

Conception et construction des arcs

Adrien ANTONELLI - Clément DESODT
Hélène HORSIN MOLINARO

Edité 16/11/2016

En termes d'architecture, un arc 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 par la rencontre de deux éléments courbes).

Une voûte 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 encore intrados) est fait en arc (ou en plate-bande).



Figure 1 : Arc de Saint Louis, Mississippi, en forme « pattes d'éléphant », image Daniel Schwen [1]

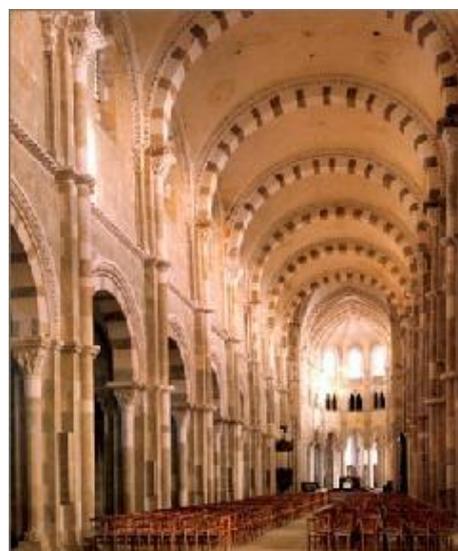


Figure 2 : Voûte en berceau (arcs plein cintre) de la basilique Sainte Marie Madeleine de Vézelay, image L'Art Roman Bourguignon [2]

Les matériaux de construction, béton ou maçonneries, présentent des contraintes à rupture plus importante 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 regard d'une poutre sollicitée en flexion.

Cette ressource présente les différentes formes d'arcs et voûtes, le vocabulaire lié, la conception et la construction des arcs sont abordées appuyées sur des exemples.

1 – Introduction

D'usage constant dans l'Antiquité romaine (figure 3) et jusqu'à la fin du XI^e siècle, l'arc en plein cintre avec ses variétés est le seul employé (hors rares exceptions) dans les constructions ; les arcs plein cintre peuvent être surhaussés ou outrepassés (dits en fer-à-cheval) ou bombés (centre au-dessous de la naissance). L'arc en plein cintre, adopté par les Romains (figure 3), a ensuite été développé par les architectes du Moyen Âge (arc Roman, figure 2) et a prédominé dans

l'architecture arabe avant l'introduction de l'arc-ogive au début du XII^e siècle en France. À cette époque, on trouve trois grandes catégories d'arcs employés dans l'architecture (figure 4) : les arcs 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 moins aigu au sommet, suivant que les centres sont plus ou moins éloignés l'un de l'autre. C'est donc durant pendant le XII^e 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^e siècle (même s'il persiste dans la construction des voûtes).



Figure 3 : Le pont du Gard, pont aqueduc romain à trois niveaux du 1^{er} siècle, image [4]

1.1 - Les différentes formes d'arcs

Il existe de nombreuses formes d'arc (figure 4) de l'arc 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.

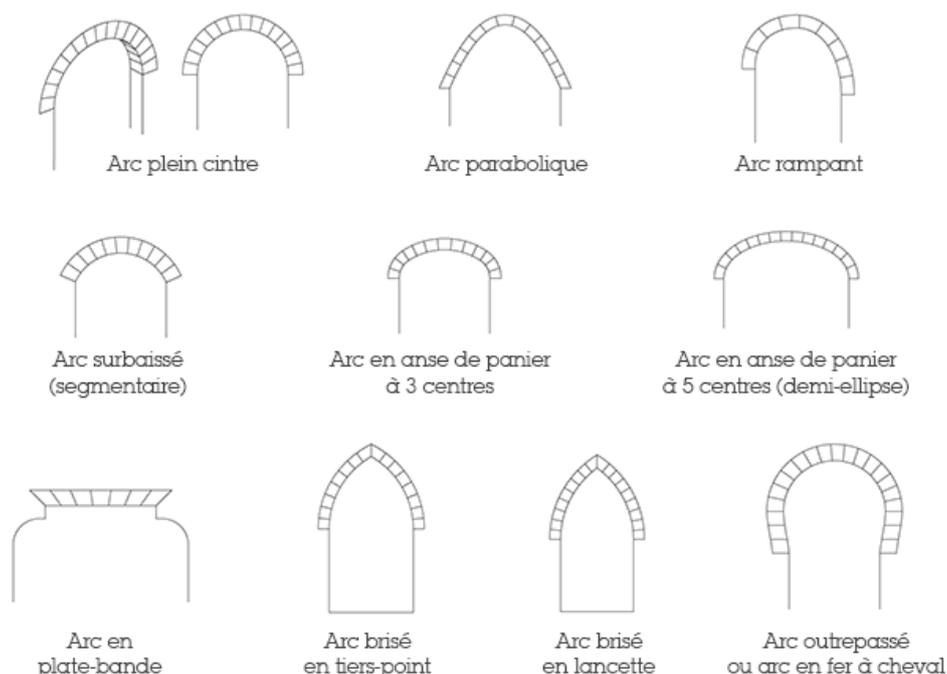


Figure 4 : Quelques exemples de formes d'arc, image [4]

1.2 - Le vocabulaire relatif aux arcs et voûtes

À la base de l'arc et de la voûte à claveaux² (figure 5), on trouve l'imposte⁴, à son sommet la clef d'arc ou de voûte¹ 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'intrados⁵, l'extérieur est l'extrados³. L'arc ou la voûte sont définis par leur portée⁷ et leur flèche⁶ ; le rapport de la portée sur la flèche qualifie l'élançement de l'arc ou la voûte. Enfin l'écoinçon⁸ est l'espace entre deux arcs ou entre un arc et une délimitation rectangulaire.

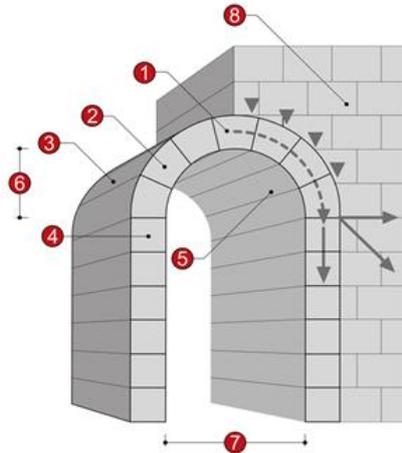


Figure 5 : Vocabulaire relatif aux arcs, image [4]

Dans les ouvrages (figure 6), l'arc peut être placé par-dessus (voir les exemples figures 10 et 15) ou par-dessous (voir les exemples figures 2 et 7).

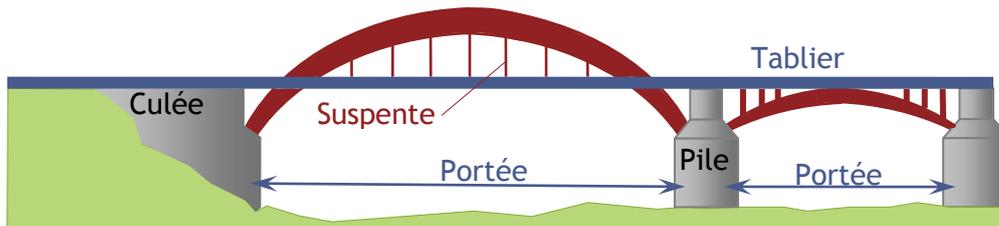


Figure 6 : Placement de l'arc : à droite, arc par-dessus avec tablier suspendu, à gauche, arc par-dessous

1.2 - Les matériaux

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 (le pont du Gard, figure 3), en pierre (la Sainte Chapelle, figure 17), en béton (le pont Chateaubriand, figure 7), en acier (l'arc Saint Louis, figure 1), en bois lamellé-collé (le stade Telus, figure 8).



Figure 7 : Pont Chateaubriand sur la Rance, Ille et Vilaine, image [5]

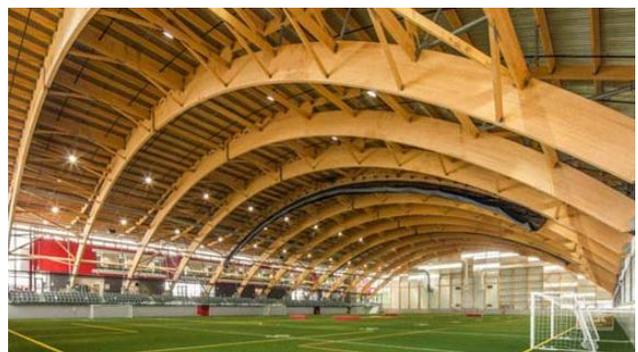


Figure 8 : Stade TELUS-Université Laval, 2012, conçu par ABCP Architecture et Coarchitecture, image Stéphane Groleau

Les ouvrages utilisant des arcs sont nombreux, divers en usage mais aussi en dimensions, dates de construction et localisation.

2 – 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 fléchissant 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 dualité 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 opposés, qu'un câble de même portée soumis à la même charge (figure 9).

L'arc n'est funiculaire que pour un type de chargement, si le chargement varie, des moments fléchissant 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 des longues portées.

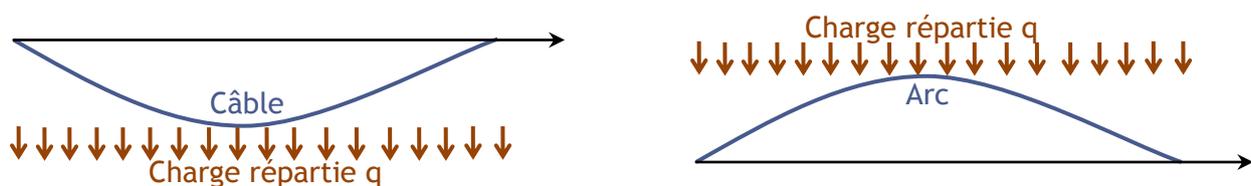


Figure 9 : Similitude arc-câble soumis à un chargement uniforme

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



Figure 10 : Harbour bridge 1932, Sidney, Australie, image [6]

L'arc de flèche H et de portée L supporte une charge répartie q (comme le poids propre du tablier, le poids propre de l'arc est négligé), il repose sur les impostes (appuis notés app) en A et B (figure 11), l'arc présente une symétrie.

L'arc est en équilibre sous trois actions : $\{ \tau_{app/arc} \}_A$, $\{ \tau_{app/arc} \}_B$ et $\{ \tau_{q/arc} \}$.

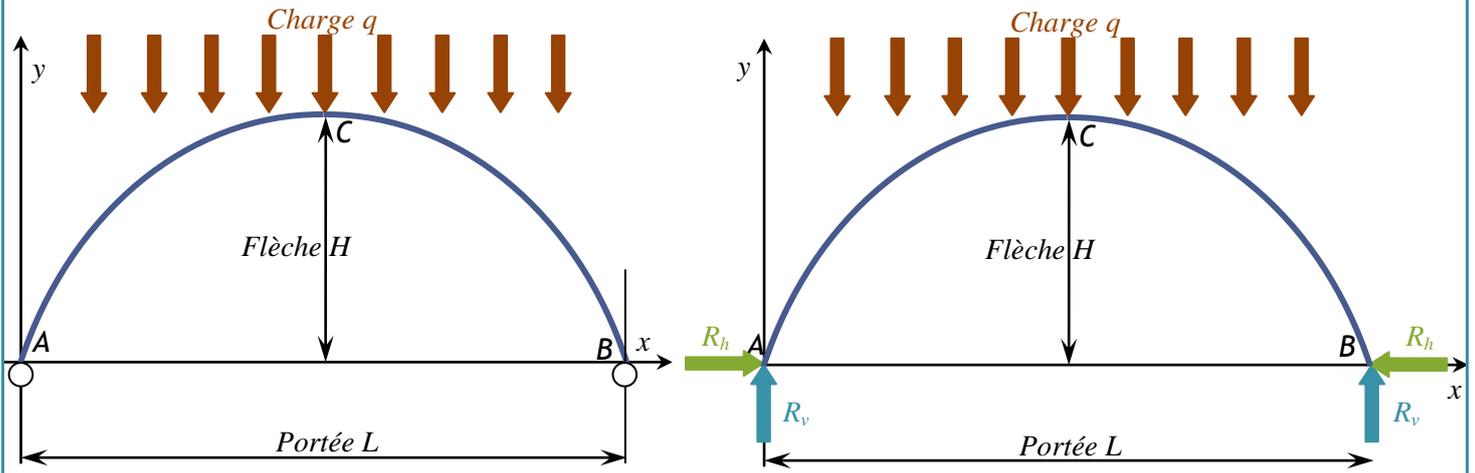


Figure 11 : Schématisation de l'arc soumis à une charge uniformément répartie

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 :

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

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 : $\{\tau_{app/da_g}\}_A$, $\{\tau_{q/da_g}\}_C$ 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 :

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

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 :

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

Réalisons une coupure fictive à une abscisse x (figure 12), et isolons la partie gauche (notée p_g) qui est en équilibre sous trois actions : $\{\tau_{app/p_g}\}_A$, $\{\tau_{cohésion}\}_P$ 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).

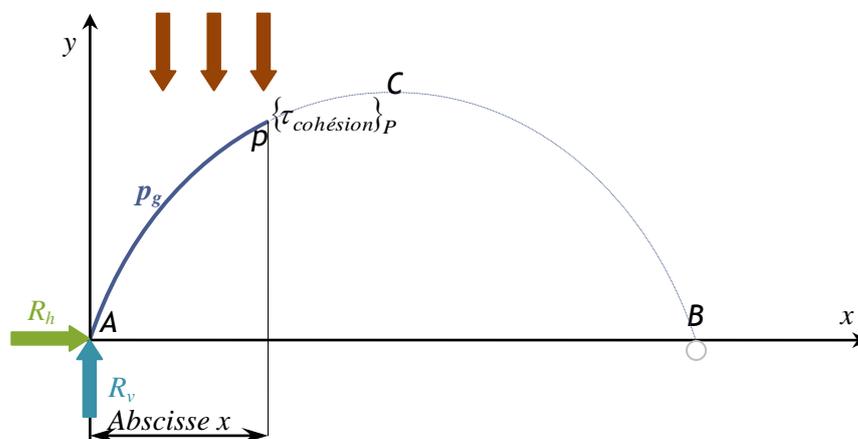


Figure 12 : Schématisation de l'étude par la coupure fictive

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 :

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

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 :

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

Ainsi l'équation de moments donne :

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

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

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

Avec $\{\tau_{q/p_g}\}_P = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ -qx & 0 \\ 0 & -\frac{qx^2}{2} \end{Bmatrix}$ et $\{\tau_{app/p_g}\}_P = \begin{Bmatrix} \frac{qL^2}{4H} & 0 \\ \frac{qL}{2} & 0 \\ 0 & \frac{qL}{2}x - y(x) \frac{qL^2}{8H} \end{Bmatrix}$

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

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

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 (figure 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.

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

« L'arc »¹ 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 (figure 13), et présente une symétrie.

Le système est en équilibre sous trois actions en A, B et C : $\{\tau_{app/arc}\}_A$, $\{\tau_{app/arc}\}_B$ et $\{\tau_{q/arc}\}_C$.

¹ 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.

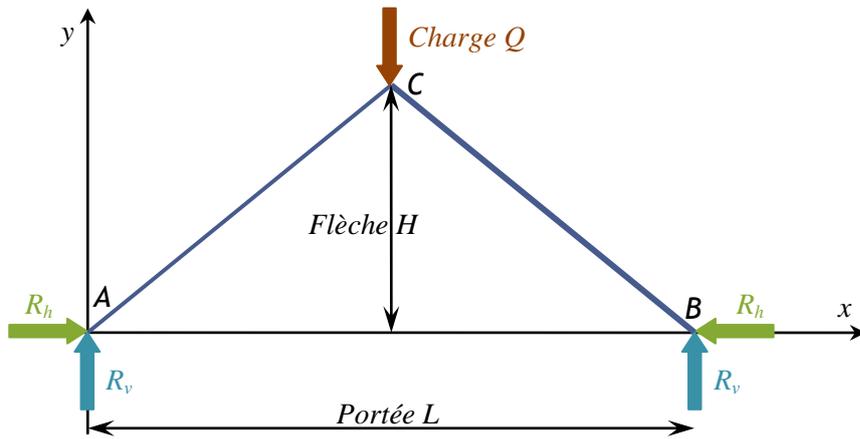


Figure 13 : Schématisation de l'arc soumis à une charge ponctuelle

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 :

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

Isolons le demi arc gauche (da_g), il est en équilibre sous trois actions en A et C : $\{\tau_{app/da_g}\}_A$, $\{\tau_{q/da_g}\}_C$ 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 :

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

L'hypothèse de moment de flexion nul en tout point, entraîne que les moments sont nuls en dehors du transport, il reste donc : $\overline{CA} \wedge (R_h \vec{x} + \frac{Q}{2} \vec{y}) = \vec{0}$

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

Ainsi on obtient :

Réalisons une coupure fictive à une abscisse x (figure 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 : $\{\tau_{app/p_g}\}_A$ et $\{\tau_{cohésion}\}_P$.

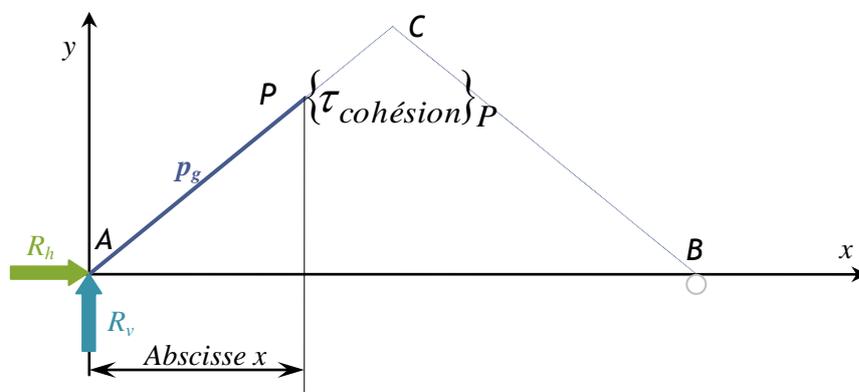


Figure 14 : Schématisation de l'étude par la coupure fictive

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

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

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 donc bien la courbe affine par morceaux évoquée au début de ce chapitre 2.2. On reconnaît ce type de forme dans la passerelle figure 15, cas où le chargement est quasiment ponctuel. Cette forme ne se retrouve pas directement dans des ouvrages, le cas de chargement ponctuel étant peu réaliste, cependant ce cas permet d'introduire le cas suivant.



Figure 15 : Schématisation de l'arc soumis à une charge ponctuelle

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

Ce cas de chargement (figure 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. Ainsi on retrouve ce type de forme dans les arcs en ogive développés dans l'art gothique (figure 17).

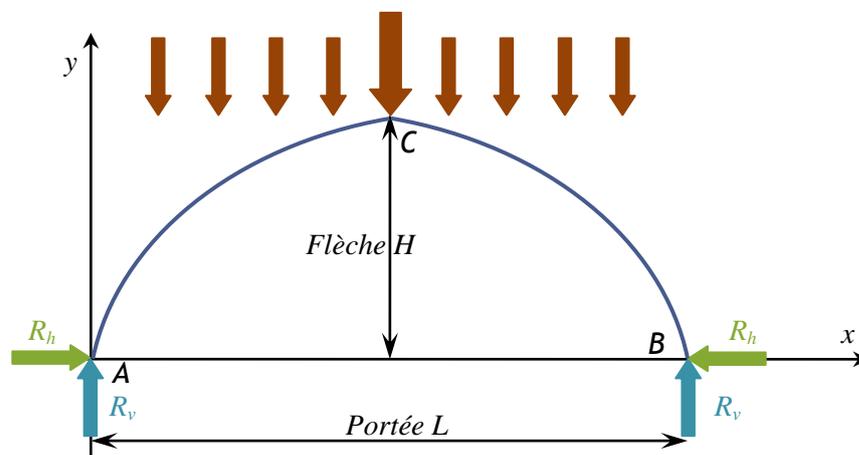


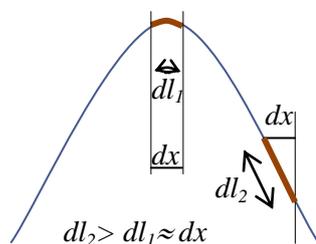
Figure 16: Passerelle Ravel au dessus de la N4, Gembloux, Belgique, image [7]



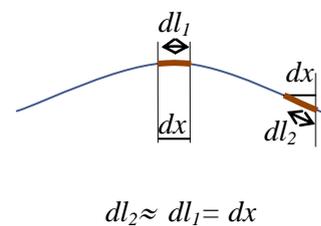
Figure 17 : La Sainte Chapelle, île de la Cité, Paris, Image [8]

2.4 - Chaînette

L'arc parabolique est donc le funiculaire d'une charge répartie. Il est fréquent que le chargement ne soit pas distribué 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 (figure 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 (figure 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 alors tendu, et la forme en chaînette se rapproche d'une fonction parabolique.



(a) Arc peu élancé (L/H faible)



(b) Arc très élancé (L/H grand)

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

3 - Notions sur la conception des arcs : dimensionnement et optimisation

3.1 - Pattes 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. Conséquence : l'effort normal est plus important où l'arc fait un angle important avec l'horizontal, donc aux bases de l'arc (figure 19). En effet, la projection horizontale de l'effort normal en toute section est constante et égale à la réaction d'appui R_n soit $qL^2/8H$ (chapitre 2.1). L'effort normal augmente de la clef vers les appuis en $qL^2/(8H\cos\theta)$.

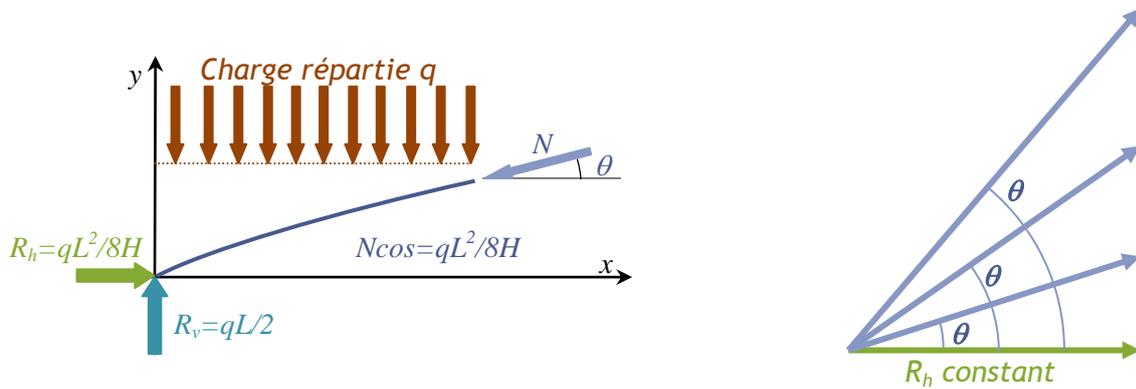


Figure 19 : Evolution de l'effort normal dans un arc en fonction de l'angle θ

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 « pattes d'éléphants » (figure 1) de certains arcs. 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 permet d'économiser de la matière dans la mesure où la sensibilité au flambement est nulle et que l'élanement (L/H) est petit (figure 20).

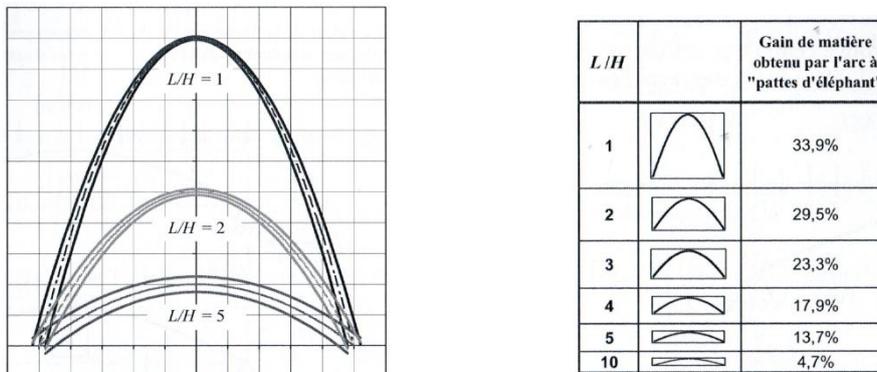


Figure 20 : Comparaison d'arcs à « pattes d'éléphant » de même portée, soumis au même chargement réparti mais d'élanements différents, le gain de matière peut avoisiner les 30%. Image [9]

3.2 - Elancement

L'élanement 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 élanement 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 l'expression liée à R_h plus haut). Son volume, qui détermine son poids propre, est :

$$V = S.l_{arc} \approx S.L = \frac{N}{\sigma}.L \quad \text{avec } N \rightarrow \infty$$

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

$$V = S.l_{arc} = \frac{N}{\sigma}.l_{arc} \quad \text{avec } l_{arc} \rightarrow \infty$$

Entre des deux cas, il est possible de déterminer un élanement optimisant le volume de l'arc, donc son poids propre et la quantité de matière ; néanmoins l'élanement 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'élanement optimal se situe vers 2,926 et pour les arcs à « pattes d'éléphant » il se situe vers 2,309. Ces valeurs sont à ajuster si l'arc est soumis au flambement (voir 3.3).

3.3 - Flambement

Les arcs étant des structures principalement soumises à une contrainte de compression, ils peuvent flamber dans leur plan et 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 :

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

Avec E , module d'élasticité du matériau utilisé, I , moment à la clef et γ paramètre qui dépend uniquement de l'élanement de l'arc L/H .

3.4 - Arcboutant

L'arcboutant 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 (figure 21). Les fondations des ponts, souvent massives aux appuis, permettent de reprendre cette poussée latérale (figure 22).

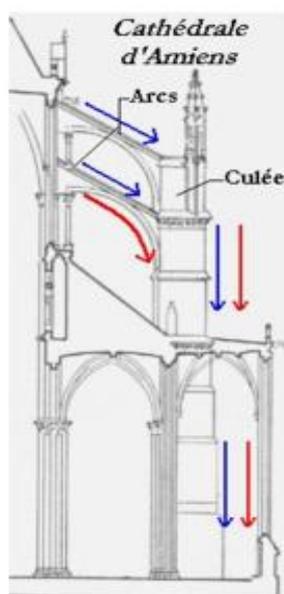


Figure 21 : Schématisation des efforts dans les arc-boutants de la cathédrale Notre Dame d'Amiens, image [10]



Figure 22 : Appui de l'arc du pont de Monéteau sur l'Yonne, image [11]

3.5 - 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.). La figure 23 illustre ce type d'étude sur la voûte plein cintre d'une chapelle.

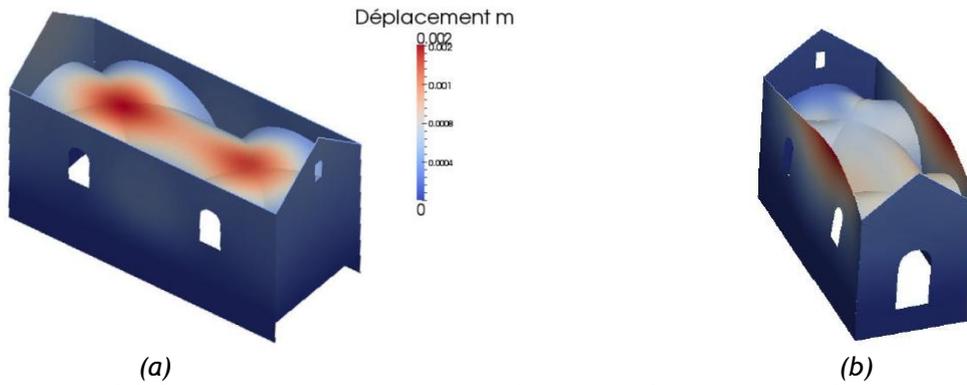


Figure 23 : (a) Déplacements verticaux sous poids propre, (b) premier mode propre de flexion, Image C. Limoge [12]

4 – 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.

4.1 - 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 (figure 24) mais on trouve aussi des installations plus complexes comme pour le pont Albert-Loupe (figure 25) pour lequel chacune des trois arches est successivement coulée sur le cintre mobile.



(a) Construction de la grande arche (portée 80m) à l'aide d'un cintre été 1916, image [13]



(b) Vue générale, image [14]

Figure 24 : Viaduc de la Roizonne dans l'Isère



Figure 25 : Pont Albert-Loupe, Plougastel-Daoulas, portée des arches 186m, images [15]

4.2 - Construction à l'aide de câbles

Les câbles permettent d'assurer la stabilité durant la construction d'arc de grandes dimensions. Les câbles ont un rôle structural, mais aussi pour certains fonctionnel, en servant à acheminer les matériaux de construction (figures 26 et 27).



Figure 26 : Viaduc de Garabit lors de sa construction en 1880 par G. Eiffel, image [16]

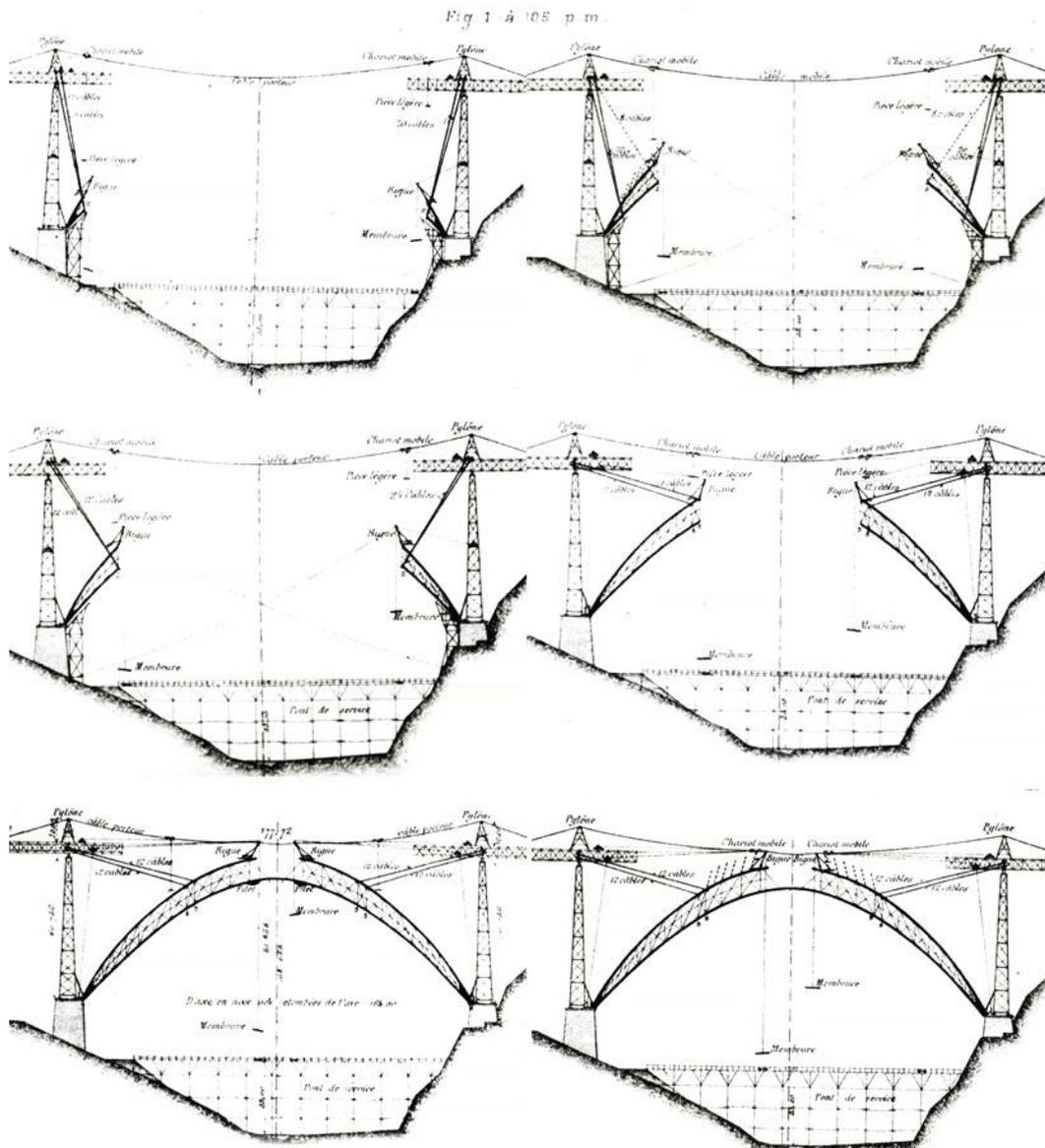


Figure 27 : Les étapes de la construction du Viaduc de Garabit, image [16]

4.3 - Construction à l'aide de structures complexes

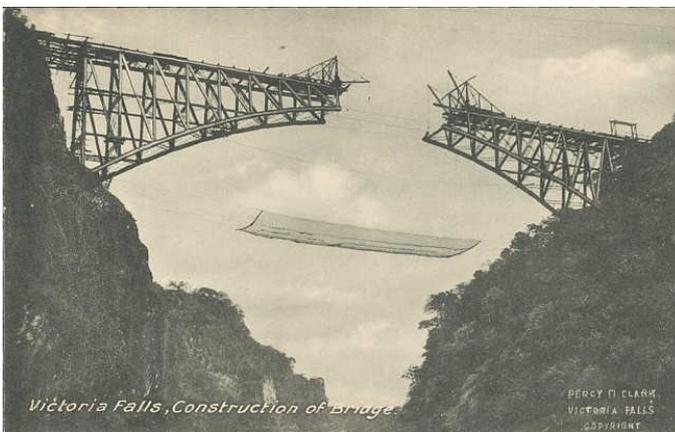
Pour la réalisation de l'arc de Saint Louis (figure 1) hors du commun par sa taille (192 m de hauteur), les équipes de construction ont tout d'abord monté chaque demi-arc séparément, en mettant en place une plate-forme de travail servant notamment à contrebalancer l'inclinaison des demi-arcs. Puis, à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



Figure 28 : L'arc de Saint Louis, Mississipi, lors de sa construction de 1963 à 65 ; images [17]

4.4 - 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 (figure 29) 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.



(a) Lors de sa construction, image [18]



(b) Vue générale, image [19]

Figure 29 : Pont des chutes Victoria sur le Zambèze

On trouve aussi des solutions de construction sans structure provisoire lorsque les ouvrages sont 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 (figure 30) puis assemblé à la plateforme de rive. Ces solutions de construction sont similaires pour les bâtiments dont la charpente en arcs est faite de bois lamellés-collés, qui sont déplacés par route puis assemblés sur site (figure 31 et 32).



Figure 30 : Pont Raymond Barre, Lyon, lors de sa construction en 2014, images [20]



Figure 31 : Transport de charpente en bois lamellé-collé, image [21]



Figure 32 : Montage par grue de la structure en lamellé-collé, portée 50m, image [22]

Inauguré en 1436, après seize années de construction, le dôme (figure 33) de la cathédrale Santa Maria del Fiore 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 coupôles superposées, l'espace interne abritant des marches ; son édification a été réalisée sans structure de soutien central. Pendant la construction, le dôme était auto-portant grâce à une disposition particulière des briques en spirale dite « spina pesche » ou arrête de poisson (figure 34).



Figure 33 : La cathédrale Santa Maria del Fiori, image [23]

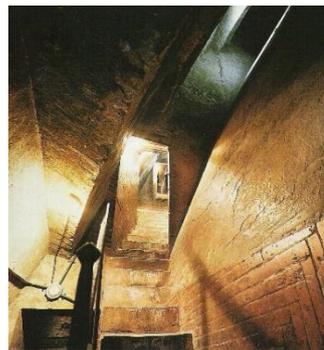
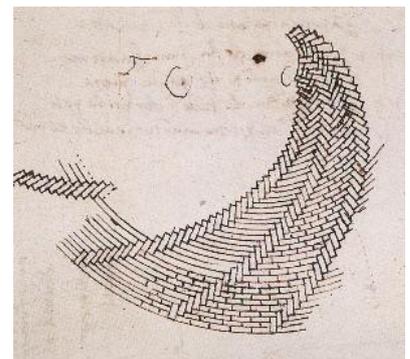


Figure 34 : L'escalier entre les deux coupôles du dôme et maçonnerie en « spina pesche », images [24]



5 – 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 cette ressource. L'arc est souvent un ouvrage de franchissement ; cependant sa capacité à reporter les efforts à ses extrémités permet d'autres utilisations, comme nous l'avons évoqué en élément de toiture (figures 32 et 33) ou encore la réalisation de barrages. Les barrages dit « barrages voûtes » (figure 35) sont souvent implantés dans des vallées étroites et aux parois suffisamment rigides pour reprendre les efforts en jeu.



Figure 35 : Barrage de Bort-Les-Orgues sur la Dordogne, image [25]

Références :

- [1]: https://fr.wikipedia.org/wiki/Gateway_Arch
- [2]: <http://www.bourgogneromane.com/edifices/vezelay.htm>
- [3]: <http://www.pontdugard.org/>
- [4]: <https://espritdepays.com/bonus/glossaire-architecture-religieuse>
- [5]: <http://www.tourismebretagne.com>
- [6]: <http://sydney-harbour-bridge.bostes.nsw.edu.au/>
- [7]: <http://www.degraeve.be/nos-metiers/genie-civil.htm>
- [8]: <http://www.forbes.com>
- [9]: Calculer une structure, de la théorie à l'exemple, Pierre Latteur, Academia Bruylant
- [10]: <http://espe-patrimoine.eklablog.com/>
- [11]: <https://structurae.info>
- [12]: Méthode de diagnostic à grande échelle de la vulnérabilité sismique des monuments historiques : Chapelles et églises baroques des hautes vallées de Savoie, thèse de Claire Limoge, Laboratoire de Mécanique et Technologie de l'ENS Cachan (2016)
- [13]: <http://geologie-patrimoine-matheysine.fr/>
- [14]: <http://stephanerevel.free.fr>
- [15]: <http://efreyssinet-association.com>
- [16]: <http://www.garabit-viaduc-eiffel.com>
- [17]: <http://www.arch2o.com/>
- [18]: <http://www.timbresponts.fr>
- [19]: <http://www.helicopassion.com>
- [20]: <http://projets-architecte-urbanisme.fr>
- [21]: <http://www.james.fr>
- [22]: <http://www.charpentes-fourmier.fr>
- [23]: <http://www.toscane-toscana.org>
- [24]: <http://www.solidariteetprogres.org>
- [25]: <https://www.edf.fr>

Ressource publiée sur EDUSCOL-STI : <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/>