

# Charpente de sécurisation des arcs-boutants et des voûtes

*PDG de l'entreprise SAS-Le Bras Frères.*

*Spécialiste de la restauration de monuments historiques, en règle générale sur les différents corps d'états.*

Ce chapitre présente les travaux d'étaie<sup>1</sup> des arcs-boutants<sup>2</sup> qui ont été réalisés par l'entreprise Le Bras Frères sur la cathédrale, mais également les cintres<sup>3</sup> qui ont permis d'étayer des voûtes du vaisseau de la nef. L'intervention de sécurisation

---

1. Action de poser des éléments de soutien ou de renfort sur un ouvrage pour supporter des charges et éviter un affaissement.

2. Pilier qui se termine en demi-cercle qui permet de soutenir un mur ou une voûte de l'extérieur.

3. Éléments de construction provisoire en charpente en forme de demi-cercle permettant de soutenir une voûte le temps de sa construction.

de la cathédrale a démarré dès le 16 avril au matin. Les premiers travaux ont consisté à sécuriser le pignon nord et le pignon sud du transept, ainsi que la dépose des statues. Dans les jours qui ont suivi, la volonté a été de très rapidement mettre hors d'eau la cathédrale par des systèmes de poutraison<sup>4</sup>, de bâchage et de faire un premier état des lieux sur l'échafaudage incendié. Cela consistait notamment à le sécuriser, remettre en place plus de deux cents

---

4. Ensemble de poutres, ou bien de poutrelles, d'un plancher de bâtiment ou d'une charpente.

vérins<sup>5</sup>, et de le renforcer avant de pouvoir modéliser la structure qui permettrait d'appréhender par la suite le processus de dépose. Au bout de trois jours, il y avait près de trois cents compagnons sur le site, tous corps d'état confondus (maître verrier, tailleur de pierre, restaurateur, archéologue) : autrement dit, une véritable fourmilière géante. Il faut savoir que les personnes travaillant dans le monument historique sont des « compagnons », présents chaque jour au chevet de la cathédrale, et qui se lèvent, non pas pour aller chercher un salaire, mais pour vivre de leur passion. Alors quand ils se retrouvent confrontés à la lourde tâche de sécuriser la cathédrale Notre-Dame de Paris, ils ne vivent pas un chantier, mais une véritable mission, décuplant l'énergie mise en œuvre.

### 1 Étalement par mise sous cintres des arcs-boutants

Les architectes avaient demandé, au vu des premiers diagnostics réalisés sur les voûtes, dont plusieurs étaient effondrées ou très fragilisées (cf. chapitre de messieurs Fromont et Prunet), que les poussées des voûtes ne soient plus contrecarrées par les arcs-boutants. Il fallait mettre en place un système pour équilibrer l'ensemble dans le cas où des voûtes complémentaires s'effondreraient,

5. Tube cylindrique dans lequel une pièce mobile, appelée piston, sépare le volume du cylindre en deux chambres isolées l'une de l'autre. Il a pour but de produire un mouvement mécanique.

notamment avec l'assèchement des joints, source d'inquiétude importante. Il a donc fallu réfléchir très rapidement à mettre en place une méthodologie de sécurisation de ces voûtes, d'où la pose des cintres. L'idée était que ces cintres puissent reprendre les efforts, mais qu'ils puissent également être un support pour les travaux de restauration et permettre de supporter la poussée des arcs-boutants. Dès le mois d'avril 2019, l'architecte en chef et la DRAC<sup>6</sup> à l'époque, ont voulu que les travaux de sécurisation soient, d'une part, pertinents pour sécuriser la cathédrale, mais aussi d'autre part, qu'ils soient déjà pensés de manière rationnelle et adaptés aux travaux de restauration qui allaient intervenir dans le futur.

Les vingt-huit arcs-boutants ont été entièrement mis sous cintres. La première des tâches pour réaliser cette mise sous cintre a été de faire un relevé précis. En l'occurrence, nous avons scanné complètement la cathédrale pour obtenir un nuage de points très précis, pour pouvoir développer les ortho-images comme nous le voyons ici et ainsi modéliser les cintres des arcs-boutants (*figure 1*). Rappelons qu'il y a vingt-huit cintres, et que chacun est unique. Nous avons l'impression qu'il y a une certaine symétrie, une certaine régularité dans l'architecture de la cathédrale, mais la réalité est tout autre : il y a presque un mètre d'écart entre les cintres les plus divergents. En l'occurrence, comme

6. Direction Régionale des Affaires Culturelles.

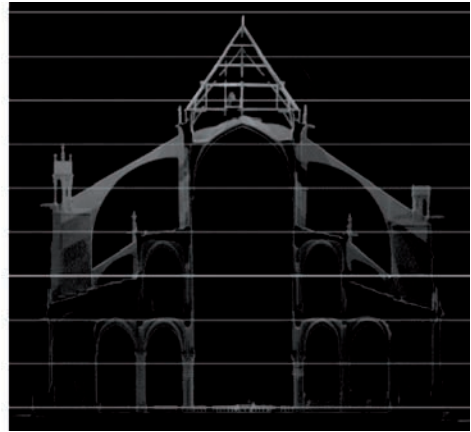
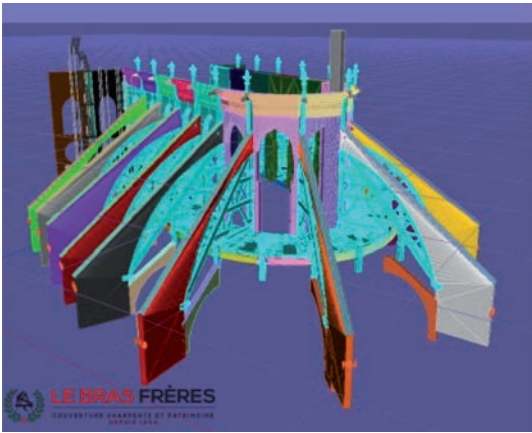


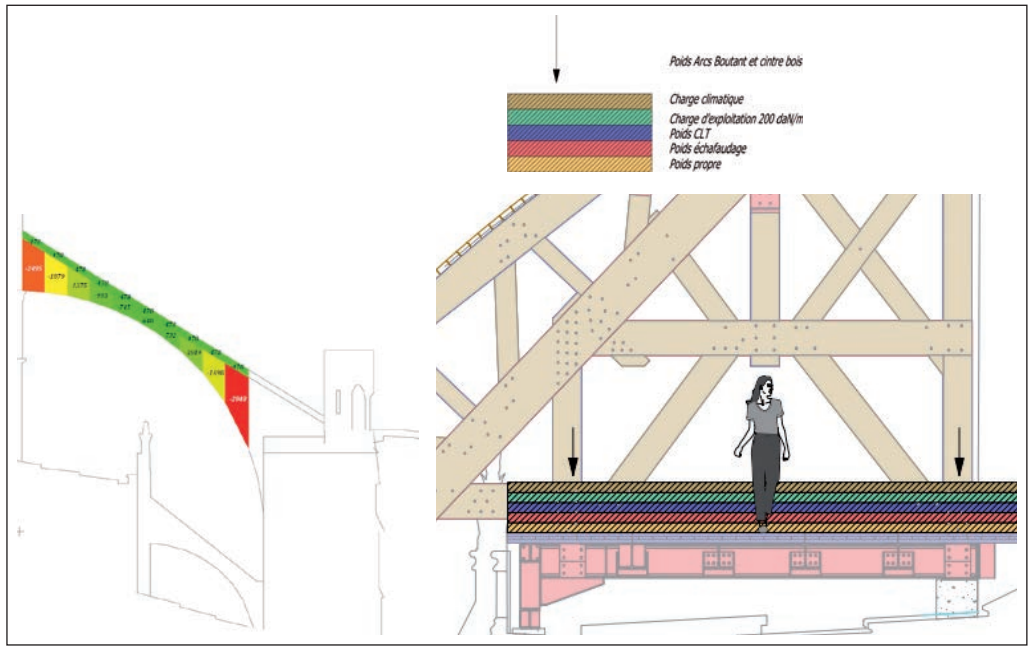
Figure 1

Nuage de points réalisé après un scan précis de la cathédrale (gauche) et ortho-image créée à partir de ce nuage de points (droite).

ces cintres doivent s'insérer avec un jeu de huit centimètres sous les arcs-boutants, il faut adapter à chaque fois le dessin, le modèle, pour l'incorporer parfaitement à l'architecture de la cathédrale. Le travail que Le Bras Frères a effectué, est un travail collaboratif avec l'ensemble des intervenants sur le chantier. En plus des architectes, le bureau d'études Bestrema nous a donné les caractéristiques mécaniques à prendre en compte dans la conception et dans le calcul de nos cintres, notamment les efforts à reprendre : que ce soient les efforts des structures en pierre de la cathédrale, les efforts pour le cintre lui-même mais aussi les échafaudages qu'il allait recevoir par la suite (**figure 2**). La **figure 3** montre le positionnement des cintres : la première contrainte était de ne pouvoir prendre que trois points d'appui sur les parties structurellement fortes de la cathédrale.

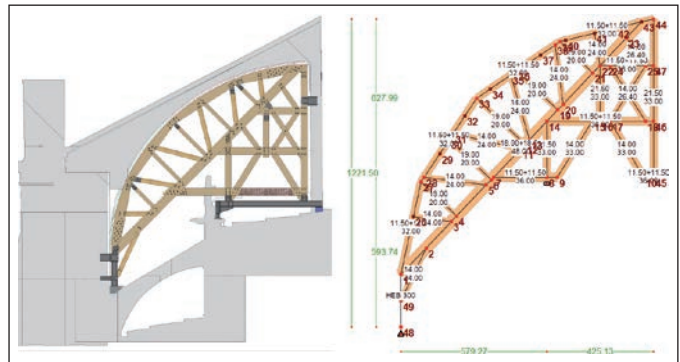
L'autre contrainte était que ces cintres devaient permettre un passage linéaire sur toutes les galeries et prendre en compte des efforts de résistance au vent qui seraient ramenés par les échafaudages ultérieurement posés. Dès le mois d'avril, tout était envisagé pour prendre en compte tout ce qui pourrait arriver dans les quatre ans à venir, et ne pas avoir d'adaptation complémentaire, dans un souci de gain de temps et de rationalisation des dépenses.

Pour pallier le degré d'urgence, il a fallu concevoir un système de mise en place innovant, contrairement à ce qui peut se faire d'habitude sur des projets de restauration où l'on étaye un ou deux arcs-boutants. Par conséquent, il a donc été nécessaire de réfléchir à une pré-construction en atelier. Les cintres sont arrivés assemblés en deux parties (**figure 4**) : les éléments de la partie de cintre appelée la demi-ferme ont été

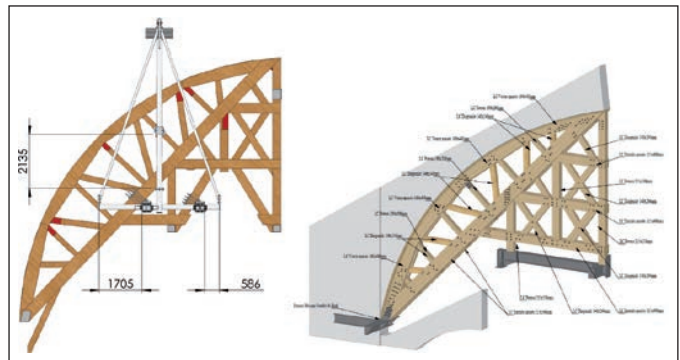


**Figure 2**  
Schémas de conception des cintres par le bureau d'études Bestrema : modélisation des efforts à prévoir.

**Figure 3**  
Schémas des cintres des arcs-boutants.



**Figure 4**  
Schémas de l'étude du levage des cintres des arcs-boutants.



assemblés sur sites et levés en une seule pièce. Pour ce faire, il a fallu concevoir un outil, appelé palonnier, construit spécifiquement pour le levage de ces cintres et incluant des dispositifs de fixation réglables (*figure 4*). Parce que – comme nous l’avons expliqué précédemment – nous traitons des cintres tous différents et dont le centre de gravité est aussi à chaque fois différent, nous avons prévu un jeu de réglage qui permette de lever le cintre, mais de manière parfaitement équilibrée : deux millimètres de décalage peuvent entraîner huit centimètres de faux équilibre sur la structure. Ces éléments mesurant seize mètres de long et pesant huit tonnes, cela donne une idée des difficultés à résoudre !

Venons-en à la fabrication de ces éléments. Habituellement, pour les monuments historiques où l’on taille les charpentes à la main, on restaure dans le souci de conservation du maximum d’éléments anciens. Or sur ce chantier, nous sommes plutôt dans une démarche neuve, en l’occurrence de taille numérique.

Les éléments ont donc été pré-assemblés en ateliers, l’ensemble des ferrures étant découpé de manière automatisée. On voit le levage du premier cintre sur la *figure 5* ainsi que les structures métalliques sur lesquelles vont reposer les cintres, avec les socles d’appui aux différents endroits qui nous ont été autorisés (*figure 6*). Le palonnier qui permet de lever les cintres et de les insérer est présenté sur la *figure 7*. Il faut faire preuve d’une extrême précision et d’une extrême précaution, parce que l’on intervient sur un monument fragilisé ; il ne s’agit pas de confondre urgence et précipitation. Sur la *figure 8*, on voit la liaison entre le cintre et l’arc-boutant qui se fait par deux éléments : nous avons un résilient et des couchis. Les couchis sont des petites lamelles de bois qui viennent faire la jonction. Le résilient lui, nous permet de faire l’interface entre le bois et la pierre afin de créer une tolérance sur le degré d’hygrométrie<sup>7</sup> que peuvent supporter ces

7. Mesure du degré d’humidité présent dans l’air.



Figure 5

Levage du premier cintre des arcs-boutants.



Figure 6

Structures métalliques sur lesquelles vont reposer les cintres.

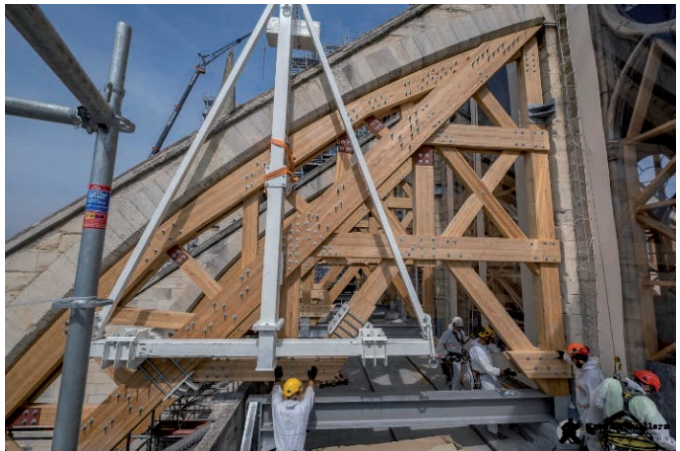


Figure 7

Palonnier permettant le levage des cintres.

couchis, et donc aux volumes différents qu'ils peuvent subir. Une fois les cintres posés, on ajoute une structure métallique sur laquelle est posé un plancher en lamellé croisé

(figure 9). C'est un plancher de circulation et de travail qui va permettre aussi la pose des échafaudages le long des murs gouttereaux pour restaurer les grands combles.



Figure 8

Liaison entre le cintre et l'arc-boutant.



Figure 9

Plancher en CLT (lamellé-croisé).

## 2 Étaieage par mise sous cintres des arcs de voûtes et des voûtains

Une fois les cintres posés sur les arcs-boutants, un travail colossal a été réalisé en collaboration avec les cordistes de démontage de l'échafaudage incendié. Dès que l'échafaudage incendié a pu être sécurisé et démonté, il a fallu intervenir sur la sécurisation des voûtes, donc

à l'intérieur de la cathédrale, en adoptant à peu près le même principe que pour les arcs-boutants, à la différence près que là, il n'y a pas de moyen de grutage par le dessus. Il faut donc pouvoir amener des éléments préfabriqués et les disposer sous les voûtes.

Le même protocole a été appliqué : relevé et scan 3D de l'ensemble des structures (figure 10), mise en place d'un

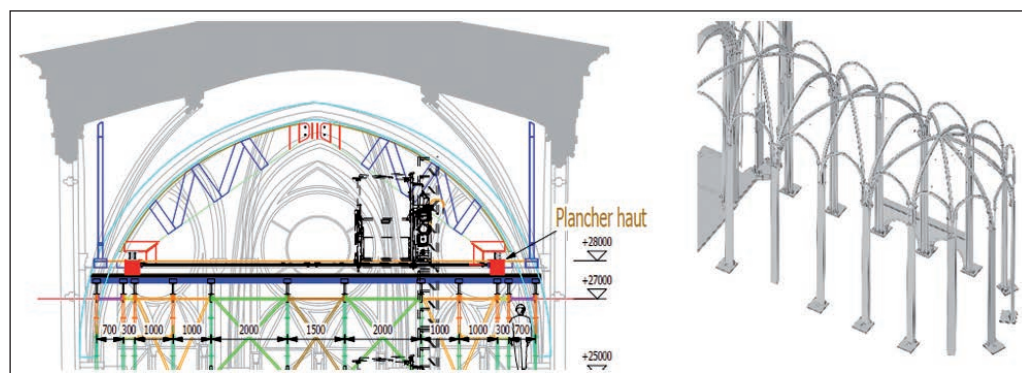


Figure 10

Relevé et scan 3D de l'intérieur de la cathédrale.

platelage d'échafaudage<sup>8</sup>, autrement dit, tout un système d'étalement sur toute la hauteur de la cathédrale. Actuellement, l'intérieur de la cathédrale est rempli d'échafaudages avec un platelage en partie haute qui permet de supporter les cintres. On voit sur la **figure 11**, que la structure est conçue à partir de la structure primaire qui vient vraiment sous les arcs, et d'une structure secondaire qui vient étayer les voûtes. Les cintres sont amenés assemblés, ils sont positionnés sur des ferrures déjà mises en place (**figure 12**), des systèmes métalliques de réglages sont installés (**figure 13**), et un système de vérin hydraulique permet justement de lever les structures en sous-œuvre (**figure 14**). Ce système de levage est très important et très sensible, il nous permet d'être extrêmement précis et ainsi de ne pas risquer d'endommager les voûtes, très nettement fragilisées. Ce travail est réalisé de part et d'autre. Nous venons alors serrer une ferrure métallique qui sert de

clé de voûte (**figure 15**) ; ensuite, nous mettons en place un tirant<sup>9</sup> pour équilibrer l'ensemble de la structure (**figure 16**). Nous reproduisons ce travail sur l'ensemble des arcs. Une fois les tirants installés, parfaitement équilibrés, nous pouvons alors nous passer des étalements et installer la structure secondaire (**figure 17**).

Quelques chiffres donnent un ordre de grandeur de l'ampleur des travaux réalisés. Vingt-huit cintres, deux cent trente mètres de cubes de bois pour la partie cintre des arcs-boutants, deux cents mètres cubes pour les cintres des voûtes. Au total, entre la sécurisation des pignons, les planchers au-dessus des murs gouttereaux de la nef, les planchers en partie basse et les différents étalements qui ont été réalisés, c'est près de mille cinq cents mètres cubes d'étalement qui ont été réalisés sur la cathédrale depuis le début des travaux, commencés dès le 16 avril sur le pignon nord.

8. Ensemble de planchers juxtaposés les uns à côtés des autres permettant de créer une surface plane pour les travaux de charpente ou de toiture.

9. Membrane qui reprend des efforts de traction entre deux poussées divergentes, et évite le déversement d'un mur ou encore l'écartement des pièces de charpente.

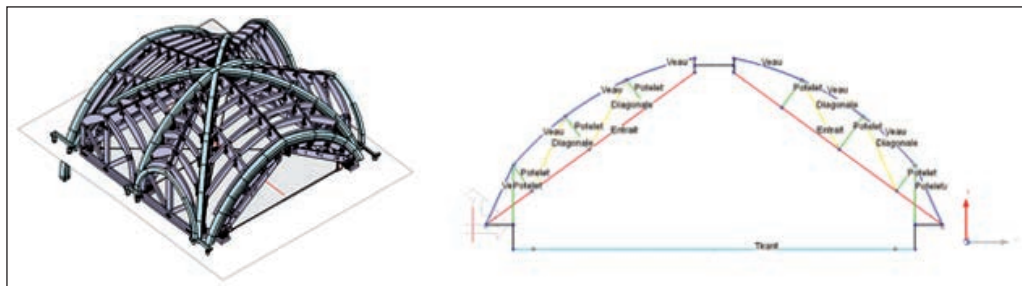


Figure 11

Schémas des deux structures (primaire et secondaire).



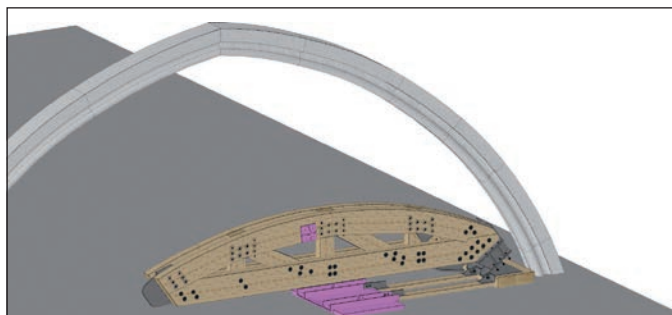


Figure 13

Installation des systèmes métalliques de réglage.

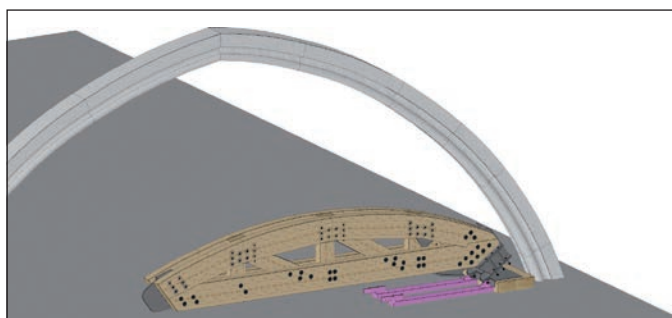


Figure 12

Cintre positionné sur des ferrures après assemblage.

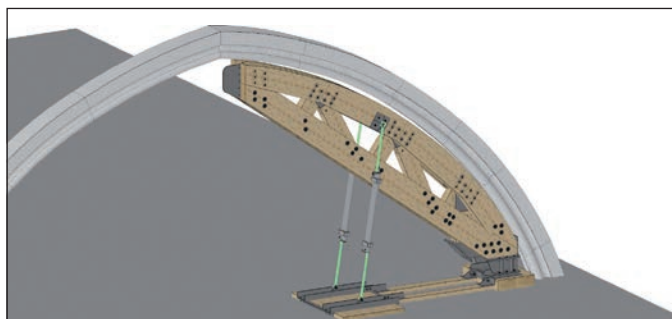


Figure 14

Vérin hydraulique permettant le levage du cintre en sous-œuvre.

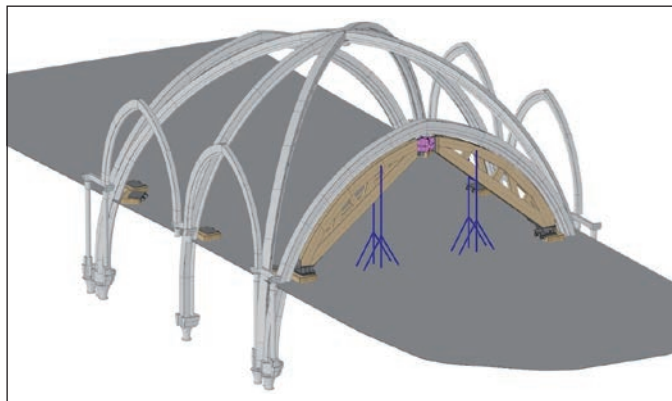


Figure 15

Serrage de la clé métallique (clé de voûte).

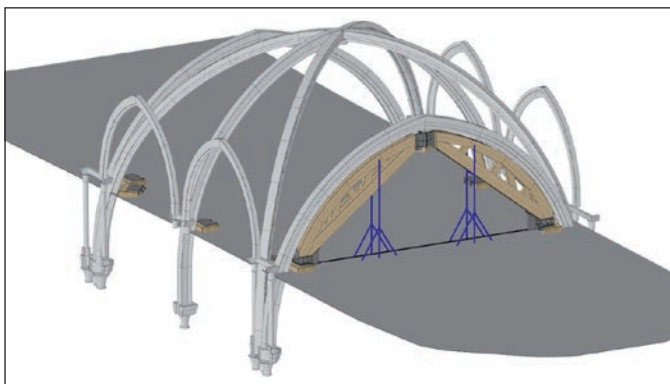


Figure 16

Mise en place d'un tirant permettant d'équilibrer la structure.



Figure 17

Pose de la structure secondaire.