponts. Les locomotives à vapeur et les wagons de marchandises sont à l'origine de phénomènes de contrainte cyclique portant sur la structure de l'ouvrage, avec des variations passant d'une charge nulle à une charge élevée puis de nouveau à une charge nulle. Au fil du temps, ces phénomènes provoquent une certaine fatigue de la fonte et du fer puddlé, voire des ruptures fragiles (ruptures dues à la fragilité).

Avec l'invention du convertisseur Bessemer en 1856 puis des procédés Siemens-Martin en 1867, la production industrielle de l'acier se développe rapidement. L'acier, possédant des caractéristiques mécaniques bien supérieures

à celles du fer, le remplace progressivement dans tous les types d'ouvrages et permet d'alléger les structures. De nombreux ouvrages en arc en acier, d'une portée voisine de 150 m, sont construits vers la fin du XIX<sup>e</sup> siècle comme le pont Alexandre III à Paris, construit pour l'Exposition universelle de 1900. En 1890, le pont du Forth en Écosse constitue un nouveau type d'ouvrage : la portée est étendue à 521 m grâce à une travée indépendante de 107 m en appui, non pas sur des piles, mais sur chacun des bras de 107 m de l'ouvrage, qui s'appuient quant à eux sur les piles en rivière.

**La révolution industrielle, qui commence à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle en Grande-Bretagne, se diffuse progressivement dans le monde entier et entraîne des transformations considérables. De nouvelles formes de transports de marchandises, par canaux et par rail, émergent pour s'adapter au rythme accéléré de l'exploitation du charbon, le développement des Industries du textile et de la céramique. Les ponts ont le vent en poupe...**

Élément clé de l'industrie sidérurgique naissante, le charbon alimente les hauts fourneaux destinés à faire fondre le fer.

L'**acier** brut est obtenu selon la méthode de l'inventeur anglais Henry Bessemer, qui consiste à insuffler de l'air chaud dans la masse de fer en fusion. L'acier, c'est finalement du fer raffiné qui a été débarrassé d'une certaine quantité de carbone et d'autres impuretés. Cependant, l'acier ne remplaça le fer qu'au bout d'un certain temps. Quand le prix mondial de l'acier chuta de 75 % en 1880, il entra en concurrence avec le fer et le supplanta, du fait de ses extraordinaires qualités (ductilité et résistance mécanique à la fois en compression et en traction).

Grâce à l'addition de petites quantités de nickel, de silicium et de manganèse au fer de première coulée et à un procédé de laminage à chaud, on produisit les aciers modernes, ductiles et extrêmement résistants, utilisés dans la construction des grands ponts du XX<sup>e</sup> siècle. Actuellement, on peut fabriquer des câbles en fils d'acier et des laminés traités à chaud pour créer des poutres-treillis légères, des arcs élancés, de grands ponts suspendus en acier et d'élégants ponts à haubans.

Ainsi, l'avènement de l'acier a ouvert la voie à des avancées technologiques fulgurantes dans la construction des ponts de grande portée. C'est aux États-Unis que furent construits les premiers ouvrages : ponts en arc, ponts à poutres-treillis en acier, ponts suspendus à câbles métalliques. Plus tard, ce fut la Grande-Bretagne qui innova avec les ponts cantilevers à poutres-treillis et les tabliers à poutres-caissons en acier. Il a servi à construire des ouvrages à la portée exceptionnelle tels que

le Pont de Brooklyn, le Firth of Forth, le Pont de Québec, le Pont George Washington, le Pont Golden Gate, le Pont Verazzano, le Humber Bridge, le Pont Est et le Pont Akashi Kaikyo.

**De 1880 à nos jours, 4 types d'ouvrages en acier se sont succédé : le pont en arc à poutre-treillis en acier, le pont cantilever à poutres-treillis, le pont suspendu et le pont à poutre à âme pleine et à poutres-caissons.**

### Le pont en arc à poutres-treillis en acier

Lorsque le prix de l'acier chuta brutalement, dans les années 1870, les premiers grands ponts construits en acier se trouvaient aux États-Unis. Les arcs du Pont Eads à Saint-Louis sur le Mississippi et les cinq poutres-treillis Whipple du pont Glasgow sur le Missouri furent les premiers à utiliser l'acier.

### Le pont cantilever en arc à poutres-treillis

Ce type de pont fut construit pendant des siècles en utilisant d'abord la pierre, puis le fer et enfin l'acier. Contrairement à la fonte, l'acier permit de construire des poutres-treillis de grande portée, sans aucune augmentation de poids. Ainsi, la construction de ce type de pont devint possible sur de larges estuaires. Construit en 1890, le premier et le plus remarquable de ces ouvrages fut le pont du Forth près d'Edimbourg, en Écosse. La poutre-treillis cantilever ou en encorbellement fut rapidement adoptée aux États-Unis et servit à la construction de nombreux ponts ferroviaires jusqu'à l'effondrement du Pont de Québec, au Canada, en 1907.

### Le pont suspendu

James Finlay, Thomas Telford, Samuel Brown et Marc Segurn furent les premiers à concevoir des ponts suspendus à chaînes, mais ils ne disposaient que de fonte et de fer puddlé. Le principe du pont suspendu ne fut véritablement établi qu'avec le Pont de Wheeling (Ohio County, Virginie-Occidentale, États-Unis) de Charles Ellet Jr. John Roebling fut par la suite le partisan le plus fervent des ponts suspendus par câbles et de la technologie de l'enroulement des torons. "Son" Pont de Brooklyn fut le premier à utiliser l'acier pour les fils des câbles de suspension. Avec leurs gigantesques capacités de portée, les ponts suspendus peuvent franchir de larges estuaires et des vallées profondes...

- Deux mâts, un ou deux câbles qui s'ancrent sur les culées ou massifs et passent sur la tête des mâts en faisant une vague.
- Les suspentes s'accrochent du câble au tablier.

Le pont du détroit d'Akashi est un pont suspendu, situé au Japon. Il franchit la mer intérieure de Seto pour relier Kobe, sur l'île principale de Honshū, à la ville de Awaji, sur l'île de même nom. Sa portée centrale est la plus longue du monde, avec 1 991 m. La longueur totale du pont est de 3 911 m.

### Le pont à poutre à âme pleine et à poutres-caissons

De nombreux ponts à poutres furent construits en utilisant un ensemble de poutres placées parallèlement les unes aux autres, connectées entre elles au sommet pour former une chaussée. Leur assemblage était rapide, mais elles n'étaient utilisables que sur des portées relativement courtes. On ajouta à intervalles serrés des raidisseurs et on transforma la poutre en un caisson creux très rigide. L'essentiel de ce travail de pionnier fut réalisé pendant et après la Seconde Guerre mondiale, car il fallait construire de manière rapide et efficace des ponts de portées inférieures ou égales à 300 mètres. De nombreux ponts à poutres-caissons en acier furent ainsi bâtis en Allemagne dans les années 1950 et 1960, dans le cadre de la reconstruction. Pour des portées supérieures à 300 mètres, les ponts suspendus ou à haubans sont généralement plus économiques.

Dans les années 1970, le monde entier assista à l'effondrement, pendant leur construction, de quatre ponts à poutres-caissons en acier : à Vienne, en Autriche, sur le Danube ; à Milford Haven, au Pays de Galles ; en Allemagne, sur le Rhin ; et enfin à Melbourne, en Australie. La construction des tabliers à poutres caissons en acier fut stoppée jusqu'à l'établissement d'accords internationaux portant sur des normes de conception et de fabrication plus élaborées.



Pont Eads à Saint-Louis (États-Unis) sur le Mississipi, construit entre 1867 et 1874

© CC Koh3rd

Pont du Forth près d'Edimbourg (Écosse)



© shaitn - Fotolia.com

*Le pont du détroit d'Akashi (Japon)*



## Quelques viaducs remarquables en acier

### Garabit (Cantal, France)

Construit entre 1880 et 1884. Arche de 165 m de corde pour 51,85 m de flèche. Longueur du tablier : 565 m à 122 m de hauteur. Le tablier fut poussé par les ouvriers avec des leviers. Tous les 7 m, il avançait de 10 à 12 cm, par mouvement. Ce viaduc est entièrement riveté.

### Viaur (Aveyron, France)

Arche de 220 m ouverte à 116 m de hauteur. Nos aïeux ne voulaient laisser aucun point du territoire à l'écart des voies ferrées, le seul moyen de transport existait avec les canaux "ligne Albi-Rodez" en 1902. Je n'ai jamais éprouvé une sensation aussi profonde que celle que j'ai ressentie devant cet arc géant d'une aussi grande légèreté.



Viaduc de Viaur (Aveyron, France)

### Viaduc sur le Forth (Édimbourg, Écosse)

Réalisé de 1883 à 1890, ouvrage gigantesque, trois piles de 110 m de haut, deux arches de 521 m d'ouverture. 25 000 tonnes de pierres pour les fondations, 51 000 tonnes d'aciers pour le viaduc de 2 400 m. 100 ouvriers sont morts par accident. Ils étaient 3 500 par jour. On comprend mieux pourquoi Gustave Eiffel était fier de n'avoir eu qu'un seul accident mortel à déplorer pendant la construction de la tour qui n'a duré que 26 mois.

## L'avènement du béton armé

**La fonte et le fer remplacèrent progressivement le bois et la pierre, puis ces matériaux furent à leur tour remplacés par l'acier et le béton armé, qui jouèrent un rôle primordial dans la construction des ponts à partir du xx<sup>e</sup> siècle. En deux siècles, la portée des ponts est passée de près de 100 mètres à près de 2000 mètres !**

Le ciment connaîtra son apogée au xix<sup>e</sup> siècle, quand on parviendra à une proportion parfaite dans son mélange. On attribue à un ingénieur français, Louis Vicat, cette recette de l'assemblage idéal... qui aujourd'hui est la suivante : prendre du calcaire, de l'argile et une pincée de gypse pour faire le ciment... Puis mélanger le ciment avec de l'eau et du sable, et saupoudrer le tout avec plusieurs bennes de graviers... on obtient du béton.

Bref, à partir de la fin du xviii<sup>e</sup> siècle, béton et acier vont commencer à se croiser sur les chantiers... Se croiser seulement car, pour tout dire, au départ, ils vont s'ignorer superbement... Et ce, durant des décennies. Pourtant, ces deux-là ont tout pour s'entendre... Il faut, à ce stade de l'histoire, adresser un grand merci à Monsieur Joseph-Louis Lambot, né en 1814, l'inventeur du ciment armé ou Fer-ciment, qui donnera naissance au béton armé. Très habile de ses mains, il confectionne, en 1845, des caisses pour oranges, des réservoirs, des étagères...

en fil de fer recouvert de ciment. Puis, avec les mêmes matériaux, il construit une barque qui flotte sur le petit lac de Miraval dans le Var, en 1848, et qu'il dénomme "bateau ciment".

C'est le 30 janvier 1855 que M. Lambot dépose un brevet d'invention, ainsi conçu : combinaison de fer et de ciment destinée à remplacer le bois de construction et dite : Fer-ciment. Cette même année, il y eut à Paris une Exposition Universelle durant laquelle notre inventeur exposa son bateau ciment qui obtint un grand succès. Le Fer-ciment donna ainsi naissance au béton armé, un matériau révolutionnaire qui bouleversa l'histoire du bâtiment, mais finalement pas celle de la construction navale...

Pour les architectes et les ingénieurs, ce nouveau matériau composite est une aubaine... D'un côté, le béton est plutôt du genre bon marché, résistant à la compression, mais beaucoup moins à la traction... De l'autre, l'acier est très résistant à la compression et à la traction, mais plutôt du genre "pas donné". En coulant du béton sur un peu d'acier, on obtient donc un matériau rentable et parfaitement résistant à la compression et à la traction. On va pouvoir construire toujours plus haut, toujours plus grand. Aujourd'hui, pour construire un mur ou un pilier, on coule du béton dans un coffrage sur une armature d'acier, qui a été posée par des armaturiers. Le coffrage est généralement en bois ou en métal. Une fois que le béton a pris (c'est-à-dire qu'il est devenu dur comme une pierre), on enlève le coffrage.

Les ingénieurs tardèrent pourtant à reconnaître les véritables qualités du béton en tant que matériau de construction. Le béton est en effet aussi fragile que la pierre, résistant bien en compression mais pas en traction, de sorte qu'il se fissure s'il est soumis à une flexion ou à une torsion. Afin qu'il résiste à la traction, il est nécessaire de constituer des armatures avec de l'acier et c'est donc naturellement qu'il apparaît avec le développement de ce dernier.

L'ingénieur français François Hennebique (1842-1921) comprit le premier le principe du béton armé et imagina des applications. **Mais ce fut Robert Maillart (1872-1940) qui construisit le premier des ponts en béton armé**, tandis que son contemporain Eugène Freyssinet expérimentait les techniques de la précontrainte pour les structures en béton et enrichissait l'industrie des ponts de l'une des méthodes les plus efficaces au monde pour la construction des tabliers.

## Le béton précontraint



*Séduit par le béton en tant que matériau, Eugène Freyssinet a le sentiment que le béton armé ne permet pas de tirer le meilleur parti des deux éléments qui le composent, que le mariage du béton et de l'acier peut être beaucoup plus fécond. Il approfondit une idée simple : il faut préparer le béton à faire face sans dommages à son avenir. Son avenir est d'être soumis à des charges et donc à des tractions dangereuses pour son intégrité (fissures, puis rupture). Préparer le béton, c'est le comprimer suffisamment pour qu'en tout point les compressions soient supérieures aux tractions qui se développeront ultérieurement. La compression préalable du béton se nomme la "précontrainte". Le vocable a été utilisé pour la première fois par Eugène Freyssinet en 1933.*

**Robert Maillart et Eugène Freyssinet** étaient de grands ingénieurs et des spécialistes incontestés des ponts en béton. Leurs travaux ouvrirent la voie aux futurs perfectionnements de ce type de ponts : poutres préfabriquées, arcs en béton, construction de poutres-caissons et de voussoirs en encorbellement.

Hans Wittfoht, Jean Muller et les entrepreneurs Polensky, Zöllner et Campenon Bernard lancèrent, quant à eux, la construction des premiers ponts à poutres-caissons à voussoirs en béton, technique actuellement largement utilisée dans le monde.

Le béton armé a ainsi servi à ériger la plupart des plus longs ponts de la planète. Le coût relativement faible du béton armé par rapport à l'acier, la possibilité qu'il offre de préfabriquer et de précontraindre des poutres de longueurs standards, de prendre appui sur des chevalets de faible hauteur pour franchir de courtes portées sont des qualités qui ont fait de lui un matériau économiquement attractif.

*Le Pont du lac Pontchartrain (Louisiane, États-Unis), en béton préfabriqué, à voussoirs et à poutres-caissons, est le pont le plus long des États-Unis, avec une longueur totale de 37 kilomètres.*



## Le pont à haubans

De tous les ponts modernes à grande portée, le pont à haubans est probablement le plus élégant. Les haubans sont à l'origine des cordes servant à fixer les structures de tentes et les mâts des voiliers, système qui fut à la base de l'idée de pont suspendu. Le développement des tabliers à poutres-caissons très rigides et de forme trapézoïdale a permis qu'une seule nappe de haubans soutienne directement le tablier du pont. De ce fait, les ancrages devenaient inutiles et il n'était plus nécessaire d'avoir autant de câbles que pour un pont suspendu conventionnel.

Réalisés avec deux mâts, les haubans supportent le tablier. À ce jour, le pont de Tataru au Japon a une portée de 890 m, le pont de Normandie en France 856 m (et des mâts de 230 m de haut).

Les pionniers en matière de ponts à haubans modernes furent, après la Seconde Guerre mondiale, les ingénieurs allemands Fritz Leonhardt, René Walter et Jorg Schlaich. Récemment, des progrès concernant les haubans et les tabliers en poutres-caissons ont été réalisés grâce aux travaux des ingénieurs suédois du bureau d'études COWI Consult, des ingénieurs des ponts Carlos Fernandez Casado en Espagne, R. Greisch en Belgique. Michel Virlogeux en France, des sociétés Jean Muller International, Sogelerg et EEG.

Ce type de ponts est plus efficace, pour des portées plus courtes, que le pont suspendu et nécessite moins de câbles pour soutenir

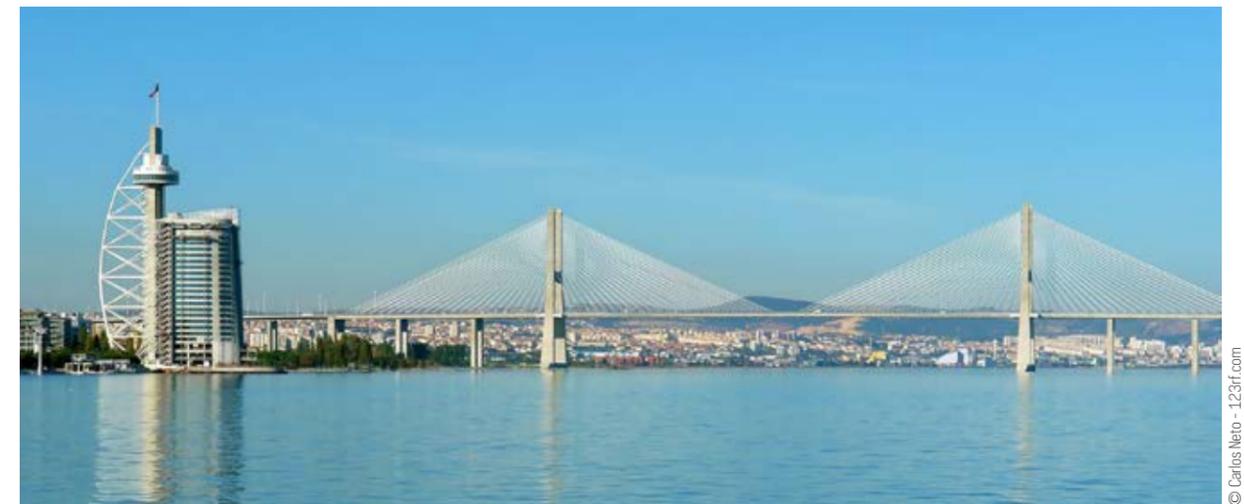
le tablier. Ce tablier est accroché grâce à une série de câbles distincts, disposés en éventail ou en harpe. Dans la configuration en éventail, les câbles se rejoignent au sommet du pylône au niveau d'une selle, tandis que dans une configuration en harpe, ils sont rattachés au tablier et au pylône à intervalles réguliers, parallèlement les uns aux autres.

Les premiers ponts de ce type utilisaient deux nappes de haubans reliés à des pylônes jumeaux soutenant les deux côtés du tablier. Le Pont Severins, à Cologne, fut le premier formé d'un très grand pylône en forme de A, destiné à soutenir les haubans en éventail de sa travée asymétrique.

Le Pont Vasco de Gama (Portugal) fut un immense projet dont la conception dura de nombreuses années et la réalisation dix-huit mois, ce qui, pour un ouvrage de cette taille, est un record absolu ! La travée centrale de navigation constitue un pont à haubans tandis que les autres parties, appelées travées d'accès, sont plus courtes et formées de caissons en béton construits par encorbellements successifs.

Le viaduc de Millau (Aveyron, France) est un pont à haubans franchissant la vallée du Tarn. Portant l'autoroute A75, il fait la jonction entre le Causse Rouge et le Causse du Larzac en franchissant une brèche de 2 460 mètres de longueur et de 270 mètres de profondeur au point le plus haut, dans un panorama de grande qualité et avec des vents susceptibles

de souffler à plus de 200 km/h. J'ai l'honneur d'avoir, avec mes équipes, réalisé l'ensemble des armatures de l'ouvrage et participé à la création de la plus haute pile de pont du monde en béton armé.



Le Pont Vasco de Gama (Portugal)

© Carlos Neto - 123rf.com





## Le pont en arc moderne

Le béton armé et l'acier sont les principaux matériaux utilisés pour bâtir les ponts en arc modernes. Le béton de l'arc est coulé dans des coffrages métalliques ou en bois portés par un cintre, une fois que les armaturiers ont terminé leur œuvre. Les coffrages sont retirés après le séchage et le durcissement complet du béton. En général, un pont en arc en béton se compose d'au moins deux arcs parallèles, sur lesquels s'appuient des poteaux de différentes longueurs soutenant le tablier.

Les ponts en arc modernes peuvent avoir des profils surbaissés et élancés, ou des courbes segmentées très accentuées selon la longueur de la portée et la résistance du sol. Si le sol est de mauvaise qualité près de la berge et de meilleure qualité dans le lit du cours d'eau, il peut être rentable de construire un arc segmentaire très incurvé dont la poussée horizontale est inférieure à celle d'un pont en arc surbaissé.

Les constructeurs de ponts ont ainsi créé différentes formes d'arc pour exploiter le plus possible la légèreté des matériaux, l'éventail des portées possibles, les gabarits de navigation et la possibilité d'augmenter ou de diminuer la poussée horizontale en fonction de la qualité du sol.

Il existe également des ponts à tablier intermédiaire dans lesquels une partie du tablier est suspendue à l'arc tandis que l'autre est soutenue par des poteaux situés en dessous. L'arc est relié à la travée du tablier qui résiste

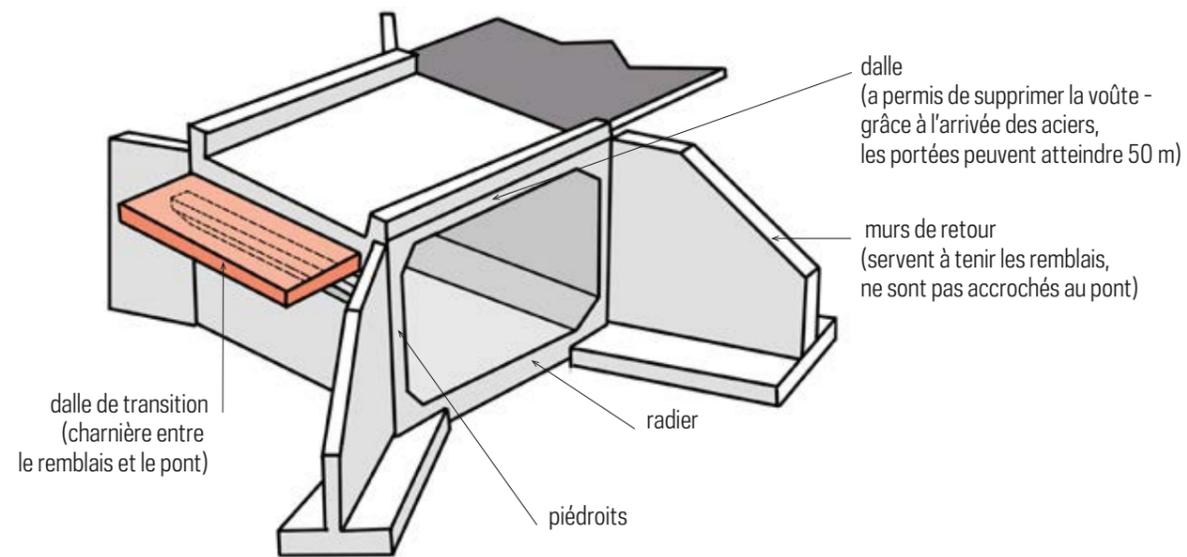
à la poussée de l'arc vers l'extérieur, ce qui rend inutile la construction de culées. Ce type d'arcs fut largement utilisé dans la construction de ponts ferroviaires et routiers dans le monde entier car il permettait de franchir des cours d'eau sur lesquels le gabarit de navigation était réduit en raison de berges peu profondes ou d'un lit formé de hauts-fonds.



Le pont Wanxian sur le Yang Tse (Chine)

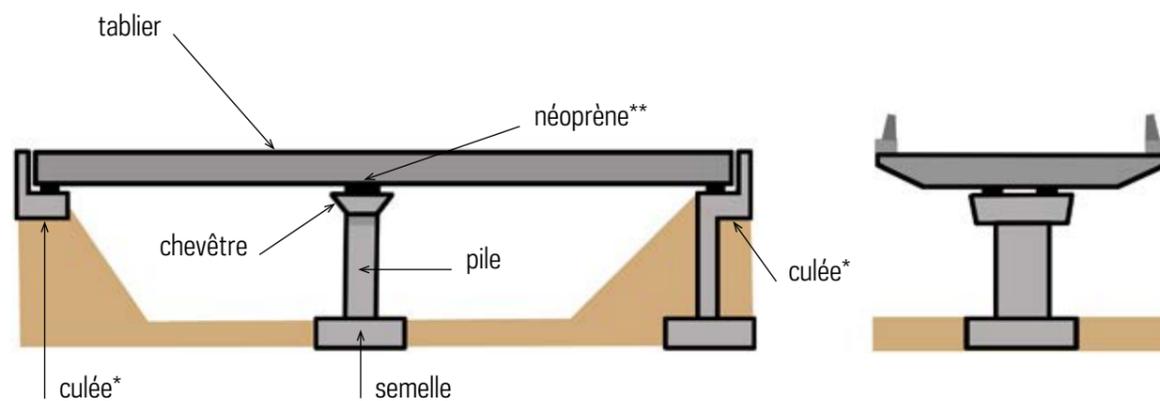
# Petit récapitulatif des différents types de ponts

## Pont cadre ou ouvrage hydraulique



## Ponts autoroutiers (PS – PI)

Ces ponts peuvent avoir plusieurs travées. Une travée est la portée entre appuis. Un pont a 5 travées et comportera 2 culées et 4 piles (la portée maximum de 45 m).

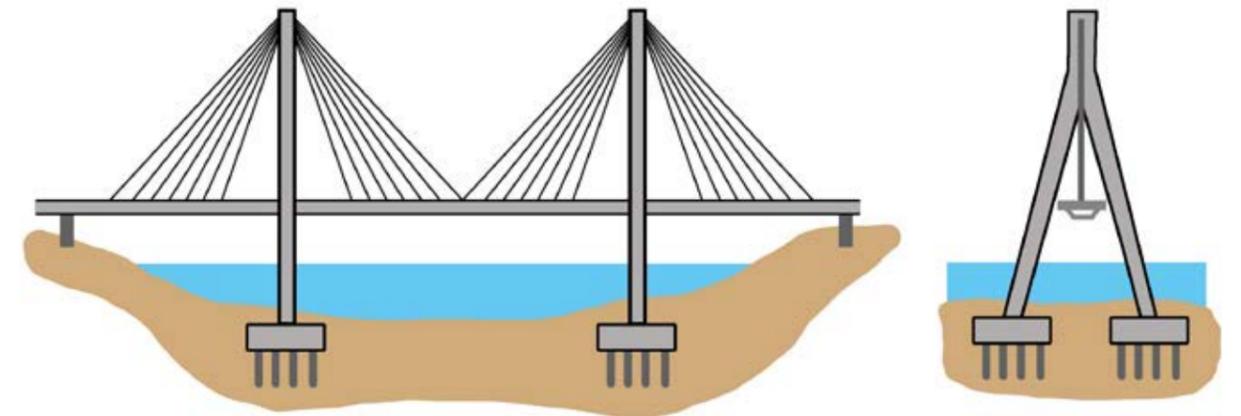


\* culée : deux types sont représentés suivant les sols.

\*\* néoprène : pour chaque pont, le tablier est désolidarisé de ses appuis. Plusieurs raisons à cela : la dilatation, les séismes, les catastrophes naturelles.

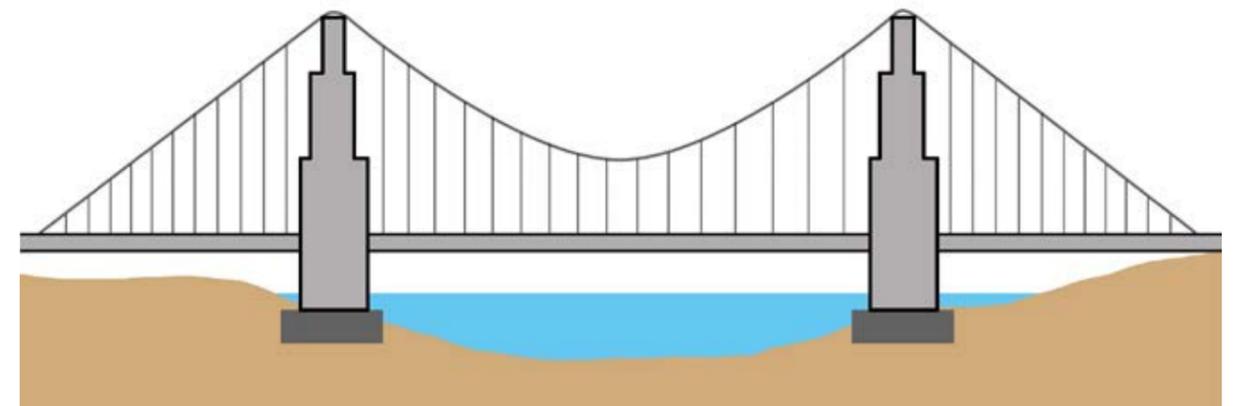
## Pont à haubans

Réalisés avec deux mâts, les haubans supportent le tablier. À ce jour, le pont de Tatara au Japon a une portée de 890 m, le pont de Normandie 856 m (et des mâts de 230 m de haut).



## Pont suspendu

- Deux mâts, un ou deux câbles qui s'ancrent sur les culées ou massifs et passent sur la tête des mâts en faisant une vague.
- Les suspentes s'accrochent du câble au tablier.
- Le plus long réalisé : le pont Akashi, à Kobe (Japon). Sa portée est de 1990 m, ses deux mâts : 282 m de haut.

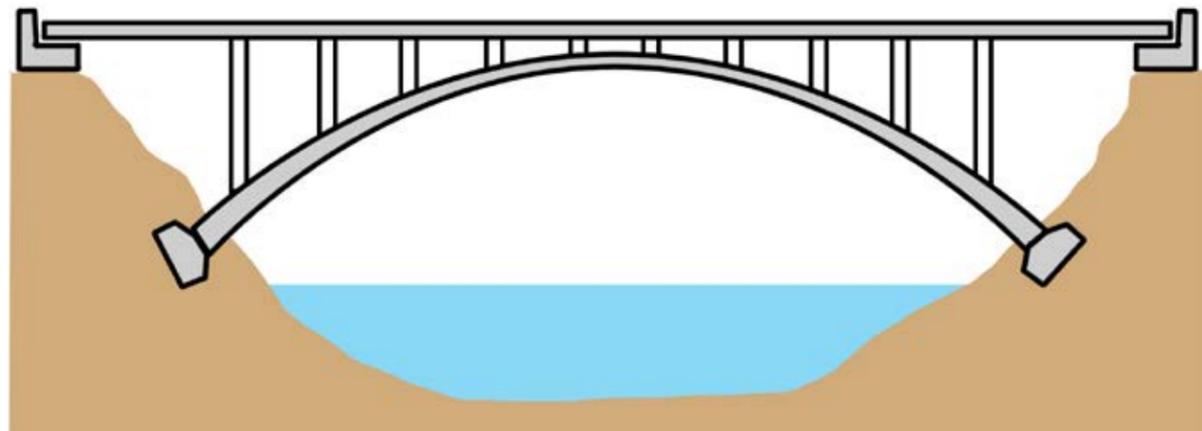


## Pont en arc

Le principe est d'éviter de travailler en rivière ou de casser une vallée par des piles. L'arc maintient le tablier par des pillettes. Ce type de construction est très spectaculaire.

Le plus grand arc est le pont Wanxian sur le Yang Tse (Chine), l'arc est de 420 m. Un projet sur le viaduc de Millau n'a pas été retenu : son arc faisait 620 m.

Les arcs sont aussi parfois en acier : le pont de New-River Gorge a une portée principale de 518 m.



## Pont béquille

(avec le mode de construction dit encorbellement)

Ce principe est architectural et économique par rapport à l'Arc.

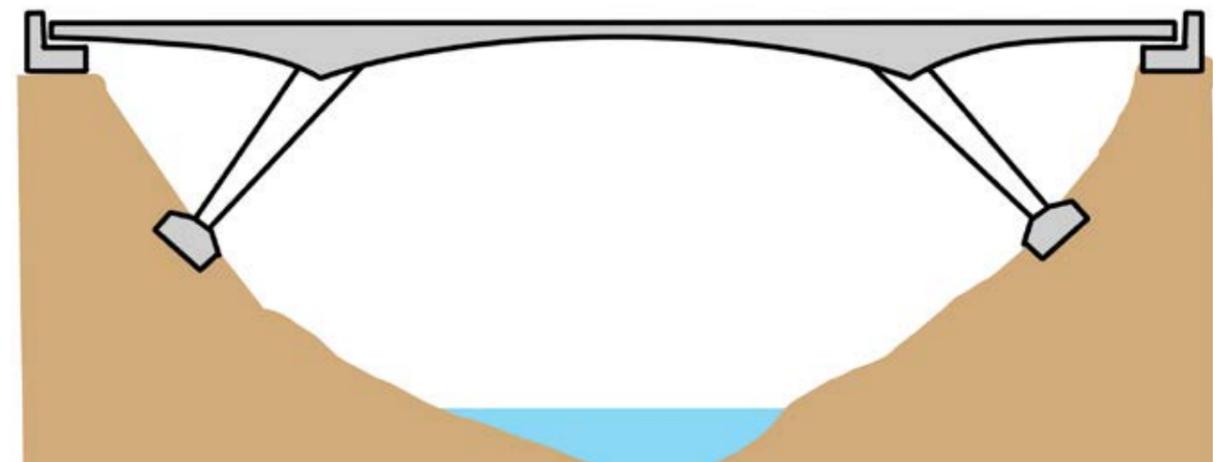
Pour maintenir le tablier, on lui attribue deux béquilles. Il est facile de comprendre la fonction de ces béquilles.

Par contre, lors de sa construction, on est obligé de faire des palées provisoires (celle de Garabit faisait 4 x 4 m et 68 m de haut et 2 par béquilles). Une fois le pont achevé, elles sont détruites.

Type de construction par encorbellement : une fois que la béquille ou la pile est terminée, on réalise le VSP (Voussoir Sur Pile). Un équipage est mis de part et d'autre, d'une longueur de 3 à 3,5 m (le poids 50 tonnes par voussoir) et on coule le béton des premiers voussoirs (poids de charge équipage + béton : 120 à 150 tonnes).

C'est là qu'intervient la précontrainte, instrument merveilleux inventé par Monsieur Freyssinet au début du siècle.

La plus grande portée en béton : 301 m.



# Toujours plus...

**Toujours plus haut, toujours plus grand, toujours plus vite... les hommes repoussent éternellement les limites techniques des ouvrages et de leur mode de construction. À en donner le tournis. Jusqu'où iront-ils ?**

**Le pont de la Confédération** relie depuis 1997 l'île du Prince-Édouard et le Nouveau-Brunswick en enjambant le détroit de Northumberland sur la côte est du Canada. Avec ses 12,9 km, c'est le plus long pont au-dessus d'une étendue maritime prise par les glaces dans le monde. C'est une structure de 62 travées multiples séparées de 250 m, en béton post-tensionné à coffre poutre. La plus grande partie du pont courbe est à 40 mètres au-dessus de l'eau, mais il contient une section à 60 mètres de hauteur pour permettre le passage des bateaux.

Un consortium dirigé par la coentreprise J. Muller International and Stantec a conçu la structure du Pont. En raison de son exceptionnelle longueur, le pont comporte plusieurs travées préfabriquées en béton. Les ingénieurs ont intégré des courbes afin de s'assurer que les conducteurs demeuraient attentifs et ainsi réduire les risques d'accidents. La plus grande courbe de la travée prévue pour permettre la navigation se trouve donc à 60 m au-dessus du niveau de l'eau. Ce chenal (200 m de largeur et une hauteur libre de 49 m) permet le passage de navires océaniques. Les travées latérales offrent une hauteur libre de 28 m pour les bateaux de pêche et de plaisance.

Il a été conçu pour une durée de vie utile de 100 ans. Il est d'une conception suffisamment résistante pour affronter les conditions environnementales sévères du détroit de Northumberland. Le Pont a été conçu au moyen de grands éléments préfabriqués, réalisés

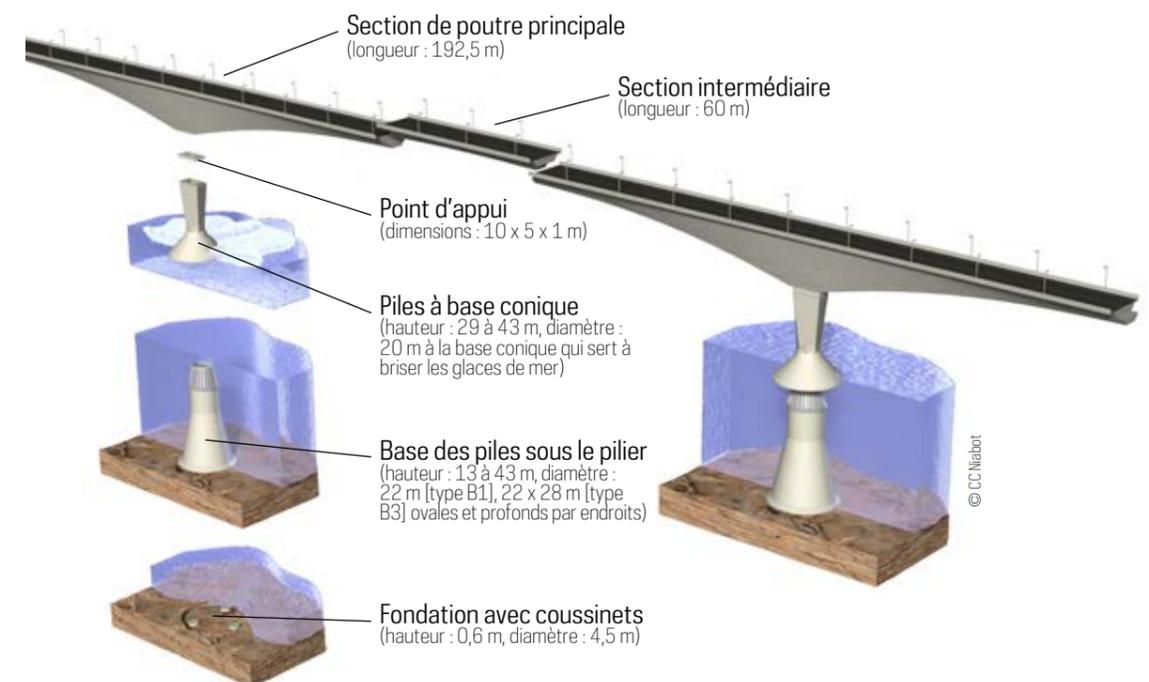
en béton. Les fondations consistent en des semelles précontraintes de 22 m de diamètre pesant chacune 3 700 à 5 100 tonnes, les fûts de pile de 3 000 à 5 000 tonnes et les fléaux 8 000 tonnes. Ainsi, la plus grande partie de la construction (bases de piles, fûts de piles, poutres principales et tabliers intermédiaires) a été réalisée sur la terre ferme dans des usines de préfabrication à ciel ouvert spécialement créées pour la construction.

Les composantes étaient ensuite transportées au-dessus des eaux de 35 m de profondeur à l'aide d'une poutre de lancement munie d'un pont roulant. La première base de pile fut mise en place par une grue flottante inédite

dans le monde, la Svanen, le 7 août 1995. Pendant 18 mois, la Svanen installa 175 composantes du pont principal, dont les 44 poutres. Vinrent ensuite les boucliers anti-glace au début de 1996, boucliers qui permirent de briser avec succès la glace du détroit en la forçant à remonter le long de leur cône pour s'effondrer en retombant. La travée du chenal de navigation, qui surplombe les eaux du haut de ses 60 mètres, et le mi-chemin du pont furent installés le 3 août 1996. Le chenal de navigation de la travée maritime a une largeur de 172 mètres et se situe à 49 mètres au-dessus du niveau de la mer, ce qui permet le passage de navires aux dimensions plus que respectables.



Le pont de la Confédération (Canada)



**Le pont Rion-Antirion**, officiellement dénommé pont Charilaos Trikoupis, est un pont à haubans qui relie le Péloponnèse à la Grèce continentale entre les deux villes de Rion et Antirion.

D'une longueur totale de 2 883 mètres, le franchissement est composé d'un pont principal multi-haubané d'une longueur de 2 252 mètres encadré de deux viaducs d'accès. Cet ouvrage détient quelques records mondiaux :

- les piles avec la plus grande hauteur immergée (63,5 mètres pour la pile M3),
- les appuis de piles les plus gros jamais réalisés, avec une embase de 90 mètres de diamètre et d'une hauteur variant de 9 à 13,5 m,
- les joints de chaussée avec le plus grand souffle au monde (près de 5 mètres possibles),
- les amortisseurs les plus gros jamais réalisés, capables de dissiper une énergie atteignant 5 mégajoules.

Les défis qu'il a fallu relever étaient multiples :

- Relier deux plaques tectoniques en mouvement, puisque le golfe de Corinthe est un fossé d'effondrement sensible aux mouvements tectoniques. Chacune des plaques s'éloigne de l'autre de plusieurs millimètres par an. Le Péloponnèse s'éloigne ainsi irrémédiablement de la Grèce continentale.
- Franchir une hauteur d'eau atteignant 65 mètres au point le plus profond, c'est-à-dire que les techniques à retenir s'apparentent plus à des techniques relevant du domaine de l'offshore et des plateformes pétrolières que de la construction classique de ponts.
- S'appuyer sur des fonds marins de qualité

médiocre (le substratum rocheux est à plus de 700 mètres de profondeur).

- Résister à des vents violents : la vitesse de référence prise en compte selon les British Standards est de 32 m/s. Elle correspond, au niveau du tablier, à une vitesse moyenne de 50 m/s (soit 180 km/h) sur 10 minutes.
- Résister à un séisme de force 7 de magnitude sur l'échelle de Richter. Le dernier séisme important a eu lieu le 15 juin 1995 à une trentaine de kilomètres du site avec une magnitude de 6,3.



Remorquage d'une pile du pont Rion-Antirion (Grèce)

© GEFYRA - Nikos Demitriou

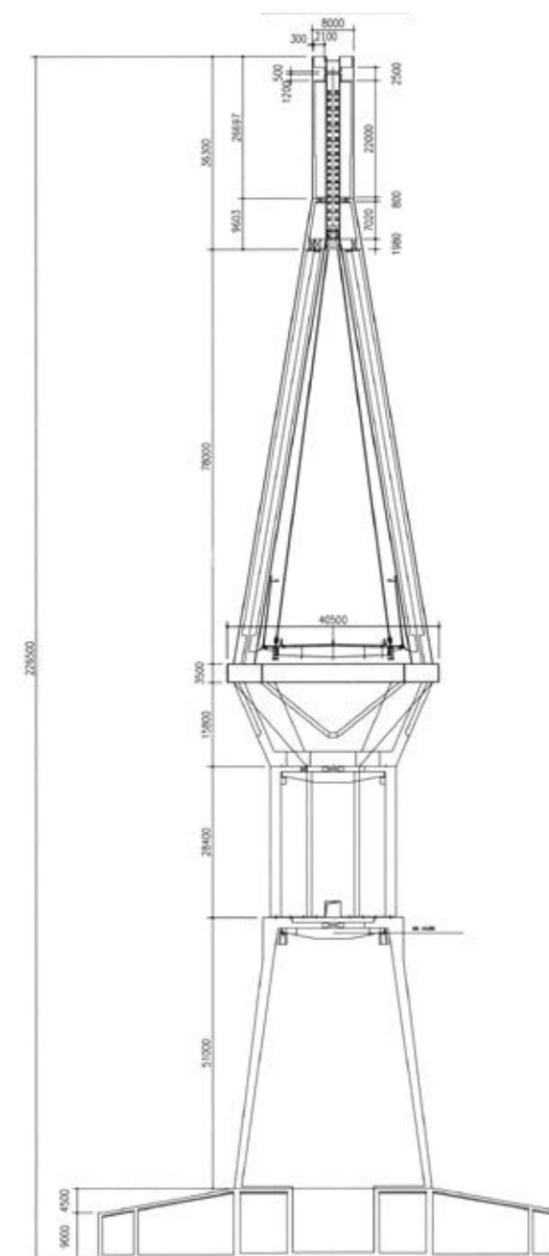
Les piles reposent par environ 60 mètres de profondeur. La base des pylônes se situe entre 25 et 45 mètres (pour les deux pylônes centraux) au-dessus du niveau de la mer, laissant un gabarit de navigation de 52 mètres au milieu du détroit. Les pylônes s'élèvent de 115 mètres et culminent à une hauteur maximale de 160 mètres au-dessus du niveau de la mer.

La partie supérieure de la pile est une pyramide inversée d'une hauteur d'environ 15 mètres avec une base carrée de 38 mètres de côté. Chaque pylône se compose de quatre jambes inclinées en béton armé d'une section de 4 mètres par 4, convergeant dans la tête de pylône pour former une structure monolithique. Les embases des quatre piles en béton sont circulaires de 90 mètres de diamètre et pèsent 150 000 tonnes chacune.

La méthode de construction utilisée pour les piles est inspirée de celles utilisées pour la construction de structures offshore gravitaires :

- Construction des embases de fondation dans une cale sèche jusqu'à une hauteur de 18 m pour fournir la flottabilité suffisante,
- Remorquage et amarrage de ces embases dans une cale en eau,
- Construction de la partie conique des fondations dans la cale en eau, jusqu'à 65 m de hauteur,
- Remorquage et immersion des fondations à leur position finale.

### Époustouflant non ?



Coupe de l'ensemble pile et pylône du pont Rion-Antirion (Grèce)



# En guise de conclusion

Le pont exerce sur les esprits une fascination, liée à la puissance du symbole de passage qu'il concrétise. Ce trait d'union, si cher à Michel Serres.

Le fondement de cette fascination est certainement l'eau, le précipice, le vide, enfin la frontière dangereuse entre deux mondes, deux rives.

Le pont, dans la mythologie exprime le passage du monde des vivants à celui des morts. Il est la balance suprême, le couteau sur lequel repose le fléau, il est "le fil aigu sur lequel seul peuvent passer indemnes les justes".

## Le pont est lieu de vie...

Le pont Sublicius à Rome fut le lieu où l'on immergeait des mannequins d'osier, sacrifice rituel à l'eau, partage entre le monde des vivants et des morts comme le Styx (fleuve ou marais des enfers, pour y avoir plongé Achille devint invulnérable, sauf au talon).

Au Moyen Âge, un poème fameux célébrait le "Pont dangereux", celui où les hommes ne pouvaient s'aventurer s'ils avaient l'âme chargée de péchés, rappelant d'autres mythes bien plus anciens où le passage de la vie ou de la mort s'exprimait par le franchissement d'un pont aussi affûté qu'un couteau.

Parfois, le pont est le lieu de passage de ce monde à un autre par un plongeon volontaire conduisant au flot noir porteur d'oubli, aboutissement après avoir été porteur de vie.

Le pont, lien entre les hommes, est aussi cette passerelle qu'on se plaît à détruire dès qu'on veut empêcher la communication entre les hommes. Ne parle-t-on pas de "couper les ponts" ?

## Lien : le pont est cela, donc il est vie ! Il est la vie.

Le pont naît de l'eau pour la vaincre et c'est l'homme qui le fait naître. L'eau n'a nul besoin de l'homme pour être mais l'homme a besoin de l'eau pour vivre.

Quoi de plus beau qu'un pont où l'on peut un instant s'accouder pour regarder l'eau s'écouler, alors qu'autour le monde bruisse.

"Débarque-moi donc  
de d'sus l'dos,  
j'suis pas un pont."

Félix Leclerc

# Des ponts éternels

- Pont des Soupirs (Venise, Italie)
- Pont du Rialto (Venise, Italie)
- Pont Neuf (Paris, France)
- Stari Most (Mostar, Bosnie-Herzégovine)
- Ponte Vecchio (Florence, Italie)
- Pont du Gard (Vers-Pont-du-Gard, France)
- Viaduc de Millau (Millau, France)
- Tower Bridge (Londres, Angleterre)
- Pont de Brooklyn (New York, États-Unis)
- Golden Gate Bridge (San Francisco, États-Unis)
- Harbour Bridge (Sydney, Australie)

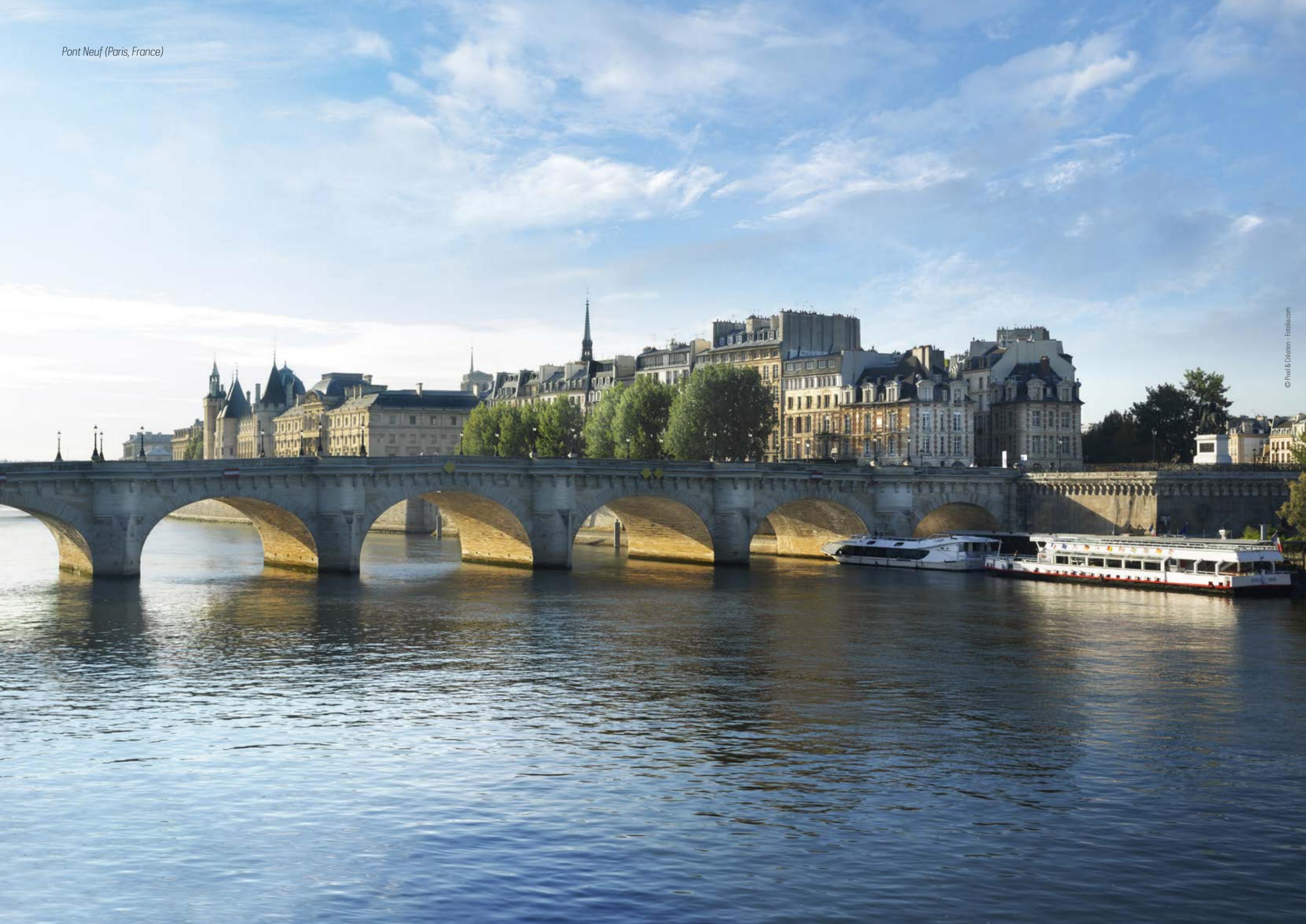
...

à découvrir...





Pont Neuf (Paris, France)





Ponte Vecchio (Florence, Italie)



Pont du Gard (Vers-Pont-du-Gard, France)



Viaduc de Millau (Millau, France)



Tower Bridge (Londres, Angleterre)



Pont de Brooklyn (New York, États-Unis)





Harbour Bridge (Sydney, Australie)



# All over the world

## **Pont** *(en anglais bridge)*

Ouvrage par lequel une voie de circulation, un aqueduc, une conduite franchit un cours d'eau, un bras de mer, une dépression ou une voie de circulation.

## **Viaduc** *(en anglais viaduc)*

Ouvrage routier ou ferroviaire franchissant à grande hauteur une brèche, ou comportant de nombreuses travées.

## **Passerelle** *(en anglais footbridge)*

Pont donnant passage aux seuls piétons et/ou supportant des canalisations.

## **Aqueduc** *(en anglais aqueduct)*

Canal creusé ou construit pour assurer l'adduction de l'eau dans une agglomération ou pour irriguer des cultures et conjointement ouvrage d'art, pont supportant ce canal.

Conception  
[www.madeinmouse.com](http://www.madeinmouse.com)

Illustrations  
**Rimbus**

Photographies  
**Fotolia, 123rf, Structurae, Wikipédia, X**

Sources

- “Les Ponts, Histoire et techniques” de David Bennet
- “L’art des Ponts : Homo pontifex” de Michel Serres
  - Wikipédia
- “Le Pont-Flavien de Saint-Chamas” de A. Roth-Conges,  
édité par les Amis du Vieux-Saint-Chamas avec l’aide du Conseil municipal
  - “Un pont chez Poséidon” (Vinci, éd. Textuel)

[www.samt.fr](http://www.samt.fr)



