

# Conception et construction des arcs

ADRIEN ANTONELLI \*, CLÉMENT DESODT \*\*, HÉLÈNE HORSIN MOLINARO \*\*\*

*Nombre de monuments et d'ouvrages sont conçus avec des arcs ou des voûtes. Cet article en présente les différentes formes et le vocabulaire lié. La conception et la construction des arcs seront abordées et accompagnées d'exemples.*

**E**n termes d'architecture, un arc **1** est une construction de forme courbe dont les deux extrémités vont s'appuyer sur des points solides. Un arc est un assemblage de pierre, moellon, brique, béton, acier ou bois destiné à franchir un espace plus ou moins grand au moyen d'une courbe (ou de la jonction de deux éléments courbes).

Une voûte **2** est un ouvrage de maçonnerie cintré permettant de couvrir un espace en s'appuyant sur des murs, des piliers ou des colonnes. La voûte est constituée d'un plancher (en brique, moellon, pierre, béton) dont le dessous (ou intrados) est en arc (ou en plate-bande).

Les matériaux de construction, béton ou maçonnerie, présentent des contraintes à la rupture plus importantes en compression qu'en traction. L'intérêt premier d'une forme en arc est de faire travailler ces matériaux majoritairement en compression. Les constructions en arcs et voûtes permettent d'atteindre de plus grandes longueurs de franchissement en comparaison d'une poutre sollicitée en flexion.

D'usage constant dans l'Antiquité romaine **3** et jusqu'à la fin du XI<sup>e</sup> siècle, l'arc en plein cintre est le seul employé (hors rares exceptions) dans les constructions ; il peut être surhaussé, outrepassé (dit en fer-à-cheval) ou bombé (centre au-dessous de la naissance). L'arc en plein cintre adopté par les Romains a ensuite été développé par les architectes du Moyen Âge (arc roman, **2**) et a prédominé dans l'architecture arabe avant l'introduction de l'arc en ogive au début du XII<sup>e</sup> siècle en France. À cette époque, trois grandes catégories d'arcs sont employées dans l'architecture **4** : les arcs en plein cintre (en demi-cercle), les arcs surbaissés (dits en anse de panier), formés par un ovale, une demi-ellipse, le grand diamètre à la base, et les arcs brisés (en lancette ou en tiers-point), formés de deux portions de cercle qui se croisent et donnent un angle curviligne plus ou

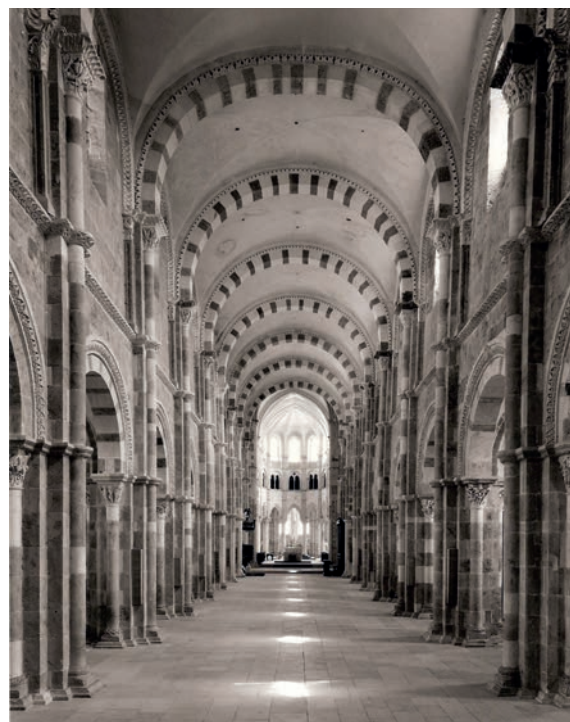
## MOTS-CLÉS

architecture et construction, statique, résistance des matériaux

\* Étève normalien en master 1 génie civil de l'ENS Paris-Saclay.  
 \*\* Professeur agrégé en génie civil à l'ENS Paris-Saclay.  
 \*\*\* Professeur agrégée de mécanique, site Culture sciences de l'ingénieur de l'ENS Paris-Saclay. Publié Culture sciences de l'ingénieur : [http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/ressources\\_pedagogiques/conception-et-construction-des-arcs#description](http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/ressources_pedagogiques/conception-et-construction-des-arcs#description)



**1** Arc de Saint-Louis, Mississippi, en forme « pattes d'éléphant »



**2** Voûte en berceau (arcs en plein cintre) de la basilique Sainte-Marie-Madeleine de Vézelay

moins aigu au sommet, selon la distance entre les centres. C'est donc pendant le XII<sup>e</sup> siècle que l'arc formé de deux portions de cercle est adopté dans les provinces de France, puis dans tout l'Occident ; il disparaît avec l'art du Moyen Âge vers le milieu du XVI<sup>e</sup> siècle, même s'il persiste dans la construction des voûtes.



3 Le pont du Gard, pont aqueduc romain à trois niveaux du 1<sup>er</sup> siècle

### Les différentes formes d'arcs

Il existe de nombreuses formes d'arc 4 : de l'arc en plein cintre à l'arc brisé dit en ogive, typique de l'arc gothique, en passant par l'arc outrepassé ou rampant. Nous verrons par la suite que la forme la plus adaptée pour supporter une charge linéairement répartie selon l'axe horizontal est l'arc parabolique.

Les éléments matériels constitutifs des arcs et voûtes sont présentés en figure 5. À la base de l'arc et de la voûte à claveaux, on trouve l'imposte ; à son sommet, la clef d'arc ou de voûte, dernier claveau que l'on pose au sommet de l'arc ou de la voûte pour les fermer. L'intérieur de l'arc est l'intrados, l'extérieur est l'extrados. L'arc ou de la voûte sont définis par leur portée et leur flèche ; le rapport de la portée sur la flèche qualifie l'élançement de l'arc ou de la voûte. Enfin, l'écoinçon est l'espace entre deux arcs ou entre un arc et une délimitation rectangulaire.

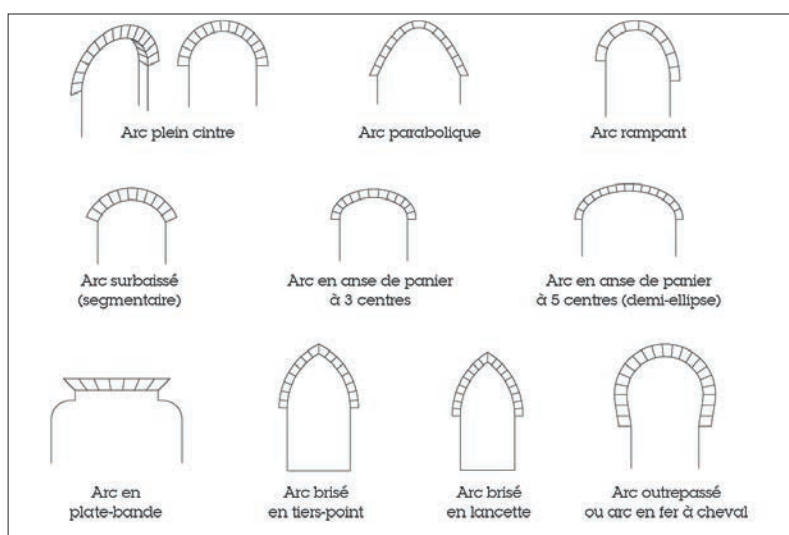
Dans les ouvrages d'art, l'arc peut être placé par-dessus 6 10 15 ou par-dessous 2 6 7.

Les matériaux constituant les arcs et les voûtes sont divers, le choix du matériau dépend de la géométrie du site, des charges, de l'environnement (résistance du sol, humidité, etc.), du mode constructif ; citons les constructions en maçonneries comme le pont du Gard 3, en pierre comme la Sainte-Chapelle 17, en béton comme le pont Chateaubriand 7, en acier comme l'arc Saint-Louis 1 ou en bois lamellé-collé comme le stade Telus 8.

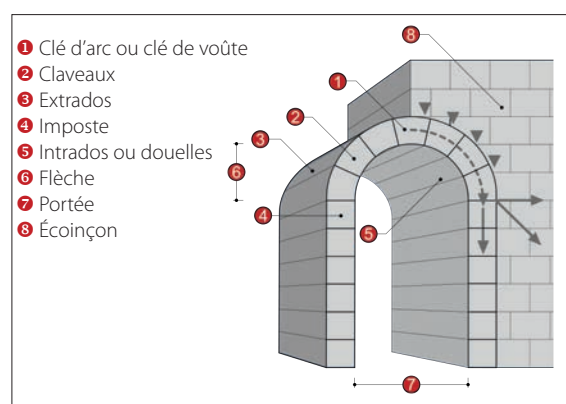
### Notions sur la conception des arcs : le funiculaire, forme idéale

Dans la conception d'un arc, on cherche à donner une géométrie telle que le matériau ne travaille majoritairement qu'en compression, en limitant les efforts tranchants et les moments fléchissants qui doivent donc être nuls. La forme réalisant cette condition est appelée polygone funiculaire.

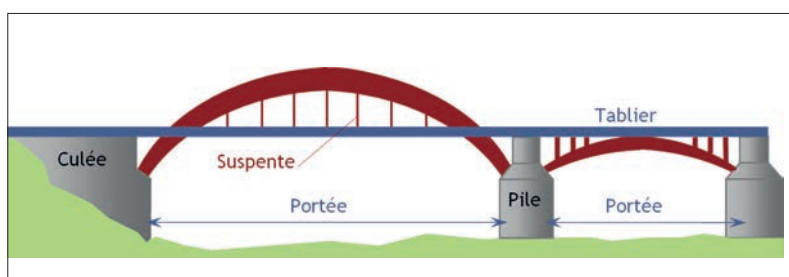
Il est possible de faire l'analogie avec un câble dont la rigidité flexionnelle est très faible ; les câbles adoptent des géométries satisfaisant les équations d'équilibre en supprimant dans chaque section le moment fléchissant. Même si les forces dans un câble sont des forces de traction, on peut ainsi envisager une certaine



4 Quelques exemples de formes d'arc



5 Vocabulaire relatif aux arcs et voûtes



6 Placement de l'arc : à gauche, arc par-dessus avec tablier suspendu ; à droite, arc par-dessous





7 Pont Chateaubriand sur la Rance conçu par Charles Lavigne, Ille-et-Vilaine

similitude entre câbles et arcs : pour un chargement donné, un câble adopte la forme que devra adopter l'arc pour ne pas présenter de moment fléchissant. Un arc soumis à un chargement uniforme pour être funiculaire doit donc adopter la même forme, mais de sens opposé, qu'un câble de même portée soumis à la même charge 9.

L'arc n'est funiculaire que pour un type de chargement ; si le chargement varie, des moments fléchissants vont apparaître. La forme de l'arc est définie en fonction de la charge majoritaire. C'est le cas de la charge de poids propre pour des ponts de longue portée.

**Détermination de la forme idéale pour supporter une charge uniformément répartie horizontalement dans le cadre d'un problème plan**

Prenons un arc de flèche  $H$  et de portée  $L$  qui supporte une charge répartie  $q$  (comme le poids propre du tablier, le poids propre de l'arc est négligé). Celui-ci repose sur les impostes (appuis notés app dans l'équation) en A et B 11, l'arc présentant une symétrie. L'arc est en équilibre sous trois actions :

$$\{\tau_{app/arc}\}_A, \{\tau_{app/arc}\}_B \text{ et } \{\tau_{q/arc}\}.$$

En appliquant le principe fondamental de la statique, on détermine que les réactions verticales des deux appuis en A et B sont identiques et égales à la moitié de la charge :

$$R_v^A = R_v^B = R_v = \frac{qL}{2}$$

Soit le point C au milieu de l'arc, isolons le demi-arc gauche (noté  $da_g$  et  $da_d$  pour le demi-arc droit), il est en équilibre sous trois actions en A et C :

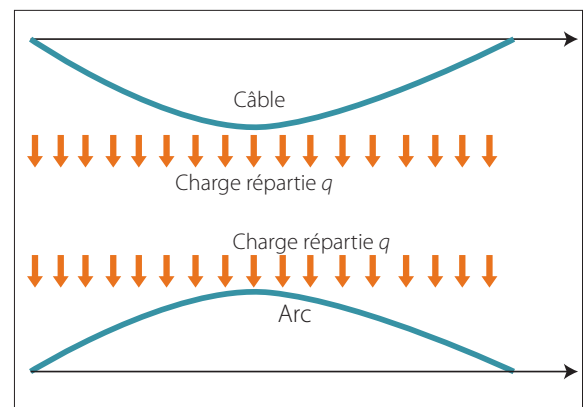
$$\{\tau_{app/da_g}\}_A, \{\tau_{app/da_g}\}_C \text{ et } \{\tau_{da_d/da_g}\}_C.$$

Le principe fondamental de la statique appliqué au demi-arc gauche et exprimé au point C donne l'équation de moment :

$$\overline{M}_C(q / da_g) + \overline{M}_C(da_d / da_g) + \overline{M}_A(app / da_g) + \overline{CA} \wedge (R_h \vec{x} + \frac{qL}{2} \vec{y}) = \vec{0}$$



8 Stade Telus, Université Laval, 2012, conçu par ABCP Architecture et Coarchitecture



9 Similitude arc-câble soumis à un chargement uniforme



10 Harbour bridge conçu par l'architecte Ralph Freeman, 1932, Sydney, Australie

L'hypothèse de moment de flexion nul en tout point entraîne que le moment de la partie droite sur la gauche est nul ; l'équation devient :

$$\overline{M}_C(q / da_g) + \overline{CA} \wedge (R_h \vec{x} + \frac{qL}{2} \vec{y}) = \vec{0}$$

où  $R_h$  est la réaction horizontale en A.

Réalisons une coupure fictive à une abscisse  $x$  12 et isolons la partie gauche (notée  $p_g$ ) qui est en équilibre sous trois actions :

$$\{\tau_{app/p_g}\}_A, \{\tau_{cohésion}\}_p \text{ et } \{\tau_{q/p_g}\}.$$

Le torseur de cohésion représente l'action de la partie droite de l'arc (enlevée) sur la partie gauche (isolée).

Prenons un élément de tronçon à l'abscisse  $x$  de longueur projetée  $dx$ , le moment élémentaire de la charge répartie appliqué à cet élément de tronçon est :

$$\delta \overline{M}_C(q / p_g) = \left( \frac{L}{2} - x \right) q \cdot dx \cdot \vec{z}$$

En intégrant sur la longueur projetée du demi-arc (pour  $x$  de 0 à  $L/2$ ), on obtient le moment de la charge répartie sur le demi-arc gauche :

$$\overline{M}_C(q / da_g) = \frac{q \cdot L^2}{8} \cdot \vec{z}$$

Ainsi, l'équation de moments donne :

$$R_h = \frac{qL^2}{8H}$$

Isolons le tronçon gauche **12**, le principe fondamental de la statique appliqué à la partie gauche de l'arc et exprimé au point P donne l'équation :

$$\{ \tau_{\text{cohésion}} \}_P = - \{ \tau_{q/p_g} \}_P - \{ \tau_{\text{app}/p_g} \}_P$$

avec

$$\{ \tau_{q/p_g} \}_P = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -qx & 0 \\ 0 & -\frac{qx^2}{2} \end{pmatrix}$$

et

$$\{ \tau_{\text{app}/p_g} \}_P = \begin{pmatrix} \frac{qL^2}{4H} & 0 \\ \frac{qL}{2} & 0 \\ 0 & \frac{qL}{2}x - y(x)\frac{qL^2}{8H} \end{pmatrix}$$

Donc

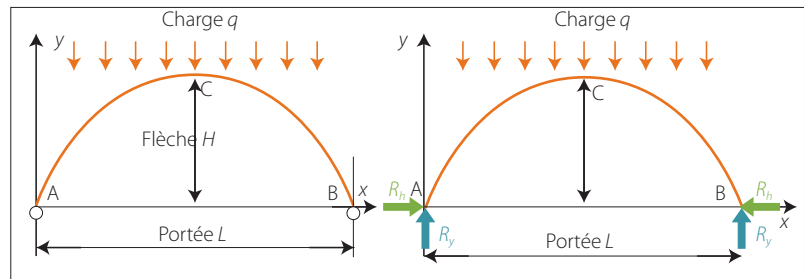
$$\{ \tau_{\text{cohésion}} \}_P = - \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -qx & 0 \\ 0 & -\frac{qx^2}{2} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{qL^2}{4H} & 0 \\ \frac{qL}{2} & 0 \\ 0 & \frac{qL}{2}x - y(x)\frac{qL^2}{8H} \end{pmatrix}$$

Reprenons l'hypothèse de moment de flexion nul en tout point :

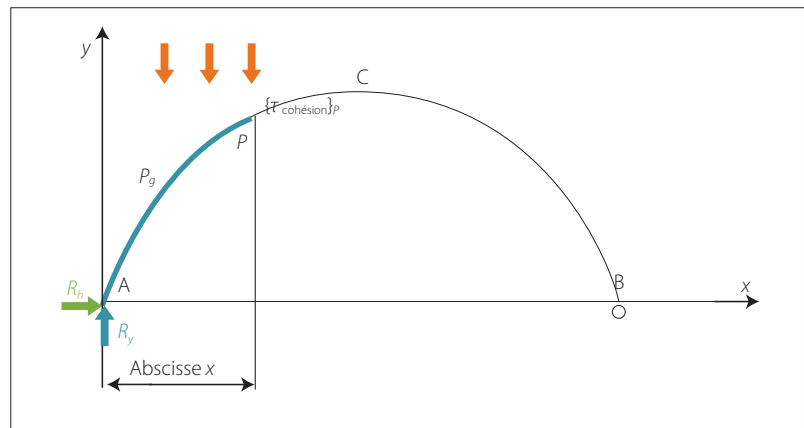
$$\frac{qL}{2}x - y(x)\frac{qL^2}{8H} - \frac{qx^2}{2} = 0$$

D'où l'équation du demi-arc gauche :

$$y(x) = \frac{4H}{L^2} \cdot x \cdot (L - x)$$



**11** Schématisation de l'arc soumis à une charge uniformément répartie



**12** Schématisation de l'étude par la coupure fictive

La forme optimale d'un arc pour supporter une charge uniformément répartie est donc une parabole. Cette forme se retrouve dans des ouvrages comme le Harbour bridge à Sidney **10**, où le chargement peut être considéré comme réparti grâce aux suspentes régulièrement espacées qui transmettent la charge à l'arc. Le tablier du pont permet de répartir les charges fluctuantes sur les différents éléments ; on peut l'assimiler à une poutre de raidissement.

**Détermination de la forme idéale pour supporter une charge ponctuelle dans le cadre d'un problème plan**

« L'arc<sup>1</sup> » de flèche  $H$  et de portée  $L$  supporte une charge  $Q$  (poids propre de l'arc négligé), il repose sur les impostes (appuis notés app) en A et B **13**, et présente une symétrie. Le système est en équilibre sous trois actions en A, B et C :

$$\{ \tau_{\text{app}/\text{arc}} \}_A, \{ \tau_{\text{app}/\text{arc}} \}_B \text{ et } \{ \tau_{q/\text{arc}} \}_C$$

En appliquant le principe fondamental de la statique, on détermine que les réactions verticales des deux appuis en A et B sont identiques et égales à la moitié de la charge :

$$R_v = \frac{Q}{2}$$

<sup>1</sup> En faisant l'analogie avec le câble, le funiculaire d'un arc soumis à une charge ponctuelle correspond à deux branches linéaires : cela n'a donc plus une forme arquée.

Isolons le demi-arc gauche ( $da_g$ ) ; il est en équilibre sous trois actions en A et C :

$$\left\{ \tau_{app/da_g} \right\}_A, \left\{ \tau_{q/da_g} \right\}_C \text{ et } \left\{ \tau_{da_d/da_g} \right\}_C.$$

Le principe fondamental de la statique appliqué au demi-arc gauche et exprimé au point C donne l'équation de moment :

$$\overline{M}_C(q / da_g) + \overline{M}_C(da_d / da_g) + \overline{M}_A(app / da_g) + \overline{CA} \wedge (R_h \vec{x} + \frac{Q}{2} \vec{y}) = \vec{0}$$

L'hypothèse de moment de flexion nul en tout point entraîne que les moments sont nuls en dehors du transport ; il reste donc :

$$\overline{CA} \wedge (R_h \vec{x} + \frac{Q}{2} \vec{y}) = \vec{0}$$

Ainsi, on obtient :

$$R_h = \frac{LQ}{4H}$$

Réalisons une coupure fictive à une abscisse  $x$  **14**, le torseur de cohésion représente l'action de la partie droite de l'arc (enlevée) sur la partie gauche  $p_g$  (isolée). La partie restante est en équilibre sous deux actions en A et P :

$$\left\{ \tau_{app/p_g} \right\}_A \text{ et } \left\{ \tau_{cohésion} \right\}_P$$

Le principe fondamental de la statique appliqué à la partie gauche de l'arc et exprimé au point P donne l'équation :

$$\left\{ \tau_{cohésion} \right\}_P = - \left\{ \tau_{app/p_g} \right\}_P = - \left\{ \begin{array}{cc} \frac{LQ}{4H} & 0 \\ \frac{Q}{2} & 0 \\ 0 & \frac{Q}{2}x - y(x)\frac{LQ}{4H} \end{array} \right\}$$

Reprenons l'hypothèse de moment de flexion nul en tout point :

$$\frac{Q}{2}x - y(x)\frac{LQ}{4H} = 0$$

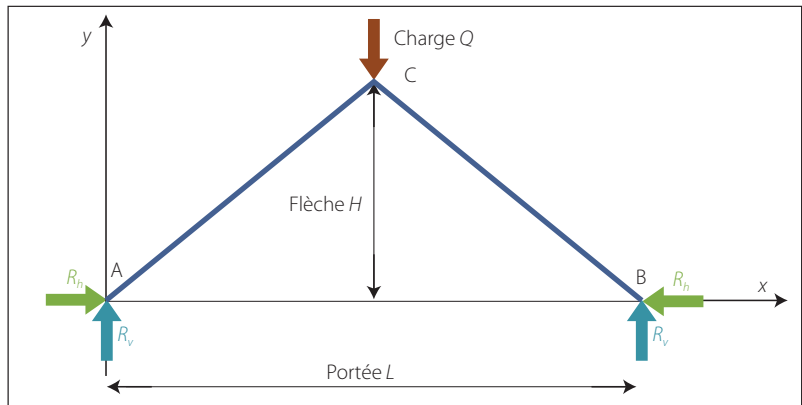
D'où l'équation du demi-arc gauche :

$$y(x) = \frac{2H}{L}x$$

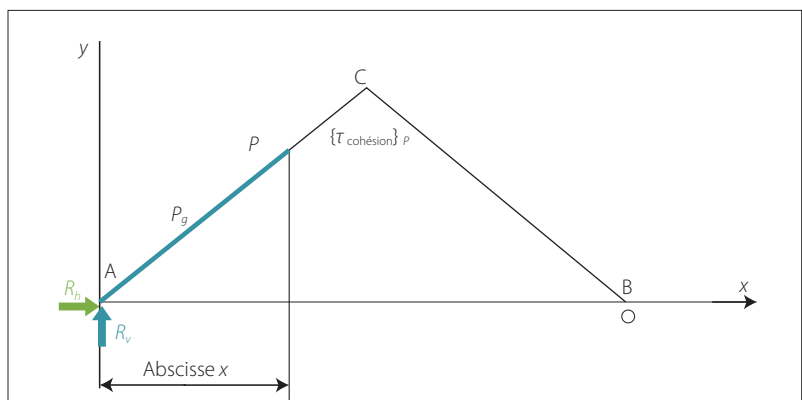
Et l'équation du demi-arc droit :

$$y(x) = -\frac{2H}{L}x + 2H$$

Ainsi, on retrouve bien la courbe affine par morceaux évoquée au début de ce cas d'étude. On reconnaît ce type de forme dans certaines passerelles **15**, cas où le chargement est quasiment ponctuel. Cette forme ne se retrouve pas directement dans des ouvrages,



**13** Schématisation de l'arc soumis à une charge ponctuelle



**14** Schématisation de l'étude par la coupure fictive



**15** Passerelle Ravel au-dessus de la N4, à Gembloux, Belgique

le cas de chargement ponctuel étant peu réaliste ; cependant, ce cas permet d'introduire le cas suivant.

**Détermination de la forme idéale pour supporter une charge uniformément répartie et une surcharge ponctuelle au sommet**

Ce cas de chargement **16** peut être considéré comme la superposition des deux études précédentes. Sa résolution conduit à trouver une forme dont l'équation est celle d'une parabole additionnée à celle d'une courbe affine par morceaux. On retrouve ce type de forme dans les arcs en ogive développés dans l'art gothique **17**.

**Châinette**

L'arc parabolique est donc le funiculaire d'une charge répartie. Il est fréquent que le chargement ne soit



pas réparti uniformément, ne serait-ce que par la construction, le poids de la maçonnerie étant plus important dans les écoinçons qu'en haut de l'arc. Le poids propre par unité de longueur horizontale **18** est alors plus important aux appuis qu'à la clef. En poursuivant l'analogie exprimée entre arc et câble, la chaînette est la forme que prend un câble suspendu entre deux appuis sous son poids propre **1**. Le funiculaire d'une telle charge s'énonce avec des fonctions hyperboliques et non plus paraboliques ; lorsque l'arc est élancé (on le dit aussi surbaissé), la forme du câble est tendue et la forme en chaînette se rapproche d'une fonction parabolique.

**Notions sur la conception des arcs : dimensionnement et optimisation**

**Patte d'éléphant**

Si l'effort tranchant et le moment fléchissant sont nuls en tout point, la résultante du torseur de cohésion est toujours colinéaire à la direction de l'arc. En conséquence, l'effort normal est plus important là où l'arc fait un angle important avec l'horizontale, donc aux bases de l'arc **19**. En effet, la projection horizontale de l'effort normal en toute section est constante et égale à la réaction d'appui  $R_h$ , soit  $ql^2/8H$  comme vu précédemment. L'effort normal augmente de la clef vers les appuis en  $ql^2/(8H\cos\theta)$ .

C'est donc aux lieux de naissance des arcs que les efforts sont les plus importants. Pour ne pas dépasser la contrainte à rupture en compression du matériau, une solution consiste à augmenter la section, d'où la forme en « pattes d'éléphant » de certains arcs **1**. Notons que cette forme permet d'augmenter la section uniquement là où cela est nécessaire, ce qui permet de réduire le poids propre de l'arc et d'économiser de la matière dans la mesure où la sensibilité au flambement est nulle et que l'élancement ( $L/H$ ) est petit **20**.

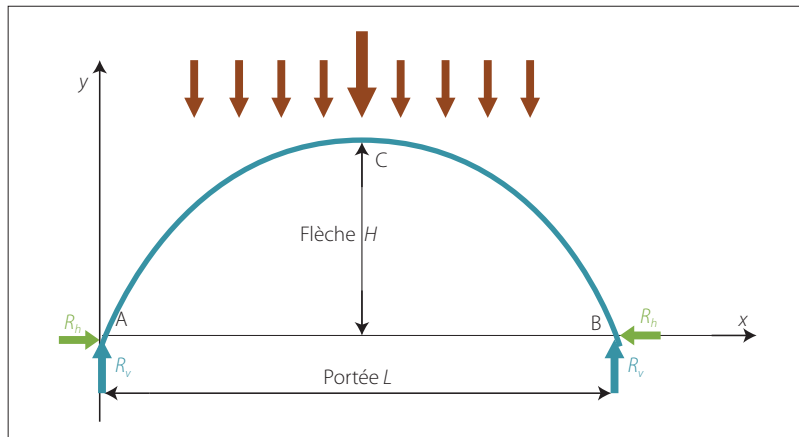
**Élancement**

L'élancement est le rapport de la portée  $L$  sur la flèche  $H$  (souvent la portée est imposée et la hauteur est à choisir). Le poids propre d'un arc, lié au volume de matière nécessaire  $V$ , est proportionnel à la longueur de la fibre moyenne  $l_{arc}$  et à l'effort de compression qu'il doit supporter.

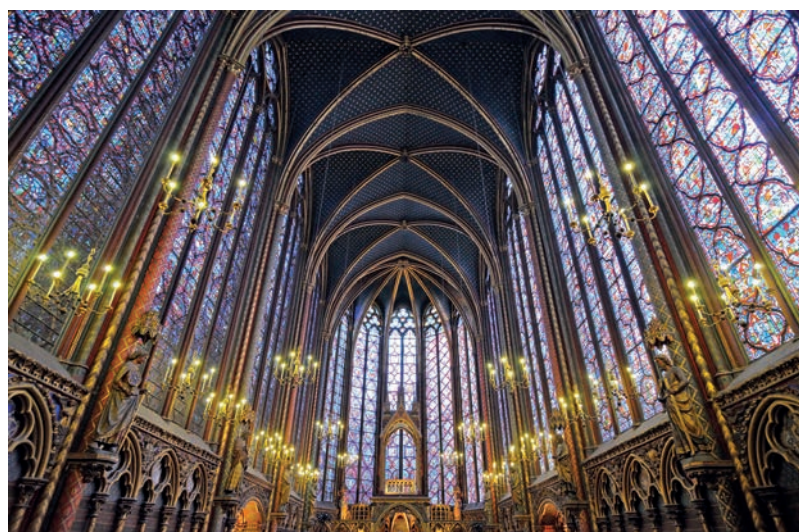
Un arc tendu (plat) voit son élancement  $L/H$  tendre vers l'infini, sa longueur moyenne  $l_{arc}$  se rapprocher de la portée  $L$  et l'effort normal de compression  $N$  tendre vers l'infini (voir plus haut l'expression liée à  $R_h$ ). Son volume, qui détermine son poids propre, est :

$$V = S \cdot l_{arc} \approx S \cdot L = \frac{N}{\sigma} \cdot L$$

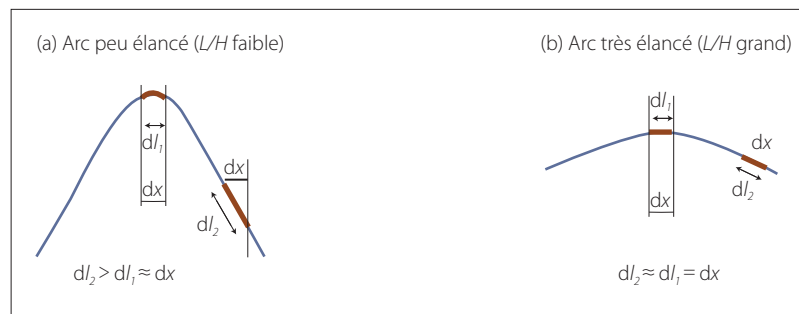
avec  $N \rightarrow \infty$ .



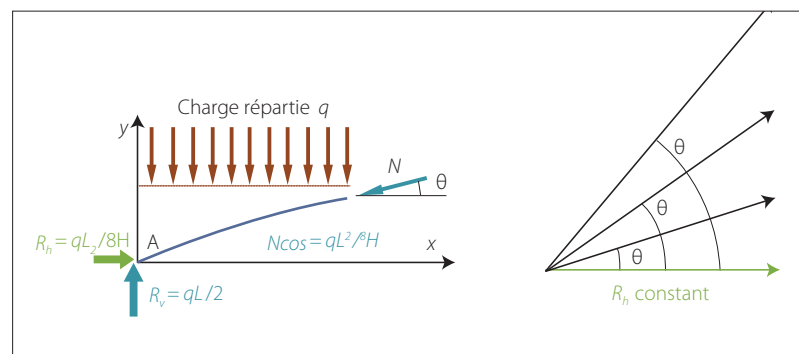
**16** Arc soumis à une charge uniformément répartie et une surcharge ponctuelle



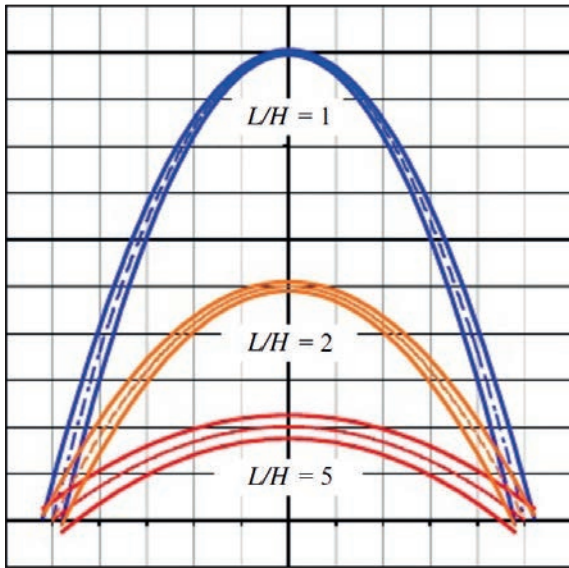
**17** La Sainte-Chapelle, île de la Cité, Paris



**18** Poids propre par unité de longueur en fonction de l'élancement de l'arc



**19** Évolution de l'effort normal dans un arc en fonction de l'angle  $\theta$



L/H		Gain de matière obtenu par l'arc à « pattes d'éléphant »
1		33,9 %
2		29,5 %
3		23,3 %
4		17,9 %

Source : Pierre Laitteur, « Calculer une structure, de la théorie à l'exemple », Academia Bruylant, www.editions-academia.be

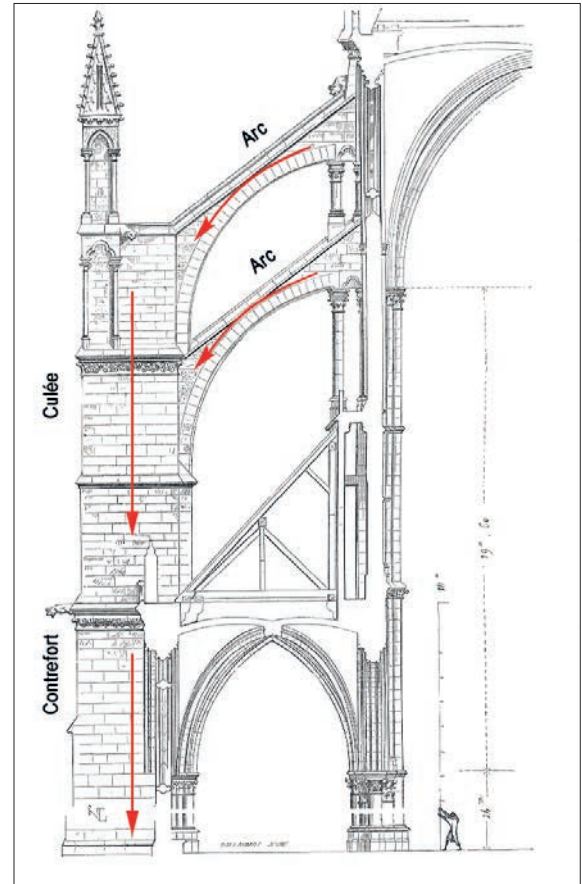
**20** Comparaison d'arcs à « pattes d'éléphant » de même portée, soumis au même chargement réparti, mais d'élancements différents, le gain de matière peut avoisiner les 30 %.

À l'inverse, un arc très haut voit son élancement  $L/H$  tendre vers zéro, la longueur de la fibre moyenne  $l_{arc}$  tendre vers l'infini et l'effort normal de compression  $N$  vers  $qL/2$ . Son volume est :

$$V = S \cdot l_{arc} = \frac{N}{\sigma} \cdot l_{arc}$$

avec  $l_{arc} \rightarrow \infty$

Entre les deux cas, il est possible de déterminer un élancement optimisant le volume de l'arc, donc son poids propre et la quantité de matière ; néanmoins, l'élancement de l'arc est aussi souvent contraint par la géométrie du site. Pour les arcs paraboliques de section constante soumis à un chargement réparti, l'élancement optimal se situe vers 2,926 et pour les



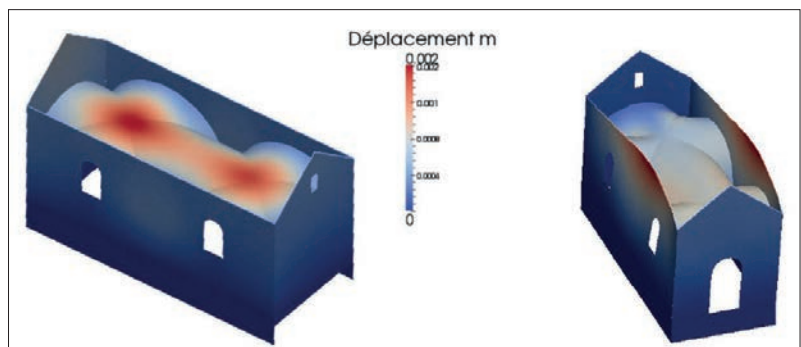
D'après un dessin d'Eugène Viollet-le-Duc

**21** Schématisation des efforts dans les arcs-boutants de la cathédrale Notre-Dame d'Amiens



© Nicolas Jarberg (www.structurae.net)

**22** Pont de Fragnée



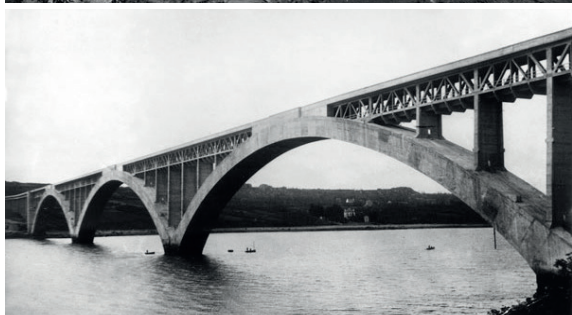
© Claire Limoge, ENS Cachan, 2016

**23** Étude sur la voûte plein cintre d'une chapelle : à gauche, déplacements verticaux sous poids propre ; à droite, premier mode de flexion





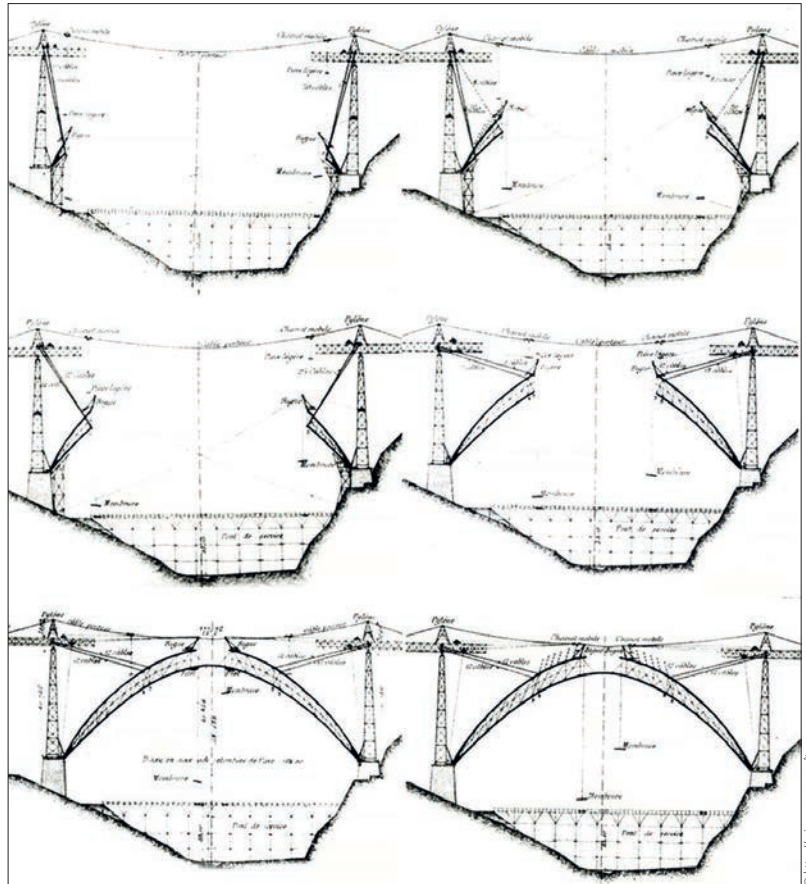
24 Viaduc de la Roizonne dans l'Isère : (a) construction de la grande arche (portée 80 m) à l'aide d'un cintre (été 1916) ; (b) vue générale aujourd'hui



25 Pont Albert-Louppe, Plougastel-Daoulas, portée des arches 186 m



26 Viaduc de Garabit lors de sa construction en 1884 par Gustave Eiffel



27 Les étapes de la construction du viaduc de Garabit (travail réalisé pour le musée des Arts et Métiers)



28 L'arc de Saint-Louis, Mississippi, lors de sa construction de 1963 à 1965

arcs à « pattes d'éléphant » il se situe vers 2,309. Ces valeurs sont à ajuster si l'arc est soumis au flambement.

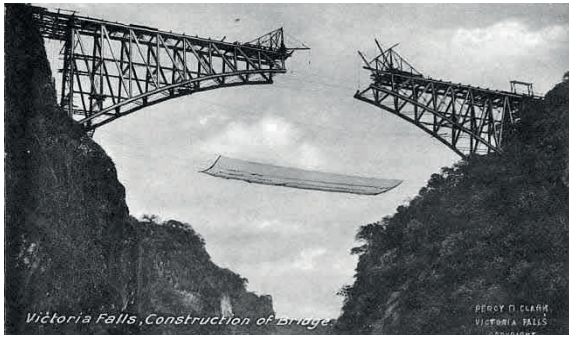
### Flambement

Les arcs étant des structures principalement soumises à une contrainte de compression, ils peuvent flamber dans leur plan, ainsi que latéralement (il s'agit alors de déversement, qui n'est pas abordé ici).

Pour un arc parabolique de section constante ou variable, la charge critique s'écrit :

$$F_{\text{crit}} = \gamma \frac{EI}{L^2}$$





29 Pont des chutes Victoria sur le Zambèze lors de sa construction

Cartes postales anciennes, Coll. JMY  
© Percy M. Clark/Adam Anniello, CC BY-SA3.0



30 Pont Raymond-Barre, Lyon

© Nicolas Robin/Syrial

© Balland/Syrial



31 Transport de charpente en bois lamellé-collé

© www.lcfournier.fr



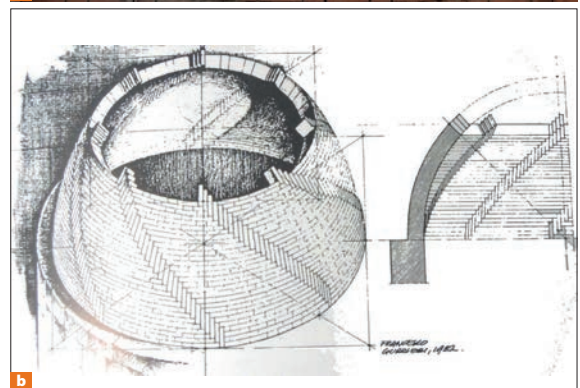
32 Montage par grue d'une structure en lamellé-collé avec une portée de 50 m

© www.lcfournier.fr



33 La cathédrale Santa Maria del Fiore, Florence

© kavalenkova/Shutterstock



34 Construction partielle d'une reproduction de la coupole du dôme (a) : maçonnerie en *spina pesche* (b)

© Francesco Bini

© Francesco Gurriferi

avec  $E$  le module d'élasticité du matériau utilisé,  $I$  le moment à la clef et  $y$  un paramètre qui dépend uniquement de l'élançement de l'arc  $L/H$ .

### Arc-boutant

L'arc-boutant juggle par sa propre poussée une partie des poussées des arcs et voûtes auxquels il s'applique et reporte le reste sur une pile verticale de maçonnerie. Il existe des batteries d'arcs-boutants, soit superposés dans un même plan vertical, soit successifs. Ce système d'arcs extérieurs permet d'absorber la poussée extérieure des murs pour la diriger vers le sol **21**. Les fondations des ponts, souvent massives aux appuis, permettent de reprendre cette poussée latérale **22**.

## Modélisation numérique

Dans l'étude de la durabilité et de la rénovation des ouvrages anciens, la modélisation numérique est de plus en plus utilisée. Cette approche permet de prendre en compte l'état plus ou moins endommagé de la structure comme des chargements de différentes natures (statiques, sismique, mouvements de terrain, etc.) <sup>23</sup>.

## Construction des arcs

La construction des arcs est généralement réalisée à l'aide de structures provisoires : cintres, câbles ou structures plus complexes pour les arcs de grande portée.

### Construction à l'aide de cintres

Fréquemment utilisés, notamment pour des arcs de taille modeste, les cintres sont les appuis de l'arc en construction. De façon traditionnelle, les cintres sont des constructions en bois <sup>24</sup>, mais on trouve aussi des installations plus complexes comme dans le pont Albert-Loupe <sup>25</sup> pour lequel chacune des trois arches est successivement coulée sur le cintre mobile.

### Construction à l'aide de câbles

Les câbles permettent d'assurer la stabilité durant la construction d'arcs de grandes dimensions. Les câbles ont un rôle structural, mais aussi pour certains fonctionnel, en servant à acheminer les matériaux de construction <sup>26 27</sup>.

### Construction à l'aide de structures complexes

Pour la réalisation de l'arc de Saint-Louis <sup>1</sup>, hors du commun par sa taille (192 m de hauteur), les équipes de construction ont tout d'abord monté chaque demi-arc séparément, en mettant en place une plate-forme de travail servant notamment à contrebalancer l'inclinaison des demi-arcs. Puis, à partir d'un certain stade, un buton (étais horizontal) provisoire a été installé entre les deux demi-arcs pour assurer leur stabilité, jusqu'à la pose de la clef de voûte <sup>28</sup>.

### Construction sans structure provisoire

Lorsque la structure est capable de reprendre les efforts de traction lors des phases de construction, il est possible de réaliser une construction sans dispositif auxiliaire. Le pont des chutes Victoria <sup>29</sup> conçu par George Andrew Hobson et inauguré en 1905 se situe en Zambie et franchit le Zambèze. L'acier permet de reprendre des efforts de traction importants ; ainsi, dans la phase de construction, la partie supérieure permettait d'assurer la stabilité de la structure.

On trouve aussi des solutions de construction sans structure provisoire lorsque les ouvrages sont



<sup>35</sup> Barrage-voûte de mont Montsalvens à proximité de Charmey, Suisse (1920)

préfabriqués, déplacés, puis assemblés sur site. Par exemple, le tablier du pont Raymond-Barre à Lyon, composé d'acier, a été réalisé sur le port Édouard-Herriot au sud de l'emplacement définitif. Le pont posé sur une barge de transport a été déplacé sur le Rhône <sup>30</sup>, puis assemblé à la plateforme de rive. Ces solutions de construction sont similaires pour les bâtiments dont la charpente en arcs est réalisée en bois lamellés-collés, transportés par la route, puis assemblés sur site <sup>31 32</sup>.

Inauguré en 1436, après seize années de construction, le dôme de la cathédrale Santa Maria del Fiore <sup>33</sup> à Florence (Italie) demeure le plus grand dôme maçonné au monde (87 m de haut). La voûte de ce dôme résulte du croisement de quatre arcs sur une base octogonale. Le dôme est en fait composé de deux coupoles superposées, l'espace interne abritant des marches ; son édification a été réalisée sans structure de soutien central. Pendant la construction, le dôme était autoportant grâce à une disposition particulière des briques en spirale dite en *spina pesce* ou arête de poisson <sup>34</sup>.

## Conclusion

La forme à donner à l'arc dépend du chargement auquel il est soumis, d'où une multiplicité de formes allant bien au-delà des cas évoqués dans cet article. L'arc est souvent un ouvrage de franchissement ; cependant, sa capacité à reporter les efforts à ses extrémités permet d'autres utilisations, ainsi que nous l'avons évoqué, comme élément de toiture <sup>32 33</sup> ou encore pour la réalisation de barrages. Les barrages dits « barrages voûtes » <sup>35</sup> sont souvent implantés dans des vallées étroites et ont des parois suffisamment rigides pour reprendre les efforts en jeu. ■