CARNET

‘Résille Gothique’
Toiture de Notre-Dame de Paris

Master 2 « Architecture Bois Construction » - 2020-2021

Benjamin Brisciani
Ingénieur
ENSTIB Epinal

Joseph Carray
Génie civil
Université de Grenoble

Paul Corre
Architecte
ENSA Nancy

Francine Ouriques
Architecte
ENSA Grenoble

Pauline Rivière
Architecte
UCL/LOCI Tournai

SOMMAIRE

INTENTIONS 3
Patrimoine 3
Formes 4
Résille Gothique 5

CHARPENTE 9
Composition - Plans et élévations 9
Elements de charpente 12
Composition - assemblages 13

NOTICE TECHNIQUE 17
I. Quantitatif 17
II. Chargement 18
III. Vérifications 19
IV. Conclusion sur les études techniques 23

MISE EN ŒUVRE 24
Sécurité incendie 24
Fabrication et chantier 26

COUVERTURE 28
Paysage et production 28
Matière - plomb x ardoise 29
Ardoise et rencontres 30

CONCLUSION 31
Remerciements 31
Références bibliographiques 31

Intentions

Patrimoine

L'enjeu étant de constituer une réponse architecturale et structurelle en adéquation avec le choix fait par le gouvernement et la commission d'experts sur la reconstruction de Notre-Dame de Paris de restaurer la cathédrale et sa flèche « à l'identique » pour honorer le travail extraordinaire de Viollet-le-Duc et valoriser le savoir-faire des artisans français, il a ici fallu définir une certaine position patrimoniale pour ce projet.

Le parti pris s'articule donc autour de deux intentions complémentaires : une démarche historique de restitution à l'identique de la précieuse flèche du XIXème siècle de Viollet-le-Duc pour reconstituer la silhouette connue de tous de Notre Dame ainsi qu'une intervention originale contemporaine avec la création d'une résille en bois pour remplacer la charpente qui soutenait le reste de la toiture de la cathédrale depuis l'époque médiévale afin de mettre en lumière le savoir-faire français de la construction en bois d'aujourd'hui.

Le gouvernement s'étant déclaré pour « une alliance de la tradition et de la modernité, une audace respectueuse », cette position a pour intention de faire du drame de l'incendie de Notre Dame une riche opportunité de reconstituer le patrimoine de la cathédrale tout en poursuivant d'écrire son histoire future.

Dans l'intention de faire de cette nouvelle toiture un nouveau trésor à léguer aux générations futures, le projet cherche à libérer totalement l'espace sous-toiture pour laisser la possibilité, à l'avenir, que la charpente de Notre-Dame puisse plus tard être découverte et visitée par le grand public pour raconter cette nouvelle partie de son histoire.

De même, pour répondre aux enjeux posés par les dégâts de l'incendie comme celui de la fragilisation des maçonneries qui supportaient l'ancienne charpente, le projet cherche une forme originale qui optimise aussi son poids en bois et qui se redirige verticalement vers les corbeaux de la cathédrale avec peu de poussées horizontales.

Nous avons donc cherché à nous inspirer de l'audacité esthétique et constructive de l'architecture gothique de la Cathédrale de Notre Dame pour apporter une réponse innovante.

Fig.1 Flèche de Notre-Dame de Paris - 1861. Charles Marville

Fig.2 Charpente de Notre-Dame de Paris. Pascal Lamaitre

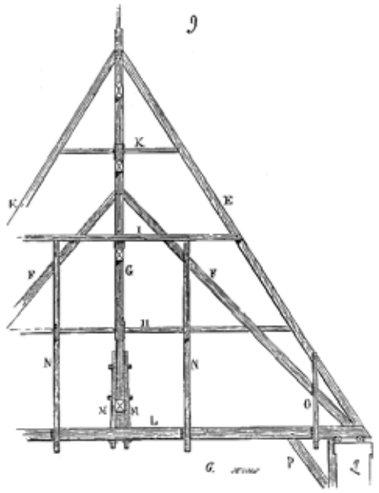


Fig.3 Élévation de la ferme-maîtresse de la charpente et élévation et plans de la flèche de Notre-Dame de Paris - Viollet-le-Duc - Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle, 1854-1868 - BNF et 1866 - BNF

Formes

Cette structure optimisée qui peut libérer un sous-espace total peut alors être celui de la « maille » ou de la « résille » en bois-court rappelant celles conçues par Philibert Delorme au XVIème siècle et mise en œuvre par Vauban au XIXème siècle. Dans son « Dictionnaire raisonné de l'architecture française» (1854-1868), Viollet-le-Duc estimait d'ailleurs déjà les résilles de Philibert Delorme comme « incontestablement supérieures ».

Au début du XXème siècle, un ingénieur allemand appelé Friedriech Zollinger inspiré par ces structures a donné son nom a son nouveau système de résilles légères en bois-court pouvant recréer de grandes voûtes en ogives en bois massif.

Cherchant à faire écho à l'esthétique, l'architecture et l'imaginaire gothique comme le dessin fin et léger des vitraux de la cathédrale, ses grands arcs en ogives ou encore les formes qu'évoquent le filet de pêche de la scène de la *pêche miraculeuse*, nous avons alors décidé de développer notre projet autour de cette forme de résille de bois massif en voûte d'ogive.

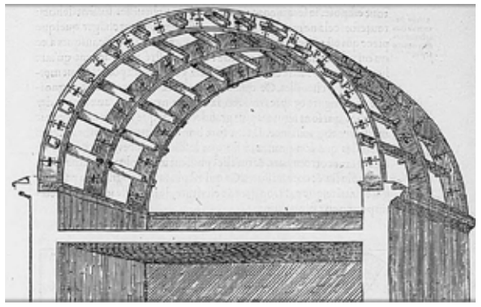


Fig.4 Charpente Résille Lamellée-Clouée. Philibert Delorme, XVIème siècle. Fonds Gallica

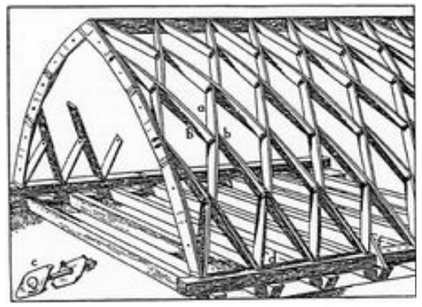


Fig.5 Charpente Résille Zollinger. Friedrich Zollinger, début XXème siècle Fonds Gallica

Fig.6 Caserne Rochambeau Mont-Dauphin, France. Vauban, XIXème siècle.

Fig.7 Ferme Garkau, Lubeck, Allemagne. Hugo Haring, 1923.

Fig.8 La Pêche Miraculeuse, Xème siècle. Codex Egberti. Archevêque Trèves Egbert

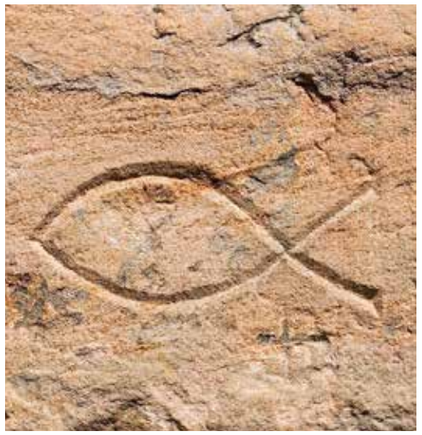


Fig.9 Ichtus, poisson gravé dans une grotte. Ier siècle.

Résille Gothique

«En 1921, Zollinger, architecte de Mersbourg en Saxe, édifie la coupole de la salle des fêtes de Coblence à l'aide de pièces droites identiques mesurant entre 1,5 et 2,5 mètres de long, montées en losanges et découpées dans la partie supérieure en forme d'arc de cercle en bois pour une portée inférieure à 30 mètres.

Présentée à Strasbourg en 1927 et l'année d'après à Nancy, la toiture «en lamelles» est un cylindre parabolique. Pour composer cette charpente, il faut un «assemblage rigoureux des pièces» et un ajustement de calculs précis. La charpente Zollinger ou en lamelles doit-être très précise au niveau des assemblages pour assurer la stabilité de la forme.»[1]

La charpente Zollinger, en «lamelles» ou aussi appelée «nid d'abeille» permet la réalisation de toitures courbes sans structure intermédiaire. La structure qui garde un angle constant entres les pièces taillées régulièrement forme un ensemble léger et autoportant.

Ces pièces pré-coupées sont souvent assemblées par des boulons ou des plaques métalliques.

Ce système constructif de charpente a été très utilisé dans la période d'entre deux-guerres, surtout en Allemagne où il y avait un manque de métal pour la construction civile. Aujourd'hui, plusieurs de ces projets sont vieux d'une centaine d'années et sont pour la plus grande partie encore en très bon état.

Le système de toiture en lamelles ressemble aux membranes verticales que l'on peut voir quand on regarde la partie inférieure d'un champignon ou alors la coquille d'un mollusque. Ces pièces légères créent une membrane qui protège ou supporte l'animal ou la plante.

Dans le système de charpente Zollinger, les pièces de bois sont appelées des lamelles et ce sont elles qui vont former l'ensemble de la «coque» pour tenir la toiture.

[1] L'industrialisation du logement en France(1885 - 1970) : De la construction légère et démontable à la construction lourde et architecturale, Architecture, Aménagement de l'espace. Conservatoire des arts et métiers - CNAM, Kinda FARES, 2012. P. 113 - 114

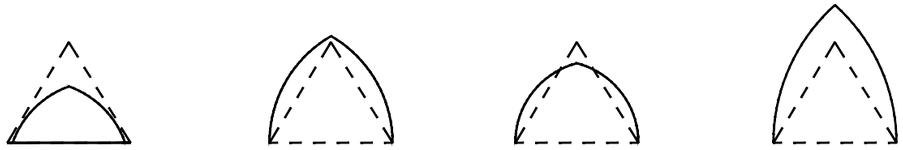


Fig.10 Différentes possibilités d'arcs ogivaux

Fig.11 Possibilités de profil sous la forme de la charpente

Fig.12 Lamelles du champignon.

Frank Rücket

Fig.13 Lamelles du coquillage Nautilus. - indulgy.com

by Lupe

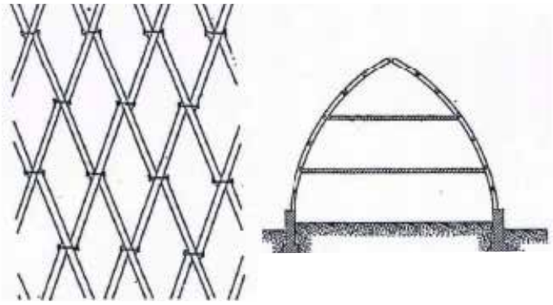


Fig.14 Habitation entièrement en lamelles. - Kinda Fares

Fig.15 Structure lamelle.

partiallyobctified.blogspot.com

Le projet donne donc à voir dans un premier temps sur la croisée du transept une nouvelle flèche conforme à celle réalisée par Viollet-le-Duc dont nous avons des relevés et une nombreuse iconographie pour la rebâtir au plus près de ce qu'elle fut, du moins en apparence, du XIXème à nos jours afin de retrouver la silhouette de la cathédrale telle que le monde entier la connaissait.

Dans un second temps, le projet complète la toiture de Notre Dame en remplaçant l'ancienne charpente médiévale aujourd'hui disparue, par une résille en chêne massif tout à fait différente.

En s'inscrivant dans la silhouette originale des deux pans de l'ancienne toiture, la résille s'élève alors avec deux voiles esquissant l'arc en ogive et liés par une longue poutre treillis servant de clé de voûte.

Des arbalétriers chevrons viennent alors reconstituer les deux pans de la toiture en se posant tel un second voile sur l'arc grâce à une série de bracons qui redistribuent les charge de toiture vers la résille.

En dessous, une nouvelle passerelle vient s'accrocher en console sur les murs existants en contrebalançant alors les possibles poussées horizontales sur la maçonnerie de la cathédrale.

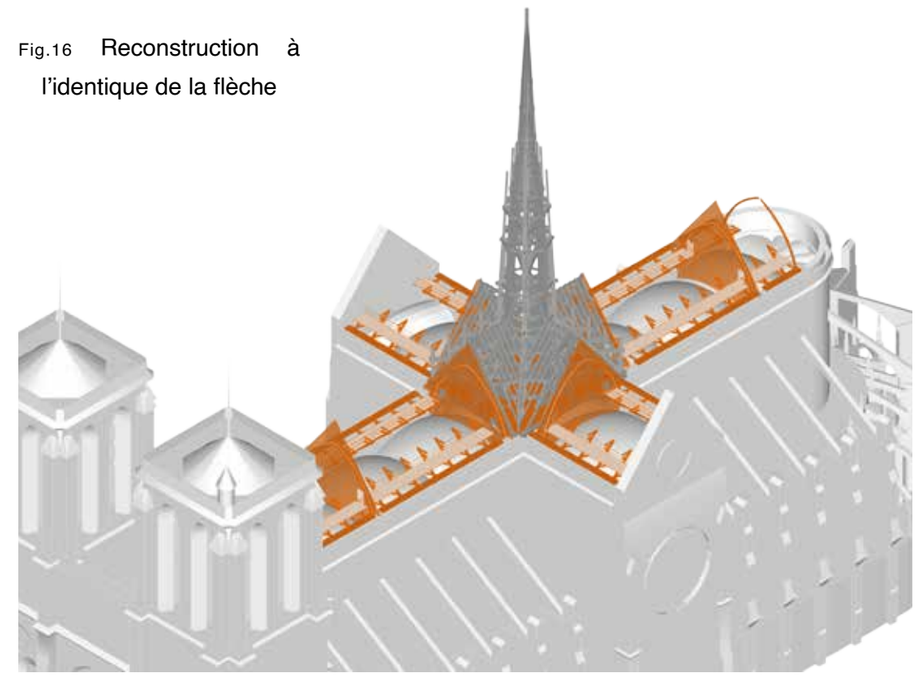


Fig.16 Reconstruction à l'identique de la flèche

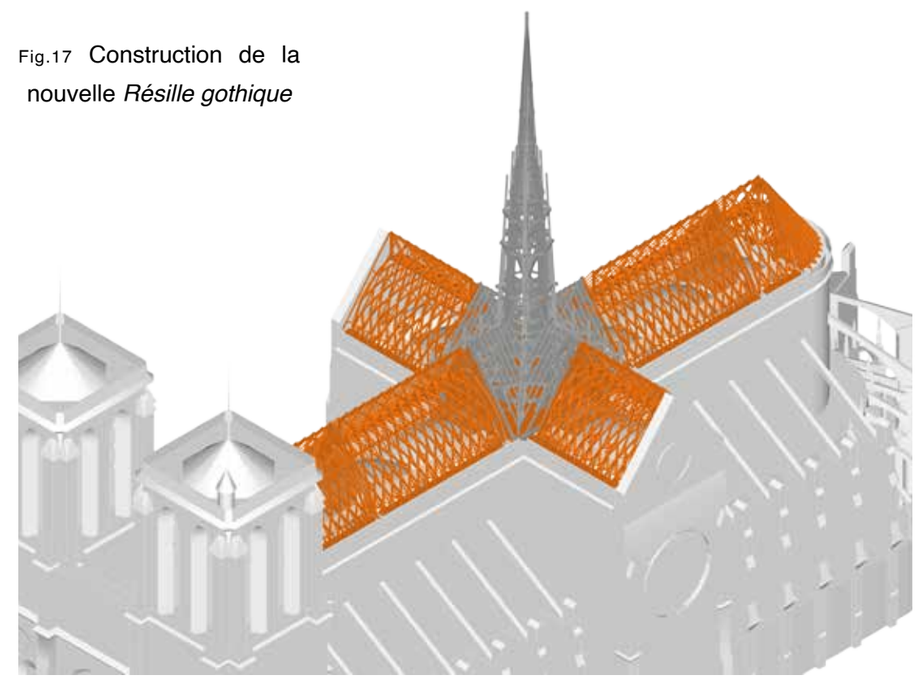


Fig.17 Construction de la nouvelle *Résille gothique*

Comment apporter un profil de voûte gothique et conserver la forme rectiligne de la toiture existante?

Nous avons répondu à cette problématique en nous inspirant de la charpente de Philibert de l'Orme à l'aide d'une double charpente composée d'une première couche principalement structurelle en voûte et d'une seconde couche qui reprend la forme d'origine de la toiture de Notre-Dame.

Dans un premier temps, nous proposons d'installer une lisse basse et une longrine comme support de notre charpente: l'une sur la maçonnerie existante et l'autre sur les corbeaux. Ces pièces font la transition entre l'ensemble de la charpente et la maçonnerie. Ce système permet de créer un «cadre» répartissant les efforts de la toiture sur l'ensemble de la maçonnerie et non sur des points d'appuis précis de la maçonnerie fragilisée.

Dans un second temps, les arcs d'ogive composés de bois d'environ 1,65m de long sont assemblés pour former la grande ogive sur lesquels viendront s'appuyer la «résille» zollinger. Ces arcs sont présents au début et à la fin de chaque module(d'environ 20 mètres), ils aident à assurer la stabilité de l'ensemble en plus de créer un espace pour accueillir les murs coupe-feu.

Entre ces arcs, une maille Zollinger viendra faire le contreventement et récupérer les charges de la toiture et les transmettre à la longrine sur les corbeaux. Une poutre treillis fera office de clef de voûte.

Ensuite des arbalétriers viendront se poser sur la résille zollinger. La liaison entre les arbalétriers et la charpente zollinger se ferra par des bracons et la poutre treillis. Ce sont les arbalétriers qui récupèrent la forme de l'ancienne toiture de Notre Dame. Ils font office de couche secondaire.

Enfin les arbalétriers supporteront un voligeage en sapin sur lesquels viendront s'appuyer la couverture en tuiles d'ardoise.

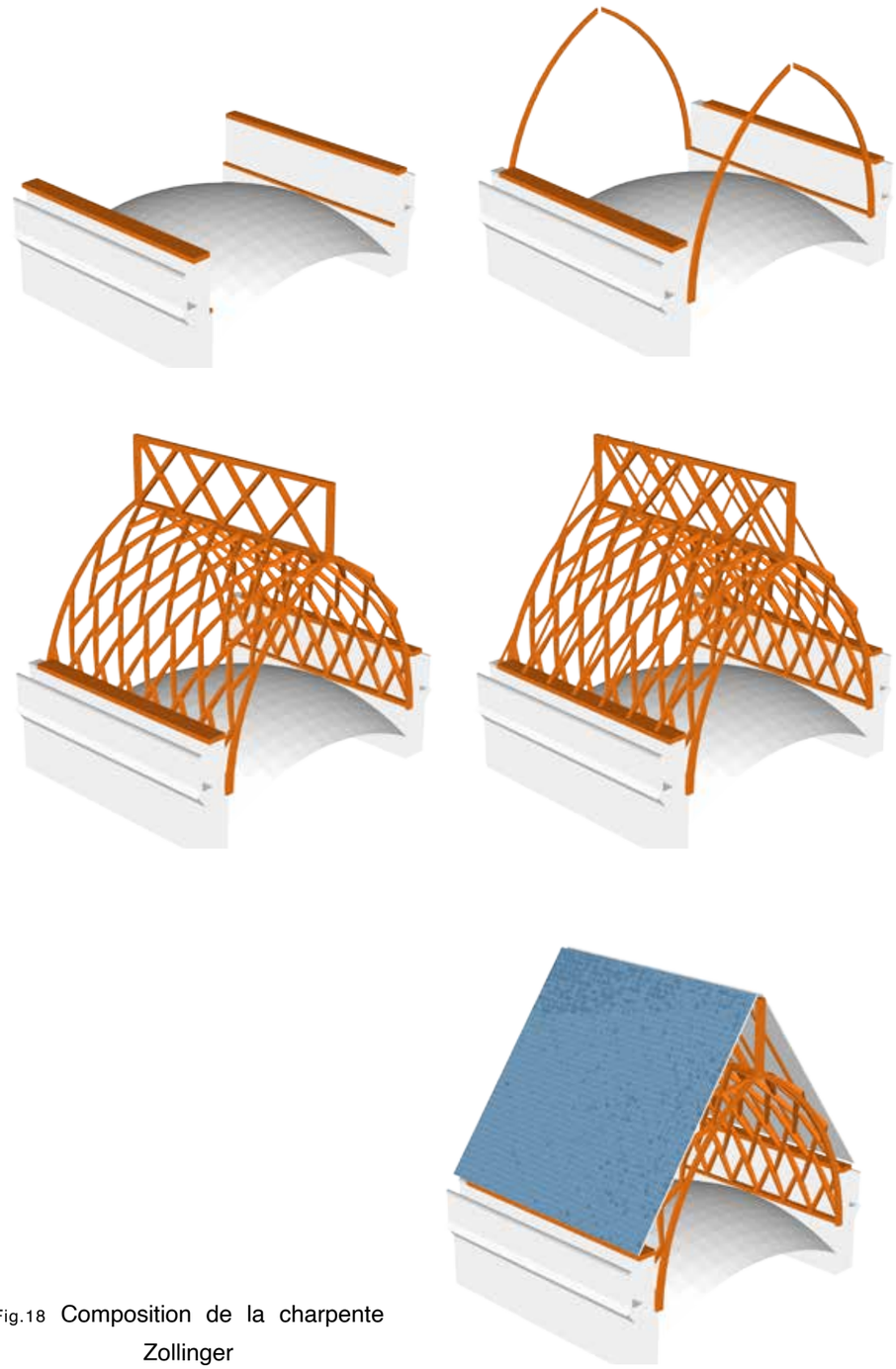


Fig.18 Composition de la charpente Zollinger

Nous avons décomposé les différents éléments du projet pour permettre une mise en œuvre optimale de la charpente sur le site. D'autant plus, cela nous permet une meilleure compréhension de notre proposition et de solutionner l'assemblage de la charpente à l'ensemble de la maçonnerie des différents espaces entre la nef, le chœur, le transept, l'abside et la croisée du transept.

A partir de la maçonnerie de la Cathédral nous viendrons poser les différents éléments qui composent la charpente.

La flèche du XIXème siècle de Viollet-Le-Duc est reconstruite à l'identique.

Une double passerelle viendra se déplier sur toute la toiture. Elle permettra la liaison entre les différents espaces et l'accès au combles. Elles se lieront par le plateau central au niveau de la flèche.

Ensuite les murs coupe-feu viendront compartimenter les espaces de la toiture et créer des modules d'environs 20m. Ces murs viendront se poser délicatement sur la lisse basse, sans toucher les voûtes, un bourrelet viendra combler le vide entre la parois coupe feu et les voûtes.

Des arcs seront placés au début et à la fin de chaque module de la charpente en résille. Ils formeront un cadre.

Enfin, entre les arcs on aura la double couche de la charpente: la résille Zollinger et les arbalétriers formant la partie structurelle et formelle de la charpente. Celle-ci permettra de reprendre l'entièreté des charges de la couverture.

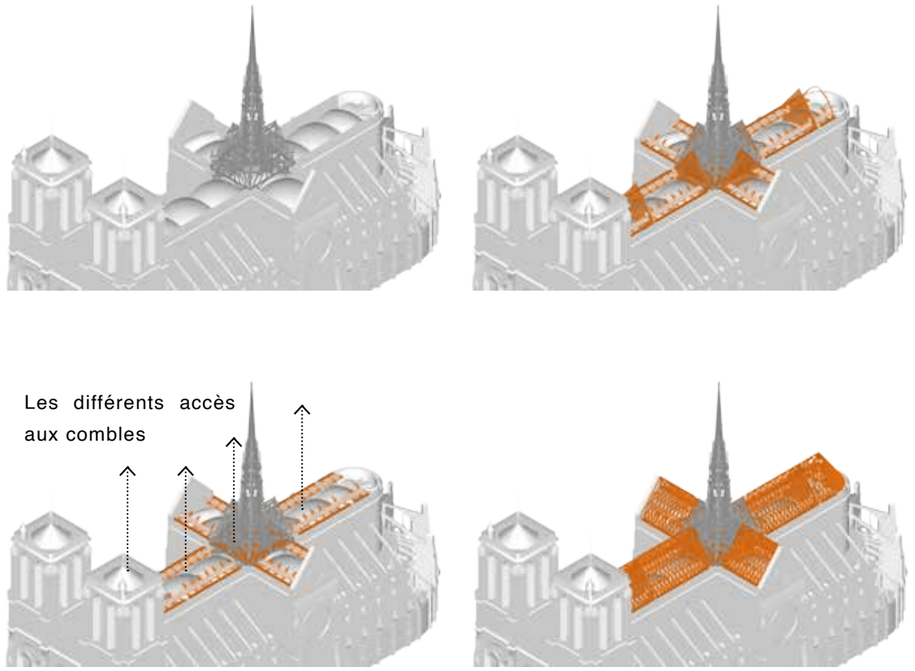


Fig.19 Décomposition schématique

Charpente

Composition - Plans et élévations

Sur la façade principale et sur la façade orientale, la résille esquisse au centre de celles-ci un grand et nouvel arc en ogive, cette fois-ci en chêne et pas en pierre, qui semble s'inscrire parfaitement dans la composition géométrique gothique de ces façades.

Le motif organique, léger et fin ainsi créé par la résille, que l'on retrouve en plan, évoque directement l'esthétique gothique de la cathédrale en rappelant le dessin de certains vitraux ou sculptures.

Le plan de la cathédrale est alors partagé en plusieurs modules identiques séparés par des murs coupe feux autour de la nouvelle flèche.

La nef compte alors 2 modules de 20m de long, le chœur un seul et le transept deux de chaque côté.

Sur la façade longitudinale, la résille s'étend sur toute la longueur de la cathédrale et semble se fondre dans l'esthétique gothique qu'elle intègre. Le motif organique se paraît à une intrigante ossature qui en ajoute à l'imaginaire d'exosquelette de arcs boutants. Au dessus, la longue poutre-treillis elle rappelle les anciens ornements de faîtage de la toiture disparus lors de l'incendie.

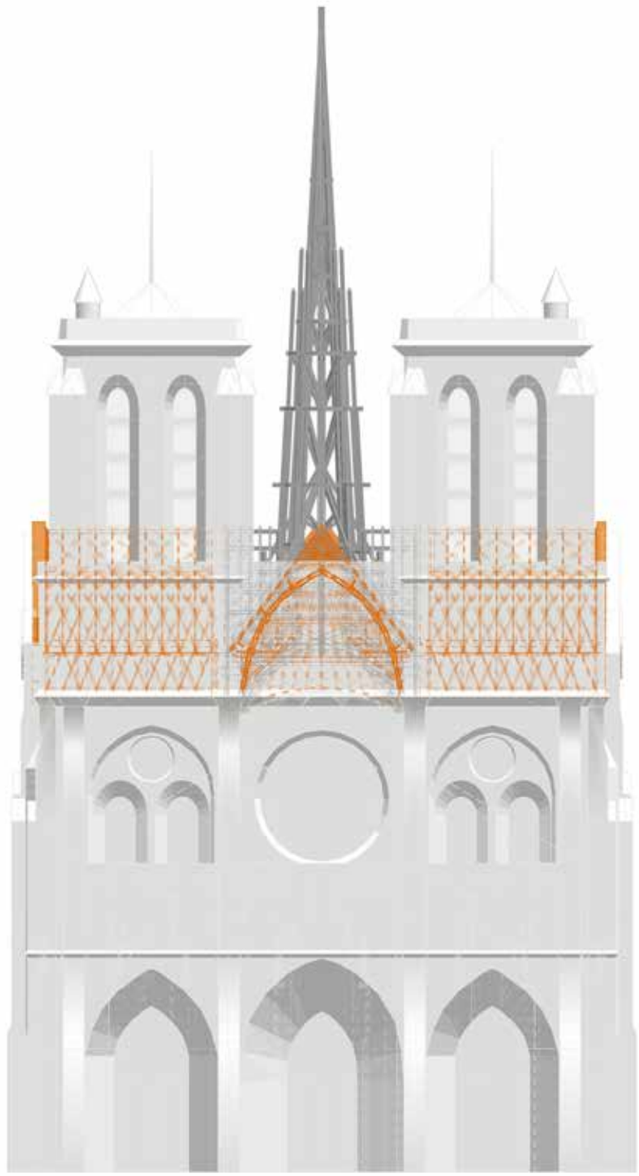


Fig.20 Élévation Ouest

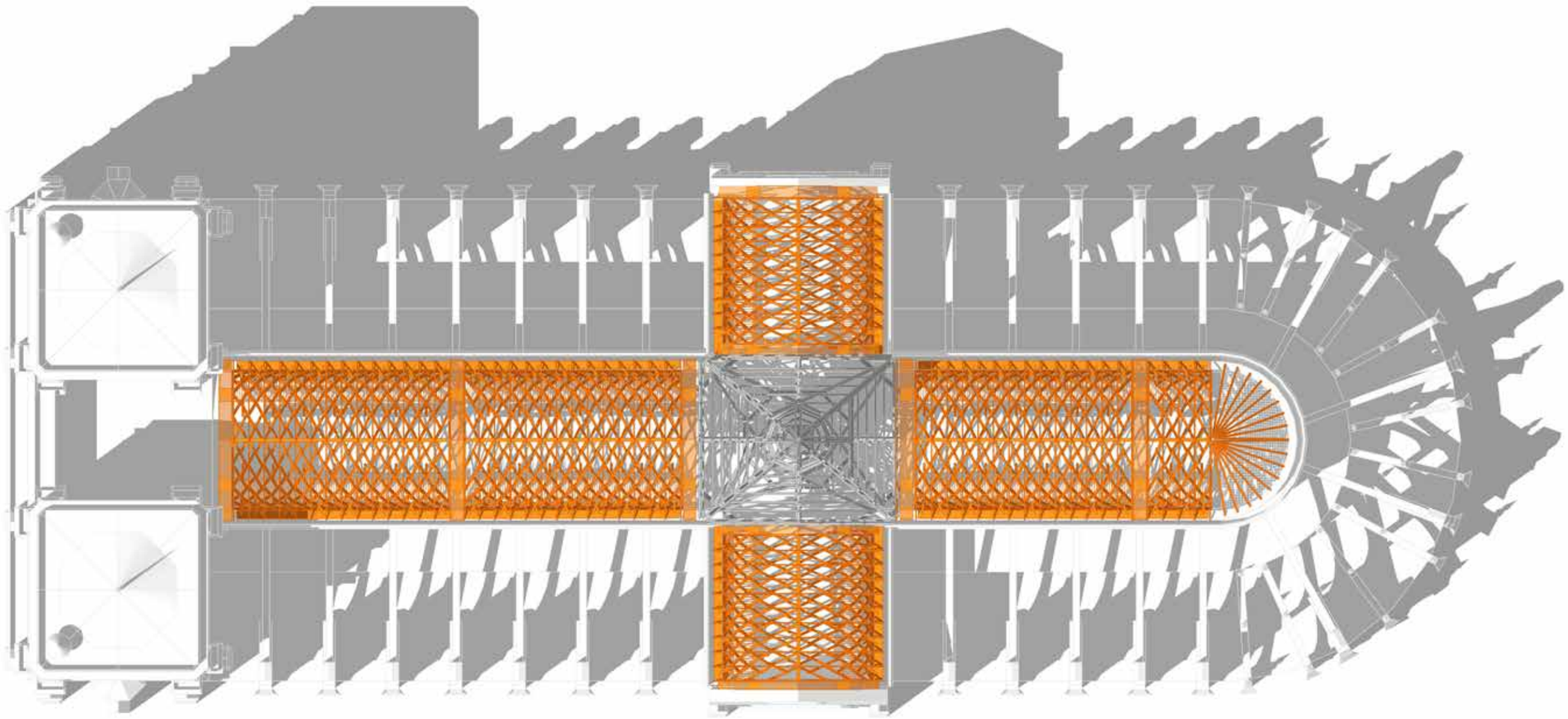


Fig.21 Plan charpente

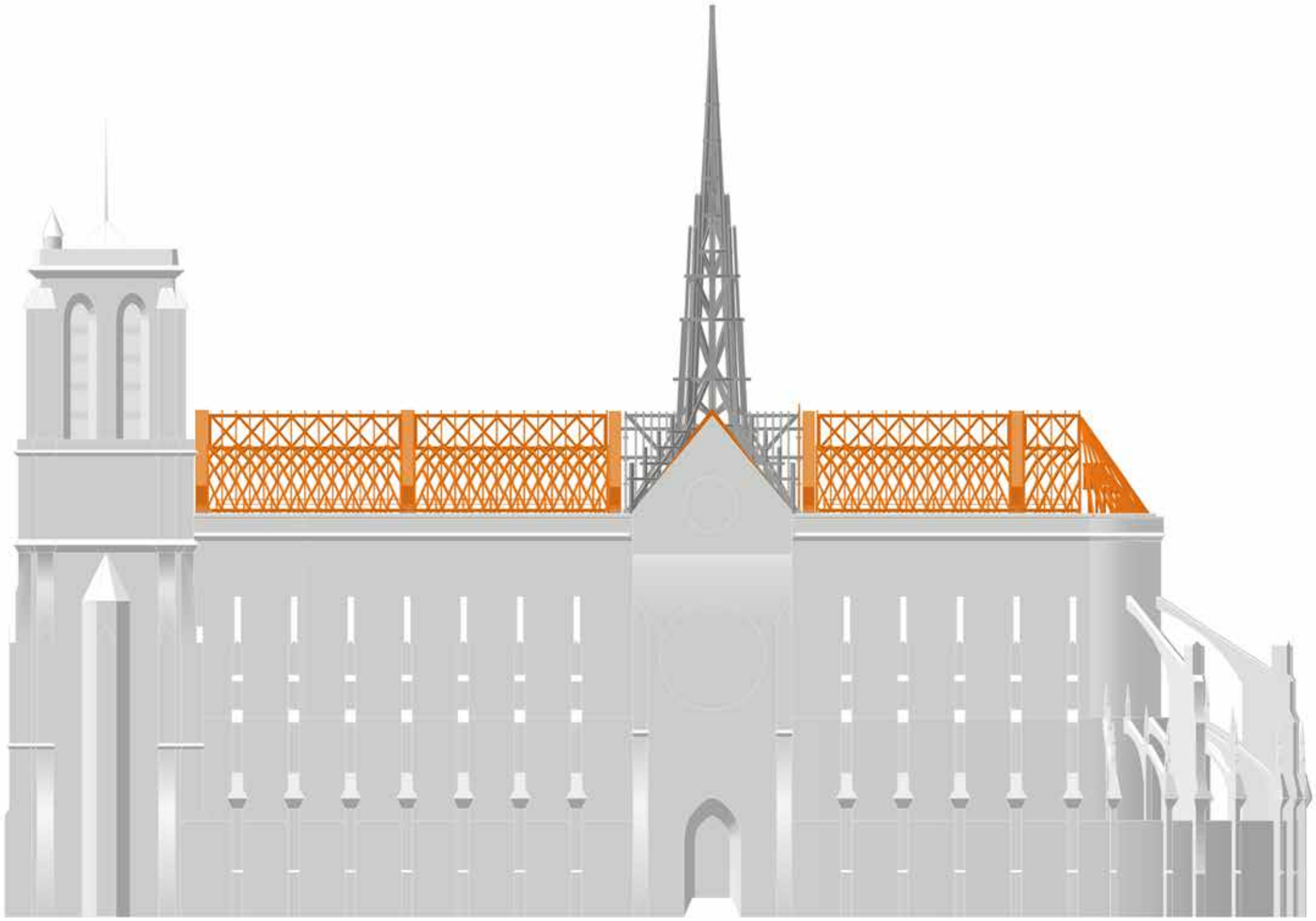


Fig.22 Élévation Sud

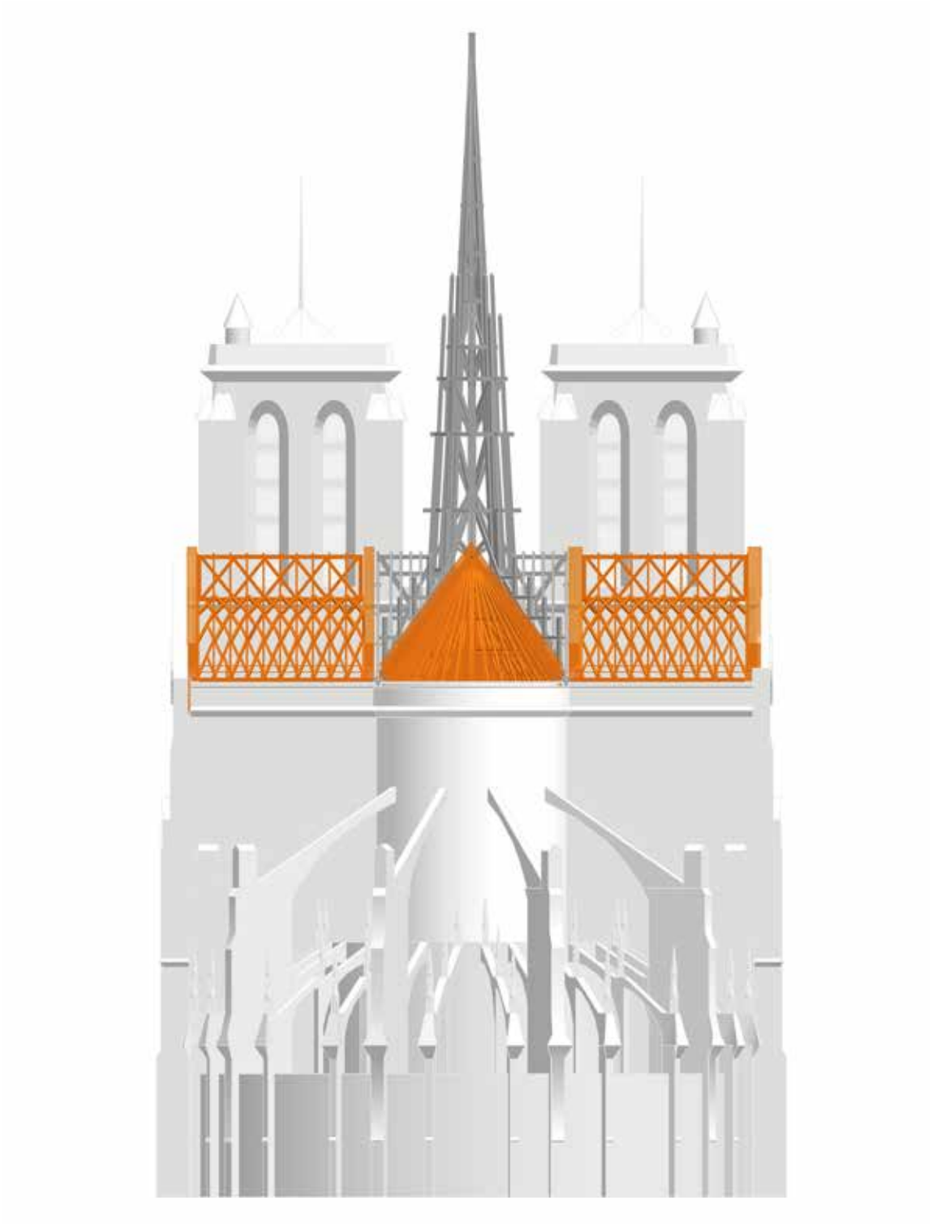
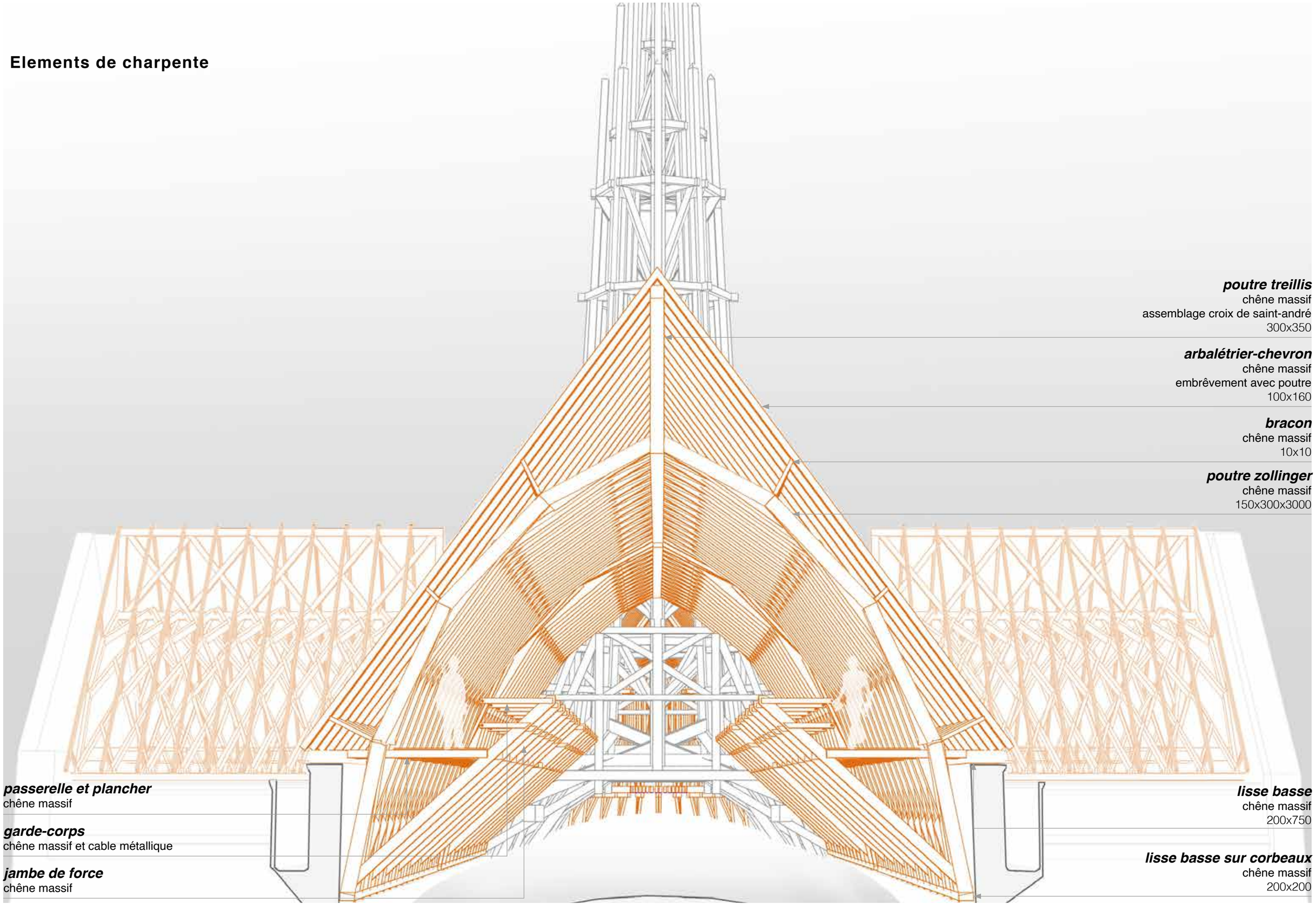


Fig.23 Élévation Est

Elements de charpente



Composition - Assemblages

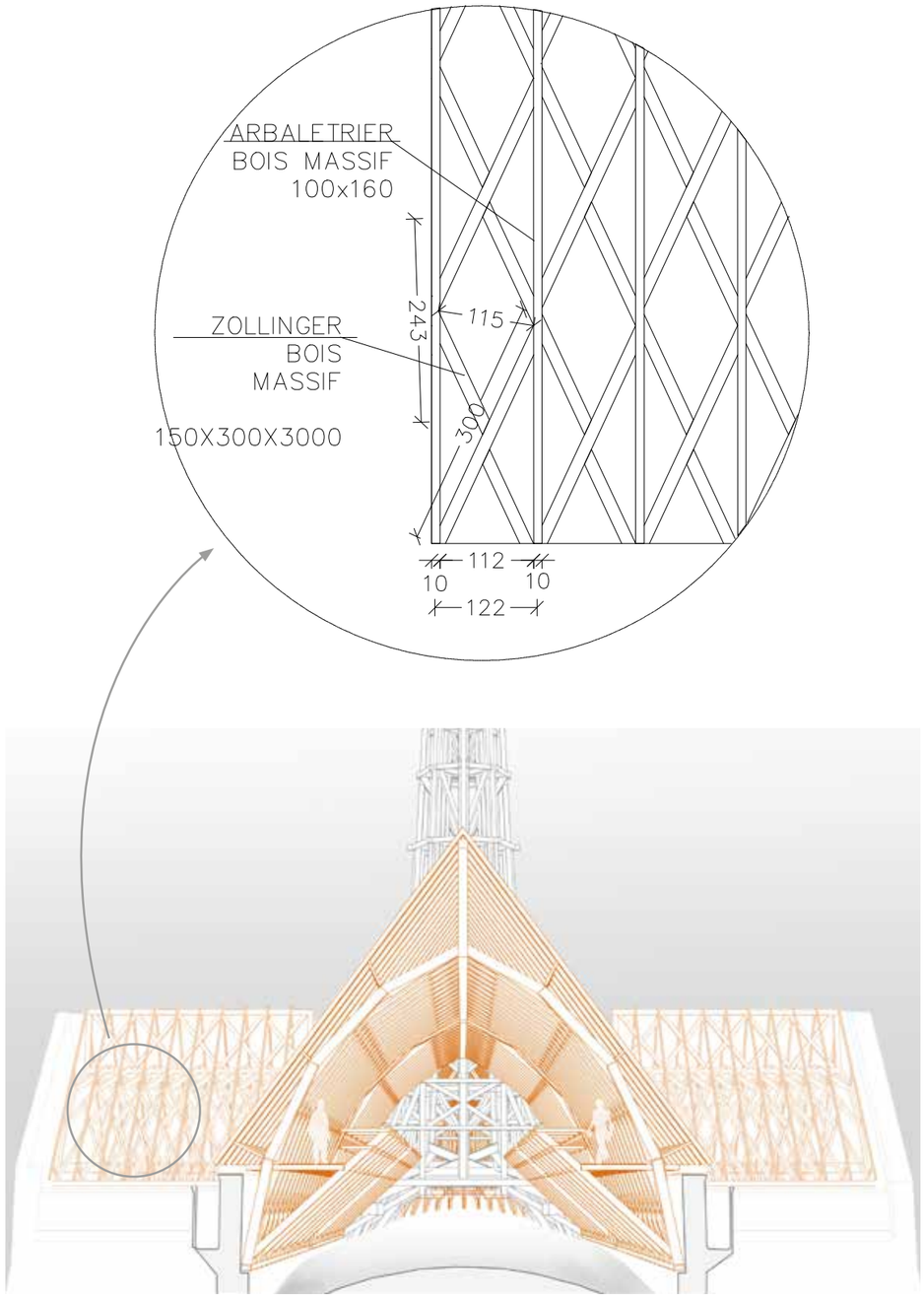
La charpente se décompose en plusieurs éléments, la passerelle, le motif Zollinger, les bracons, la poutre treillis ou encore les arbalétriers qui sont reliés entre-eux par différents types d'assemblages. Tous les types d'assemblages que nous allons vous détailler par la suite sont donnés à titre d'exemple. Nous les avons étudiés pour qu'ils résistent aux différents efforts extérieurs. Par conséquent ils peuvent être modifiés ou changés à souhait par des assemblages plus traditionnels ou plus modernes. Nous avons utilisé plusieurs types d'assemblages, de différentes époques, des plus anciennes comme le tenon-mortaise, ou plus récents par étrier métallique à queue d'aronde. Nous voulons montrer ici qu'il est possible d'associer différents types d'assemblages pour la même charpente.

Détail 1 : assemblage Zollinger

Le premier concerne les assemblages du motif Zollinger. À l'origine, deux boulons permettaient aux deux éléments venant sur l'élément continu d'être assemblés. Il était alors nécessaire de percer chaque pièce précisément du bon diamètre et aligner pour assembler le tout. Dans notre cas nous voulions changer cela. Nous allons alors utiliser un système de ferrure métallique avec double âmes noyées, fixées par des broches autoforeuses SFS pour les éléments qui s'appuieront sur l'élément continu. Il suffira ainsi de faire deux rainures de la profondeur de la plaque et de venir visser ces broches autoforeuses SFS. Nous évitons de pré-percer tous les éléments.

La base de la ferrure sera également fixée sur l'élément continu à l'aide du même type de système. Les broches travailleront uniquement en cisaillement, étant donné que c'est l'effort principal dans cet assemblage. Les âmes métalliques permettront aux deux éléments venant s'assembler sur l'élément continu de contrer les efforts de déplacement de la structure. Cet assemblage permet surtout de répartir au mieux les efforts au niveau des éléments venant s'appuyer sur l'élément continu, étant donné que toute la zone en contact avec l'âme pourra travailler de façon plus uniforme, et non en seulement deux points. Les charges étant mieux réparties, elles pourront être plus importantes. L'élément continu recevra également les charges de façon plus uniformément répartie par la plaque métallique. Tout cela dans le but de solliciter une plus grande surface de pièce.

Détail 1: assemblage Zollinger

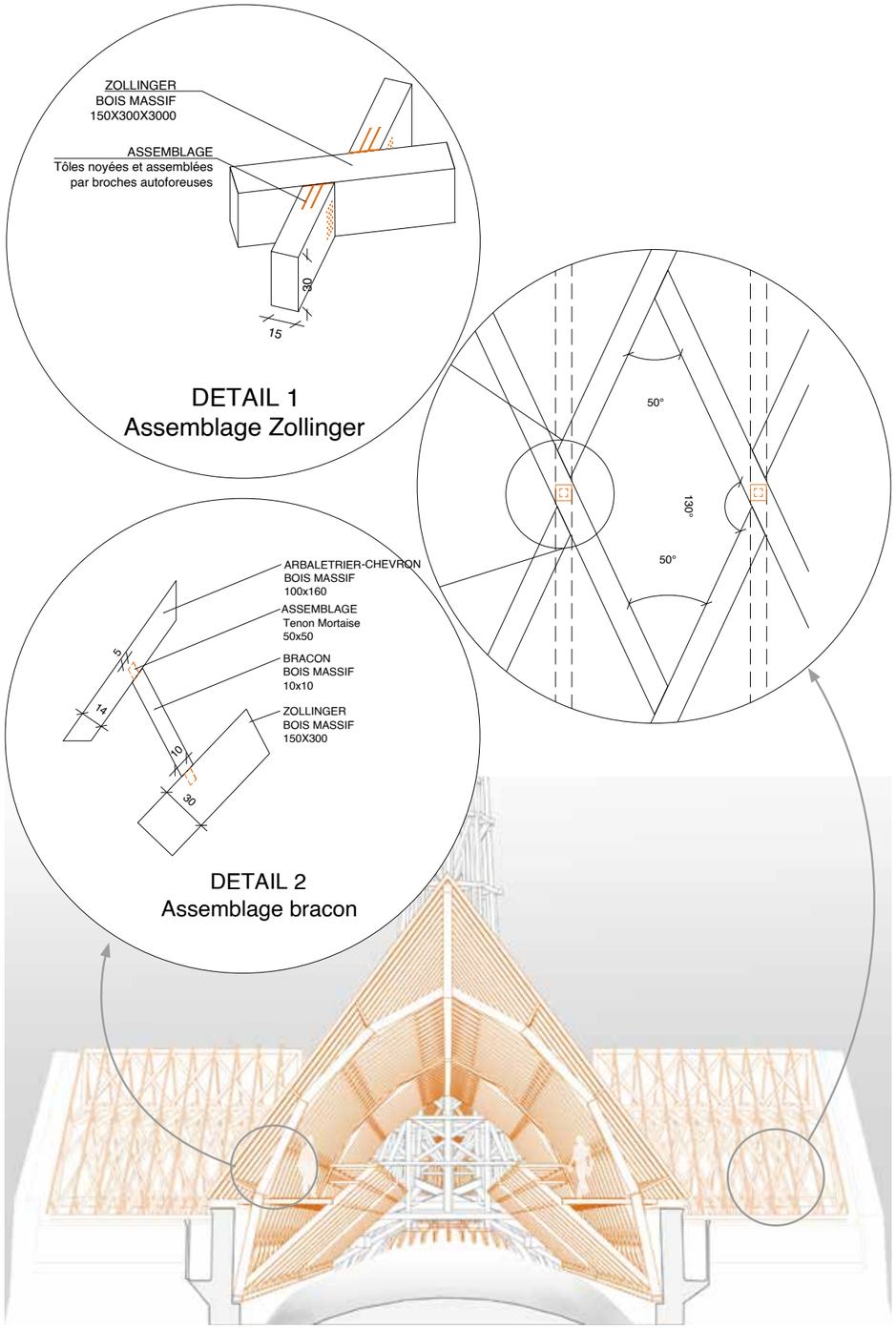


Détail 2 : assemblage bracon

Les bracons seront assemblés en tenon mortaise chevillés dans les arbalétriers et dans le motif Zollinger, comme sur une charpente traditionnelle entre l'arbalétrier et la contre-fiche. Nous évitons ainsi les assemblages métalliques apparents qui pourraient avoir un impact sur la tenue au feu. Ces assemblages pourront transmettre les charges climatiques et les efforts de la toiture sans problème au motif Zollinger.

Ils seront chevillés de part et d'autre dans le cas où la toiture serait en dépression et la couverture essayerait de se soulever, faisant travailler les bracons en traction, et les chevilles en cisaillement. La dimension de notre tenon mortaise sera en fonction des efforts qui s'applique sur le bracon. Ils seront donc encastrés dans l'arbalétrier et dans le motif Zollinger. Ainsi, le maximum d'effort de la couverture sera transmis au motif Zollinger par le bracon. Nous pouvons aussi imaginer différents types d'assemblages tels que des étriers métalliques, des embrèvements ou autre.

Les bracons subissent principalement des efforts de compression. Ils ont un rôle essentiel pour retrouver le volume de la charpente d'origine et donc la planéité du pan, étant donné qu'ils sont les principaux éléments qui relient les arbalétriers et donc le voligeage et les ardoises de la résille.

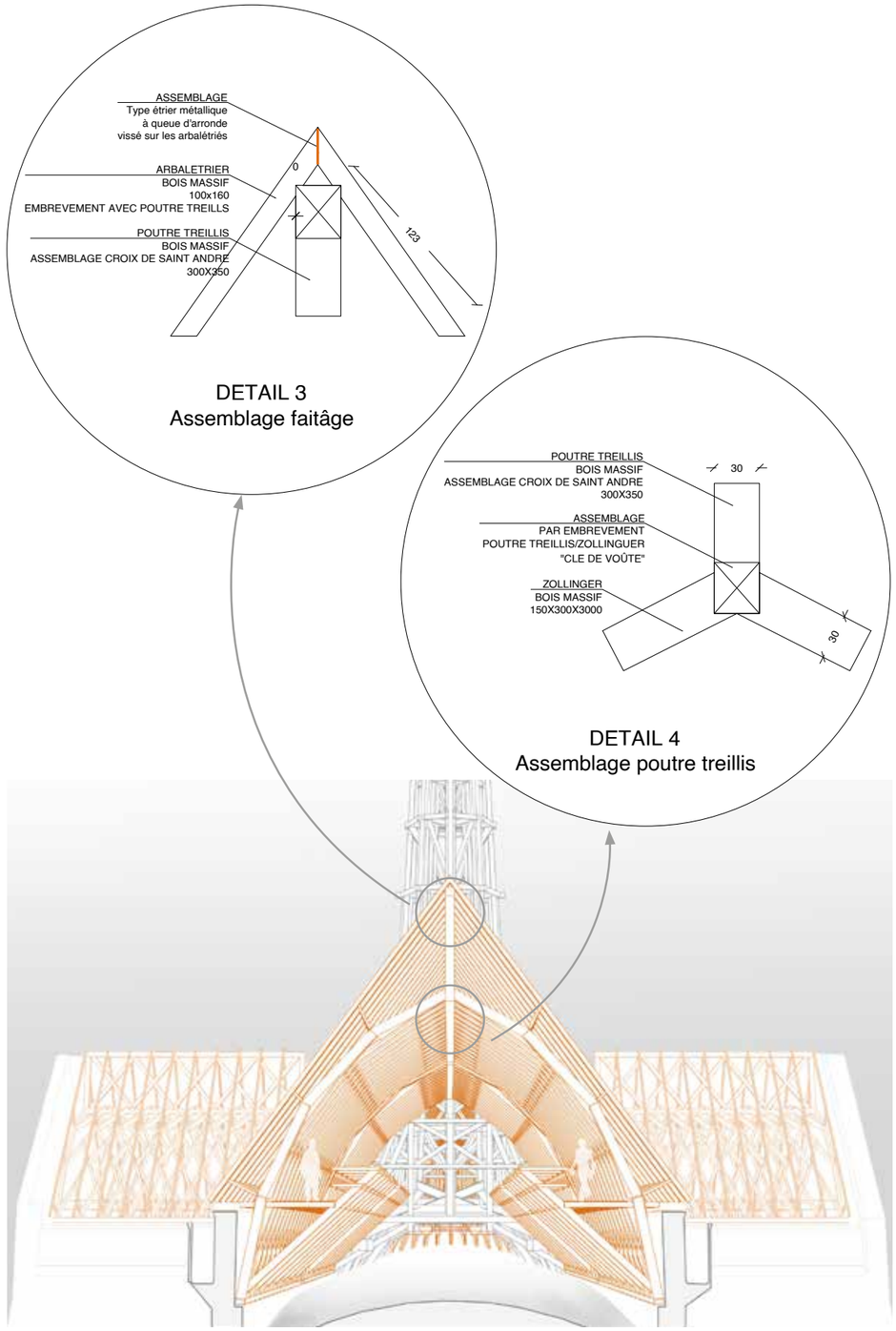


Détail 3 : assemblage faîtage

Au sujet du faîtage, les arbalétriers qui se rejoignent à ce niveau sont assemblés par un étrier métallique à queue d'aronde qui sera donc caché. Le fait de le cacher diminue les risques au niveau incendie évitant ainsi les assemblages métalliques apparents. En cas de soulèvement de la couverture, les arbalétriers ne pourront pas se séparer étant donné qu'ils sont déjà comme encastrés sur les bracons. Les Arbalétriers subiront un embrèvement au niveau de la partie supérieure de la poutre treillis pour venir s'insérer correctement à ce niveau. Il serait aussi possible de réaliser un mi-bois entre les arbalétriers, à leur sommet, pour les assembler ensemble.

Détail 4 : Assemblage poutre treillis

Les deux éléments longitudinaux et verticaux de la poutre treillis sont assemblés par tenon mortaise chevillé. Les croix de Saint-André sont assemblées entre elles par mi-bois, et également par tenon mortaise chevillé au niveau des éléments inférieurs et supérieurs de la poutre treillis. Ainsi, nous avons une poutre treillis indéformable. Elle permettra de reprendre les charges de la couverture au niveau du faîtage pour les transmettre au motif Zollinger. Elle aura également un second rôle important. Le motif Zollinger sera assemblé par embrèvement sur la partie inférieur de la poutre treillis, qui à cet endroit, peut être considéré comme une clé de voûte. Ces efforts seront alors directement retransmis au motif Zollinger. Ces assemblages semblent les plus judicieux pour contrer un incendie, tout en restant simples et efficaces. Cette poutre treillis est le dernier maillon qui permet de relier les deux pans, c'est une pièce primordiale pour le bon équilibre de notre charpente.

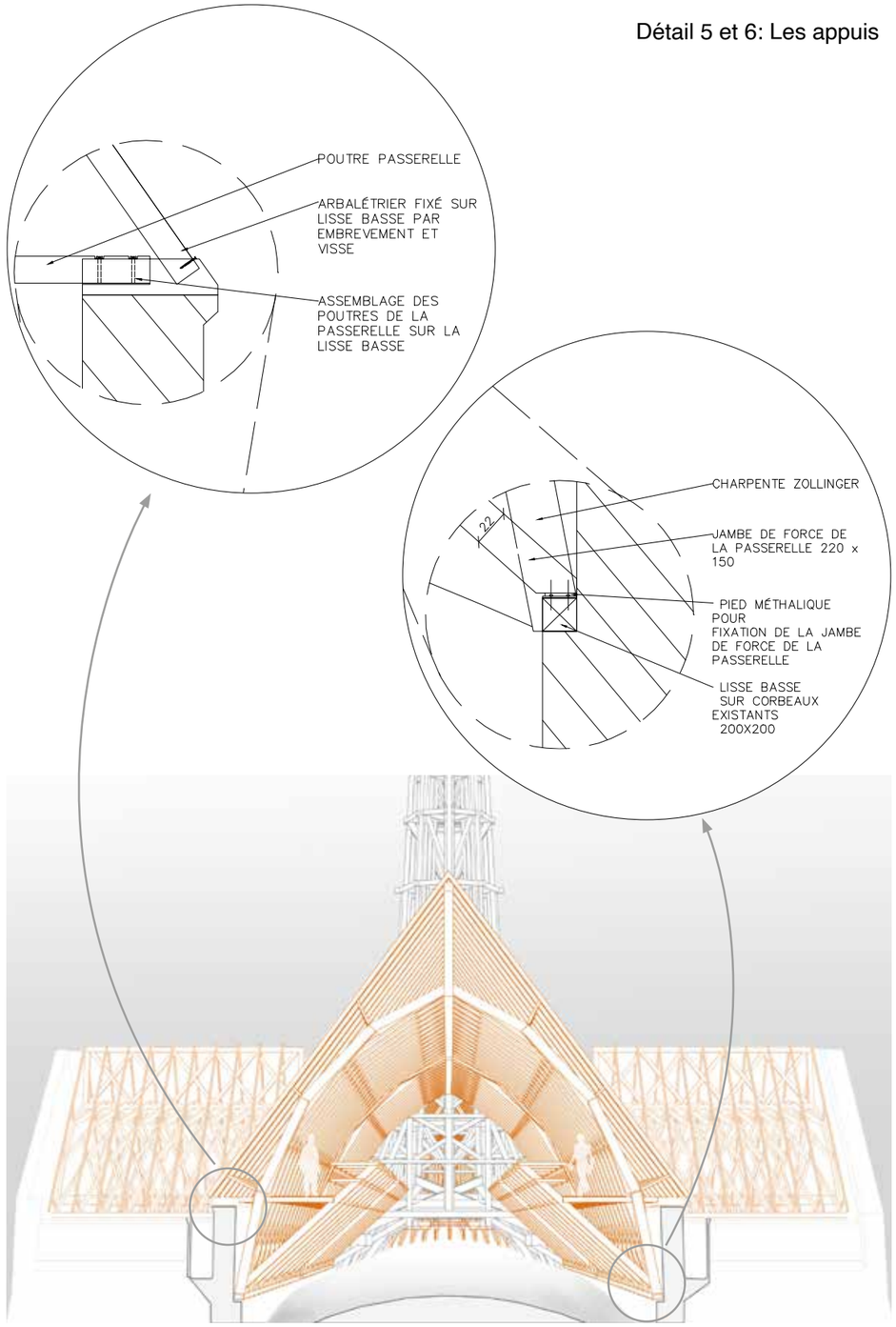


Détails 5 et 6: Les appuis

À propos des appuis de la charpente sur la maçonnerie existante, un embrèvement permet d'assembler le pied d'arbalétrier avec la lisse basse. Un second embrèvement permet l'assemblage du motif Zollinger et de la seconde lisse basse. Ces deux éléments sont vissés à leur lisse basse respective pour prévenir d'éventuels risques de soulèvement de la couverture ou de la toiture et répartir les différentes charges sur toute la longueur de la lisse. De par sa masse, similaire à celle de la charpente originale, elle n'a pas besoin d'être fixée à la maçonnerie. De plus, il serait plus intéressant de ne pas venir modifier la maçonnerie existante, et donc de ne pas y insérer des goujons d'ancrages. Nous avons fait le choix de placer une lisse basse sur la maçonnerie, cela permet de reprendre les pieds de nos arbalétriers et par la même occasion de régler les irrégularités de cette maçonnerie pour avoir un pan parfaitement plan. De plus les charges de notre couverture sont uniformément réparties tout le long de la maçonnerie. Il en est de même pour le corbeau. Nous ne voulions pas l'impacter, nous avons mis une lisse basse, cela permet de former une ceinture autour de notre résille et de répartir les charges de façon plus uniforme sur le corbeau et également d'avoir tous nos pieds de résille au même niveau. Cette lisse basse sur corbeau sera également utile pour reprendre une partie des charges de la passerelle. L'autre partie de ces charges seront reprissent par la lisse basse sur la maçonnerie. Nous avons peu d'efforts horizontaux dans notre structure du fait de notre forme d'ogive, les lisses seront principalement comprimées. Des assemblages plus complexes ne seraient pas forcément justifiés, ces assemblages relativement simples sont suffisants.

Concernant la passerelle, les poutres principales seront vissées à la lisse basse de la maçonnerie. Le pied de la jambe de force sera assemblé à la lisse sur corbeaux à l'aide d'un étrier métallique permettant de transmettre les efforts à la celle-ci. Ces jambes de force seront boulonnées aux poutres de la passerelle. Deux éléments en bois seront également boulonnés sur la partie supérieure de la jambe de force pour constituer un garde-corps. Ces éléments en bois seront reliés à leur extrémité, dans le sens du pan par des tirants métalliques pour assurer la sécurité du garde-corps. Un éclairage basse tension à LED pour éviter un départ d'incendie sera ajouté aux extrémités des jambes de force pour illuminer notre charpente.

Détail 5 et 6: Les appuis



Notice technique

I. Quantitatif

Le quantitatif de notre charpente est un point important. En effet sur notre étude de base, nous avons un quantitatif, donc un cubage de bois, plus important d'environ 12% par rapport à la charpente d'origine pour un poids total de 206 105 daN (cf. Tableau 2).
Cette donnée ne semble pas être un inconvénient primordial pour autant puisque cela faisait plusieurs siècles que la charpente était aussi lourde et qu'elle supportait très bien les différents aléas climatiques (tout comme les éléments en maçonnerie).

Charpente	
Volume total de la résille (m3)	34,494
Volume total des arbalétriers (m3)	5,457
Volume total de la poutre treillis (m3)	4,283
Volume total des lisses basses (m3)	1,200
Volume total des bracons (m3)	0,616
Volume total du voligeage (m3)	12,960
Volume total de la passerelle (m3)	3,466

Tableau 1: Descriptif du quantitatif pour un module de 20 m de longueur

Cependant nous pouvons facilement optimiser notre charpente pour atteindre le poids de celle d'origine, voire un poids bien inférieur. Pour cela nous avons pour objectif d'optimiser si possible notre résille Zollinger qui représente à elle seule plus de 50% du poids total de la charpente (cf. Tableau 1). Le deuxième poste qui consomme le plus de bois est le voligeage, il représente environ 20% du poids total, mais il reste difficile de diminuer ce cubage. En effet nous avons un entraxe d'arbalétrier relativement important et nous avions déjà opté pour le sapin comme essence de bois étant donné sa masse volumique beaucoup moins importante que celle du chêne.
En revanche, il est important de ne pas abuser de la réduction du poids de la charpente, car cela impliquerait de revoir la stabilité et le soulèvement de la charpente, apportant des complications pour l'accrocher aux maçonneries existantes. De plus nous savons que plus les sections seront petites et plus la tenue au feu diminue, il est primordial de trouver le juste milieu pour obtenir les sections les plus optimales.

Volume total de bois pour un module de 20 mètres	
62	m3

Volume total de bois pour la charpente	
306	m3

Poids total de bois pour un module de 20 mètres	
42062	daN

Poids total de bois pour la charpente	
206105	daN

Tableau 2: Volume et poids total pour un module de 20 m et pour l'ensemble de la charpente

Nous avons fait le choix de réaliser une charpente en éléments courts, cela signifie que nous avons un nombre important d'éléments à assembler entre eux, soit, un peu moins de 2200 pièces de bois pour l'ensemble de celle-ci (soit 444 éléments pour un module de 20m). Ce grand nombre est essentiellement dû à notre motif Zollinger.

II. Chargement

Pour déterminer clairement le chargement que peut recevoir notre toiture, nous sommes passés par les études de charges de neige et de vent. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel ACORD qui nous semblait répondre pleinement à nos besoins.

1. Étude charges de neige

La valeur caractéristique S_k et exceptionnelle S_{ad} de la charge de neige sont considérées pour une altitude de région de neige A1 (Alt. 33m). Nous obtenons donc les valeurs suivantes :

$$S_k = 0{,}45\,kN/m^2\,;S_{ad} = C_{esl} * S_{k0} = 0 * 0{,}45 = 0\,kN/m^2$$

Nous veillons d'ailleurs à prendre en compte les coefficients d'exposition et thermiques comme étant égaux à 1. De ces valeurs, nous obtenons ces résultats et ces différents cas de neige :

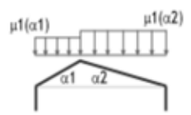
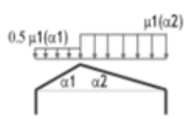
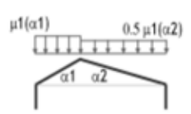
Cas de neige : S1	
	Versant gauche $S = \mu_1\ C_t\ C_e\ s_k = 0.13 \times 1 \times 1 \times 0.45 = 0.06kN/m2$ $\mu_1 = 0.8(60-\alpha)/30 = 0.8(60-55)/30 = 0.13$ Versant droite $S = \mu_1\ C_t\ C_e\ s_k = 0.13 \times 1 \times 1 \times 0.45 = 0.06kN/m2$ $\mu_1 = 0.8(60-\alpha)/30 = 0.8(60-55)/30 = 0.13$
Cas de neige : S2	
	Versant gauche $S = 0.5\ (\mu_1\ C_t\ C_e\ s_k) = 0.5 \times (0.13 \times 1 \times 1 \times 0.45) = 0.03kN/m2$ $\mu_1 = 0.8(60-\alpha)/30 = 0.8(60-55)/30 = 0.13$ Versant droite $S = \mu_1\ C_t\ C_e\ s_k = 0.13 \times 1 \times 1 \times 0.45 = 0.06kN/m2$ $\mu_1 = 0.8(60-\alpha)/30 = 0.8(60-55)/30 = 0.13$
Cas de neige : S3	
	Versant gauche $S = \mu_1\ C_t\ C_e\ s_k = 0.13 \times 1 \times 1 \times 0.45 = 0.06kN/m2$ $\mu_1 = 0.8(60-\alpha)/30 = 0.8(60-55)/30 = 0.13$ Versant droite $S = 0.5\ (\mu_1\ C_t\ C_e\ s_k) = 0.5 \times (0.13 \times 1 \times 1 \times 0.45) = 0.03kN/m2$ $\mu_1 = 0.8(60-\alpha)/30 = 0.8(60-55)/30 = 0.13$

Fig.24 Résultats obtenus pour la charge de neige sur le logiciel ACORD

Comme illustré sur la figure 25, le cas le plus défavorable est le premier où les valeurs de S prises en compte sont calculées avec la formule suivante (cf. figure 24) :

$$S = \mu_1 * C_t * C_e * s_k$$

Nous retiendrons donc une charge de neige valant 6 daN/m2 pour la suite de nos calculs.

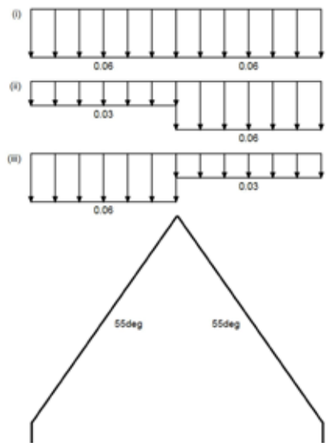


Fig.25 Schéma des résultats obtenus pour la charge de neige (ACORD)

2. Étude charges de vent

En ce qui concerne la charge de vent, nous avons considéré l'étude dans une région 2 avec une rugosité du terrain correspondant à une zone urbaine dense (IV). L'orographie du terrain est retenue comme étant un terrain plat ou de faible pente (inférieur à 5%). La hauteur z est de 43 m. La valeur de vitesse de référence du vent 24 m/s réalisent une pression dynamique de pointe pour la hauteur de calcul z de 0,71 kN/m2.

Après avoir renseigné ces caractéristiques générales des charges de vent, nous obtenons les résultats suivants concernant le vent dans la direction X+ et Y+: Selon les figures 26 et 27 obtenues grâce au logiciel ACORD, nous retiendrons donc les valeurs de pressions sur zones de toiture suivantes: 0,71 et -1,27 daN/m2.

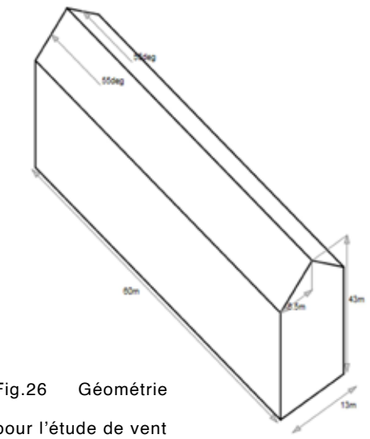


Fig.26 Géométrie pour l'étude de vent

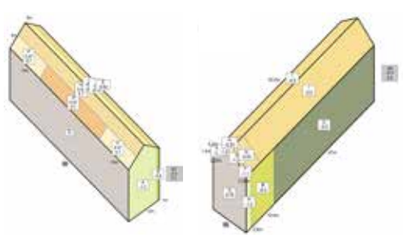


Fig.27 Résultats de l'étude de vent dans la direction X+ et Y+

3. Définition du cas de charges

Maintenant que nous avons pu définir les chargements qui reposent sur notre toiture, il nous est possible d'étudier les différents cas de charges possibles. Les charges surfaciques permanentes prennent en compte la couverture en ardoise, le voligeage en Sapin et le poids propre des arbalétriers en chêne.

Charges		
Charges de neige (S)	6	daN/m²
Charges de vents positives (Wp)	71	daN/m²
Charges de vents négatives (Wz)	-127	daN/m²
Charges d'exploitations (Qk)	40	daN/m²
Charges permanentes (Gk)	48,5	daN/m²

Tableau 3: Charges s'appliquant sur la charpente

Depuis la mise en place de ces différents chargements, nous avons pu déterminer le cas de charge le plus défavorable :

Charges ELS et ELU :

ELS		
Déformation avec le vent :		
$Ed_{qp1} = g_k$	48,46	daN/m²
$Ed_{c1} = g_k + w_z$	-78,54	daN/m²
Déformation avec la charge d'exploitation :		
$Ed_{qp2} = g_k$	48,46	daN/m²
$Ed_{c2} = g_k + Q_k$(milieu)	88,46	daN/m²
Déformation avec la neige :		
$Ed_{qp3} = g_k$	48,46	daN/m²
$Ed_{c31} = g_k + s_{n1} + 0.6*w_p$	97,06	daN/m²
$Ed_{c32} = g_k + w_p + 0.5*s_{n1}$	122,46	daN/m²

ELU		
Charge de base : poids propre (chargement)		
$Ed_1 : 1.35*g_k$	65,42	daN/m²
Charge de base : exploitation toiture (chargement)		
$Ed_2 : 1.35*g_k + 1.5*Q_k$	125,42	daN/m²
Charge de base : neige normale (chargement)		
$Ed_3 : 1.35*g_k + 1.5*s_{n1}q$	74,42	daN/m²
$Ed_4 : 1.35*g_k + 1.5*s_{n1} + 1.5*0.6*W_p$	138,32	daN/m²
$Ed_5 : 1.35*g_k + 1.5*w_p + 1.5*0.5*s_{n1}$	176,42	daN/m²
Charge de base : neige exceptionnelle (chargement)		
$Ed_6 : g_k + s_{n1}$	54,46	daN/m²
Chargement de base : vent (Arrachement)		
$Ed_7 : g_k + 1.5*w_z$	-142,04	daN/m²

Tableau 4: Charges s'appliquant sur la charpente

Notre cas de charge le plus important et le cas de charge Ed5 et impose une charge surfacique de 177 daN/m2, nos arbalétriers étant espacés d'un mètre quarante-sept d'entraxe, nous obtenons une charge répartie de 257 daN/m.

III. Vérifications

Pour pouvoir modéliser un élément de résille soit une poutre de bois massif D40 de section 150x300 mm, nous considèrerons que celle-ci s'apparente à une poutre sur deux appuis avec deux charges ponctuelles.
La première est orientée dans le sens de la poutre et s'introduit au niveau d'un des appuis. La seconde est transversale à la poutre, verticale, elle s'applique au niveau d'autres appuis. La première retranscrit les efforts retransmis par les éléments structuraux précédents comme la résille disposée en amont de l'élément étudié et la poutre treillis. La seconde est issue de la charge transmise par le bracon, perpendiculaire à notre élément.

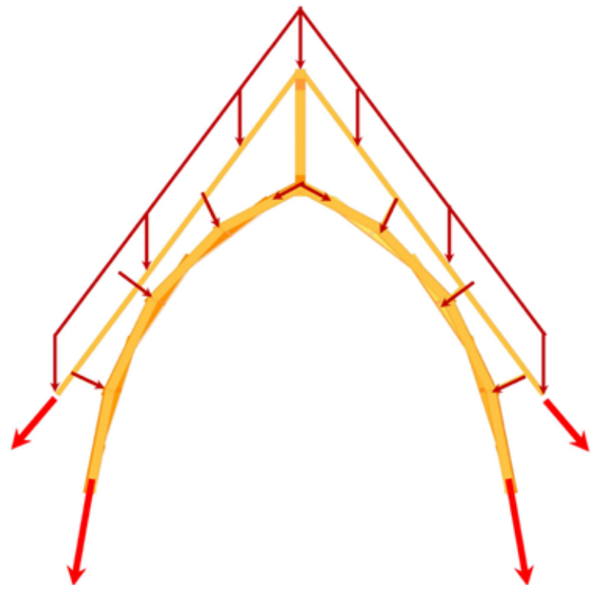


Fig.28 Schéma de la descente de charge de la structure

Pour déterminer la charge reconduite par le premier bracon, nous établissons.

$$257 * (1{,}70 + 2{,}25) = 10160N$$
$$10160 * cos(27°) = 9055N = N_{u,1}$$

De la même manière nous déterminons les efforts transmis pas la seconde et la dernière rangée de bracons ($\alpha_2 = 56°$et $\alpha_3 = 64°$) :

$$N_{u,2} = 4820N; N_{u,3} = 2270N$$

1. Efforts horizontaux

La stabilité des maçonneries est une question primordiale pour la nouvelle charpente. Notre arbalétrier peut-être considéré comme une poutre sur cinq appuis. La descente de charges s'effectue depuis l'arbalétrier qui récupère les 2,57 kN/m pour les redistribuer sur ces cinq appuis : La poutre treillis (N0), les trois bracons (N1, N2 et N3) et la lisse sur la maçonnerie (Nb).

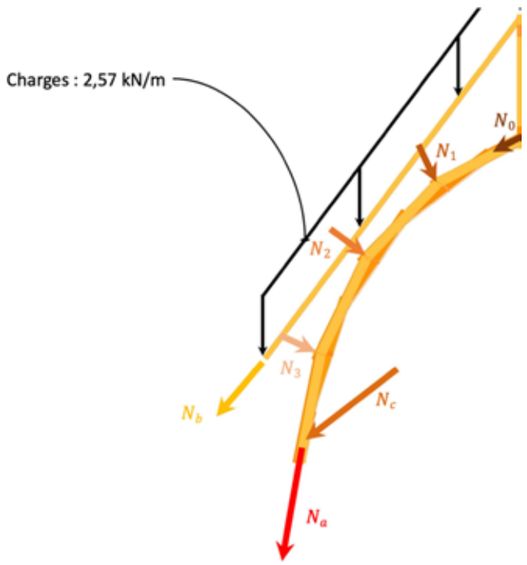


Fig.29 Schéma descriptif de l'étude des efforts horizontaux

La charge N0 comprend aussi le poids propre de la poutre treillis sur une distance d'entraxe des éléments de résille. L'assemblage de la poutre treillis sur les éléments de résille implique que sa charge N0 soit redistribuée sous forme d'effort normal dans les poutres Zollinger. La charge répartie s'appliquant sur la longueur de l'arbalétrier implique qu'une composante de cet effort soit reconduite dans le sens du pan de toiture. Nous avons choisi l'hypothèse qui nous semblait la plus contraignante qui mentionne que la charge Nb serait la résultante de cet effort sur la longueur quasi complète de l'arbalétrier. Cette même résultante est directement reconduite dans le mur de maçonnerie.

Les bracons rapportent leurs charges sous formes ponctuelles en fin de chaque poutre de la résille. Ces charges sont ensuite redirigées vers le bas de la structure comme efforts normaux des éléments de Zollinger entraînant une compression plus importante de ceux-ci. Nous pouvons ajouter à ces données le poids propre des poutres en chêne qui constituent la résille sur une même trame ainsi que l'effort impliqué par la passerelle (Nc) et nous obtenons l'effort résultant sur la lisse basse sur corbeaux (Na).

Les efforts qui composent la valeur de la charge introduite par la poutre treillis N0 sont les suivantes:

- Charges Couverture + Exploitation :

$$257 * 2{,}25 = 5800N$$

- Poids propre poutre treillis (Poids total : 6 000 kg) :

$$\frac{\frac{6000}{20} * 1{,}47}{2} = 2210N \qquad \text{Soit :} \qquad N_0 = 8010N$$

L'effort des bracons diffère selon leur rang par rapport au faîtage. La plage d'efforts récupérés et l'inclinaison de l'élément n'est pas le même entre les différents rangs de bracons. Nous avons donc pour le premier rang de bracon:

$$257 * (1{,}70 + 2{,}25) = 10160N$$
$$N_1 = 10160 * cos(27°) = 9055N$$

De la même manière nous déterminons les efforts transmis pas la seconde et la dernière rangée de bracons (α_2=56°etα_3=64°) :

$$N_2 = 4820N; N_3 = 2270N$$

Le poids propre d'une continuité de poutre en chêne (750 kg/m3) allant des corbeaux à la poutre treillis vaut environ 5 300 N.

Nous connaissons maintenant la charge arrivant sur les corbeaux, il suffit de sommer les valeurs précédemment obtenues :

$$N_a = N_0 + N_1 + N_2 + N_3 + P_p = 29{,}46kN$$

Cette charge s'applique sur la lisse basse avec un angle de 75° environ, il suffit de faire le produit de 29,46 par le cosinus de cet angle pour connaître l'effort horizontal qui en résulte soit :

$$R_{x,a} = 29{,}46 * cos(75) = 7{,}63kN$$

La composante de la charge répartie qui suit le pan de toiture est une charge équivalente à 2,11 kN/m soit (2,25 m étant la plage d'effort complètement retenue par la poutre treillis) :

$$N_b = 2{,}11 * (12{,}00 - 2{,}25) = 20{,}58kN$$

L'angle d'incidence de cette charge étant de 55°, il suffit de faire le produit de 20,58 par le cosinus de cet angle pour connaître l'effort horizontal qui en résulte soit :

$$R_{x,b} = 20{,}58 * cos(55) = 11{,}81kN$$

Enfin, pour prendre en compte le chargement de la passerelle dans les efforts horizontaux, nous considèrerons :

Charges Exploitation (une personne) : 1000N

Poids propre passerelle (pour un mètre linéaire) : 2200N

Soit :

$$N_c = 3200N$$

Cette passerelle apporte donc des charges supplémentaires avec un angle de 56°, il suffit de faire le produit de 3,2 par le cosinus de cet angle pour connaître l'effort horizontal qui en résulte soit :

$$R_{x,c} = 3{,}2 * cos(56) = 1{,}79kN$$

Nous obtenons donc un effort horizontal inférieur à celui précédemment établi par M. Vannucci lors de son étude de l'ancienne charpente de Notre-Dame qui établissait une valeur de 30,26 kN.

$$R_x = R_{x,a} + R_{x,b} + R_{x,c} = 21{,}23kN$$

2. Compression d'un élément de résille

Selon notre modélisation rdm6, l'effort normal maximal agissant sur un élément de résille est d'environ 42 400 N.

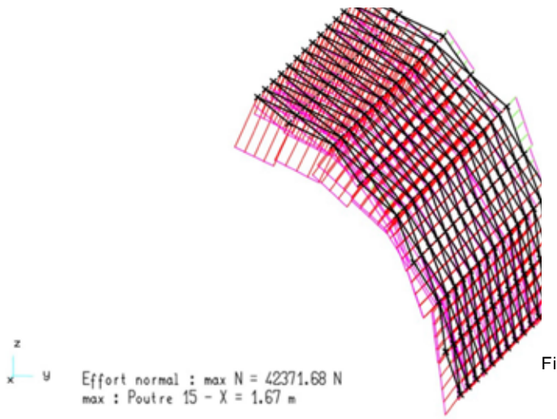


Fig.30 Résultats d'effort normal calculé dans les éléments Zollinger (Rdm6)

L'aire nette est mesurée en retirant l'épaisseur des assemblages des éléments (pour notre calcul, nous émettons l'hypothèse de 4Ø18).

$$A_{net} = 150 * (300 - 4 * 18) = 34200mm^2$$

$$\sigma_{c,o,d} = \frac{42400}{34200} = 1{,}24MPa$$

Pour des éléments en bois massif D40, nous obtenons les caractéristiques techniques suivantes : $f_{(c,o,k)}$=26MPa; $E_{0,05}$=9400MPa; k_{mod}=0,9; γ_m=1,3

Nous pouvons donc en déduire la résistance de calcul à la compression axiale :

$$f_{c,o,d} = \frac{0{,}9 * 26}{1{,}3} = 18MPa$$

Ensuite, nous devons définir le coefficient de flambement le plus défavorable kc. Pour cela, nous devons déterminer les élancements relatifs dans les deux plans de flambement potentiels :

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi}\sqrt{\frac{f_{c,o,k}}{E_{0,05}}}; \lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi}\sqrt{\frac{f_{c,o,k}}{E_{0,05}}}$$

Où λ_y et λ_z sont les élancements mécaniques dans les directions y et z donnés par :

$$\lambda_y = l_f\sqrt{\frac{A}{I_{Gyy}}}; \lambda_z = l_f\sqrt{\frac{A}{I_{Gzz}}}$$

Dans notre cas, nous considèrerons la longueur de flambement l_f équivalente à l_0 soit 3 550 mm.

Nous avons donc :

$$\lambda_y = 41; \lambda_z = 82$$

$$\lambda_{rel,y} = 0{,}571; \lambda_{rel,z} = 1{,}142$$

Pour obtenir le coefficient kc,y, nous aurons besoin de ky (avec β_c=0,2 qui détermine la bonne rectitude du bois massif):

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{{k_y}^2 - {\lambda_{rel,y}}^2}} = 0{,}928$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{{k_z}^2 - {\lambda_{rel,z}}^2}} = 0{,}580$$

Soit :

$$k_c = k_{c,z} = 0{,}580$$

Donc nous obtenons :

$$\frac{\sigma_{c,o,d}}{f_{c,o,d} * k_c} = \frac{1{,}24}{18 * 0{,}580} = 0{,}119 \leq 1 \Rightarrow OK!$$

3. Compression d'un bracon

Selon notre modélisation rdm6, le bracon le plus sollicité reçoit un effort normal d'environ 9 055 N. L'aire nette est ici équivalente à la section.

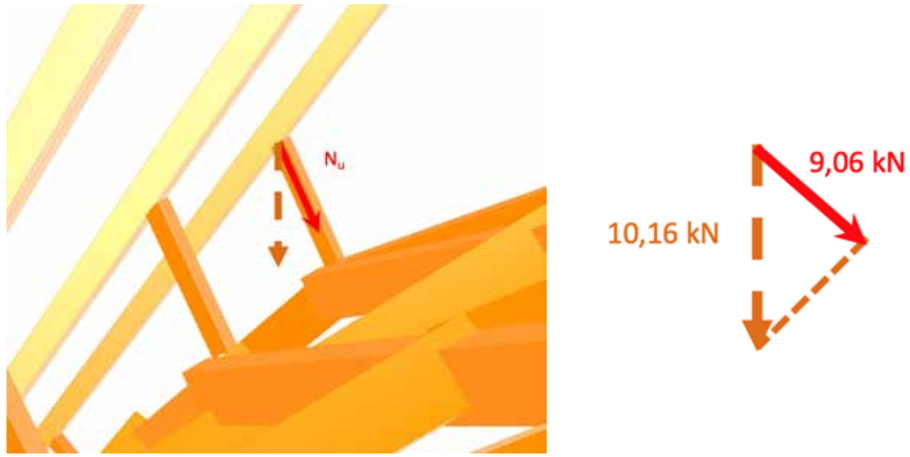


Fig.31 Schémas descriptifs de la force de compression agissant sur un bracon de rangée 1

$$A_{net} = 100 * 100 = 10000mm^2$$

$$\sigma_{c,o,d} = \frac{9055}{10000} = 0{,}906MPa$$

$$f_{c,o,k} = 26MPa; E_{0,05} = 9400MPa; k_{mod} = 0{,}9; \gamma_m = 1{,}3$$

$$f_{c,o,d} = \frac{0{,}9 * 26}{1{,}3} = 18MPa$$

Ensuite, nous devons définir le coefficient de flambement kc. Pour cela, nous devons déterminer les élancements relatifs dans les deux plans de flambement potentiels. Comme nous sommes dans une section carrée $\lambda_{(rel,z)}=\lambda_{(rel,y)}$:

$$\lambda_{rel,z} = \lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi}\sqrt{\frac{f_{c,o,k}}{E_{0,05}}}$$

$$\lambda_y = \lambda_z = l_f\sqrt{\frac{A}{I_G}}$$

Dans notre cas, nous considérerons la longueur de flambement l_f équivalente à l_0 soit 1 000 mm.

Nous avons donc :

$$\lambda_y = \lambda_z = 34{,}64$$

$$\lambda_{rel,y}\lambda_{rel,z} = 0{,}58$$

Pour obtenir le coefficient kc, nous aurons besoin de k (avec β_c=0,2 qui détermine la bonne rectitude du bois massif):

$$k = 0{,}5\left(1 + \beta_c(\lambda_{rel} - 0{,}3) + {\lambda_{rel}}^2\right) = 0{,}696$$

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - {\lambda_{rel}}^2}} = 0{,}925$$

$$\frac{\sigma_{c,o,d}}{f_{c,o,d} * k_c} = \frac{0{,}906}{18 * 0{,}925} = 0{,}054 \leq 1 \Rightarrow OK!$$

4. Cisaillement d'un élément de résille

La configuration de nos éléments de résille peut engendrer un cisaillement au niveau de l'intersection de deux poutres au milieu d'une troisième. Le décalage peut offrir un cisaillement qui nous semblait utile de vérifier.

$$\frac{\tau_{v,d}}{k_v * f_{v,d}} \leq 1$$

Pour déterminer la contrainte de cisaillement de calcul τ_(v,d), nous devons utiliser les valeurs de l'effort tranchant ultime V_u agissant sur une section rectangulaire $b*h_{ef}$ (dans notre cas, nous prendrons h_{ef}=h) :

$$\tau_{v,d} = \frac{3}{2}\frac{V_u}{b * h}$$

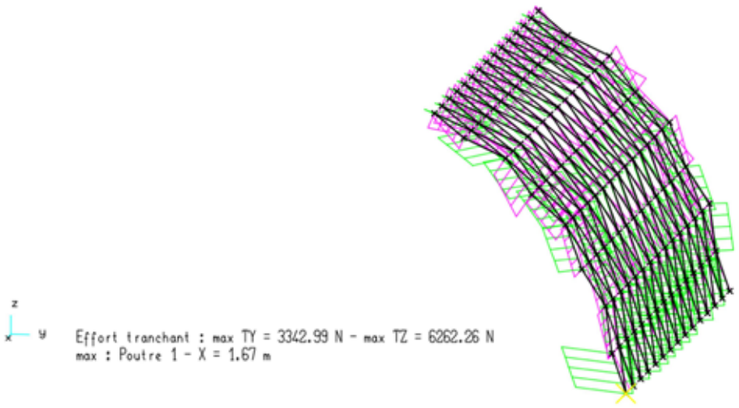


Fig.32 Résultats d'effort tranchant calculé dans les éléments Zollinger (Rdm6)

Selon nos résultats obtenus sur rdm6, l'effort tranchant maximum obtenu dans cet axe est 3 343 N.

$$\tau_{v,d} = 0{,}112$$

La résistance de calcul au cisaillement est quant à elle déterminée en fonction des coefficients k_{mod} et γ_m, qui valent respectivement 0,9 et 1,3, et de la valeur de résistance caractéristique au cisaillement $f_{(v,k)}$ valant 3,8 MPa pour du bois massif D40 :

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} * f_{v,k}}{\gamma_m} = 2{,}631$$

Le coefficient k_v prend en compte l'entaillage de la pièce, ce qui n'est pas notre cas dans la résille. Nous considèrerons donc k_v=1:

$$\frac{\tau_{v,d}}{k_v * f_{v,d}} = 0{,}042 \leq 1 \Rightarrow OK!$$

IV. Conclusion sur les études techniques

La détermination des charges de neige et de vent nous a menées à définir clairement le cas de charge qui nous serait le plus défavorable.

De ce chargement nous avons pu avoir une approche des efforts horizontaux dévoilant une réduction de 29,8 % par rapport à l'effort horizontal calculé par M. Vannucci dans son étude structurelle. La conception de notre résille qui adopte la forme d'une ogive comme une voute gothique permet de rapporter un maximum de charges verticalement et donc d'atténuer considérablement ces efforts qui peuvent facilement contrarier la stabilité des éléments en maçonnerie.

Les vérifications effectuées quant aux résistances de différents éléments de notre résille montrent une grande solidité de cette structure. Les sections retenues dans notre modélisation permettent aux bracons de travailler à 5,4 % et aux poutres de la résille à 11,9 % en compression. De plus, les éléments de Zollinger travaillent «seulement» à 4,2 % au cisaillement au niveau de chaque discontinuité. Nous sommes donc dans une situation où notre structure est largement surdimensionnée.

De ce fait, une variation de la conception de la résille est largement envisageable. Il serait possible de réduire le nombre de motifs dans le sens de la longueur ou alors leurs angles. La hauteur de la poutre treillis peut aussi être réduite, ce qui obligera la résille à adopter une forme d'ogive plus prononcée est donc de diminuer encore plus les efforts horizontaux au niveau des corbeaux.

L'idée de coupler la modularité des paramètres de notre résille avec une optimisation de la section nous permettrait d'obtenir une charpente qui répondrait au maximum de contraintes possibles.

Mise en œuvre

Sécurité incendie

La protection incendie de la charpente est une question essentielle. C'est pour cela que nous allons la segmenter en plusieurs parties. La flèche sera isolée par 4 cloisons coupe-feu. Elle isolera le transept en deux parties. La nef et le chœur seront également divisés en deux parties pour réduire la propagation d'un éventuel incendie et ne pas ravager la totalité de la charpente, mais juste un module de 20 mètres au maximum.

Chaque cloison coupe-feu sera composée d'une structure en bois, sur laquelle une plaque de plâtre sera posée de part et d'autre à l'aide de fixations spéciales pour laisser le bois fléchir sans endommager ces plaques de plâtres. Le bois pourra alors travailler sans risque d'endommager la protection au feu. Elles seront étanches et isolantes au feu pendant 120 minutes (produit Placoplatre BA25).

Pour combler les irrégularités des maçonneries et l'espace entre cette ferme et la voûte, nous allons utiliser des bourrelets coupe-feu et un système de nappe coupe-feu, étanche et isolant au feu pendant 240 minutes (produit NULLIFIRE Smart Protection FJ203 et NAPPES VEDAFEU SV VEDA France). Pour plus de sécurité, nous allons ajouter de la laine de roche entre les plaques de plâtre. Son pouvoir isolant n'est pas son principal atout dans notre cas, c'est une excellente protection contre le feu.

Chaque cloison coupe-feu sera alors capable de retenir un incendie dans un module pendant au moins 120 minutes. La cloison sera naturellement équipée d'une porte coupe-feu résistante au feu pendant au moins 120 minutes. La structure de cette ferme sera suspendue à quelques centimètres de la voûte, mais ne s'appuiera à aucun moment dessus.

Il sera bien entendu possible de modifier cette cloison pour obtenir des temps de résistance au feu plus importante. Le surdimensionnement de notre motif Zollinger assure sa sécurité au feu pendant près de 85 minutes, avant que la résille ne cède et s'effondre. Enfin la passerelle peut rester fonctionnelle lors d'un incendie pendant plus de 35 minutes, sans prendre en compte le revêtement, étant donné que s'il est en feu, son utilisation ne serait plus possible. Mais la structure de la passerelle reste utilisable 35 minutes.

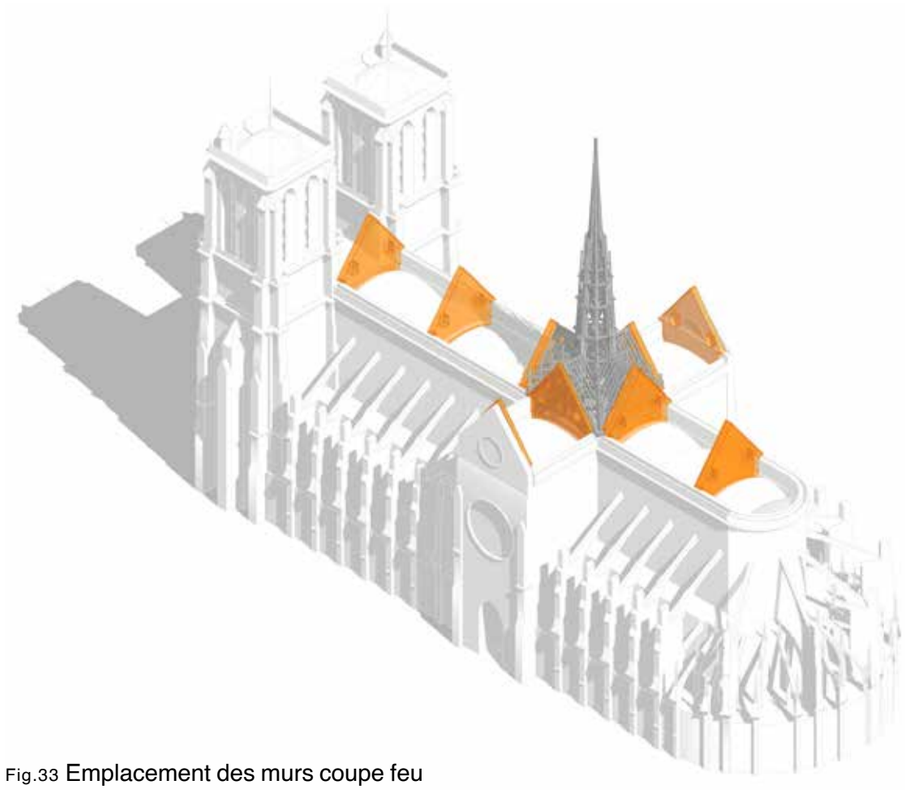


Fig.33 Emplacement des murs coupe feu

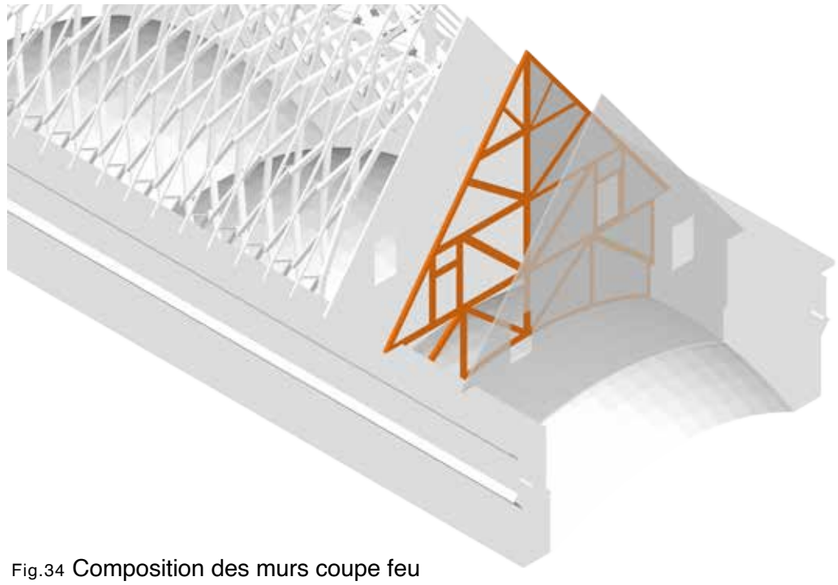


Fig.34 Composition des murs coupe feu

Nous avons aussi prévu en option de mettre un système d'arrêt d'incendie au niveau de la poutre treillis pour éteindre un départ d'incendie le plus rapidement possible et protéger au maximum notre charpente. Nous avons choisi un système d'extinction par mousse et non par eau. En effet, un système aqueux aurait probablement fait autant de dommage qu'un incendie, en détériorant les voûtes et les maçonneries qui n'auraient pas supporté une telle quantité d'eau, comme nous avons pu le constater après ce terrible incendie. Ça aurait donc été un mal pour un bien, en choisissant une solution aqueuse pour éteindre un départ d'incendie.

De plus, avec un système aqueux, il aurait été nécessaire de prendre en compte le risque de gel dans les canalisations pour qu'elles n'explosent pas. Nous avons fait le choix d'une mousse, qui assure l'extinction des incendies à évolution rapide et en préviennent le ré-allumage. L'action d'une mousse à haut foisonnement consiste en particulier à remplir le plus rapidement possible un volume important, afin d'étouffer le feu en empêchant tout apport d'oxygène.

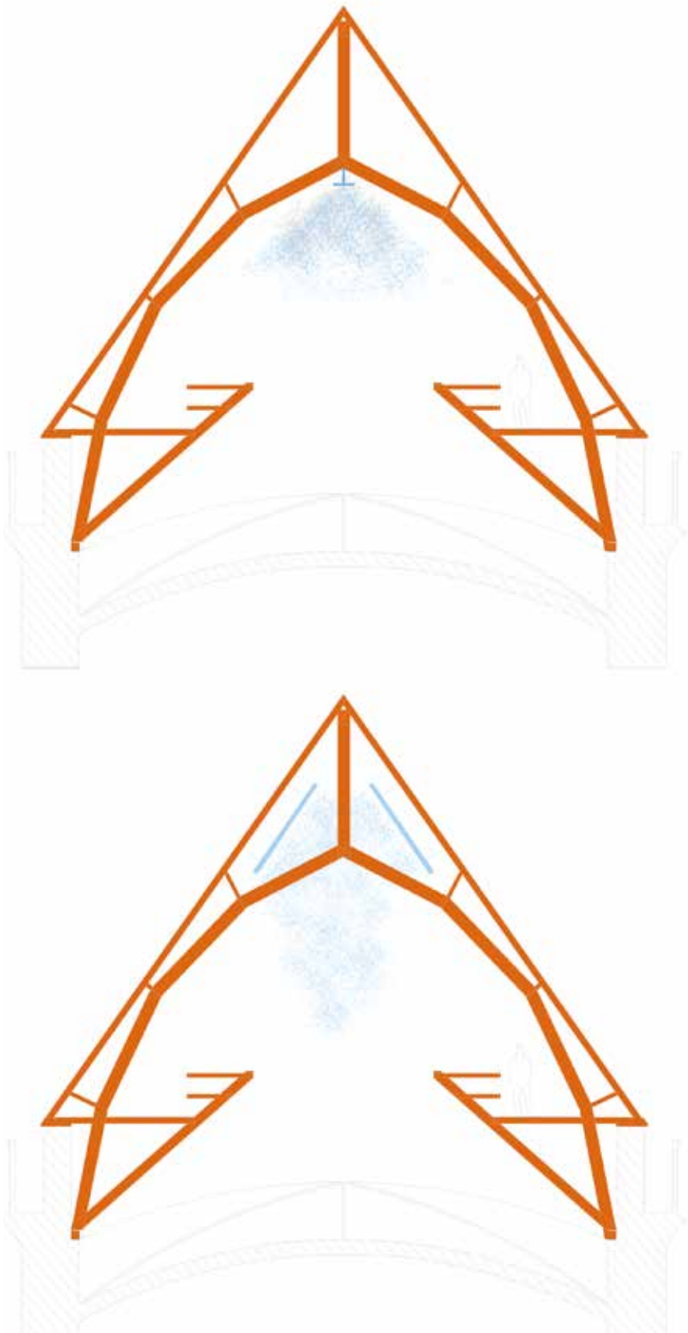


Fig.35 Schémas des possibles systèmes d'arrêt d'incendie

Fabrication et chantier

Nous avons étudié plusieurs cas de chantiers similaires à la mise en œuvre de la charpente de Notre-Dame et nous avons dégagé deux pistes:

La première consiste à pré-fabriquer en atelier sur site un module complet de la charpente et de lever ce module à l'aide d'une grue pour se poser délicatement sur les appuis en attentes.

En effet le système de préfabrication est largement favorable dans ce projet. Il y a plusieurs manières d'envisager le module:

-Charpente Zollinger + Arbalétriers+poutre treillis+ voligeage
-Charpente Zollinger + Arbalétriers+poutre treillis
-Variations de la longueur du module.

Pour l'instant nous avons calculé pour un module de 20 mètres de long fabriqué sur place un poids de la structure avoisinant les 30 tonnes ce qui serait possible de lever avec une grue adaptée à l'envergure du chantier.

La passerelle et la toiture en tuile d'ardoise pourront ensuite être mise en œuvre une fois la charpente établie.

Cette solution a pour avantage de faciliter l'ensemble des assemblages permettant la réalisation de la charpente, mais les opérations de levage seront extrêmement délicates.

Fig.36 Hypothèse 1 - Schématisation du système de préfabrication

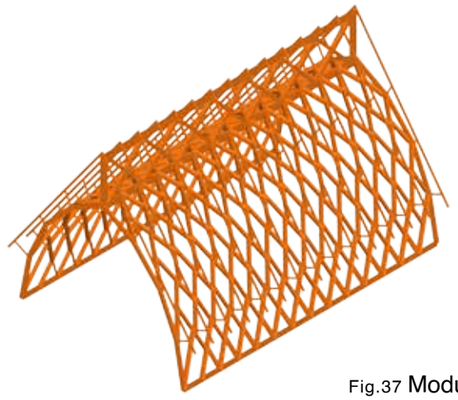
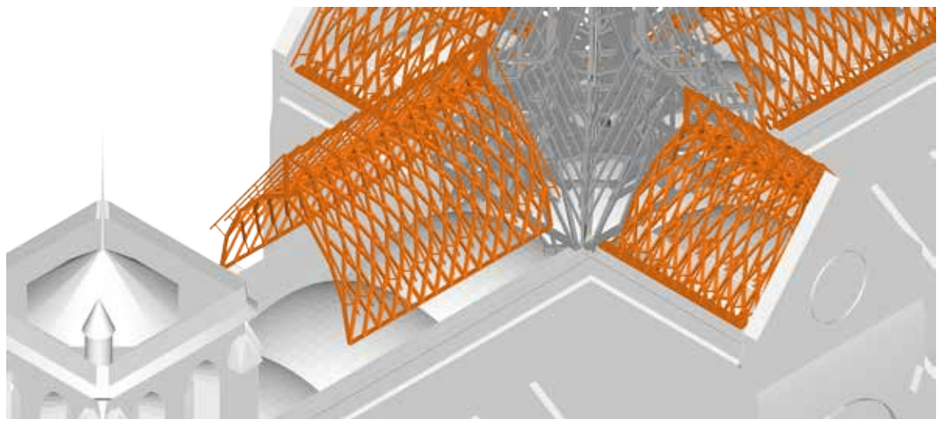


Fig.37 Module de 20m



La seconde hypothèse serait de monter les éléments de la charpente directement sur la maçonnerie et à l'aide d'une structure temporaire. On les assemblerait petit à petit pour ériger la charpente puis la couverture.

Cette solution à pour avantage de faciliter les opérations de levage des bois mais nécessite une précision d'assembler sur site extrême.

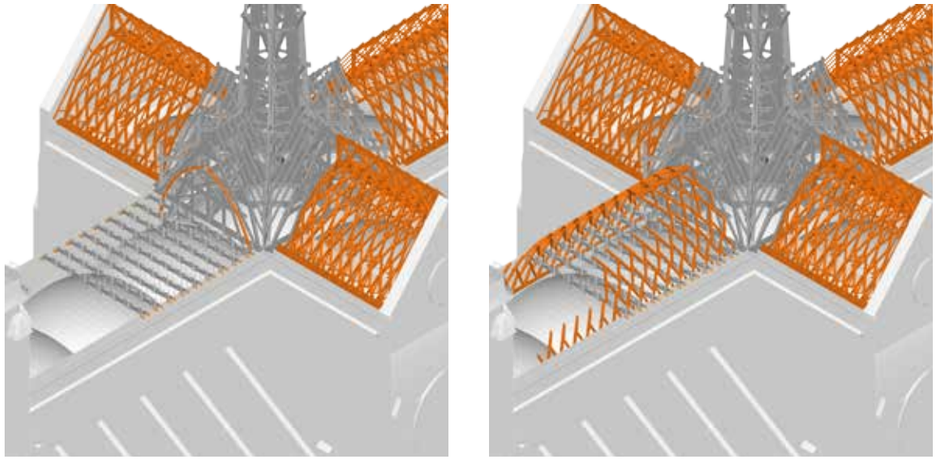
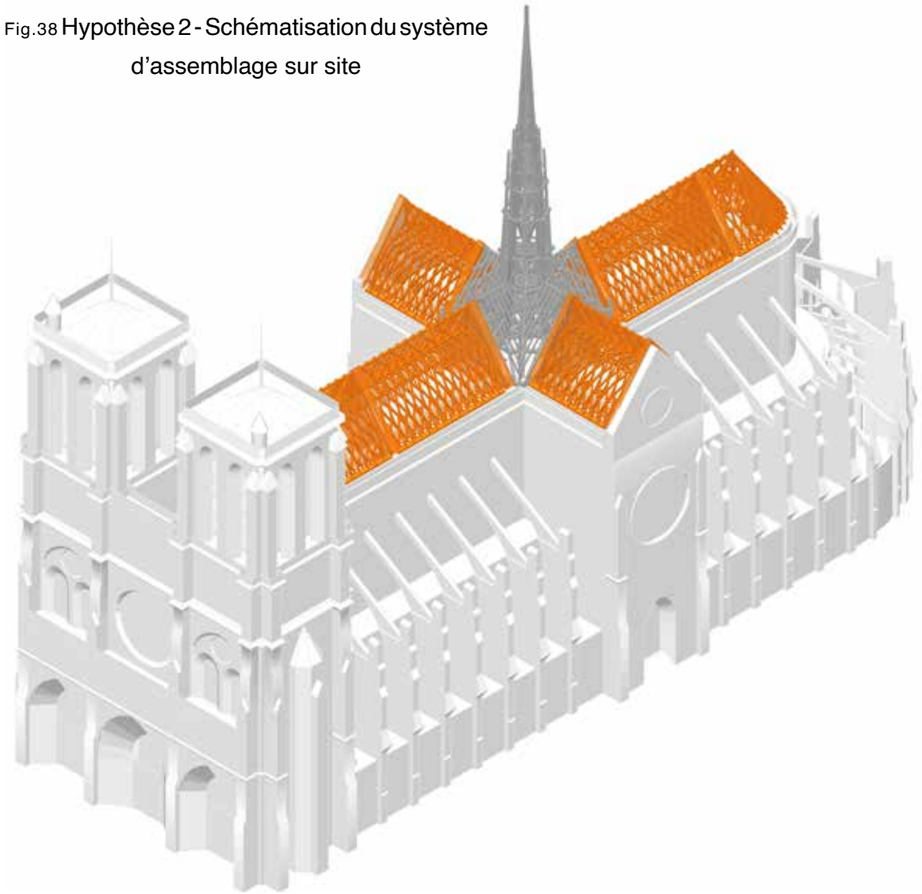


Fig.38 Hypothèse 2 - Schématisation du système d'assemblage sur site



Couverture

Paysage et production

L'ardoise en général

Nombre de monuments historiques et religieux dans Paris intra-muros utilise l'ardoise comme matériau de couverture. Elle est largement mise en œuvre dans le patrimoine français et fait partie d'un savoir faire artisanal bien spécifique. En France il ne reste plus qu'une ardoisière en activité : l'ardoisière de Corrèze.

Nous avons choisi de remplacer le plomb par l'ardoise notamment de part leur colorimétrie similaire. La couleur des ardoises varie en fonction de l'Ardoisière cela dépend du fer ou du calcaire qu'elle contient. Pour autant elle s'assimile assez rapidement à un gris plomb.

La mise en œuvre traditionnelle d'une couverture en ardoise ne nécessite pas de film d'étanchéité. Cela permet une ventilation constante du bois de charpente ce qui est un atout particulier pour Notre-Dame. De même elle ne demande que très peu d'entretien.

L'un des points qui nous a amené à proposer l'ardoise comme matériau de couverture est sa forte inertie thermique. En effet la consommation énergétique de la cathédrale (notamment en chauffage) est un vrai gouffre. Utiliser un matériau à forte inertie permettrait d'aider à maintenir une température plus régulée au sein de l'édifice.

L'ardoise est un matériau géo-sourcé, qui a une longévité dépassant les 100 ans. De part cette qualité elle peut-être largement réutilisée. En réalité se sont souvent les assemblages (clous et crochets) qui s'abîment dans le temps et non l'ardoise en elle même.

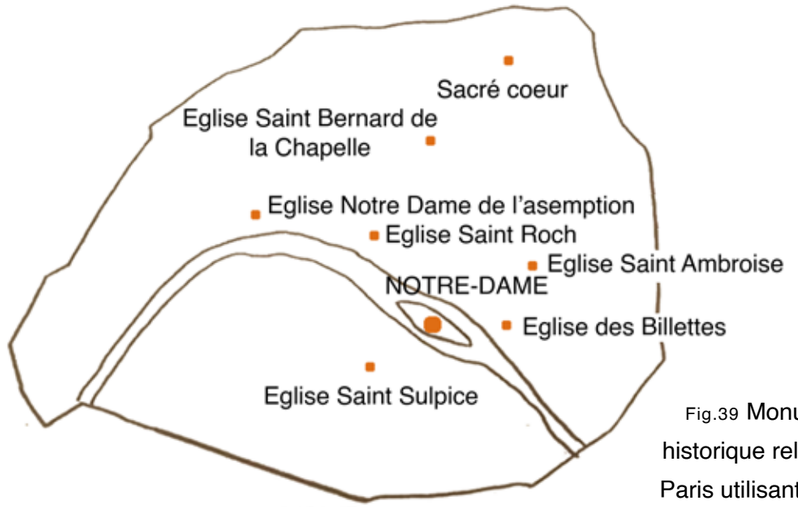
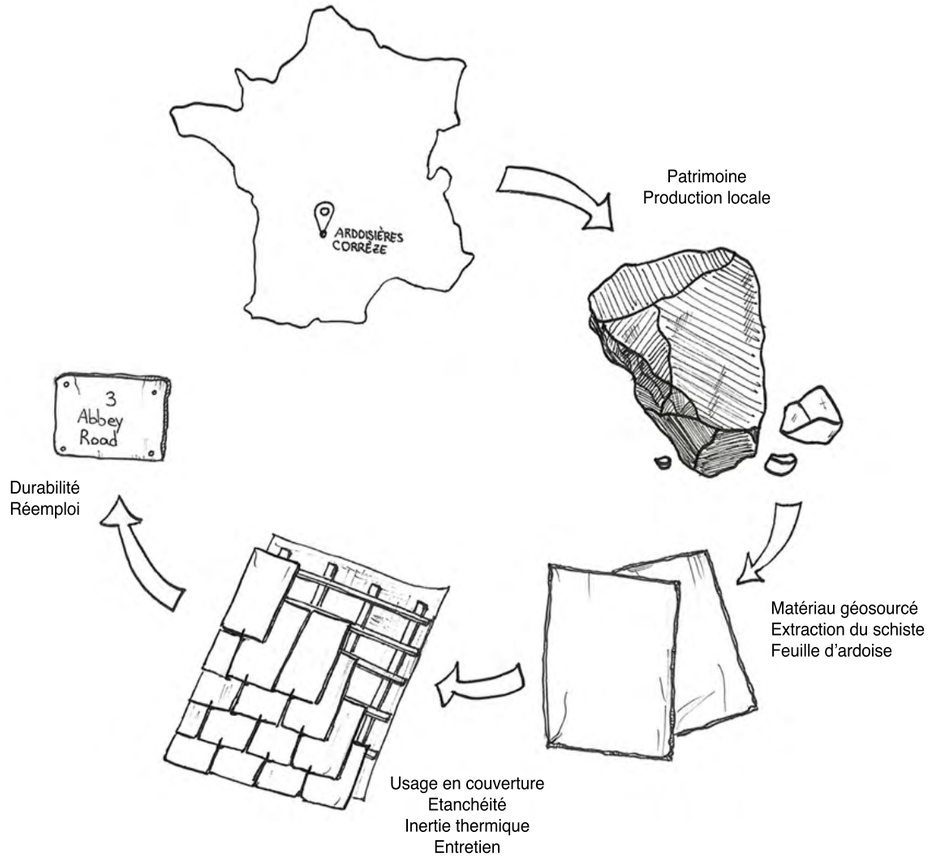


Fig.39 Monuments historique religieux de Paris utilisant l'ardoise



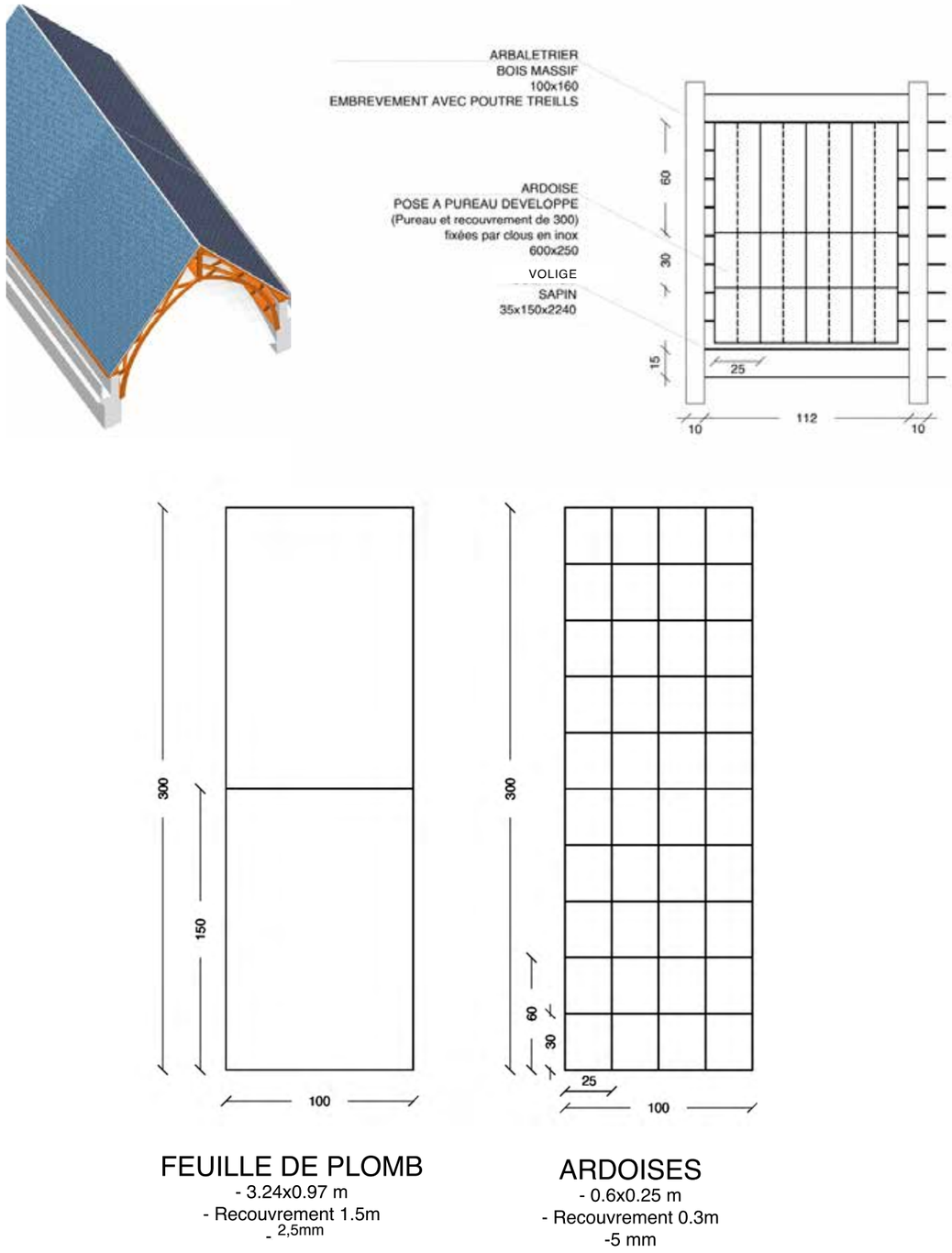
Matière - plomb x ardoise

La couverture en plomb de la cathédrale est composée de feuilles de 2,5mm et d'une dimension de 3,24x0,97 mètres. Le recouvrement est de 1,5 mètre. Chaque feuille pèse chacune 180 kilos. Celle-ci est soutenue par un voligeage.

Pour s'apparenter à la toiture en plomb existante nous proposons une mise en œuvre des tuiles d'ardoise traditionnelle à pureaux développés cloués. Les clous sont en inox, ultra résistants dans le temps. Les tuiles d'ardoise sont d'une épaisseur de 5 mm et de 60x25 centimètres. Le recouvrement est de 30 centimètres. La toiture sera supportée, à l'instar de l'actuelle, par un voligeage en sapin. Chaque volige aura pour dimension 35x150x2240 mm et sera espacée de 5 mm.

Pour atteindre les dimensions d'une feuille de plomb nous avons besoin de 4 tuiles d'ardoise en largeur et de 10 en hauteur.

En conclusion pour une feuille de plomb de 180 kilos nous avons besoins de 80 ardoises de 2,2 kilos. Pour recouvrir l'ensemble de la charpente de Notre-Dame il a fallu utiliser 1326 feuilles de plomb décrites ci-dessus. Il faudra 106080 ardoises pour recouvrir la nouvelle. Le poids total de la future couverture est de 205 tonnes, celle-ci est semblable à l'existante de 210 tonnes.



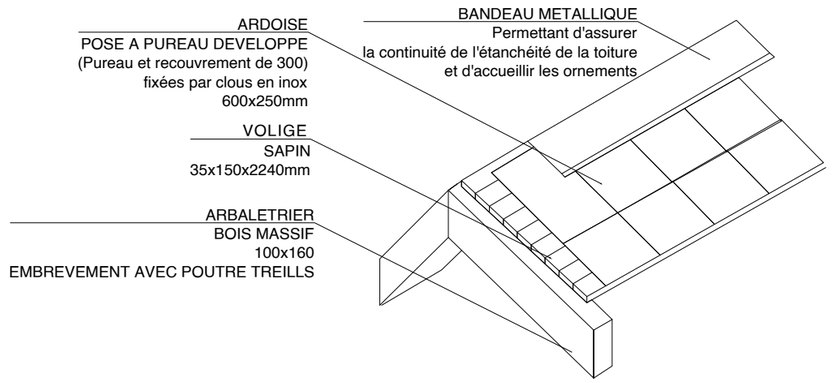
1 feuille de plomb de 180 kg < = > 80 ardoises de 176 kg
1326 feuilles < = > 106080 ardoises
210 tonnes < = > 205 tonnes

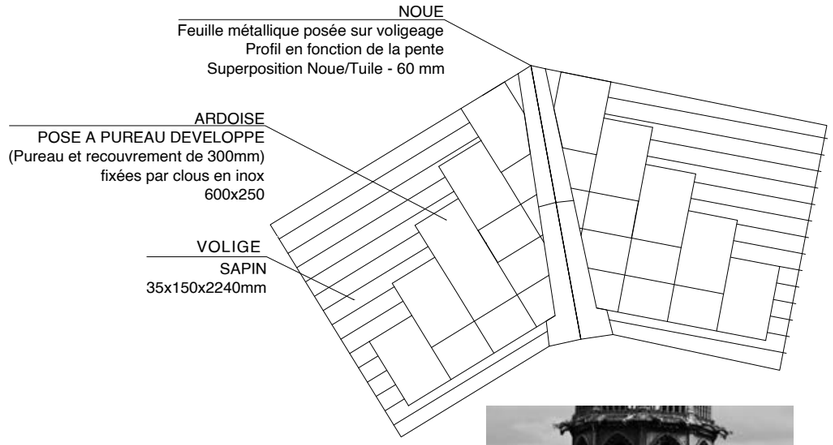
Fig.40 L'ardoise X Le plomb

Ardoise et rencontres

Concernant les noues elles seront constituées d'une feuille métallique posées sur le voligeage en sapin. Leurs développements et leurs profils sont fonctions de la pente de la toiture et de la quantité d'eau à évacuer. Les ardoises devront dépasser de la rive de la noue de 60 mm. Nous utilisons le même procédé de mise en œuvre au niveau de la jonction flèche et de la toiture en tuile d'ardoise.

Pour le faîtage de la nouvelle couverture de Notre-Dame nous proposons de réaliser à l'identique l'ensemble des ornementations. Elles seront maintenues par un bandeau métallique posé au-dessus des tuiles et qui permettra de créer la continuité de l'étanchéité de la toiture entre les 2 pans.





TOITURE DE LA FLECHE
EN PLOMB
(reconstruction à l'identique)

NOUES
Jonction flèche et toiture en ardoises
Feuille métallique posée sur voligeage
Profil en fonction de la pente
Superposition Noue/Tuile - 60 mm

FAITAGE
Permettant d'assurer
la continuité de l'étanchéité de la toiture
et d'accueillir les ornementations
(à l'identique)

FUTURE TOITURE EN ARDOISE
Pose à pureaux dévellopés
(Pureau et recouvrement de 300mm)
fixées par clous en inox
600x250

Fig.41 L'ardoise et rencontres

Conclusion

La charpente médiévale qui soutenait la toiture de la cathédrale depuis son édification, constituée de grandes fermes en chêne massif, est presque toujours restée cachée aux yeux du grand public et c'est lors de travaux de recherche et de restauration qu'on a pu découvrir la richesse constructive de cette charpente qui reflétait le savoir-faire d'une époque lointaine.
Au lieu de vouloir reconstituer cette charpente à l'identique, c'est cette idée de « Boîte de Pandore » que le projet veut retrouver en traçant alors une nouvelle page de l'histoire de la cathédrale avec une nouvelle charpente contemporaine digne du savoir-faire constructif en bois d'aujourd'hui pour que plus tard encore de nouvelles générations puissent redécouvrir ce nouvel épisode de la vie de la cathédrale.
Cette intervention contemporaine se fait alors dans le respect de la restitution de la volumétrie extérieure originale de la cathédrale et fait écho à l'audace dont faisait preuve l'architecture gothique pour s'élever en toute légèreté.

Remerciements

Pour conclure, Merci à toutes les personnes qui nous ont accompagnées et qui ont contribuées à nous donner l'occasion de travailler sur ce sujet passionnant qu'est celui de la Cathédrale de Notre-dame de Paris.
Merci pour votre Attention.

Références bibliographiques

Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle, 1854-1868 - BNF et 1866 - BNF

Kinda FARES. L'Industrialisation du logement en France(1885 - 1970) : De la construction légère et démontable à la construction lourde et architecturale, Architecture, Aménagement de l'espace. Conservatoire des arts et métiers - CNAM, 2012. Français. NNT : 2012CNAM0799. tel-00727276

Sites (consultés entre octobre et décembre 2020) :

hermetism.free.fr/viollet-le-duc_architect.htm

roofstructures.tumblr.com

tennidelacavalerie.fr - Dossier de presse

Modèle de base de la flèche - MI Tek.