



# musée des arts et métiers

## L E S C A R N E T S

### PAR MONTS ET PAR VAUX : LES PONTS



© Banque centrale européenne

*« Ce pont symbolise le lien entre les peuples puisqu'il permet de vaincre pacifiquement les obstacles. » Article 2.1.7., Les Billets et les pièces en Euros, note d'information n°122, Banque de France, décembre 2000*

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS

L E S T H È M E S

## *Par monts et par vaux : Les ponts*

■ Comment tirer parti des ressources naturelles pour se déplacer à la surface de la terre et franchir fleuves, vallées, pentes abruptes.... ? C'est ainsi qu'avec de jeunes arbres liés par des lianes, l'homme a constitué des passerelles relativement souples, bientôt remplacées par des troncs rudimentaires et plus rigides, apportant davantage de solidité à l'édifice. Ces premiers ponts ont parfois été suspendus à l'aide de lianes comme on en trouve encore dans certaines régions d'Afrique ou d'Amérique latine. On doit vraisemblablement aux Étrusques la mise en œuvre d'une autre solution au problème du franchissement : *la voûte*. Celle-ci est largement utilisée et répandue par les Romains, donnant aux ponts leur forme caractéristique d'arrondi (circulaire ou très proche du demi-cercle). Les ponts romains étaient souvent bâtis en pierre : *ponts-routes* auxquels les Romains donnaient un aspect monumental, *ponts-aqueducs* pour alimenter en eau certaines cités (tel le pont du Gard, 18 av. J.-C.). Il existait aussi des *ponts en bois* (franchissement du Rhin par César, du Danube par Trajan) qui ont aujourd'hui totalement disparu avec l'usure du temps ou les incendies.

Les ponts du Moyen Âge sont caractérisés par des voûtes en arc brisé, ou ogive. En diminuant la taille du cintre et en affinant l'allure du pont, le tracé en arc brisé permet de plus grands franchissements par augmentation des portées.

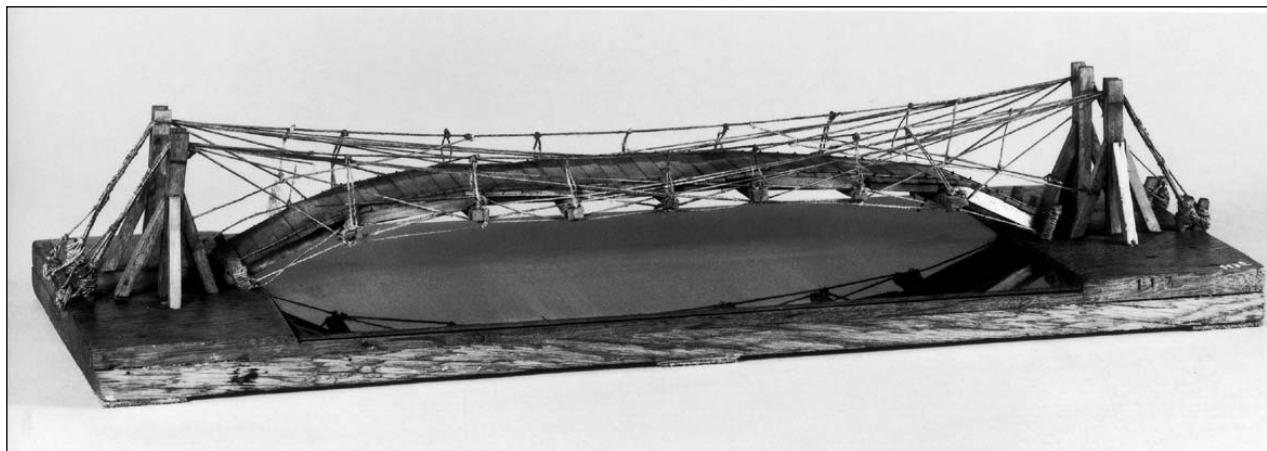
De la Renaissance jusqu'au début du XVIII<sup>e</sup> siècle, les arcs brisés sont peu à peu abandonnés. Les ponts commencent à être décorés, leurs lignes sont encore plus affinées et ils embellissent les villes.

■ Dans les villes, la plupart des ponts en pierre portent des maisons, lieux de commerce et de passage à péage, comme encore aujourd'hui à Florence.

En France, l'ingénieur Rodolphe Perronet (1708-1794), fondateur de l'école des Ponts et Chaussées, impose une rationalisation des pratiques techniques sur les chantiers. Une ambitieuse politique d'aménagement du territoire national débute avec lui. Il sera le grand « structurateur » de l'aménagement du territoire national français. Sa démarche de constructeur se fonde sur l'introduction du calcul en plus de la méthode empirique ; il obtient des arches surbaissées de grande portée. Cette technique allège considérablement l'allure du pont et réduit la largeur des piles : il obtient alors une augmentation de l'ouverture des arches, rendant ainsi l'édifice plus élégant (pont de la Concorde en 1791). Cette amélioration, en facilitant l'écoulement des eaux, permet aussi une augmentation de la durée de vie des ponts, car les piles plus fines opposent moins de résistance au courant.



*Pont Antoinette sur l'Agout, maquette au 1/25, 1884, inv. 11664.*

*Par monts et par vaux : Les ponts*

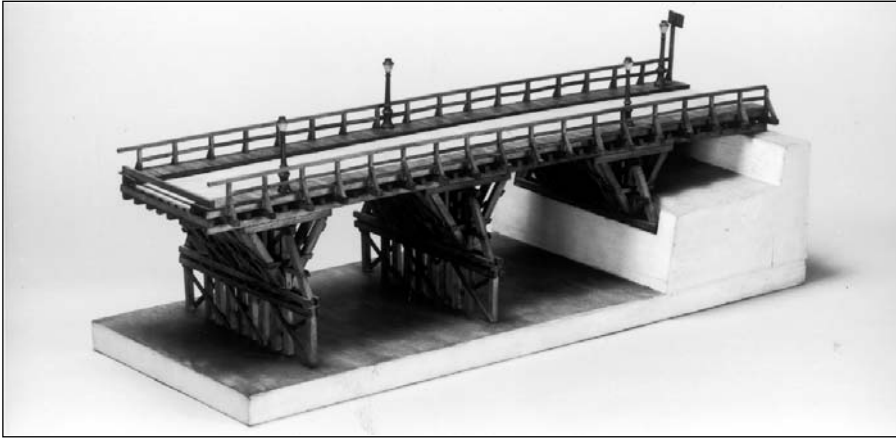
*Pont suspendu, maquette à échelle réduite, 1794-1796, inv. 117-5.*

■ C'est à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle qu'apparaissent les premiers *ponts métalliques*, d'abord en fonte (pont de Coalbrookdale, au pays de Galles, 1779) puis en fer et en acier.

Alors que la plupart des ponts étaient jusque-là construits de manière empirique, les théories de l'élasticité et de la résistance des matériaux se développent vers le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, les ponts vont être « calculés » : les équations et les calculs deviennent les outils de l'ingénieur en permettant la vérification des structures de l'édifice. L'inventeur entrepreneur Marc Seguin (1786 – 1875), promoteur de la première ligne de chemin de fer en France, s'intéresse aux ponts suspendus. Dès 1822, après avoir étudié la résistance des câbles, il propose une alternative aux ponts suspendus à chaînes qui commencent à être construits aux Etats-Unis et en Angleterre. Le premier pont suspendu à des faisceaux de fils de fer — communément appelé pont en fil de fer — est construit à Tournon sur le Rhône en 1824.

À partir du milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, des ponts de tous les types sont entrepris : *ponts à poutres*, à structure tubulaire comme le pont Britannia (1850), dont la portée atteint 147 m ; *ponts en arc*, comme le viaduc de Garabit (1884) d'Eiffel et le pont Alexandre III (1900) de Résal ; *ponts suspendus*, comme celui de Brooklyn (1883). Une des réalisations les plus marquantes du XIX<sup>e</sup> siècle est le pont *cantilever* Forth Railway Bridge sur le Firth of Forth (Ecosse), terminé en 1890 et dont les portées (distance entre deux piles de ponts) sont de 521 m.

L'usage du béton armé apparaît à la fin des années 1880 dans la construction des ponts : il permet des formes beaucoup plus variées que la pierre, tel que le pont Risorgimento à Rome (1911) avec son arche de cent mètres de portée. Les premiers arcs en béton armé de Robert Maillart, en Suisse, sont particulièrement élégants. De 1922 à 1930, Eugène Freyssinet conçoit et réalise le pont de Plougastel sur l'Elorn, qui constitue alors un record de portée avec ses arcs de 186 m. Le béton armé s'utilise surtout pour la construction de grands arcs et de nombreux ponts à poutres, comme ceux qui franchissent les premières autoroutes. La recherche de la performance marque la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle par les dimensions des ponts métalliques (pont *cantilever* de Québec (1917) : 549 m ; pont en arc George Washington à New York (1931) : 503 m ; pont suspendu du Golden Gate (1937) à San Francisco : 1 280 m).

*Par monts et par vaux : Les ponts*

3 arches du pont provisoire de Bercy à Paris, maquette échelle 1/62, 1884, inv. 7349.

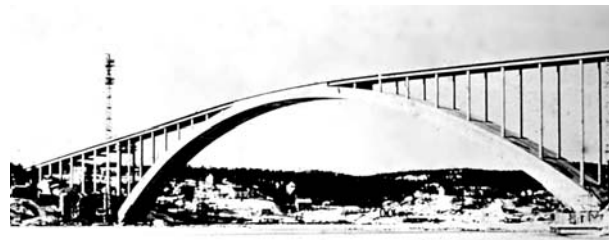
La deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle est caractérisée par le développement des ponts en béton précontraint. Le béton précontraint, inventé par Eugène Freyssinet (1879-1962), est plus avantageux que le béton armé et autorise la conception de silhouettes plus fines à résistance égale : dans le béton armé, le béton est employé pour résister aux efforts de compression, tandis que les armatures métalliques résistent aux efforts de traction. Dans le béton précontraint, le béton est préalablement comprimé au moyen de câbles en acier tendus par des vérins très puissants. Le béton résiste uniquement à l'effort de compression ; c'est pour cette raison qu'il est préférable de le pré-contraindre. Les premiers ponts en béton précontraint ont été construits par Freyssinet, sur la Marne, à partir de 1945. Pour les grandes portées, l'acier est encore largement utilisé et associé au béton précontraint et ce grâce aux progrès dans les qualités des aciers et les méthodes de calcul (ponts du Garigliano et de Grenelle à Paris, ponts de Nantes, de Chaumont, de Cornouaille, etc.). Les assemblages sont réalisés par soudage ou par boulons à haute résistance.

De nouveaux types de ponts métalliques sont apparus au cours des dernières années : ponts à béquilles obliques, comme le viaduc de Caronte (210 m entre les pieds des béquilles), ponts à haubans, comme le pont Masséna à Paris, dans lesquels le tablier est supporté en plusieurs points de la travée par des câbles en acier passant sur des pylônes.

Les ponts suspendus sont les seuls utilisés maintenant que pour les très grandes portées (pont de Tancarville, France, 1959, d'une portée de 608 m ; pont Verrazzano à New York : 1964, d'une portée de 1 298 m). Le pont de Normandie (1995) a marqué une étape dans l'évolution des ponts à haubans, par une étude pointue de l'aérodynamique due à sa situation géographique livrée aux vents.

La longueur totale des ponts s'est considérablement accrue avec, à la fin du II<sup>e</sup> millénaire, la construction de ponts maritimes :

- reliant les îles au continent, tels que le pont de Akashi Kaikyo, construit au Japon en 1998 et de longueur totale 3 910 m, ou le pont de l'île de Ré, en France (1988) d'une longueur de 3 840 m.
- ou enjambant des lacs, tels le pont de Pontchartrain, en Louisiane (1969) d'une longueur de 38 422 m, le pont japonais de Seto-Ohashi (1988) et celui de l'île du Prince Edouard au Canada (1997) de 13 000 m.



Arche en béton

## Par monts et par vaux : Les ponts

### ■ Le pont Britannia (1850)

Depuis les vingt-cinq années durant lesquelles les voies de chemin de fer commençaient à sillonner la Grande-Bretagne en ce milieu de XIX<sup>e</sup> siècle, les obstacles naturels s'opposaient à l'avancée du transport ferroviaire. Il fallait relier les provinces « éloignées » à la région londonienne. Le pays de Galles riche en charbon devait approvisionner le reste de la Grande-Bretagne de sa précieuse denrée.

Un pont devait traverser le détroit au nord-ouest du pays de Galles pour permettre une voie de transport avec l'Angleterre et ainsi accéder au port de Bristol. La marine britannique imposait aux constructeurs de concevoir un pont suffisamment élevé pour laisser passer ses navires. La destination des colonies étant quotidienne, il était impensable de rompre les échanges commerciaux même pendant les travaux.

Ce sont Robert Stephenson, William Fairbairn (ingénieur spécialiste des bateaux à coque en plaques rivetées et de la résistance des métaux) et Eaton Hodgkinson, théoricien et expérimentateur, qui vont élaborer ce pont.

Jusqu'à-là, on n'avait jamais dépassé les 100 mètres de portée, mais cela ne suffisait pas pour enjamber ce détroit. Les travaux commencent en 1847, pour se finir en 1850. On atteint un record de portée entre deux piles, car les 140 mètres sont franchis. C'est la première fois qu'on utilise une poutre de section rectangulaire en tôle et que l'on emploie une structure en fer pour un pont ferroviaire.

La structure est constituée de cinq piles et d'une paire de caissons, utilisés comme poutres et assemblés sur les rives. Cela représente une double portée centrale de 140 mètres et deux travées aux extrémités de 70 mètres. Le tout est acheminé par voie d'eau et est hissé de chaque côté des piliers centraux par des vérins.

L'ensemble pèse 9 360 tonnes de fer, chaque caisson pesant 1 800 tonnes et les plus petits 1 000 tonnes. Deux grands tubes de section carrée possèdent quatre travées dont deux prennent appui sur l'îlot Britannia (les travées centrales sont préfabriquées et les autres sont fabriquées sur place). C'est dans ces tubes métalliques que passent les trains. De nombreuses études sur la résistance des métaux sont exécutées pour le calcul de ce pont. Ce sera le plus grand succès de la carrière de Stephenson mais aussi un projet inimaginable à son époque. L'esthétique n'est pas négligée, l'architecte Francis Thompson conçoit les pylônes monumentaux du pont : deux gigantesques lions en pierres. Il sera détruit en 1970 par un incendie.

On s'aperçoit rapidement de l'intérêt des montages en treillis métalliques qui réduisent considérablement le poids de l'ensemble de la structure sans en diminuer ses capacités de résistance. Gustave Eiffel développera cette technique dans la plupart de ses constructions.



Pont Britannia, maquette à 1/333, milieu 19<sup>e</sup> siècle, inv. 6657.

Robert Stephenson (1803-1859), fils du père des chemins de fer George Stephenson, fait son apprentissage aux houillères de Killingworth avant d'étudier les sciences et les mathématiques un semestre à l'université d'Edimbourg. Il prend la direction de l'usine de conception et de construction de locomotives de son père vers 1823 et met au point la fameuse « Rocket » pour le concours de Rainhill de 1829. À 30 ans il obtient le poste d'ingénieur en chef du London and Birmingham Railway, première ligne de 180 km à relier Londres. Cette organisation est un travail colossal cumulant de nombreux problèmes techniques de génie civil tels que tunnels et tranchées. La ligne inaugurée en 1838 assure la notoriété de Stephenson. Les vingt années qui suivront seront consacrées aux chemins de fer, à la supervision de lignes, aux raccordements de lignes de toute l'Europe puis dans les colonies de l'empire britannique. Sa célébrité viendra aussi de ses réalisations de ponts aux conceptions révolutionnaires pour l'époque. Ces succès lui procurent gloire et fortune et il est récompensé par les honneurs de France, de Belgique, de Norvège. Il est élu Fellow of the Royal Society en 1849 et devient membre du parlement de Whitby en 1847 ; il le restera jusqu'à sa mort en 1859.



Pont sur la rivière de Hué (Annan), maquette au 1/25, 1900, inv. 13296.

## Par monts et par vaux : Les ponts

■ Avant toute construction d'un pont, une décision politique s'impose : dans quel but allons-nous le construire ? La construction d'un pont est un acte éminemment politique. Il va permettre l'accès à une région hostile ou à découvrir (tel le pont de César sur le Rhin pour intimider les Germains). Il va servir à désenclaver une région excentrée ou isolée tel le pays de Galles avec le pont Britannia. Il va ouvrir les portes du commerce en temps de paix ou des invasions en temps de guerre. La complexité de la construction d'un pont nécessite tellement de spécialistes, de main d'œuvre et de décisions, ainsi qu'un coût très élevé, que seule une instance politique locale, régionale ou nationale est à même de mener à bien et de financer ce projet.

Lorsque la décision politique est prise, il est alors nécessaire de faire appel aux ingénieurs qui vont chercher le lieu adéquat pour faire passer leur pont. Solidité des rives, profondeur des eaux, débit du courant, hauteur des crues, largeur du lit de la rivière, géologie du fond du lit... Les infrastructures et réseaux routiers et ferroviaires ne doivent pas être oubliés.

Cet ouvrage architectural, permettant de franchir un obstacle naturel ou artificiel, s'appuie à ses extrémités sur des *culées* (C). Les appuis intermédiaires s'appellent des *piles* (Pi). La *portée* (Po) est la distance entre deux appuis consécutifs.

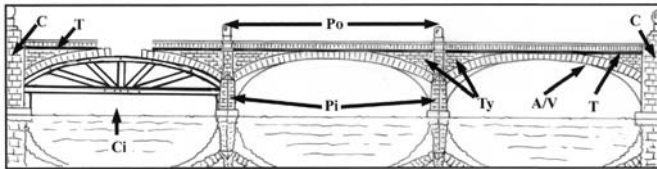


Schéma de principe d'un pont

**Les ponts à poutres** peuvent être en bois, en fer, en acier, en béton armé ou précontraint. Les poutres doivent pouvoir résister à la flexion et à l'effort tranchant. Alors que la portée des poutres en bois est très limitée, il existe des poutres en acier de plus de 500 m et des poutres en béton précontraint de plus de 200 m de portée. Les systèmes *cantilevers* sont constitués de tronçons de poutres. L'ensemble constitué par la poutraison et la couverture est appelé le *tablier* (T) du pont.

**Les ponts voûtés** sont en maçonnerie ou en béton, car les voûtes ont essentiellement à subir des efforts de compression. Une voûte est construite sur un échafaudage appelé *cintré* (Ci). La forme du cintré est demi-circulaire, en arc de cercle ou en ogive. Lorsque toutes les pierres de taille sont posées au contact les unes des autres, le cintré est enlevé et sous l'effet de leur poids, les pierres se trouvent fortement comprimées. La structure ainsi constituée peut supporter de très lourdes charges, à condition que les culées soient assez massives et que le sol soit assez résistant.

Les voûtes sont surmontées latéralement de murs, appelés *tympans* (Ty), entre lesquels se trouve un remblai qui supporte la chaussée. Lorsque la portée est assez grande, le tablier s'appuie sur la voûte par l'intermédiaire d'une succession de petites voûtes.

Les *ponts en arc* sont métalliques ou en béton armé. Leur tablier est soit supérieur, lorsqu'il repose sur les arcs, soit inférieur lorsqu'il est suspendu aux arcs, soit intermédiaire.

Dans les **ponts suspendus**, des *câbles* (Ca), constitués d'un très grand nombre de fils métalliques, ancrés dans des massifs d'ancrage et passant sur des pylônes de grande hauteur, supportent le tablier. Ces câbles travaillent essentiellement à la traction ; ils portent le tablier par l'intermédiaire de suspentes attachées à des colliers, et constituées de câbles ou de barres métalliques.

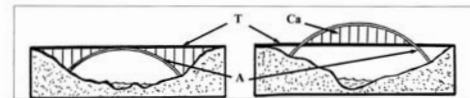
La plupart des ponts sont *fixes*.

On utilise exceptionnellement des ponts *mobiles*, lorsque le tablier n'est pas assez haut par rapport à la voie franchie qui est en général dans ce cas une voie de navigation intérieure ou maritime. Les ponts *levants* sont des ponts à poutres qui peuvent être soulevés, au moyen de treuils, le long de deux pylônes placés à leurs extrémités. Les ponts *tournants* pivotent autour d'un axe vertical placé sur une pile au milieu du tablier. Les ponts *basculants* pivotent autour d'un axe horizontal placé sur une culée, ou autour de deux axes horizontaux, sur chacune des culées. Les *tabliers* des ponts sont munis de divers équipements nécessaires pour leur conservation et leur utilisation : garde-corps pour les piétons ou barrières de sécurité pour les véhicules, dispositifs d'étanchéité et d'évacuation des eaux, joints de chaussées et de trottoirs pour permettre la dilatation, appareils d'éclairage, etc. Les ponts sont aussi utilisés pour le passage de nombreuses canalisations placées à l'intérieur des trottoirs et des tabliers.



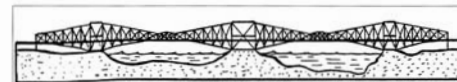
Pont à linte pleine

Pont à treillis

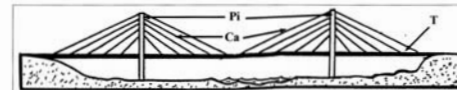


Pont en arc à tablier supérieur

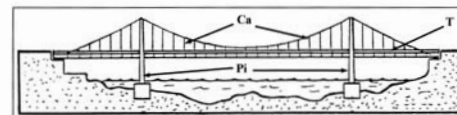
Pont en arc à tablier intermédiaire



Pont cantilever



Pont à haubans



Pont suspendu



*Par monts et par vaux : Les ponts*

## ■ Collections

Le domaine consacré à la Construction présente, sur une mezzanine, une série de maquettes de ponts représentant pratiquement tous les types évoqués ici.

Arche du pont de pierre de Bordeaux, Claude Deschamps, 1819 ; inv. 8707.

Pont de Jarnac sur la Charente de J.P. Quénot, 1828 ; inv. 7387.

Pont Britannia au Pays de Galles, R. Stephenson et W. Fairbairn, 1850 ; inv. 6657.

Pont de Drogheda en Irlande, Sir J. Mac Weill, 1855 ; inv. 13123.

Pont Antoinette sur l'Agout, P. Séjourné, 1884 ; inv. 11664.

Pont de Hué au Vietnam, fin du XIX<sup>e</sup> ; inv. 13296.

Viaduc sur le Rio Malleco au Chili, 1895 ; inv. 13108.



Arche du pont en pierre de Bordeaux, maquette au 1/25, 1819, inv. 8707.

### POUR EN SAVOIR PLUS.

Marcel Prade, *Ponts et viaducs au XIX<sup>e</sup> siècle. Techniques nouvelles et grandes réalisations.* Paris, Errance, 1989.

D'après Viollet-le-Duc, *L'Encyclopédie médiévale.* Réimpression Inter Livres, 1995, tome I, Architecture.

*Civilisations du Danube*, dossiers d'Archéologie n°220, février 1997. [Exposition. Paris, Centre Georges Pompidou. 1997] ;

Antoine Picon (dir.), *L'art de l'ingénieur : Constructeur, Entrepreneur, Inventeur*, Centre G. Pompidou, Le Moniteur, 1997.

Judith Dupré, *Les Ponts*, Cologne, éditions Könemann, 1998.

Les collections du Musée des arts et Métiers sont aussi consultables sur Internet.

Adresse électronique :

<http://www.arts-et-metiers.net>

### Tableau des ponts et de leurs performances (établi au 1<sup>er</sup> janvier 2000) :

Type de pont	Nom, Lieu ou Fleuve, Pays, Année	Portée principale
Arc de pierre	Pont de Trajan sur le Danube vers le III <sup>e</sup> siècle après J.-C.	60 m (longueur totale 1 000 m)
Mobile	Arthur Kill, Elizabeth, New Jersey, 1959	170 m
Poutre-caisson en acier	Costa e Silva, Rio de Janeiro, Brésil, 1974	300 m
Poutre-caisson en béton	Austevoll, Norvège, 1998	301 m
Poutre-trellis	Astoria, Columbia river, Oregon, 1966	376 m
Arc en béton	Wangxiang, Yang-Tsé, Chine, 1996	420 m
Arc en acier	New River Gorge, Fayetteville, Washington, 1978	518 m
Cantilever	Québec, Québec, Canada, 1917	549 m
A haubans	Tatara, Onomichi-Imabari, Japon, 1999	890 m
	Normandie, Le Havre, France, 1995	856 m
Suspendu	Akashi Kaikyo, Japon, 1998	1 990 m (longueur totale 3 910 m)



Pont de Neuilly : cintre en charpente ayant servi à la construction fin XIX<sup>e</sup> inv. 8637.

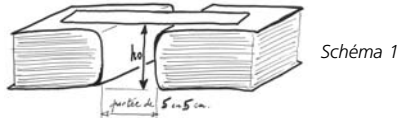


## Par monts et par vaux : Les ponts

Prenez deux feuilles cartonnées (bristol) au format A4. Découpez, dans la première, quatre bandes de cinq centimètres de large dans le sens de la longueur (5 x 29,7 cm). Tracez sur la seconde trois bandes aux mêmes dimensions, coupez la chute. Prenez deux livres identiques, épais (de type dictionnaire). Ecartez-les de 5 cm (portée = P0)

### 1) Pont des origines

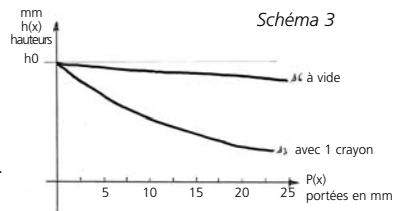
Placez une bandelette de carton entre les deux dictionnaires distants de  $x = 5$  cm, où  $x$  représente la portée du pont et la bandelette le tablier (schéma 1). Mesurez la hauteur du tablier (bandelette) par rapport à la table. Appelons  $h_0$  cette hauteur de référence.



Placez un crayon au milieu du tablier (schéma 2). La hauteur de la bandelette est alors désignée par  $h_x$ . Si l'on donne à la portée une valeur de  $x = 5$  cm,  $h_x$  s'écrit alors  $h_5$ . Mesurez  $h_5$ . Augmentez la portée  $x$  de 5 cm en 5 cm et mesurez les hauteurs correspondantes :  $h_{10}$ ,  $h_{15}$ ,  $h_{20}$  et  $h_{25}$ .



Pour tracer la courbe  $h_x = f(x)$  reportez les points correspondants sur un graphique (la hauteur en ordonnée, la portée correspondante en abscisse). Vous obtenez deux courbes, l'une « à vide », l'autre « avec un crayon ». Que remarquez-vous ?

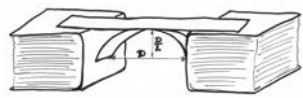


Vous constaterez que plus la portée augmente, plus la hauteur  $h_x$  diminue : le tablier subit une flexion qui s'accroît avec la portée.

### 2) Ponts de l'Antiquité

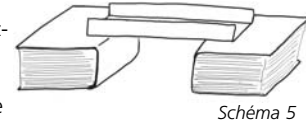
Pour pallier ce phénomène de flexion, on va soutenir le tablier par l'ajout d'un arc.

Placez une deuxième bandelette pliée en forme d'arc de cercle (schéma 4). Effectuez les mêmes mesures qu'en 1 et reportez-les sur le graphique fait en 1. Comparez les performances des deux types de ponts. (Attention : à l'époque de ce pont, l'arche étant un demi-cercle, on calculera la longueur de la bandelette représentant l'arche (elle vaut  $1/2$  circonférence soit le produit  $P \times \pi/2$ ).



### 3) La révolution industrielle

Le treillis métallique posé sur les piles a remplacé l'arche de pierres. Vous pouvez symboliser cette structure avec la deuxième feuille cartonnée en la pliant sur les tracés au crayon papier. L'association de deux pliages formant un « U » (schéma 5). Maintenez-les par du ruban adhésif et mesurez les flexions respectives. Que peut-on en déduire ? (Vous pouvez augmenter la charge, le crayon risque d'être trop léger)

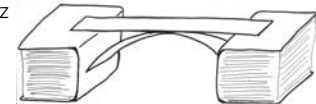


L'association de trois pliages formant un carré (schéma 6) du type du pont Britannia. Maintenez-les par du ruban adhésif et mesurez les flexions respectives. Que peut-on en déduire ?



### 4) Début du XX<sup>e</sup> siècle

Le béton apparaît et permet davantage de liberté dans la forme des ponts. Nous allons pouvoir donner à la forme de notre arc un rayon beaucoup plus grand (Schéma 7). Essayez en augmentant la longueur de la portée. Effectuez les mêmes mesures qu'en 1). Que peut-on en déduire ? Les flexions relevées sont-elles importantes ?



### 5) Milieu du XX<sup>e</sup> siècle

Le béton précontraint fait son apparition. Maintenez tendu, à l'aide de pinces à linge et de fils, le tablier à chaque bout. Le pont forme un léger arc. Effectuez les mêmes mesures qu'en 1). Que peut-on en déduire ? Les flexions relevées sont-elles importantes ?

- **Rédaction** : Éric Cancouet
- **Schémas** : Éric Cancouet
- **Coordination** : Claudette Balpe
- **Impression** : Alphagraphe
- **Photos** : Musée des Arts et métiers - CNAM Photo Pascal Faligot / Seventh Square ; Institution of Civil Engineers (London)
- **Musée des arts et métiers Service éducatif**  
292, rue Saint-Martin — 75003 Paris  
Tél. : 01 53 01 82 75 ou 01 53 01 82 32  
**ISBN** : 2-908207-83-4