

# *Le rêve modulaire*

Restauration de la toiture de Notre-Dame de Paris

Master 2 « Architecture Bois Construction » - 2020

Cahier de présentation



Maxence LEBOSSÉ

Michel RAMOS

Vincent MASGONTY

Angela Tatiana ARIAS TEATIN

Mélaine DE BACKER



# Preface

Ce cahier de présentation a été réalisé dans le cadre du projet du master Architecture, Bois, Construction. Il explique la manière dont nous, le groupe E, avons abordé la charpente de Notre-Dame de Paris afin de concevoir notre projet.

La cathédrale Notre-Dame de Paris, située sur l'île de la Cité, est un lieu de culte catholique, siège de l'archidiocèse de Paris, qui a connu un incendie le 15 Avril 2019. Cet incendie a détruit la flèche et la totalité de la toiture couvrant la nef, le chœur et le transept. Il a également fait plusieurs dégâts sur la maçonnerie et les voûtes de ce monument.

Notre-Dame est, depuis cette date, fermée au public pour une durée indéterminée.

Le projet conduit par Franck Besançon et Gilles Duchanois propose aux étudiants d'imaginer une nouvelle charpente tout en prenant en compte le passé de ce monument historique et la promesse du président Emmanuel Macron, qui a promis sa réouverture au public pour 2024.



## Introduction



Au sein de notre équipe, E, ont concouru à ce projet :  
Mélaine de Backer, Architecte DE, diplômée de l'ENSA Nantes, Vincent Masgonty, Etudiant Ingénieur 3A à l'ENSTIB, Michel Ramos, Ingénieur/Architecte diplômé du Politecnico di Milano et de l'ESTP Paris, Angela Tatiana Arias Teatin, Ingénieure civile diplômée de l'Université Piloto de Colombie, Maxence Lebossé, Architecte DE, diplômée de l'ENSA Strasbourg.

Ensemble, nous avons mis en commun nos compétences pour concevoir à cinq, dessiner à dix mains, et qualifier le fonctionnement structurel de notre projet. En essayant de franchir les limites de nos disciplines personnelles pour en fabriquer une commune mise au service de notre proposition de charpente.

Notre première analyse s'est faite avec la production commune de documents réunissant les principales propriétés de la cathédrale. Nous avons donc pu nous rendre compte de l'ampleur du site avec les différents aspects à traiter. C'est là que nos premières intuitions sur le devenir du lieu, dans le cadre de ce projet, sont nées.

Nous n'avons malheureusement pas pu être présents sur le site en vue de la situation sanitaire que nous connaissons en 2020 mais également à cause de la toxicité rejetée par le plomb qui a fondu lors de l'incendie et est descendu dans les maçonneries. Nous avons donc réalisé des recherches historiques et des analyses constructives. Ce travail a été réalisé en groupe. Il nous a permis de comprendre les évolutions du lieu et les besoins pour son futur.



# Sommaire

<b>Préface</b>	<b>3</b>				
<b>Introduction</b>	<b>5</b>				
<b>Sommaire</b>	<b>7</b>				
<b>Notice architecturale</b>	<b>8</b>	<b>Notice descriptive</b>	<b>12</b>	<b>Notice technique</b>	<b>42</b>
<b>1_Genèse</b>	<b>8</b>	<b>5_La charpente</b>	<b>12</b>	<b>7_Prévention incendie</b>	<b>42</b>
<b>2_La modularité</b>	<b>8</b>	5a_Les Portiques	12	7a_La veille	42
<b>3_Dessin et dessein (Approche esthétique)</b>	<b>8</b>	5b_Les modules des Fermes	14	7b_Le compartimentage	43
<b>4_Composition (Approche technique)</b>	<b>10</b>	5c_Les modules de l'Abside	18	<b>8_Processus de mise en oeuvre</b>	<b>47</b>
		5d_Les modules de la Croisée des Transepts	24	8a_La fabrication	48
		5e_Les modules de la Flèche	30	8b_Le montage	48
		<b>6-La couverture</b>	<b>34</b>	<b>9_Notes de calcul</b>	<b>49</b>
		6a_La matière	34	9a_Modules Ferme	49
		6b_Du faîtage au chéneau, le dessin de la couverture	35		
		6c_Couvrir la flèche	40	<b>Maquette finale</b>	<b>52</b>
				<b>Remerciements</b>	<b>57</b>
				<b>Bibliographie</b>	<b>58</b>

# Notice architecturale

## Genèse

Notre projet et son processus créatif, n'est pas né d'une intention architecturale mais s'est amorcé par la définition d'un ensemble de paramètres, auxquels la charpente devait se confronter pour trouver sa réalité construite, dans son contexte, celui d'une cathédrale ayant subi un incendie d'une grande violence et dans son époque, le 21ème siècle.

Au sein de notre équipe nous avons débattu du bien fondé de proposer une charpente "nouvelle", face à un projet de restitution de la charpente originelle, qui semble faire consensus, non seulement au sein de l'opinion publique, que de la communauté scientifique. Cependant, parce que nous sommes inscrits dans un cadre d'études, au sens propre du terme, nous avons fait le choix de nous pencher sur un "scénario de mise en œuvre" qui soulève un ensemble de questions, autant qu'il tente de répondre à un panel de problématiques.

## Modularité

La conception modulaire est un «marronnier» dans la pratique architecturale. Parmi nos camarades nous avons donc aussi souhaité défendre cette position pour en étudier les avantages et inconvénients, pour la conception d'une charpente de cathédrale. Par ailleurs, au sein même de la charpente originelle, notre regard contemporain voit dans les fermes principales accompagnées de leurs fermettes, un ensemble statique cohérent formant un module.

Le module est né avec l'architecture moderne, et continue encore de nos jours de nourrir la pensée des esprits créatifs. En ce sens, nous pensons que le module est

l'aboutissement d'une manufacture de précision. Le fruit d'une recherche et de développement consciencieux avant d'être l'apanage des processus industriels et de standardisation.

La conception modulaire fait preuve d'une grande précision d'exécution et de mise en œuvre au service de la valeur inestimable de la cathédrale.

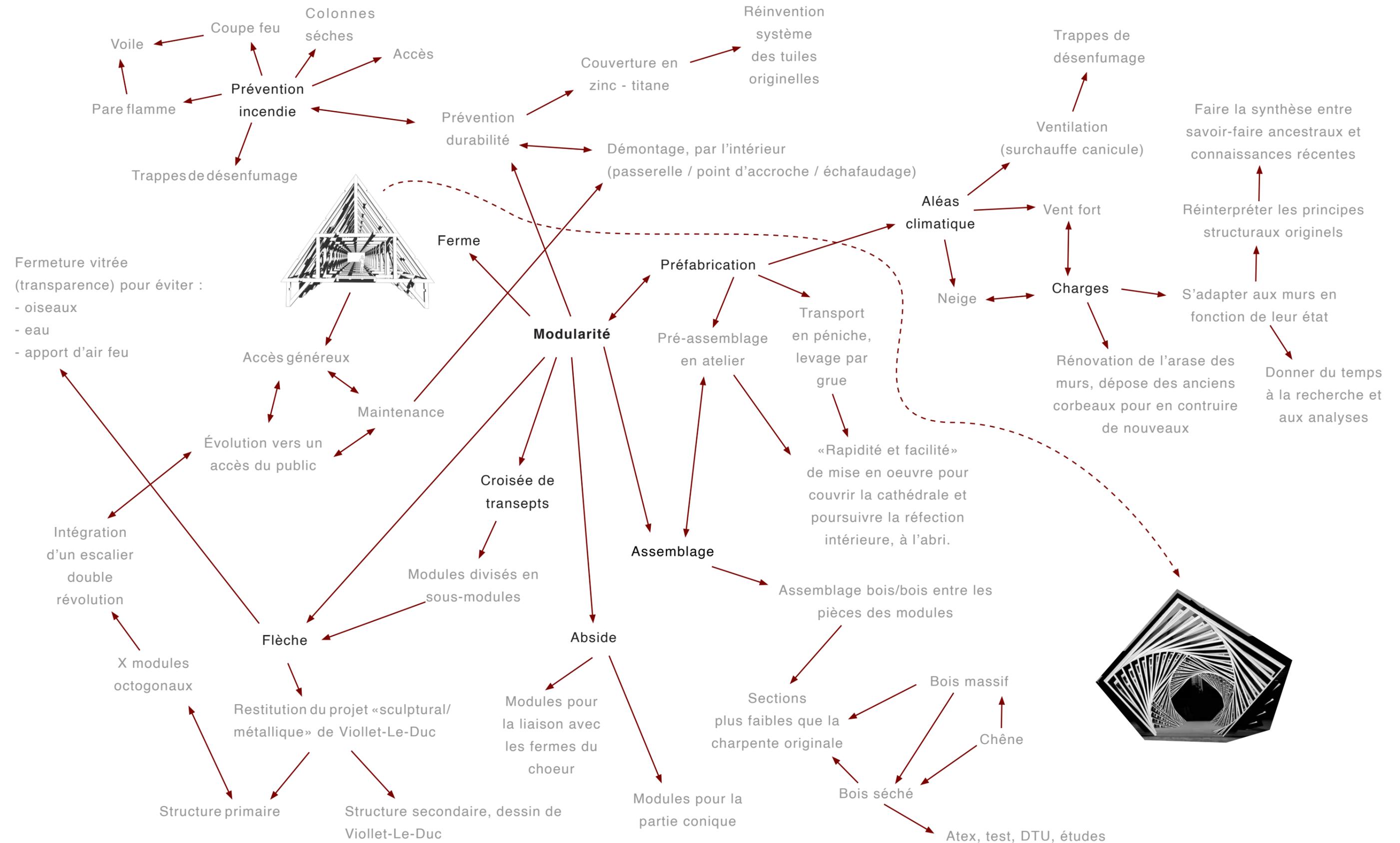
Mais la modularité peut aussi répondre à une volonté de rapidité de reconstruction. Garantissant dans un délais restreint le retour de la silhouette de la cathédrale dans le paysage de Paris, mais aussi, la restauration des espaces intérieurs, ce qui permettrait de retrouver la pratique des cultes et des visites.

Comme nous le verrons plus après dans la description du projet, notre intention n'est pas d'écarter les savoirs ancestraux des compagnons charpentiers, mais davantage faire la synthèse entre connaissances artisanales et processus industriels, qui eux aussi reposent sur des savoirs faire humains et techniques.

Le processus de fabrication des modules est optimisé, et raccourcit les délais du chantier en facilitant la mise en œuvre in situ de la charpente par un assemblage en atelier, en amont.

## Dessin et dessein (Approche esthétique)

Le dessin de la charpente dans son ensemble répond en premier lieu à sa logique constructive modulaire. Les traits de charpente sont épurés pour former une ossature essentielle. Cette simplicité, nous ne l'avons pas souhaitée dépourvue de sens ni de symbolique.





La croix latine



L'arborescence



La forêt

Deux images ont guidées notre conception :

- La croix latine, parce qu'elle représente la foi chrétienne, elle renvoie au plan même du lieu de culte qu'est la cathédrale. Et à l'instar de la croix de Saint-André, elle est un trait de charpente en soi.

- La forêt, qui fut le "toponyme" de la charpente originelle, retrouve dans notre projet toute la primeur de son expression. Poinçons et faux-entrants dessinent des silhouettes d'arbres dans la perspective de l'espace intérieur de cette charpente. Un espace, presque un lieu en soit, que nous avons souhaité libre, comme pour fabriquer une voûte végétale abstraite.

Dessin et dessein se conjuguent dans un langage contemporain, afin de restituer de façon subtil l'esprit de l'époque, et véhiculer les images liées à l'histoire de la charpente de Notre-Dame de Paris.

### Composition (Approche technique)

Ce principe de modularité nous a invité à préciser la composition de la charpente. Cette dernière se scinde en parties elles-même subdivisées en plusieurs niveaux de modules. Nef, Transepts, Chœur, Abside, Croisée des transepts et Flèche forment donc, selon la logique originelle de la charpente de la cathédrale, les six parties majeures.

- Nef, Transepts, Chœur, se basent sur le même dessin de module, qui s'adapte selon la situation. Un module lui-même divisé en deux parties, un pour chaque pans de toiture, qui peuvent être facilement levés du parvis jusqu'au-dessus des voûtes. Trois modules singuliers

viennent compléter cet ensemble, ils sont situés aux pignons, ouest, nord et sud.

- La croisée des transepts, divisée en quatre parties, assure la liaison entre les parties précédemment citées et constitue le socle statique de la flèche. Assurant son assise et le report des charges qui en découlent.

- L'abside, elle aussi composée de quatre parties, deux quarts de cônes joints aux modules du chœur par deux modules singuliers, hybrides. Ils complètent et referment l'ensemble de la charpente posée sur les murs gouttereaux.

Ce premier grand ensemble de charpente repose sur un maillage de portiques et de pannes, qui assure à la fois, la descente des charges au bas des murs gouttereaux, ainsi que le contreventement en partie basse. (Nous détaillons la logique constructive de cet élément dans la notice technique).

- La flèche est composée de dix modules, eux-mêmes scindés en huit éléments. C'est en particulier la modularité de cette partie de la charpente qui permettrait d'optimiser le temps de reconstruction. Comme nous le montrerons plus tard dans ce cahier, les modénatures de la flèche et sa structure porteuse peuvent être réalisées en un même temps, puis assemblées une fois réunies sur le chantier. Évitant les déploiements fastidieux d'un vaste échafaudage au-dessus de la toiture de Notre-Dame pour permettre la réalisation in situ de la couverture métallique qui enveloppe la flèche.

Schéma représentant le dessin de la charpente avec sa logique constructive modulaire

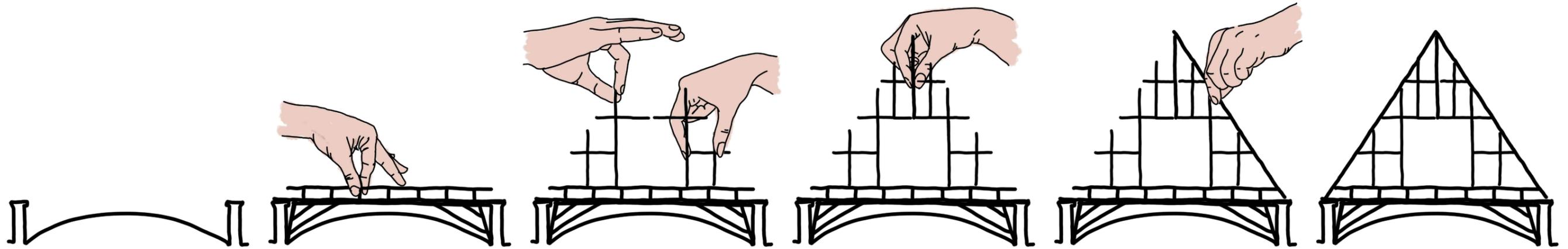
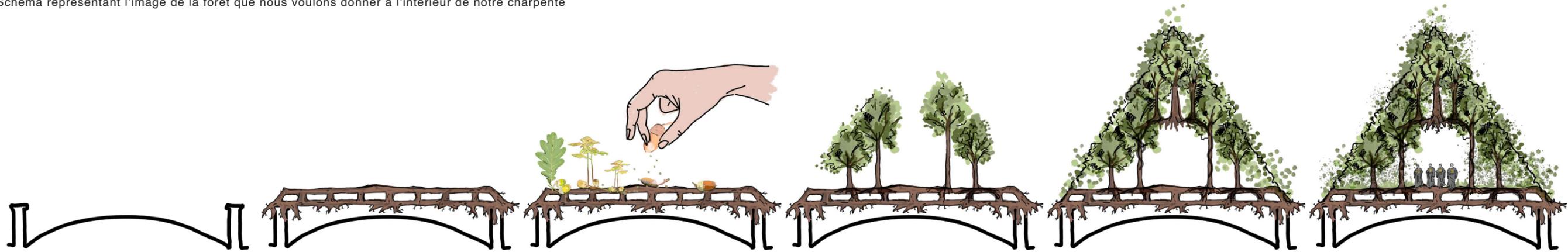
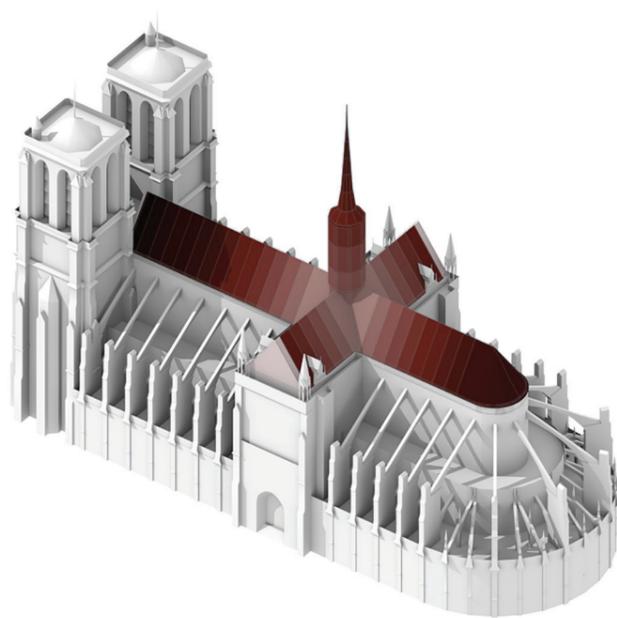


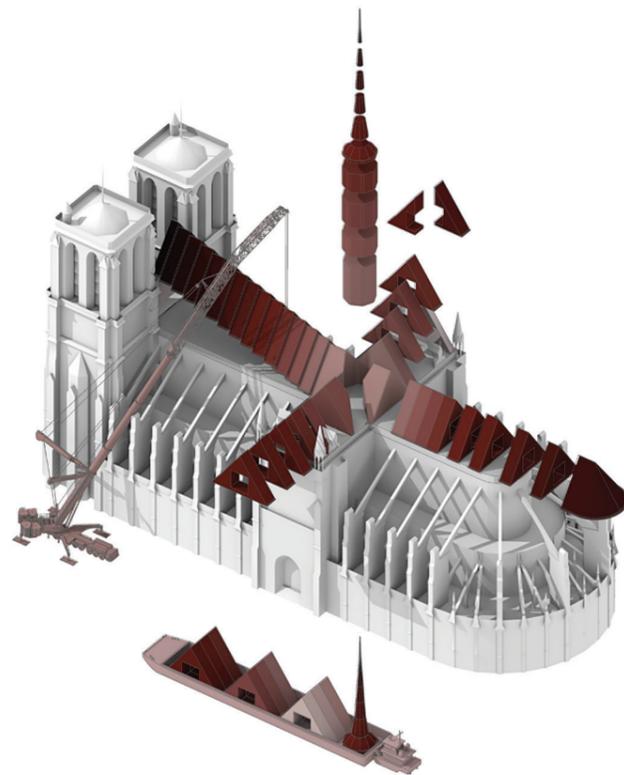
Schéma représentant l'image de la forêt que nous voulons donner à l'intérieur de notre charpente



## Notice descriptive



Schema d'ensemble de la toiture de Notre-Dame



Schema de décomposition de la charpente et de la toiture de Notre-Dame

### La charpente

Nous décomposons ci-après la description de la charpente telle que nous l'avons conçue. Dans un premier temps, nous traiterons de la partie se situant au-dessus de l'extrados de voûtes : le maillage de portiques et pannes. Puis, nous poursuivrons par la description des modules de Fermes, de la Nef, des Transepts, puis du Chœur, pour terminer avec l'Abside. Enfin, nous développerons la structure de la Croisée des Transepts, pour en arriver à celle de la Flèche.

#### *Les Portiques*

Ce sont les racines de la charpente. C'est aux portiques que revient la tâche de répartir les charges au bas des murs gouttereaux. Ils portent les modules des Fermes et de l'Abside, et participent au contreventement général de la charpente par l'intermédiaire de pannes, qui disposées en quinconces et encastrés à mi-bois constitue un maillage continu et indéformable.

C'est sur ces pannes que viennent s'encaster à leur tour les modules des Fermes. La distinction constructive entre portique et modules nous permet de constituer un plancher au-dessus de l'extrados de voûtes sans que l'orthogonalité des modules ne rentre en conflit avec les défauts de parallélisme des murs gouttereaux de la cathédrale. Chaque portique à sa propre dimension déterminée par sa position dans la toiture.

Ici, la démarche paramétrique et l'usage de la maquette numérique issue des scans de la toiture de Notre-Dame prennent tout leur sens. Au regard, tout à la fois de la forte détérioration des corbeaux lors de l'incendie, et de l'incompatibilité de notre système constructif avec la

disposition antérieure de ces derniers. Nous proposons d'opérer la rénovation et d'étendre l'emploi de ces éléments maçonnés. Ainsi sur la base du relevé numérique, nous pouvons paramétrer la disposition des corbeaux et des portiques afin qu'ils trouvent place entre deux parties opposées de murs les plus parallèles entre elles et selon un pas d'entraxe donné.

Afin de parfaire le maillage, chaque pannes, à l'instar des portiques, disposent de sa situation propre et référencée. En effet les pannes sont disposées de telle manière qu'elles sont implantées de façon perpendiculaire aux modules des Fermes. C'est de nouveaux par l'intermédiaire d'un double numérique de la charpente que peuvent être situées et dessinées avec précision les découpes, légèrement obliques, nécessaires à l'emboîtement des pannes avec la poutre supérieure des portiques.

Chaque portique se compose de trois poutres superposées assemblées par un ensemble de clavettes en bois dur. Aux extrémités, les poutres supérieures et intermédiaires viennent buter contre le débord de l'arase des murs gouttereaux, la poutre inférieure vient se loger sous le débord de l'arase et s'insère en haut d'un poteau en appuis sur le corbeau, par un assemblage moisé/moisant. Afin de contenir les possibles déformations du bois dans le temps et l'espace, l'assemblage de trois poutres est maintenu moisé entre deux contrefiches. Ce dispositif permet de reprendre les charges plus au centre des poutres afin de le reporter au poteau et ainsi le transmettre au droit du mur gouttereau.

Figure 1 : Axonométrie de composition des portiques, échelle 1/50eme

Figure 2 : Axonométrie éclatée montrant la disposition des portiques, sans échelle

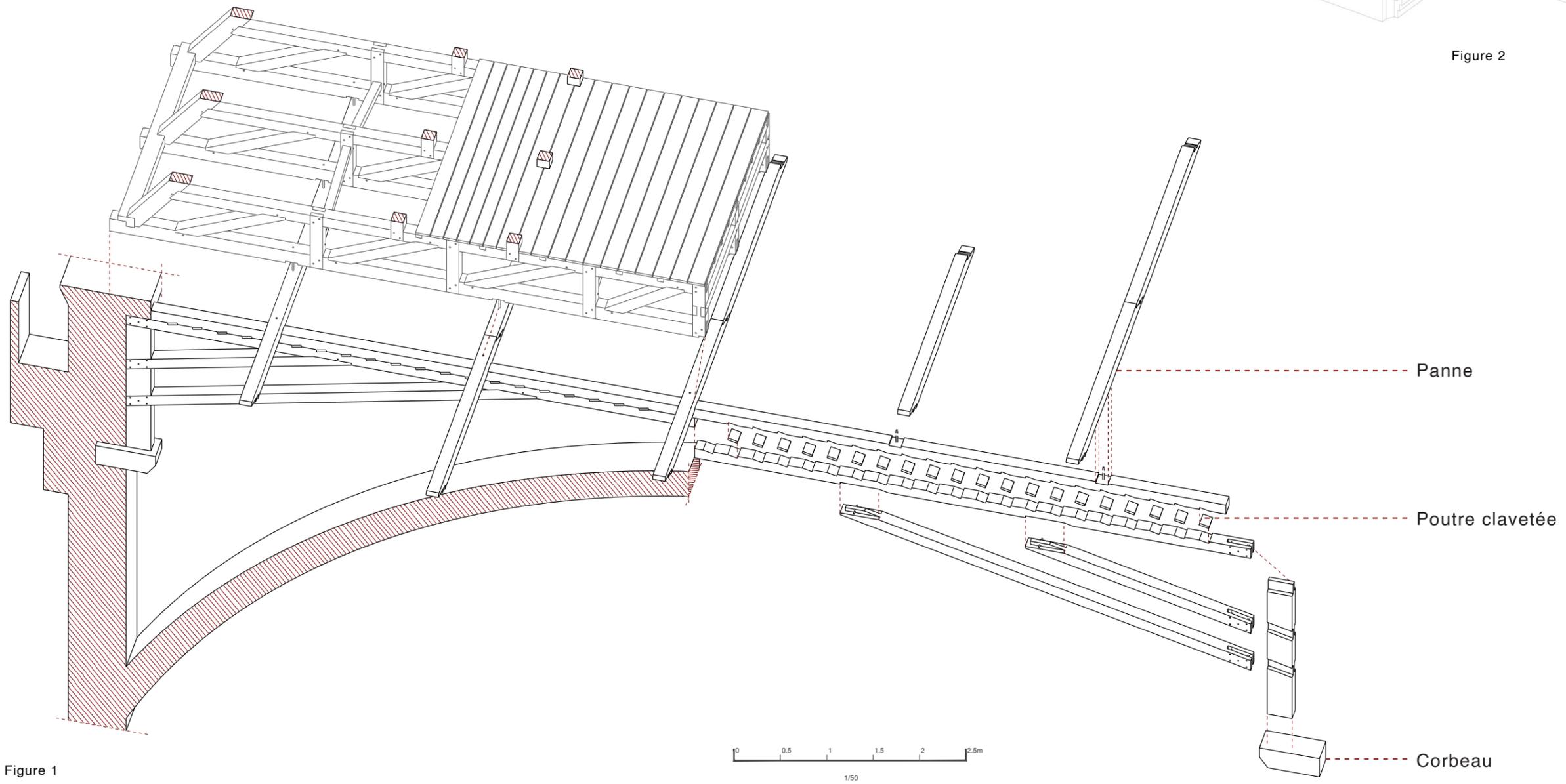


Figure 1

Figure 2



Photo prise de l'intérieur de la charpente de la nef de Notre-Dame de Paris, donnant une vue sur la rosace.



Photo prise de l'intérieur de la charpente de la nef de Notre-Dame de Paris, donnant une vue sur la rosace.

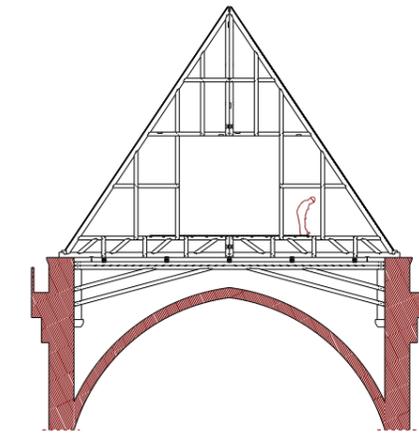
### Les modules des Fermes

Les modules Ferme sont donc subdivisés en deux demi modules qui se font face au-dessus des voûtes. Nous avons fait le choix de conserver des sections complètes et donc d'avoir ces sections doublées, aux niveaux de linéaires contiguë de chaque modules. Les sections de bois qui composent les modules sont optimisées pour garantir une tenu statique du demi-module en son poids propre, mais aussi lors de son transport et de sa mise en œuvre. Évitant ainsi le recours à un étayage, qui augmente la consommation de bois et la durée du chantier. Le surdimensionnement des sections aux linéaires de rencontres de chaque modules contribue cependant à garantir la durabilité de la charpente dans le temps, ainsi que la solidité de l'assemblage entre modules.

Enfin, le surdimensionnement des sections des modules Ferme se fait dans la mesure où nous employons le zinc titane en couverture. Ce matériau plus léger que le plomb (7200 contre 11200 kg/m<sup>3</sup>) nous permet donc de renforcer les performances structurelles de notre charpente, tout en maintenant un poids total similaire à la charpente originelle. Une légèreté trop importante pourrait nuire à la tenue de la charpente dans le temps, en particulier face à des vitesses de vents élevées.

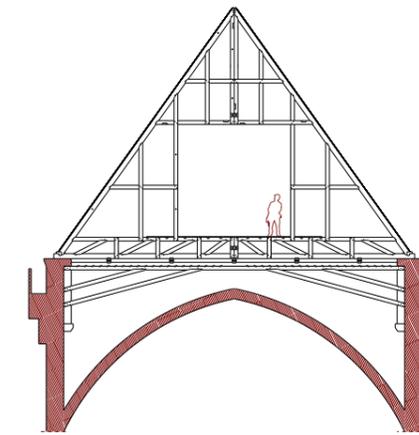
On trouve dans les modules de Fermes quatres types majeurs d'assemblages :

Le poinçon est en son haut assemblé avec l'arbalétrier par un tenon/mortaise chevillé (tige filetée de 16mm avec cloche sur la face extérieur du module). À sa rencontre avec les faux entrants, le poinçon peut y être assemblé soit à mi bois (et chevilles), soit en bout, en moisant/moisé.



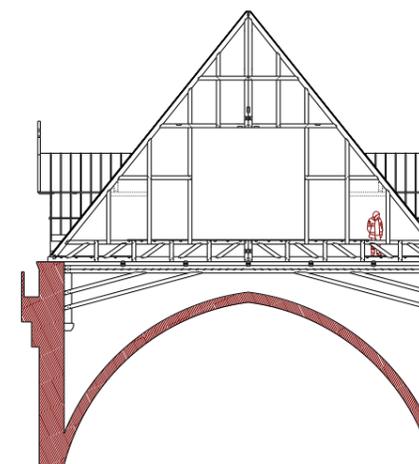
Choeur

Ouverture 4x4 m



Nef

Ouverture 4,5x4,5 m



Transept

Ouverture 4,5x4,5 m

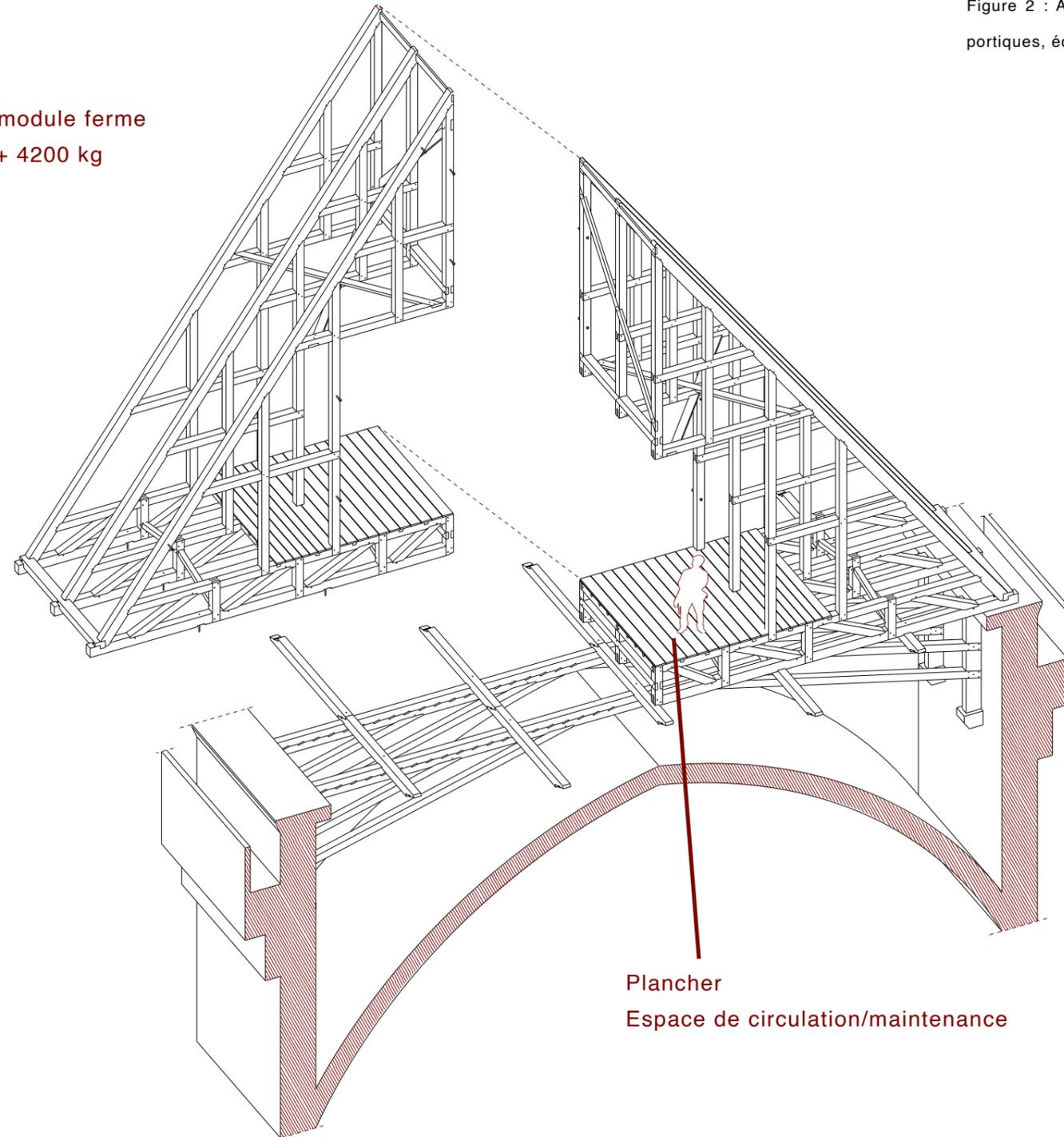


Figure 1

Figure 1 : Coupes des modules Fermes à leur emplacement respectif, échelle 1/500eme

Figure 2 : Axonométrie du montage des modules Fermes sur les modules des portiques, échelle 1/100eme

Sous-module ferme  
6 m<sup>3</sup> + 4200 kg



Module ferme 12m<sup>3</sup>  
Poids 8520 kg

Module ferme 4m<sup>3</sup>/mL  
Ferme originelle 4,14 m<sup>3</sup>/mL

Plancher  
Espace de circulation/maintenance

Figure 2



Figure 1 : Axonométrie éclatée du module Fermes dans la nef, montrant le dispositif de mise en place de la couverture, échelle 1/200eme

Figure 2 : Axonométrie éclatée d'un module de ferme montrant les différents assemblages, échelle 1/50eme

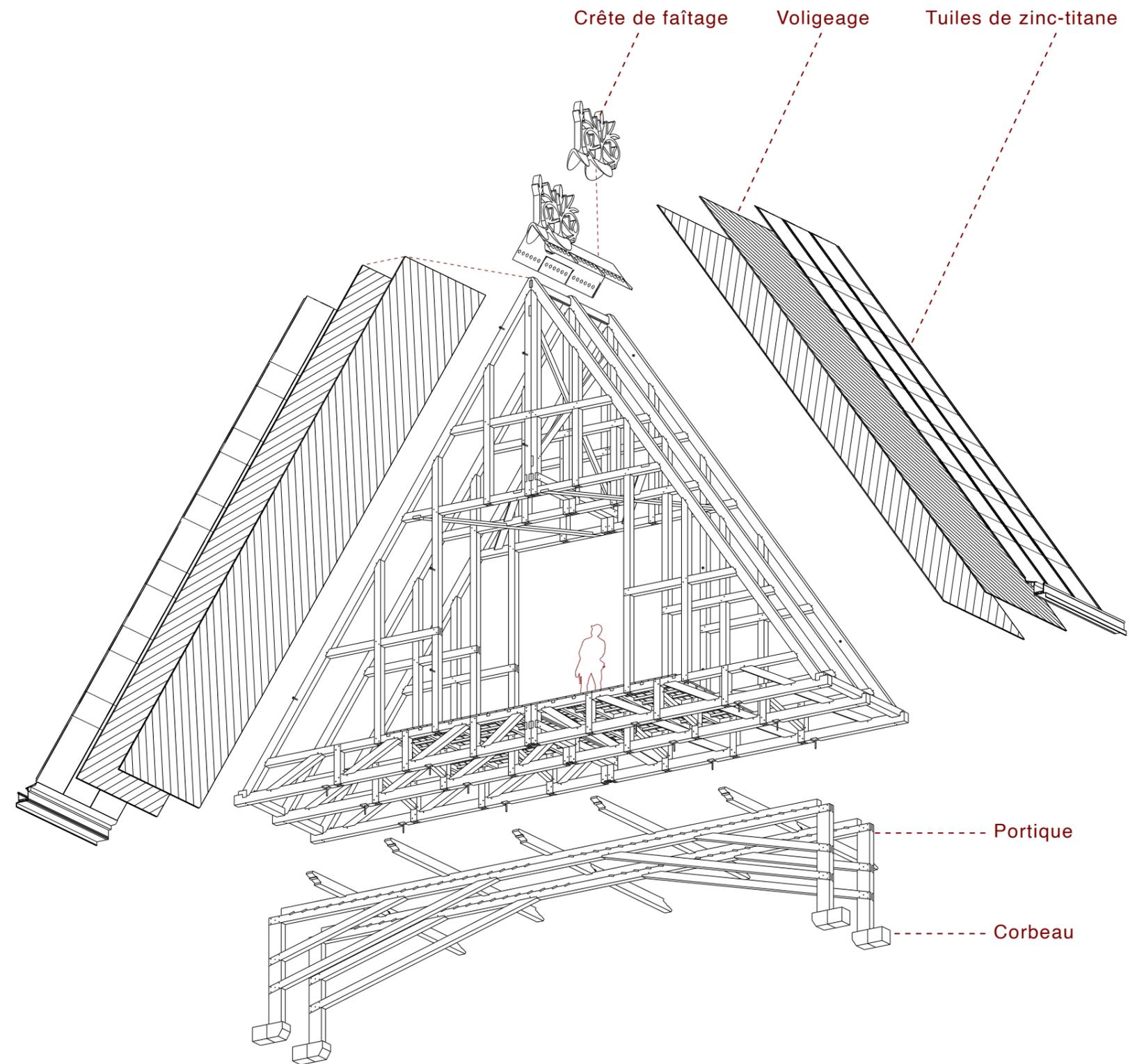
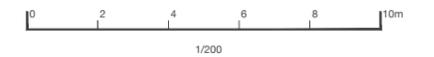


Figure 1



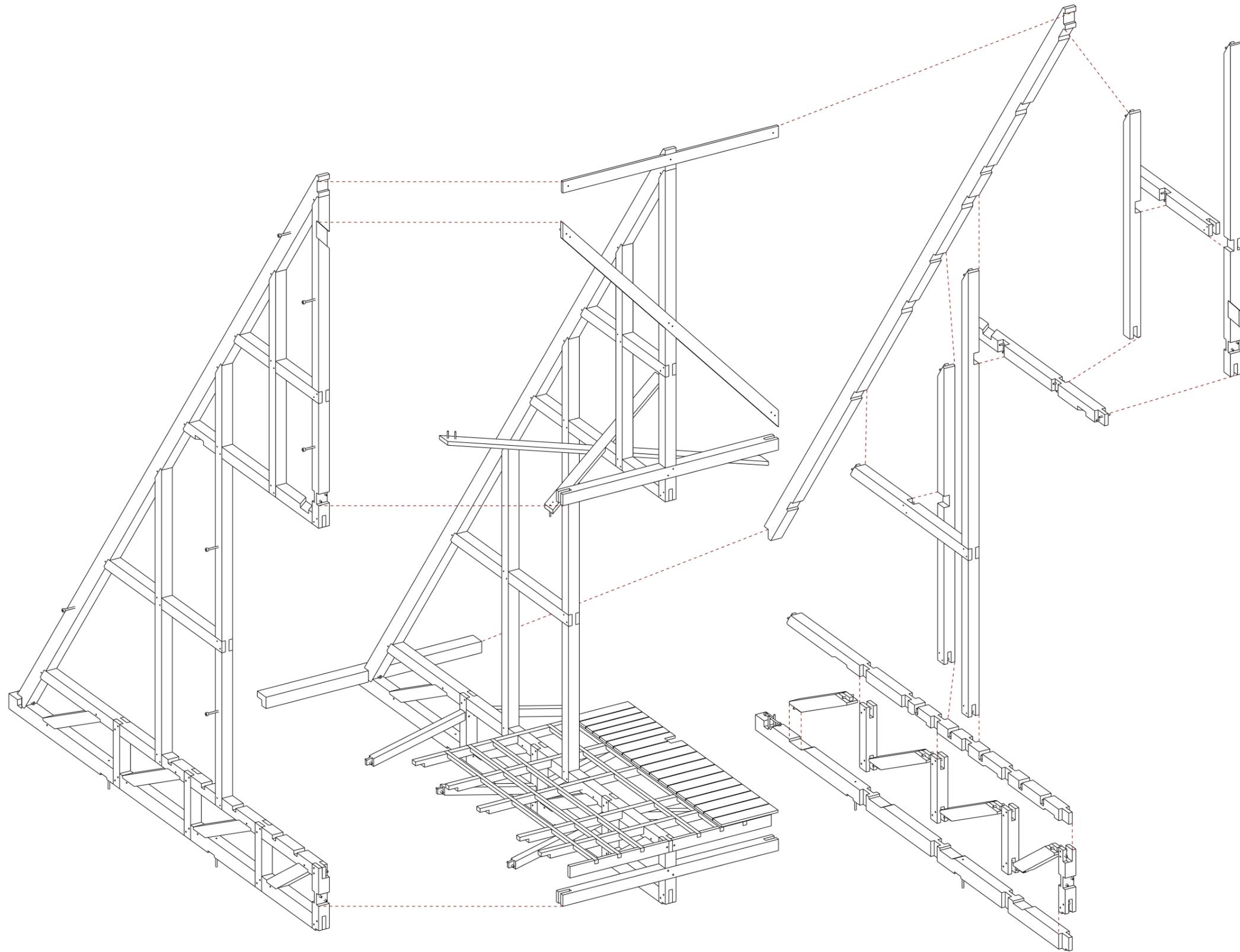


Figure 2

### *Les modules de l'Abside*

L'abside a été pensée en deux modules. Le premier module en forme de demi-cône, représente l'arc de l'abside. Le second est le lien entre l'abside et le module Ferme du chœur, qui aide au contreventement et au renversement du module de l'abside. Ces deux modules sont subdivisés en deux demi-modules qui se font face au-dessus des voûtes.

Le système d'enrayures de l'ancienne charpente de Viollet-Le-Duc a été pris comme base, sous la forme d'un losange entre l'entrait de la ferme et l'entrait de la demi-ferme. La transmission des efforts se fait, par le biais des coyers à la panne sablière de l'abside, par les enrayures en forme de polygone, mais également aux murs gouttereaux à travers les aisseliers et les jambes de force. Ces aisseliers fonctionnent ainsi comme un système de contreventement et assurent la stabilité de la structure.

En effet, ce système d'enrayures est produit à différents niveaux des faux entrants afin d'avoir une meilleure stabilité et rigidité du module. Ce système répartit à son tour les efforts sur les pannes intermédiaires de l'abside et les arbalétriers, qui descendent les charges vers la panne sablière grâce à une jambette vers le mur gouttereau. Cette jambette sur les coyers sert également de support aux arbalétriers.

Les points d'appui des modules de l'abside sont déterminés à partir de la maquette numérique puisque les murs du chœur ne sont pas orthogonaux et il est nécessaire de reconstruire des corbeaux pour l'intégration de portiques qui porteront et répartiront les charges des modules sur les murs gouttereaux.

Nous avons fait le choix de conserver des sections complètes comme le module Fermes et donc d'avoir ces sections doublées, aux niveaux de linéaires contiguës de chaque module. Ces doubles sections assureront une meilleure rigidité et une bonne tenue du module lors de son transport et de sa mise en œuvre.

Dans les modules, plusieurs types d'assemblages ont été réalisés. Le poinçon est assemblé avec la panne faitière et l'arbalétrier par un tenon/mortaise chevillé (tige filetée de 16mm avec cloche sur la face extérieure du module). Les entrants de la ferme et de la demi-ferme sont assemblés à mi-bois (et chevilles). Les arbalétriers de l'abside sont entaillés sur les pannes intermédiaires et assemblés avec la panne sablière de l'abside par un tenon/mortaise chevillé. Les barres des enrayures, les coyers, les contreventements, les jambes de force et les aisseliers sont assemblés par un tenon/mortaise chevillé.

Figure 1 : Axonométrie du module Abside, vue du fond du choeur vers la nef, échelle 1/100eme

Figure 2 : Axonométrie du module Abside, vue depuis la charpente de la nef vers le choeur, échelle 1/100eme

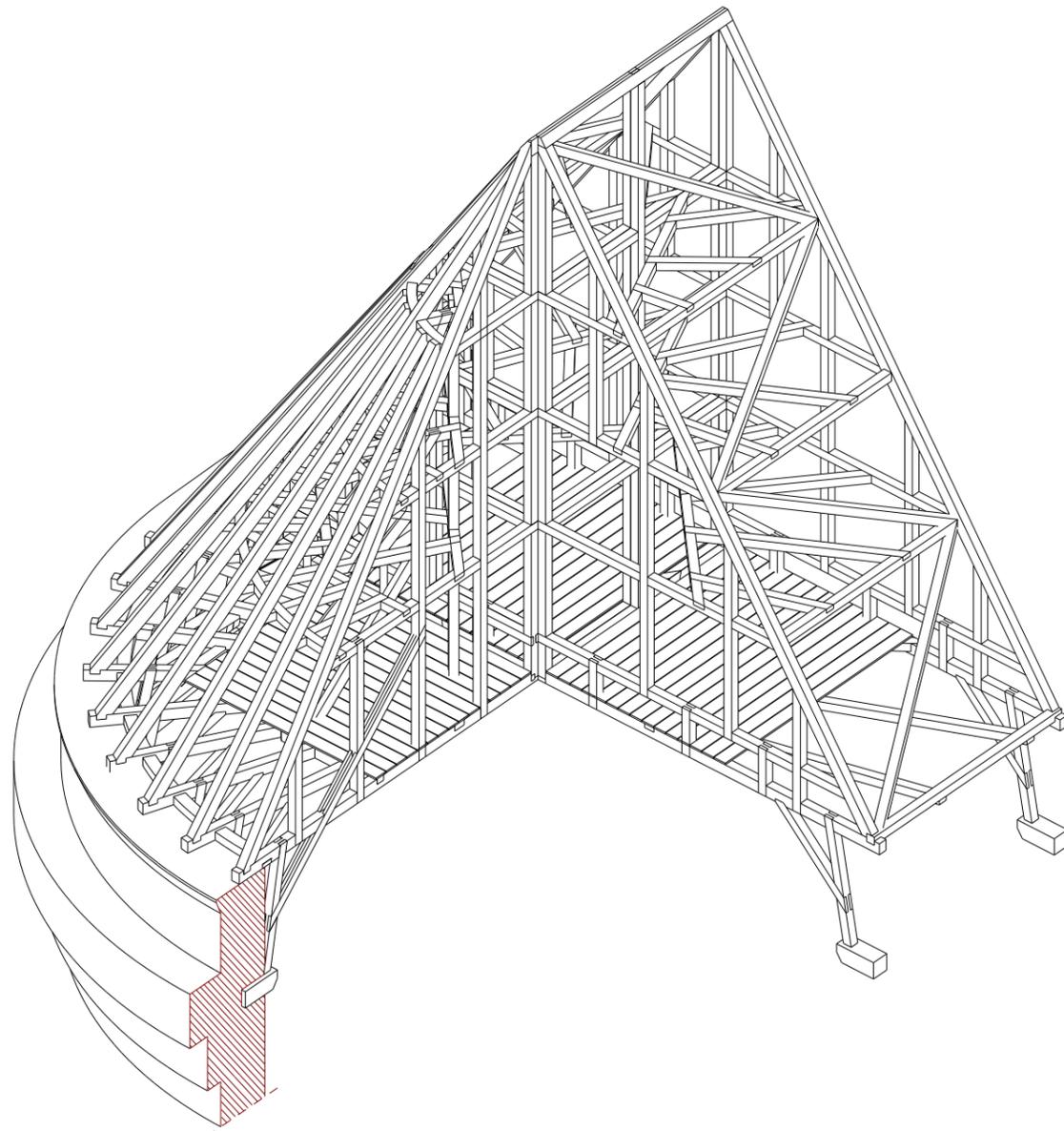


Figure 1

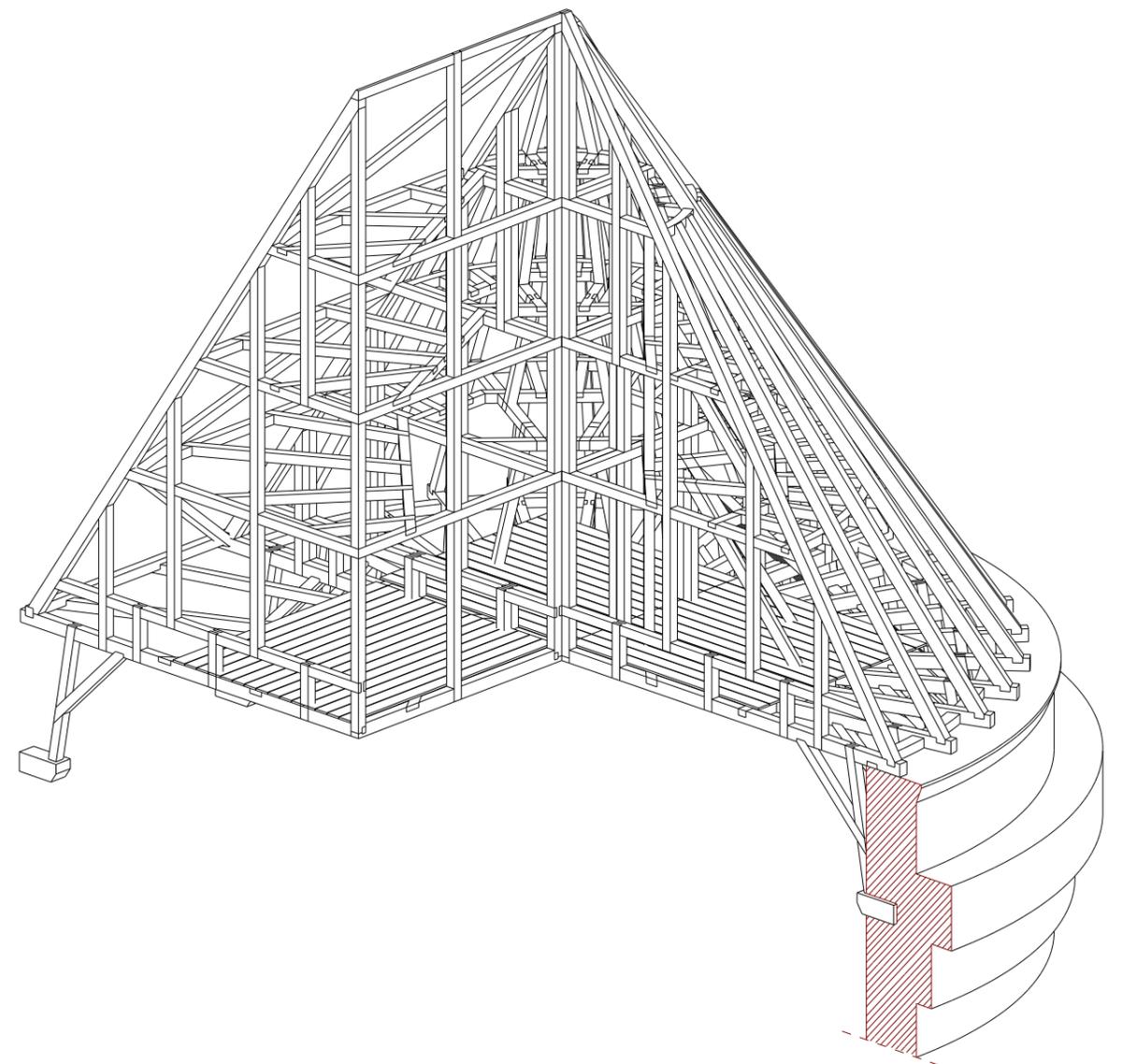


Figure 2



Figure 1 : Coupe longitudinale du module Abside avec sa liaison à la paroi qui mène au module Fermes du choeur, échelle 1/100eme  
Figure 2 : Coupe transversale du module Abside, échelle 1/100eme  
Figure 3 : Plan du module Abside, échelle 1/100eme

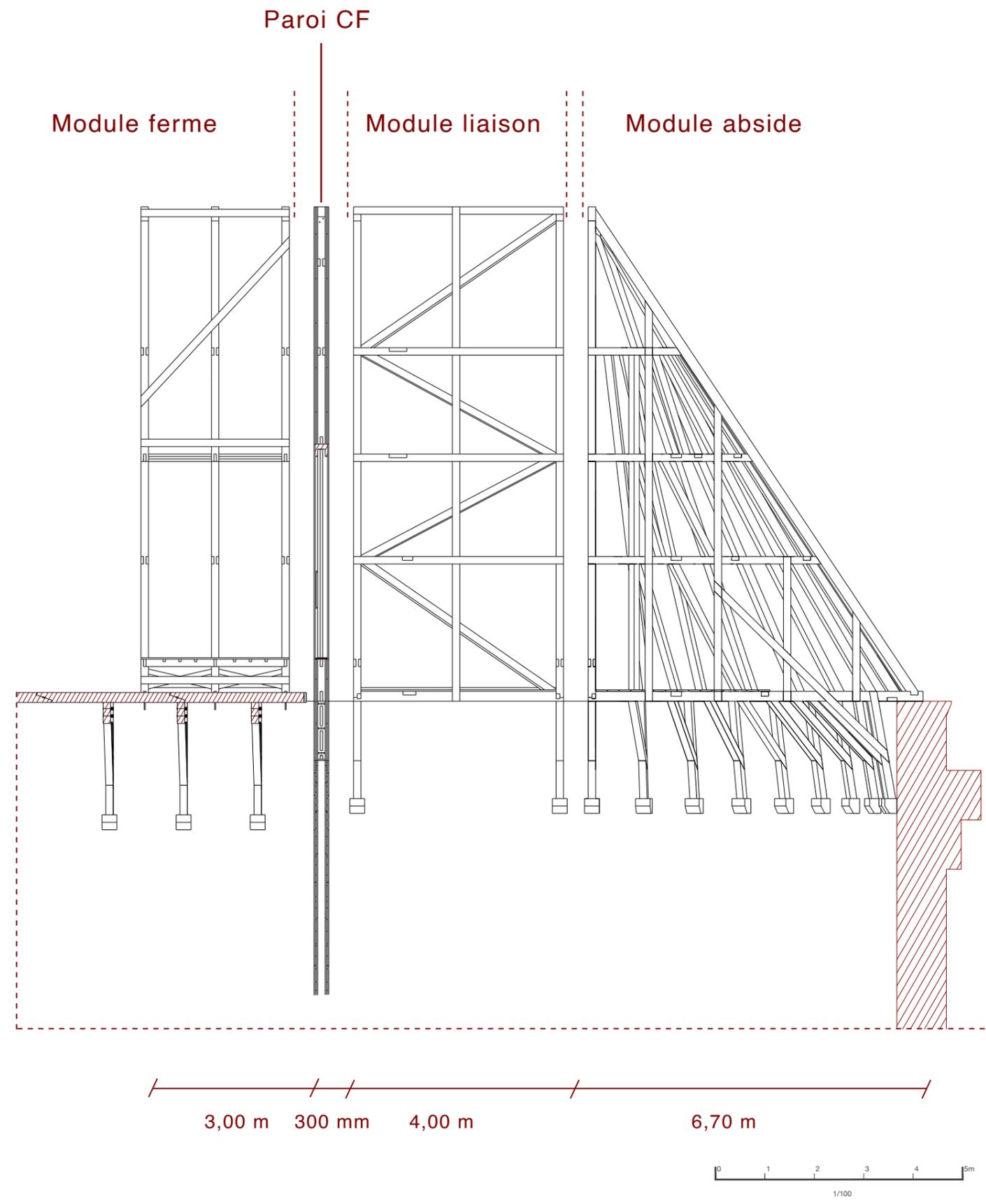


Figure 1

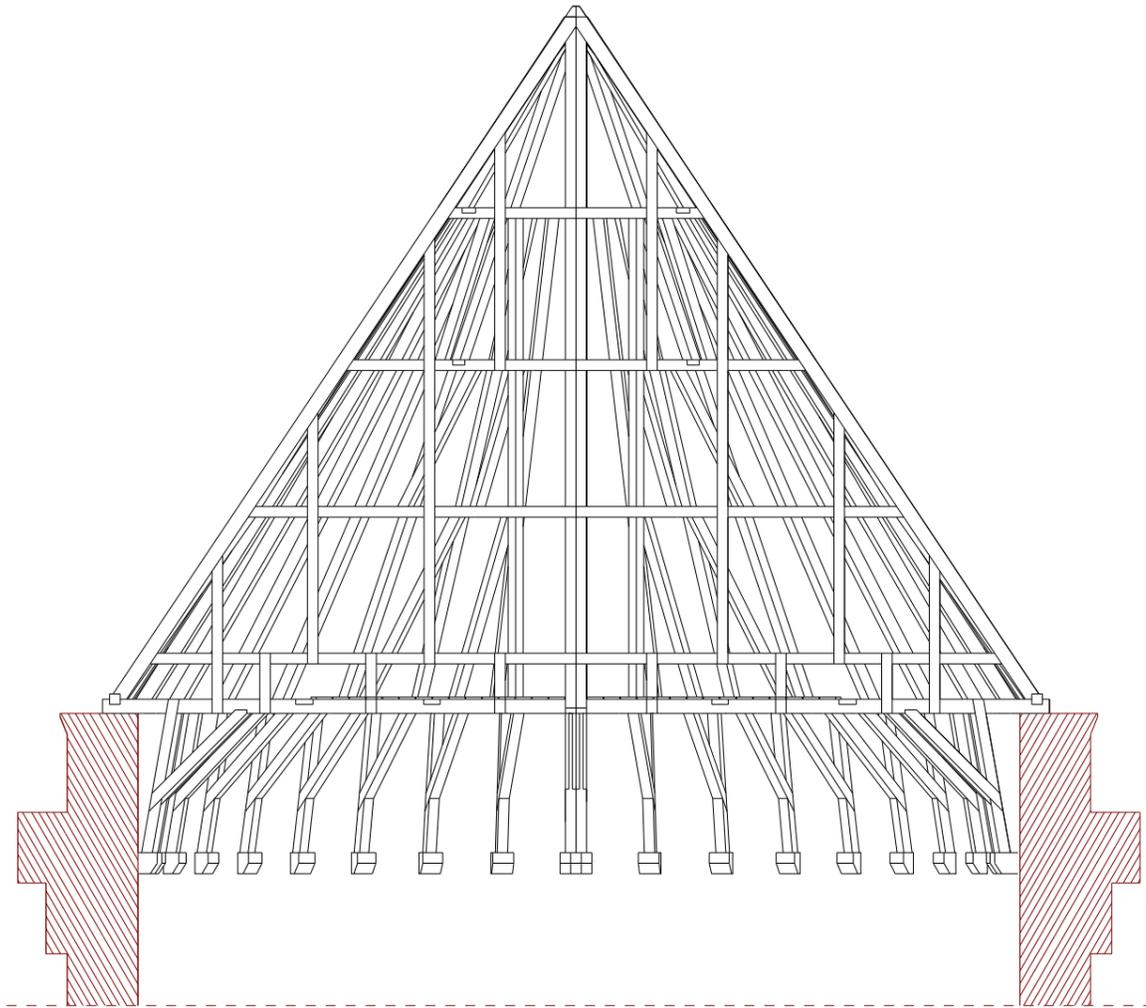


Figure 2

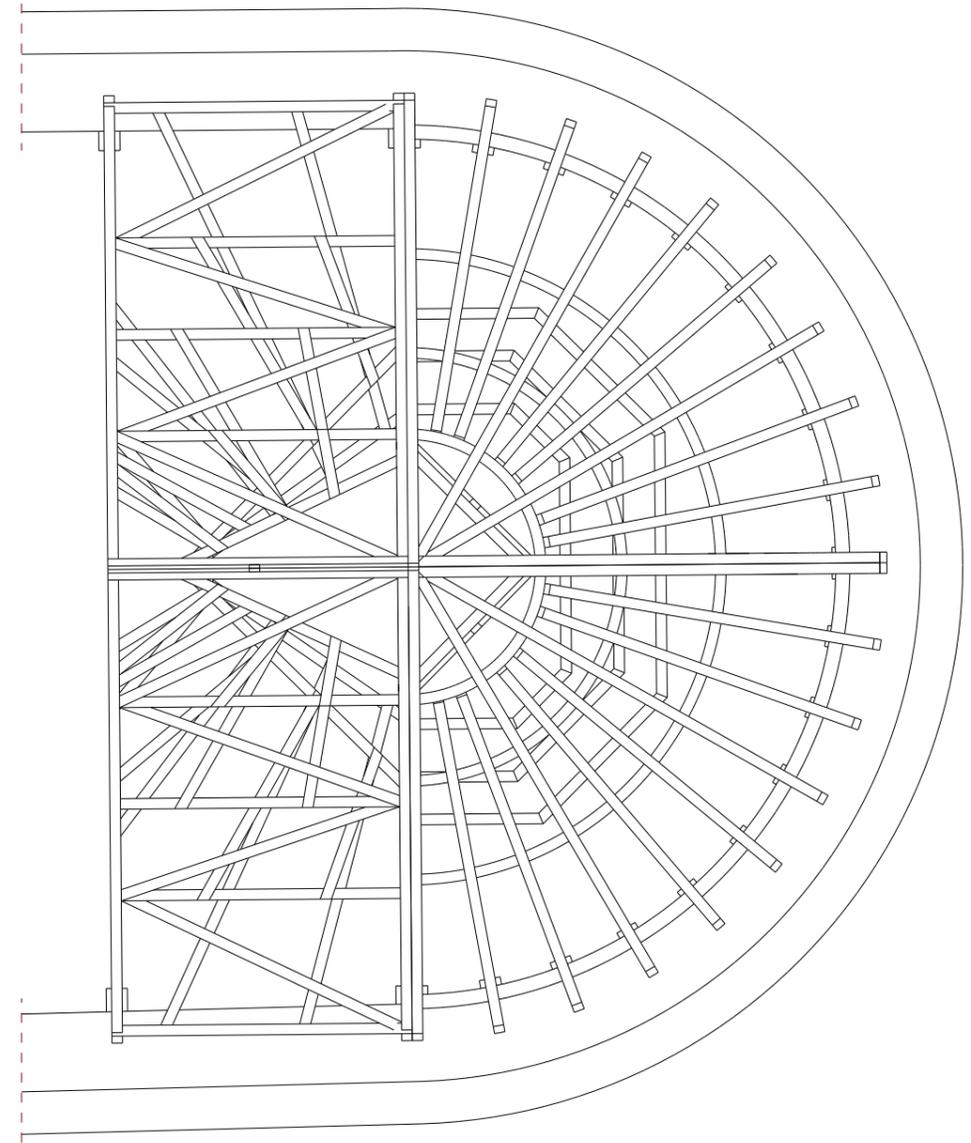


Figure 3



Figure 1 : Axonométrie éclatée du module Abside avec sa liaison à la paroi qui mène au module Fermes du choeur, échelle 1/100eme

Figure 2 : Axonométrie éclatée du module Abside avec sa liaison à la paroi qui mène au module Fermes du choeur, échelle 1/100eme

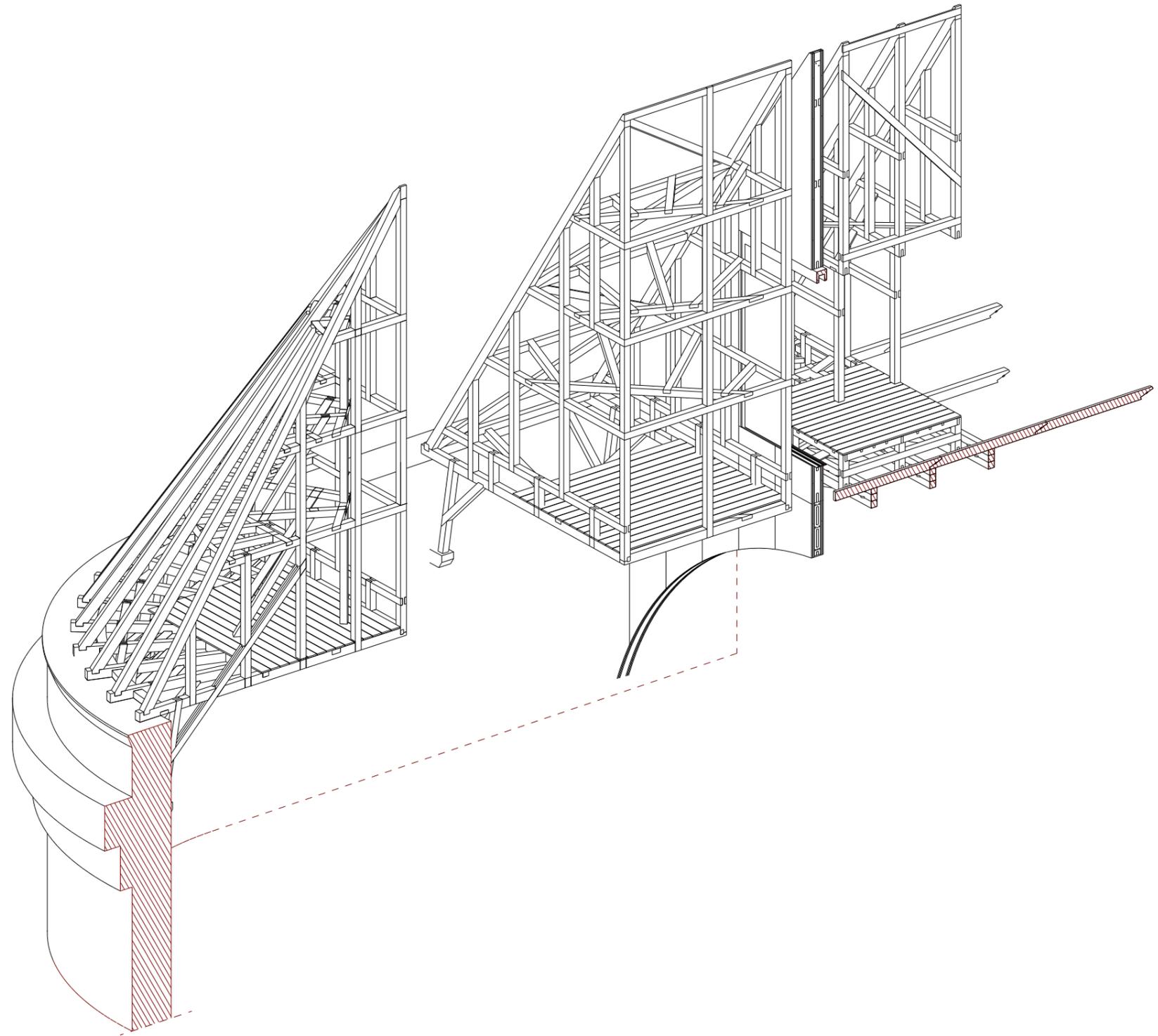


Figure 1



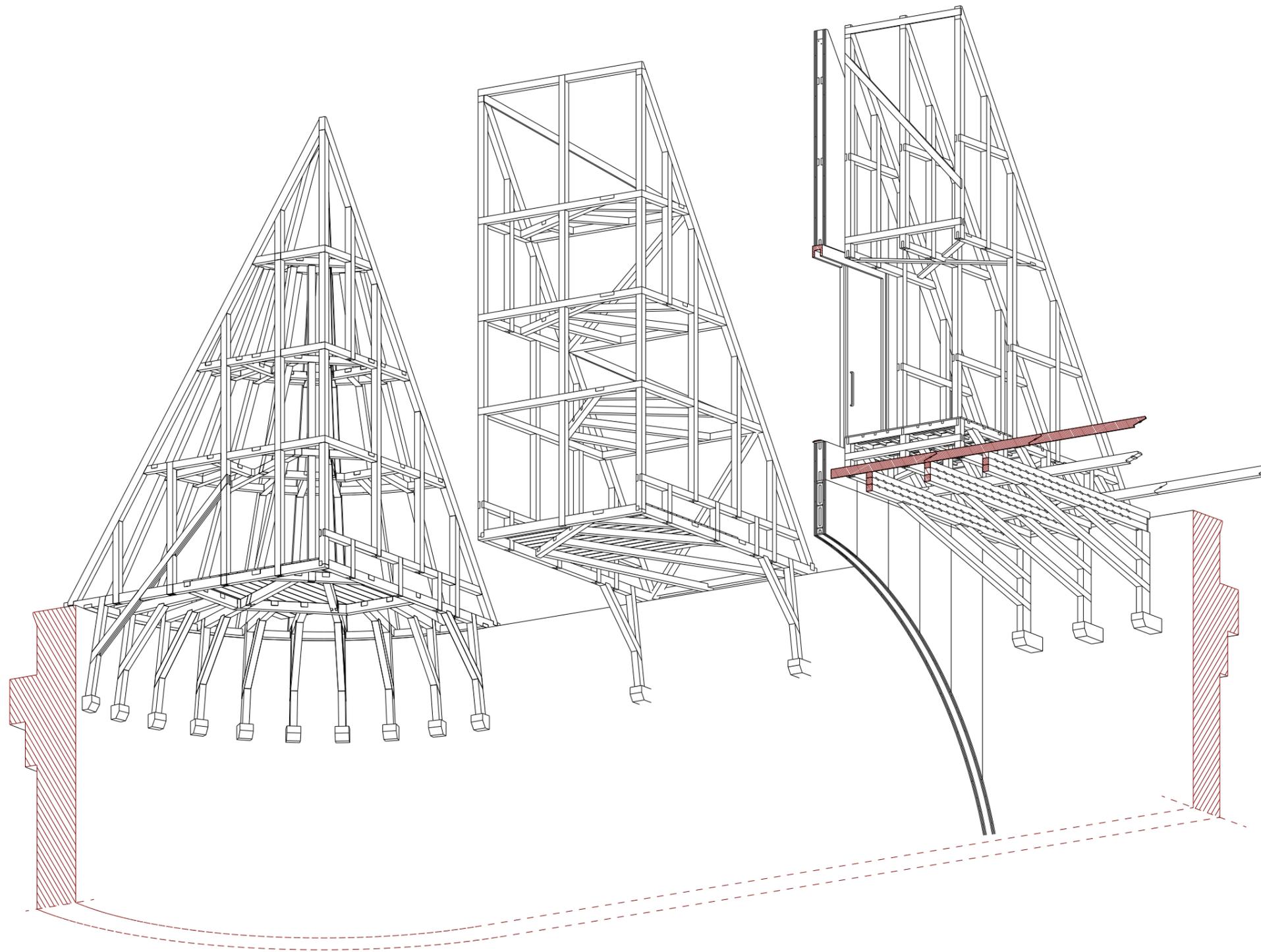


Figure 2



### *Les modules de la Croisée des Transepts*

La croisée des transepts est le lieu de réunion des modules Ferme pour la nef, les transepts et le chœur. Il s'agit d'un point complexe.

La Croisée des Transepts est divisée en quatre parties, subdivisées en deux demi-modules. Nous avons ainsi, une partie basse dans le volume où se situent les voûtes et une partie haute au-dessus de celles-ci, au même niveau que le module Fermes.

Les modules bas de la Croisée des Transepts sont très importants puisqu'ils portent les modules hauts mais également les modules de la flèche. C'est leur rôle de transmettre les charges aux bas des murs gouttereaux. Les points d'accroche de ces modules bas sont déterminés par rapport à leur position dans la toiture, du fait de la non-orthogonalité des murs de Notre-Dame lorsque ces murs se rejoignent à la croisée des transepts. Ainsi, l'usage de la maquette numérique nous sert afin de déposer les corbeaux abîmés par l'incendie et de positionner de nouveaux corbeaux pour poser les modules bas. C'est dans la continuité de cette démarche paramétrique et numérique, que les découpes précises pourront être réalisées afin d'emboîter et de boulonner les modules bas et les modules hauts.

Les modules hauts reprennent le dessin du module Fermes pour les continuités des différents dessins de charpente entre les largeurs de la nef, des transepts et du chœur. La distinction entre les modules bas et les modules hauts, nous permettent également dans la continuité du module Fermes, la création d'un plancher au-dessus de l'extrados de voûtes, afin d'accéder à l'escalier de la flèche. Les modules sont stables sous leur poids propre grâce à des

croix de saint-andré qui sont placées à l'intérieur des modules. Ceci permet également de contrebalancer les forces du vent qui seront retransmis par la flèche, que les modules de la croisée devront soutenir.

Dans un premier temps, les modules bas de la croisée des transepts sont assemblés aux modules des portiques. Ensuite, deux modules haut de la croisée des transepts peuvent prendre place. Lorsque ces deux premières étapes sont faites, nous pouvons placer le premier module de la flèche au centre de la croisée, qui vient se glisser entre les deux premiers modules haut posés. Puis, pour finir, nous venons placer les deux derniers modules haut de la croisée des transepts.

Nous avons fait le choix de conserver des sections complètes comme pour ce qui est du module Fermes et donc d'avoir ces sections doublées lors de la réunion de plusieurs modules, de plusieurs pièces. Les sections de bois qui composent les modules sont optimisées pour garantir une bonne tenue du module lors de son transport et de sa mise en œuvre.

Figure 1 : Axonométrie d'un quart de la croisée des transepts, échelle 1/100eme

Figure 2 : Axonométrie éclatée du module bas et du module haut de la croisée des transepts, échelle 1/100eme

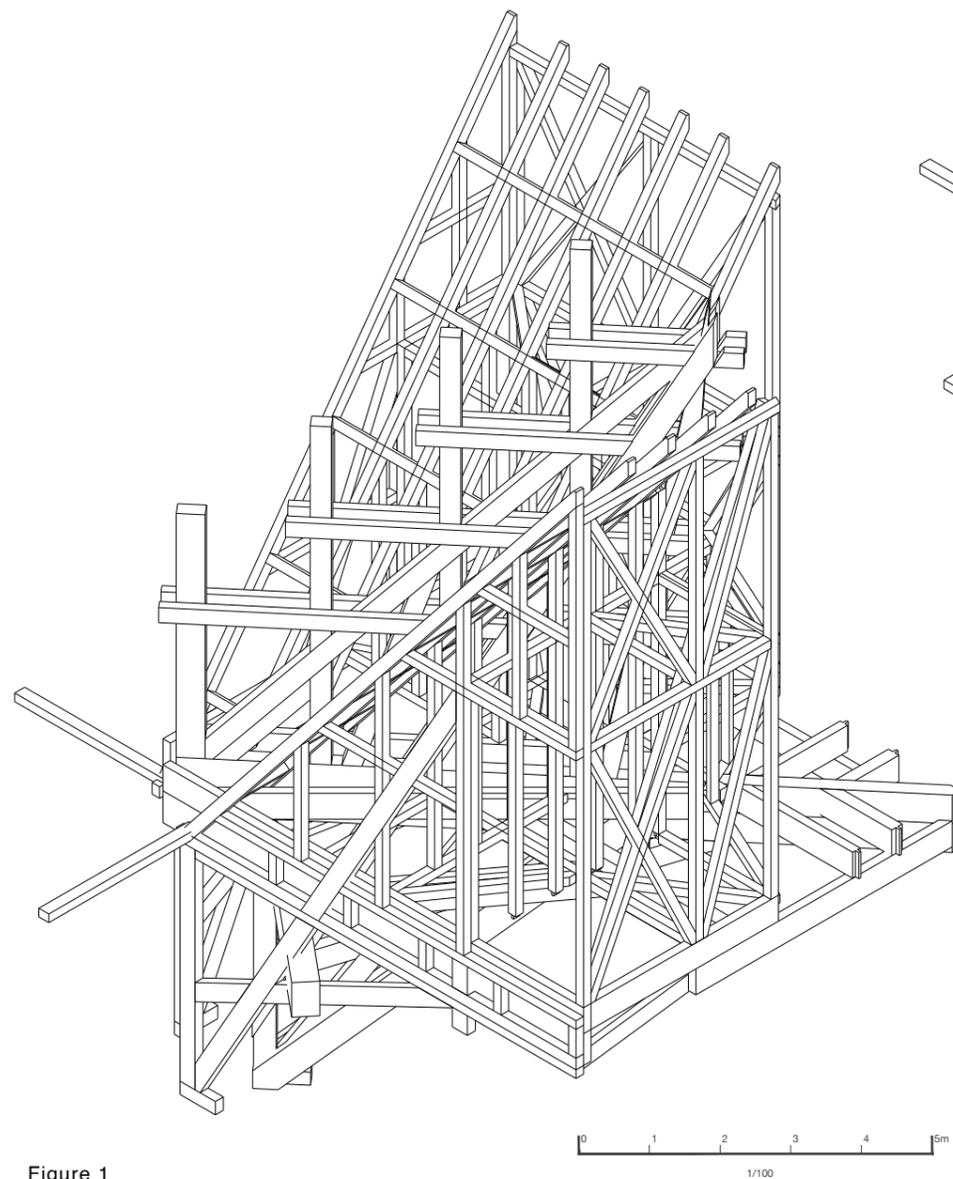


Figure 1

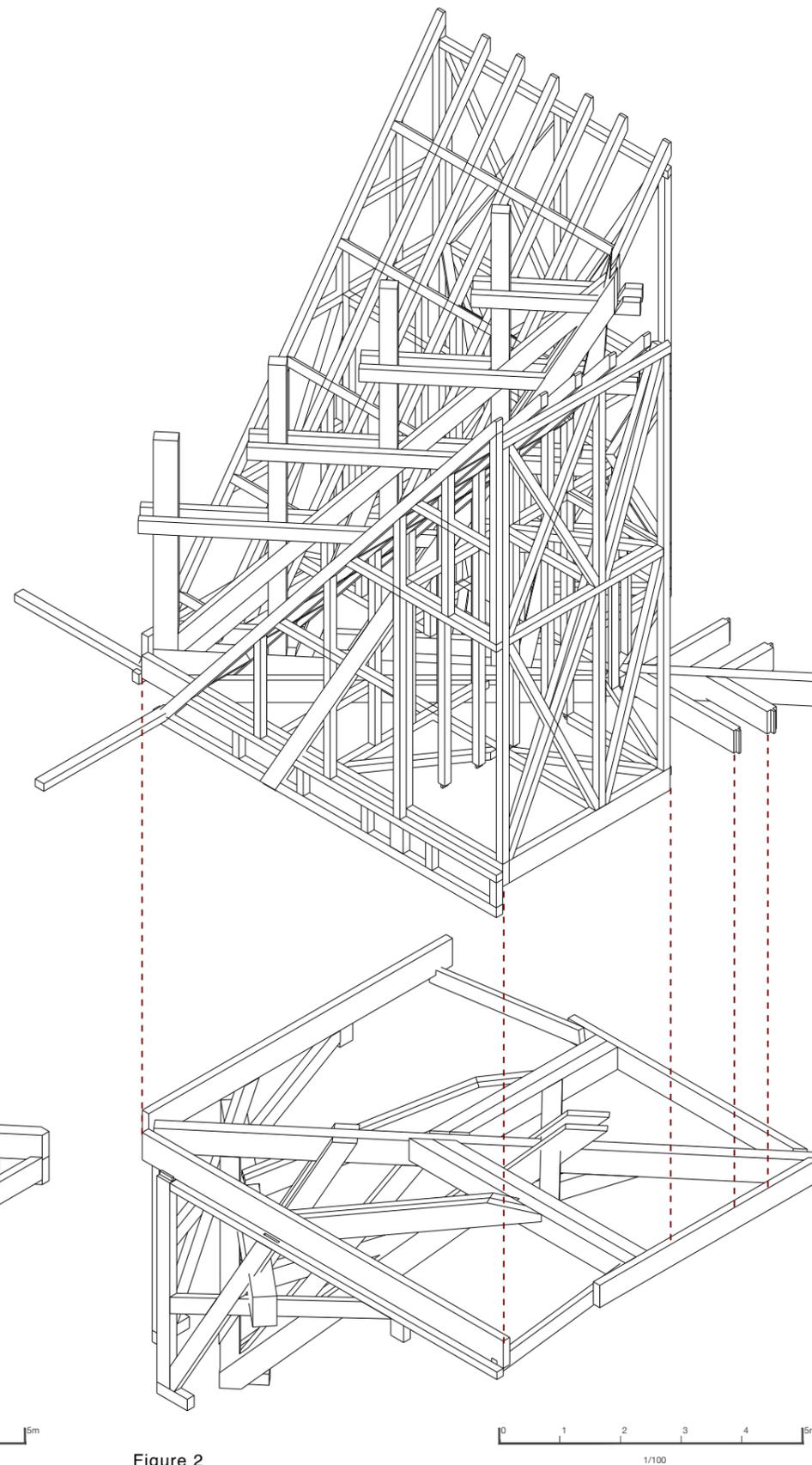


Figure 2

Pour ce qui concerne le module haut de la croisée des transepts, les parties qui se situent en diagonales de la croisée, les parties qui ressortent de la charpente à l'extérieur, recouvrent de plomb, où reposent les statuts, possèdent les mêmes sections de bois que dans la version originale de la charpente de la cathédrale. Il s'agit des sections 500x240 mm, 410x240 mm, 320x240 mm, 450x150 mm, 360x150 mm et 260x150 mm.

Ensuite, nous avons deux éléments qui viennent reprendre le dessin du module Fermes en fonction de leur emplacement : soit la ferme de la nef, soit la ferme du choeur ou la ferme côté transepts. Pour cette raison, les sections utilisées sont les mêmes que celles utilisées pour le module Fermes. Il s'agit des sections 150x150 mm et 150x200 mm.

Pour ce qui concerne le module bas, nous avons pris comme référence la partie basse de la croisée des transepts originelle. Les sections sont donc plus importantes que celles utilisées dans le module haut qui a été totalement pensé en continuité de la nouvelle charpente que nous créons. Les sections que l'on retrouve sont donc plus variées : 500x150 mm, 600x400 mm et 300x150 mm pour les accroches aux corbeaux ; et 550x150 mm, 500x240 mm et 450x250 mm pour les parties qui forment le quadrilatère sur lesquelles se pose le module haut.

A l'intérieur des modules, les assemblages sont de plusieurs types. Tout d'abord, le dessin des différentes fermes, dans la continuité du module Fermes, nous mène à utiliser les mêmes assemblages. Le poinçon est en son haut assemblé avec l'arbalétrier par un tenon/mortaise chevillé (tige filetée de 16mm avec cloche sur la face extérieur du module). À sa rencontre avec les faux entrails, le poinçon peut y être assemblé soit à mi bois (et chevilles), soit en bout, en moisant/moisé. Ensuite, les assemblages dans les modules bas et les modules hauts sont réalisés par des tenon/mortaise chevillés et des épaulements.

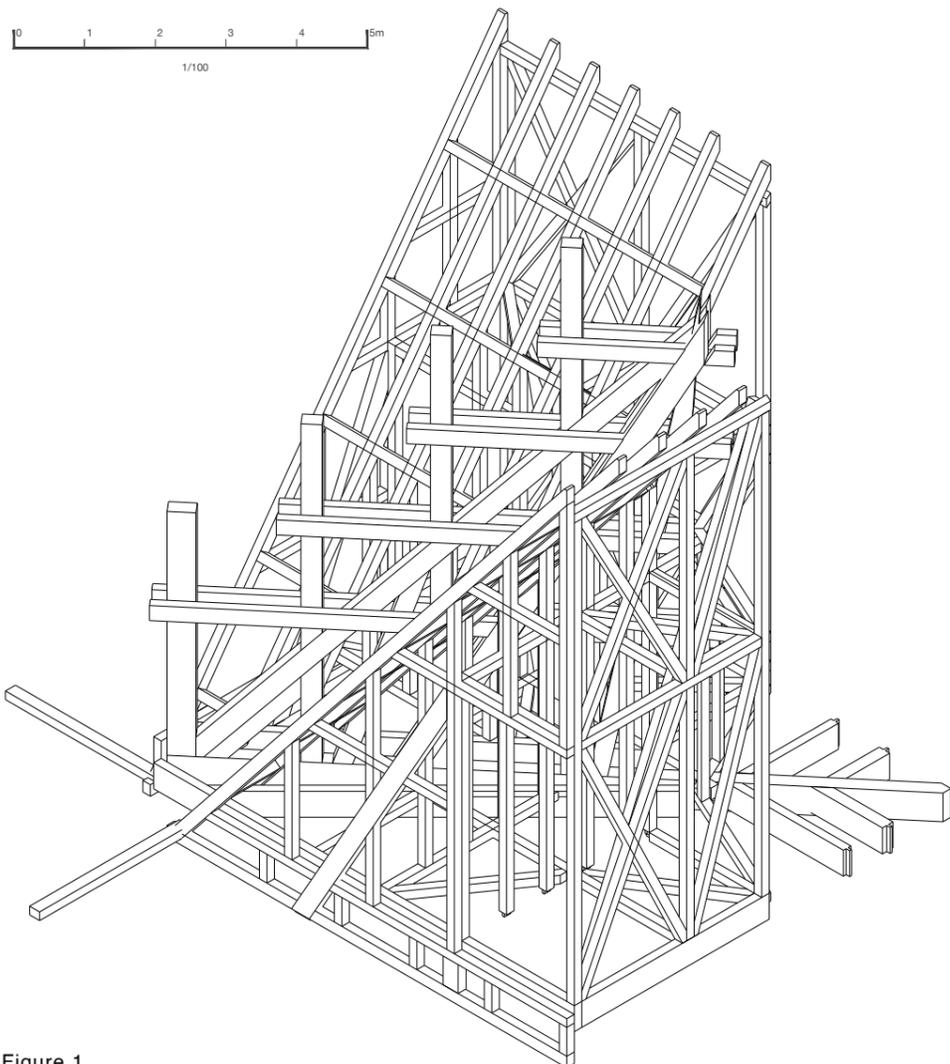


Figure 1

Figure 1 : Axonométrie éclatée du module bas et du module haut de la croisée des transepts, échelle 1/100eme

Figure 2 : Axonométrie de décomposition des différentes parties d'un module haut de la croisée des transepts, échelle 1/200eme

Figure 3 : Axonométrie éclatée de décomposition des différentes parties d'un module haut de la croisée des transepts, échelle 1/200eme

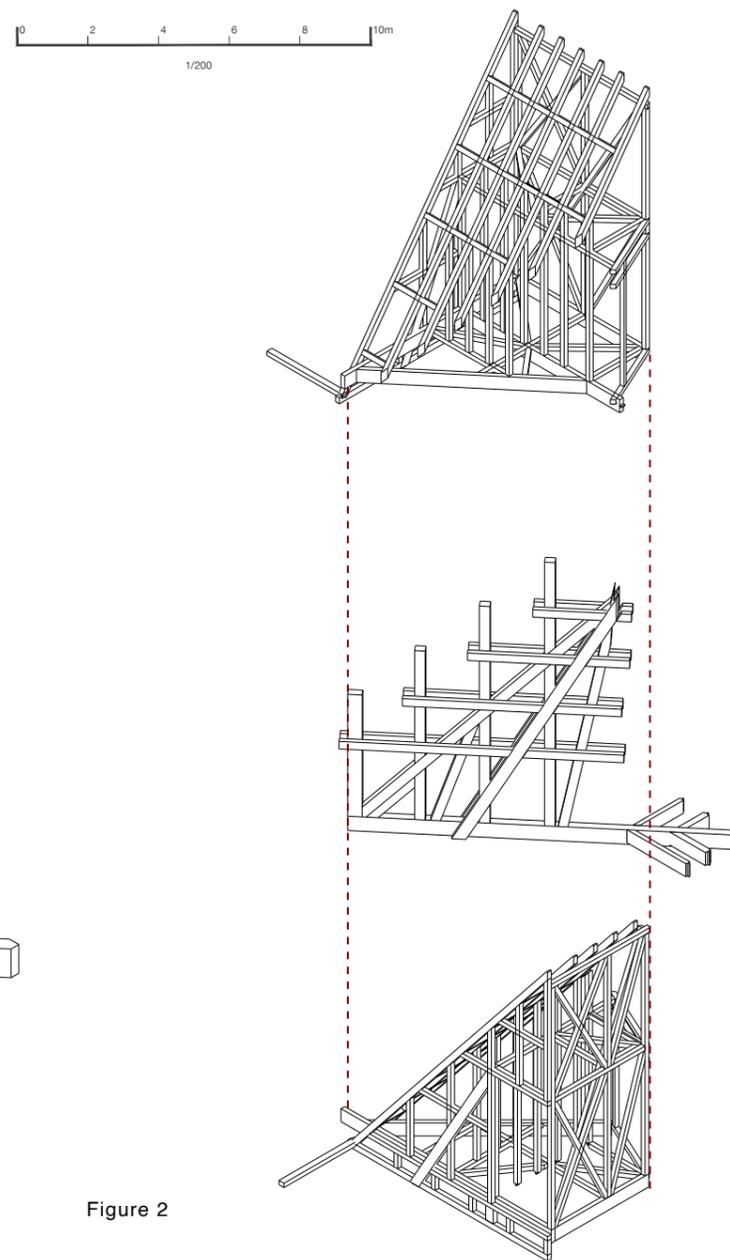


Figure 2

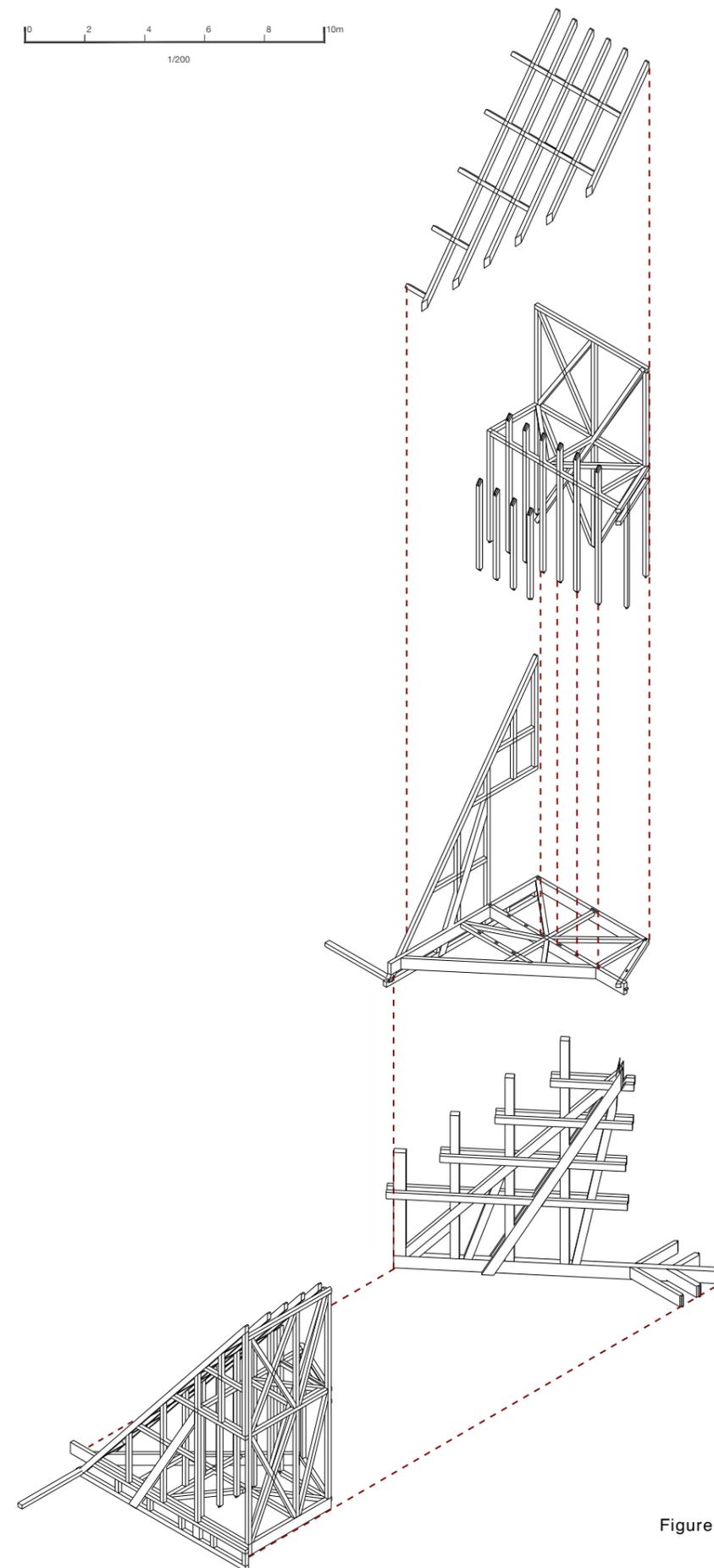


Figure 3

Figure 4 : Axométrie éclatée des différentes parties composantes de la croisée des transepts avec le premier module de la flèche, qui vient s'insérer dans la croisée, échelle 1/200eme

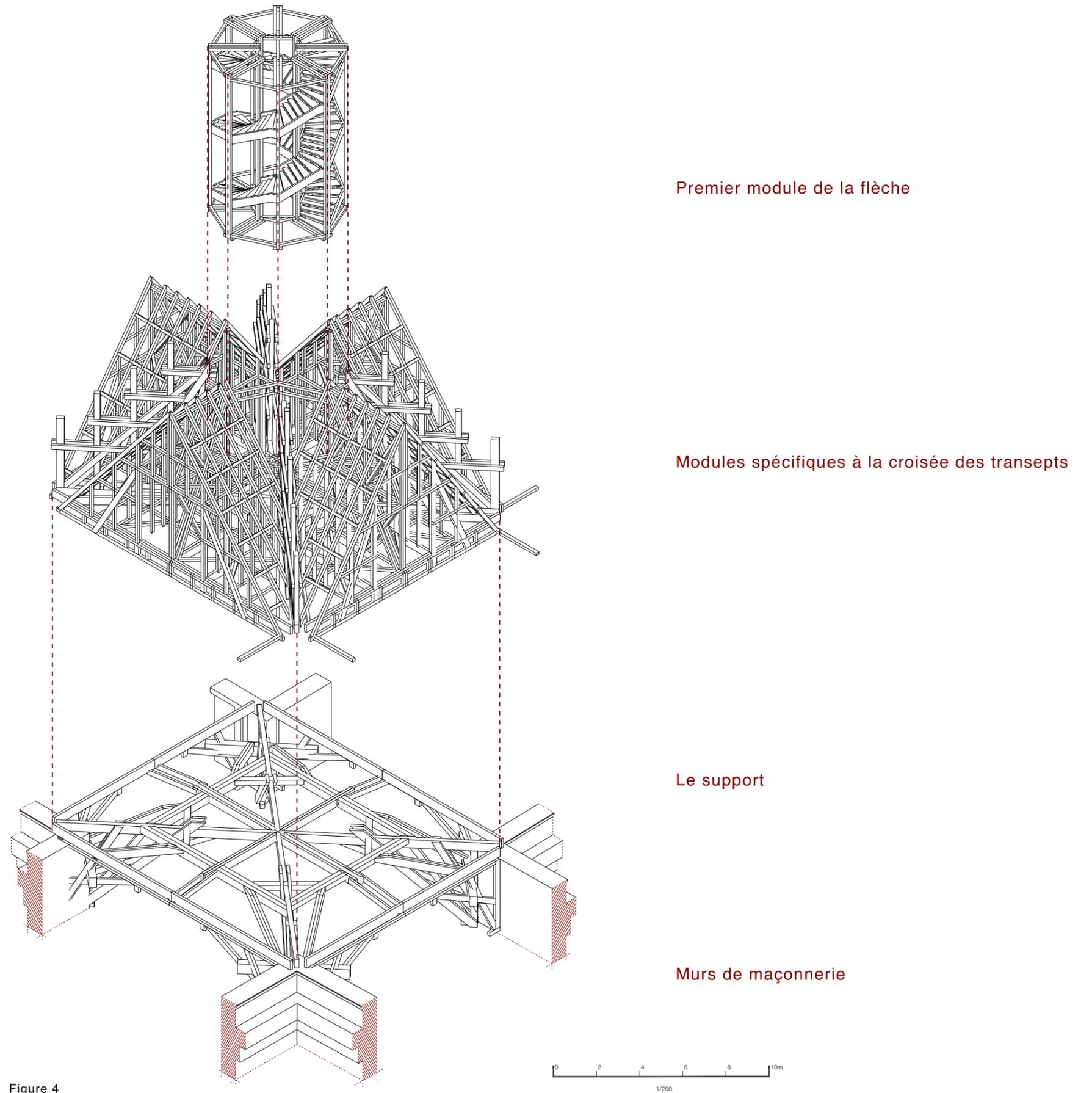


Figure 4

Figure 1 à figure 8 : Axonométries proposant le scénario de pose de la croisée des transepts par modules

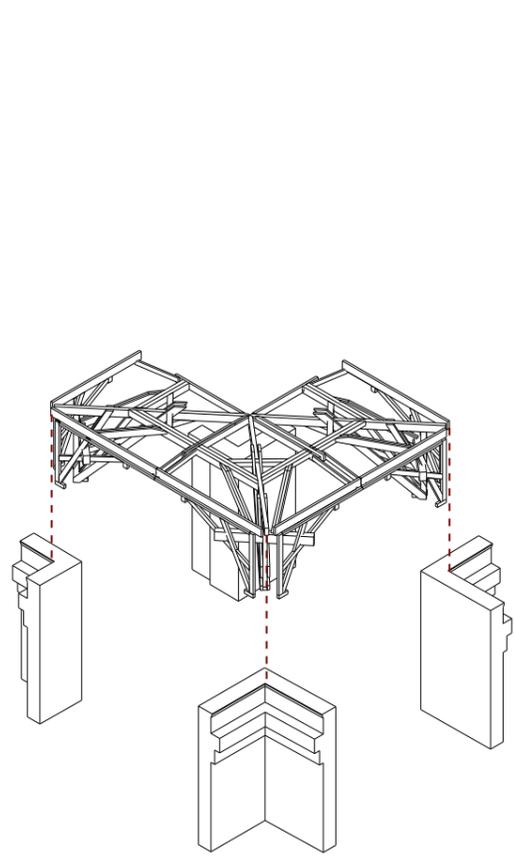


Figure 1

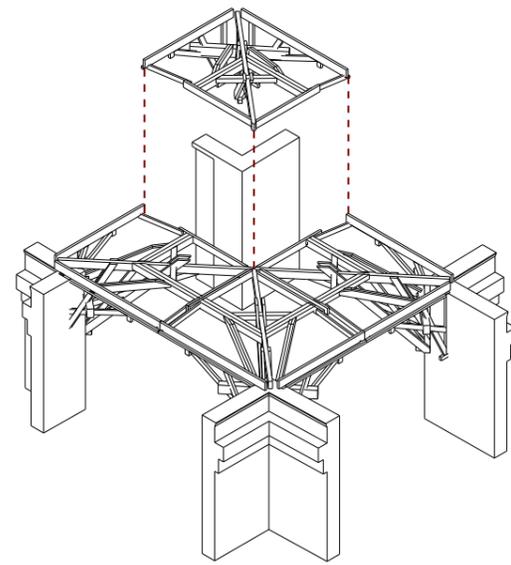


Figure 2

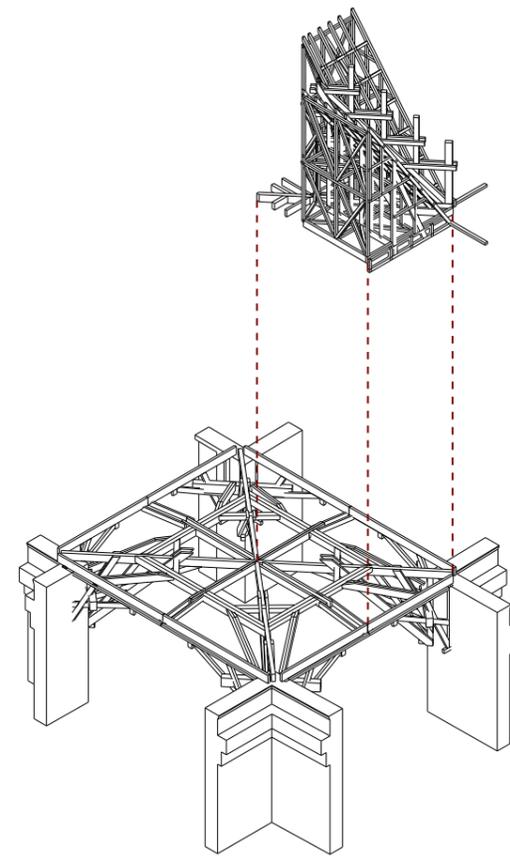


Figure 3

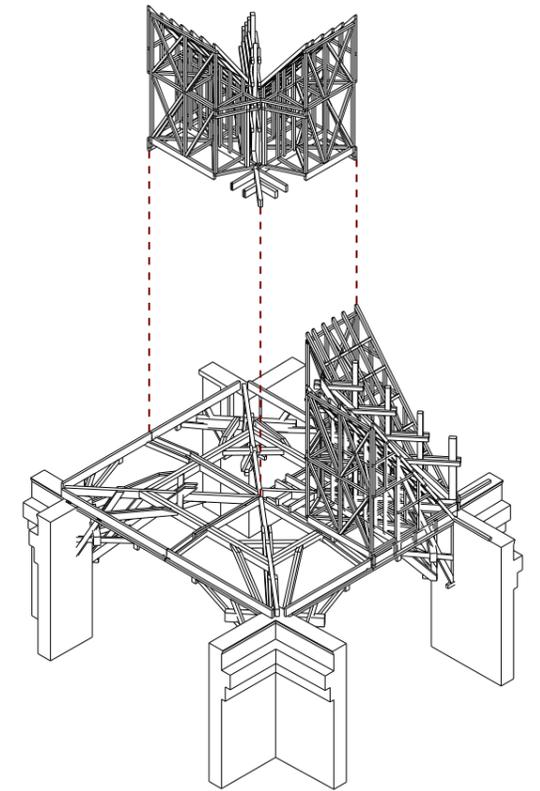


Figure 4

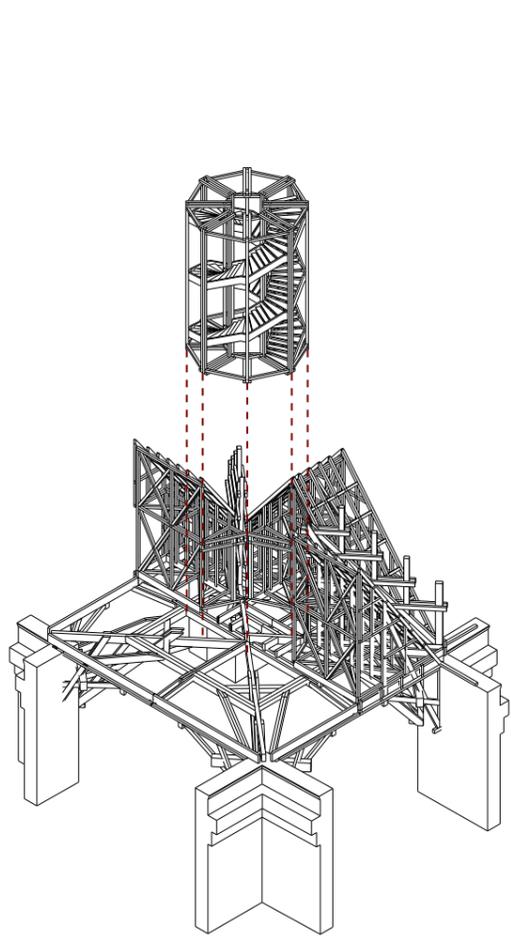


Figure 5

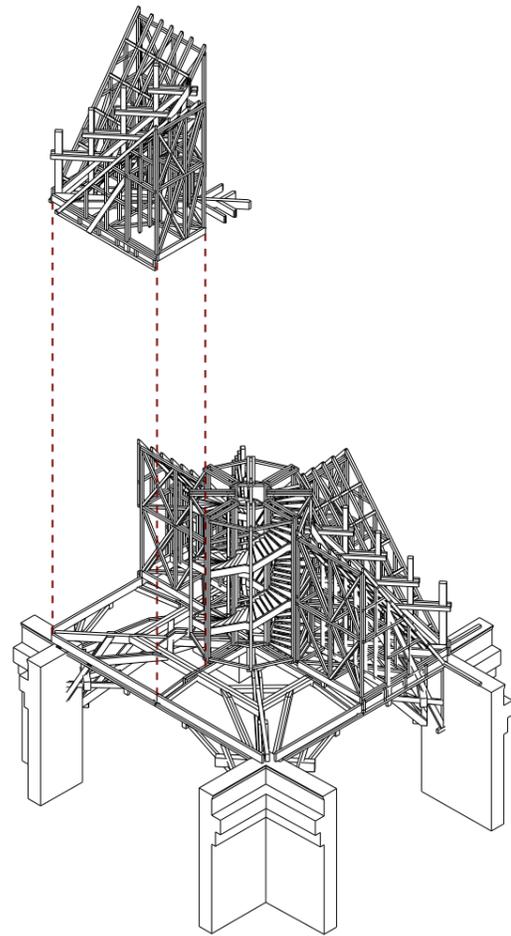


Figure 6

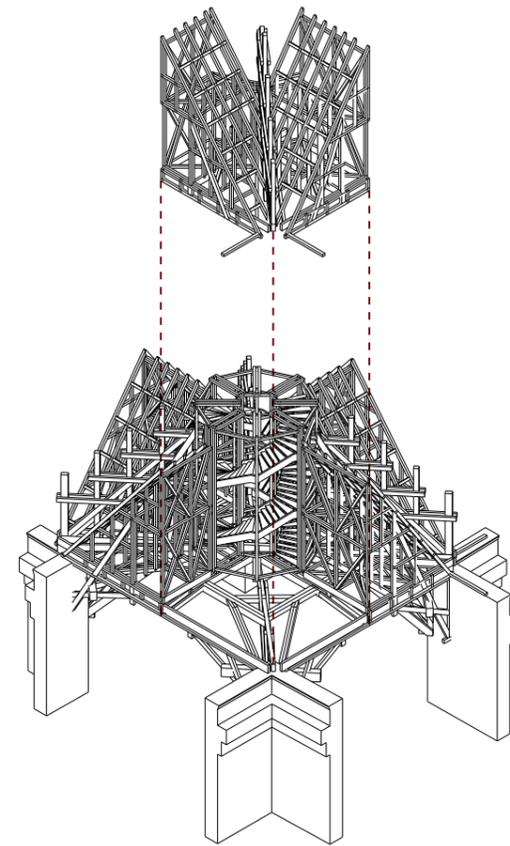


Figure 7

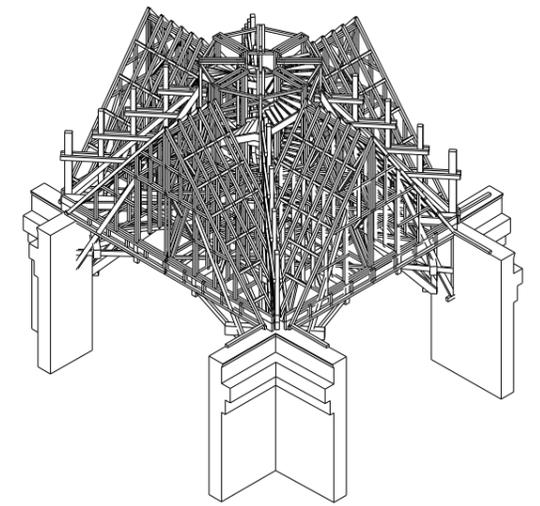


Figure 8



Photo de la toiture de Notre-Dame en plomb, recouvrant la charpente de la croisée des transepts et la charpente de la flèche

### *Les modules de la Flèche*

Pour la flèche et pour respecter le concept architectural de la modularité, nous avons pris le parti d'une réalisation quelque peu différente de la flèche érigée par Viollet-Le-Duc. Pour la flèche le choix a été fait de produire une structure modulaire primaire, sur la base d'un plan octogonal. La structure se divise ainsi en dix modules de deux typologies différentes. Les premiers modules accueillent un escalier à double révolution, qui bien plus qu'un geste architectural, a pour objectif de contreventer les modules qui composent la flèche. De plus, il facilite et déploie un accès de maintenance magnifié. Cet escalier se poursuit sur les trois premiers modules de la flèche, donnant l'accès jusqu'au quatrième module, à partir duquel le contreventement s'opère grâce à un poteau central reprenant les barres de contreventement venant de chaque nœud des bases octogonales. Sur les premiers modules, le limon de l'escalier est assemblé sur les poteaux extérieurs comme intérieurs par tenon-mortaise chevillé. Dans les modules supérieurs, les barres de contreventement sont également assemblées par tenon-mortaise sur les poteaux extérieurs et sur le poteau central.

Dans l'ensemble de la flèche, on retrouvera principalement deux assemblages qui sont le tenon-mortaise comme explicité précédemment et le moisant-moisé qui intervient au niveau de la construction des bases octogonales.

L'absence de l'escalier à partir du quatrième module s'explique par l'étroitesse des modules supérieurs. Pour accéder à la pointe, c'est donc par l'extérieur qu'il faut procéder en empruntant une échelle à échelons rabattables ou un accès pour les cordistes, toujours dans l'objectif de garantir un accès confortable, à toutes les

parties de la charpente et ainsi pouvoir en garantir la surveillance, l'entretien et donc la pérennité.

Enfin ce dispositif permet une décomposition enclive au concept de modularité que nous défendons. Optimisant les processus, de fabrication, de transports, et de montage sur le site de la cathédrale.

Comme nous l'avons évoqué en amont, sur cette structure primaire vient être implantée une structure secondaire, non porteuse, essentiellement composée des éléments de modénatures, gargouilles et autres décorations qui pourront donc être restituées dans leurs esthétiques originelles. Cette structure secondaire s'appuie sur un doublage des poteaux extérieurs, assemblés de la même manière que leurs homologues structuraux, sur la base octogonale dont les moisants se poursuivent pour venir moiser cette deuxième rangée de poteaux extérieurs.

L'objectif de ces nouveaux dessins de charpente, flèche et croisée des transepts, est de garantir la mise en place de ces éléments dans l'éventualité où les piliers qui les portent ne peuvent reprendre les mêmes niveaux de charges propres que la charpente originelle. La flèche est donc plus légère, sans perdre en performances statique et mécanique. Cette légèreté de la structure avec un total d'environ 53 Tonnes de bois pour un poids de module inférieur à 13 Tonnes (pour le plus lourd) permet d'envisager la réalisation dans le même temps des structures primaires et secondaires de chaque module. Le chantier se réduit donc au levage des modules et à leur assemblage un à un.

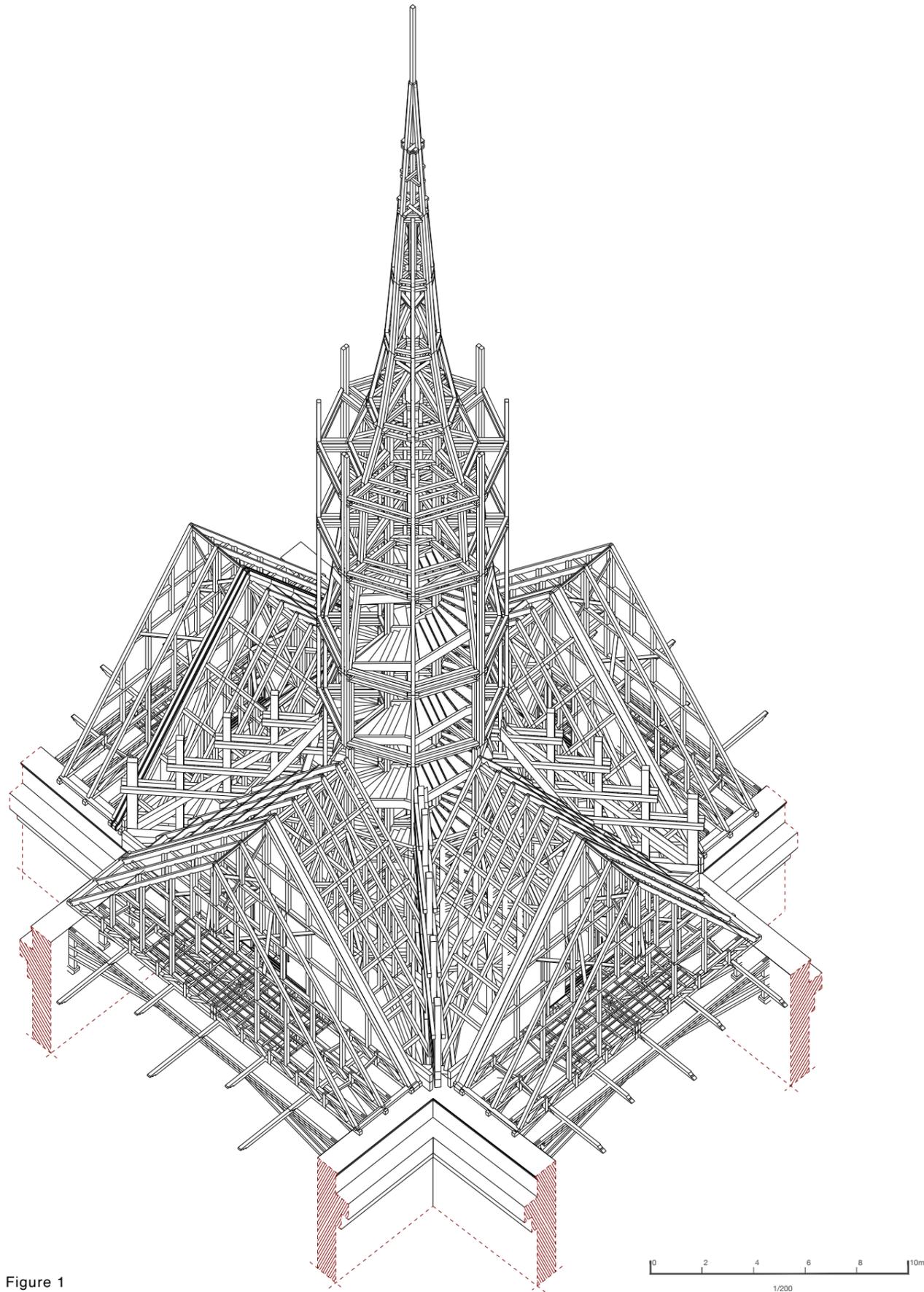


Figure 1

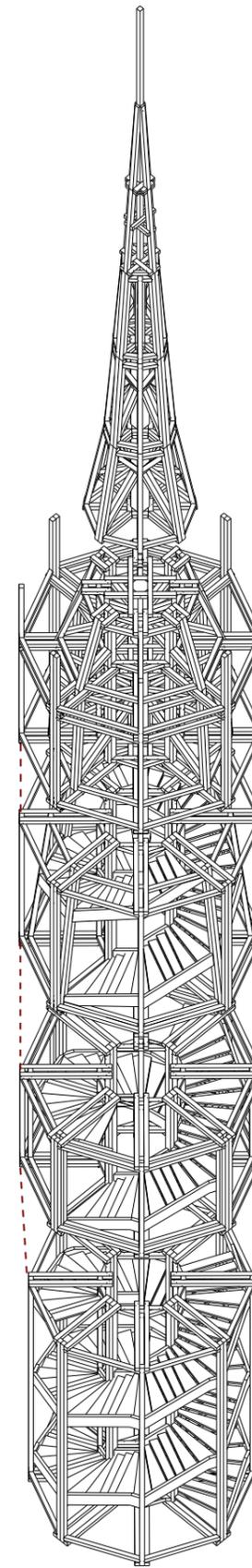


Figure 2

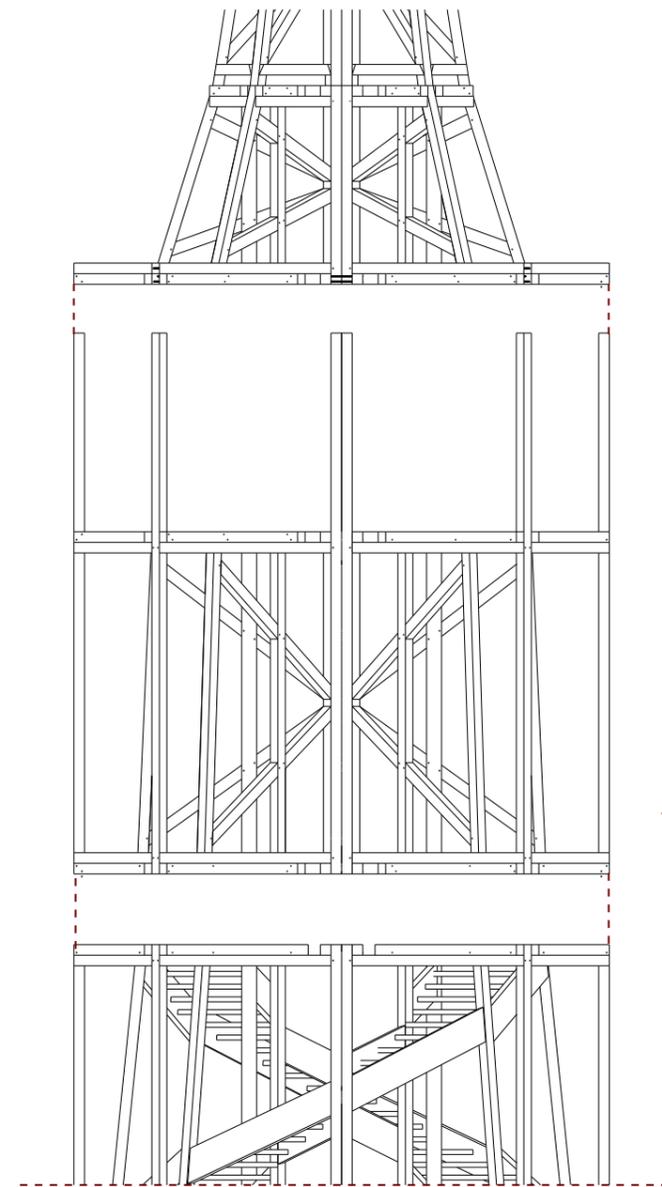
Figure 1 : Axonomie d'une vue d'ensemble de la croisée avec la flèche, échelle 1/200eme

Figure 2 : Axonomie éclatée des différents modules de la flèche, échelle 1/200eme

Figure 1 : Axonométrie éclatée du premier module de la flèche s'intégrant à la croisée des transepts, échelle 1/100eme

Figure 2 : Elevation éclatée du quatrième module de la flèche, échelle 1/100eme

Figure 3 : Elevation du premier module de la flèche, échelle 1/100eme

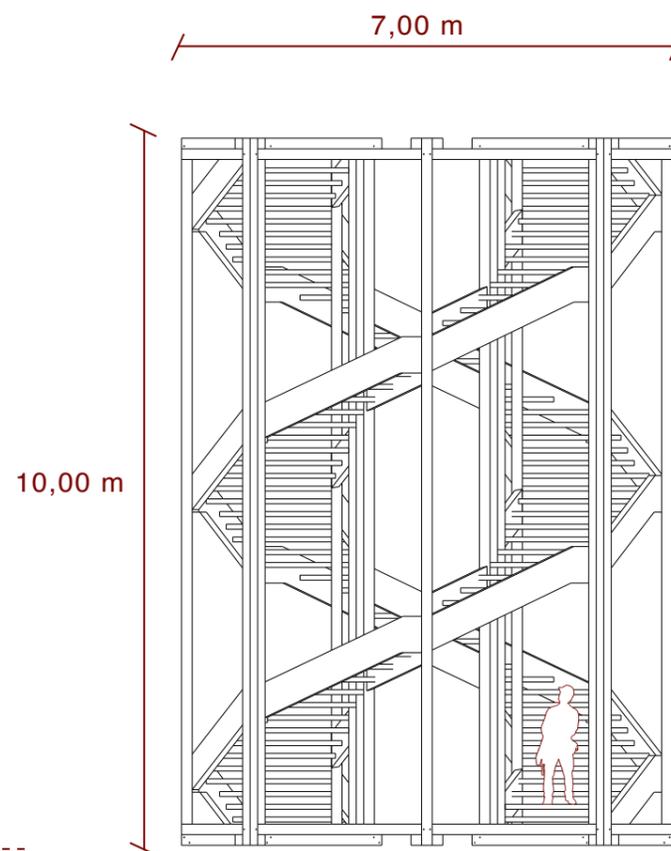


Module sablier



Figure 1

Largeur max : 7 m  
 Hauteur max : 10 m  
 Poids max : 12,5 T  
 Poids max estimé avec couverture : 14,2 T



Module escalier



Figure 2

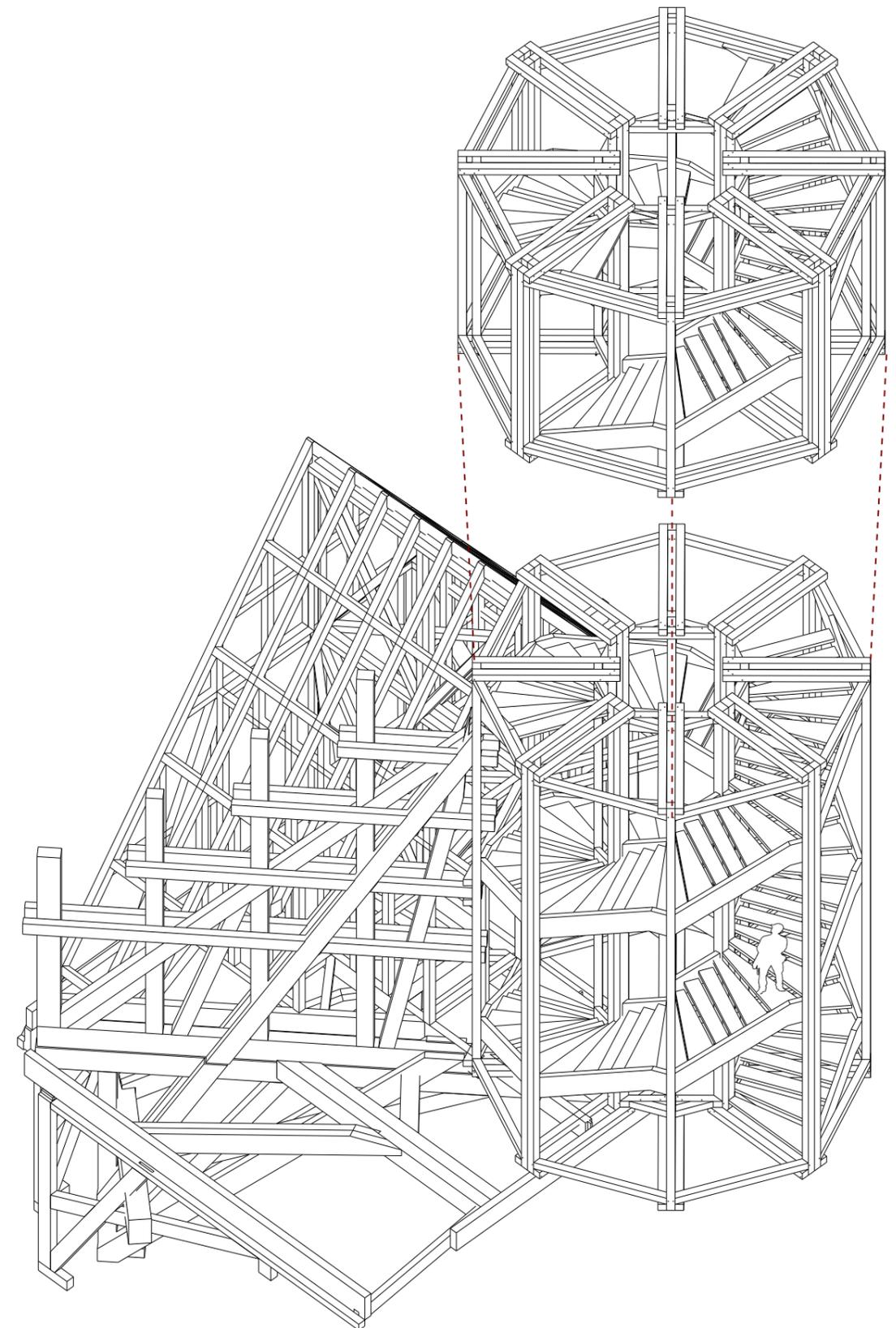


Figure 3



Largeur max : 2,6 m  
 Longueur max : 5 m  
 Hauteur max : 10 m  
 Poids max : 3,1 T  
 Poids max estimé avec couverture : 3,55 T

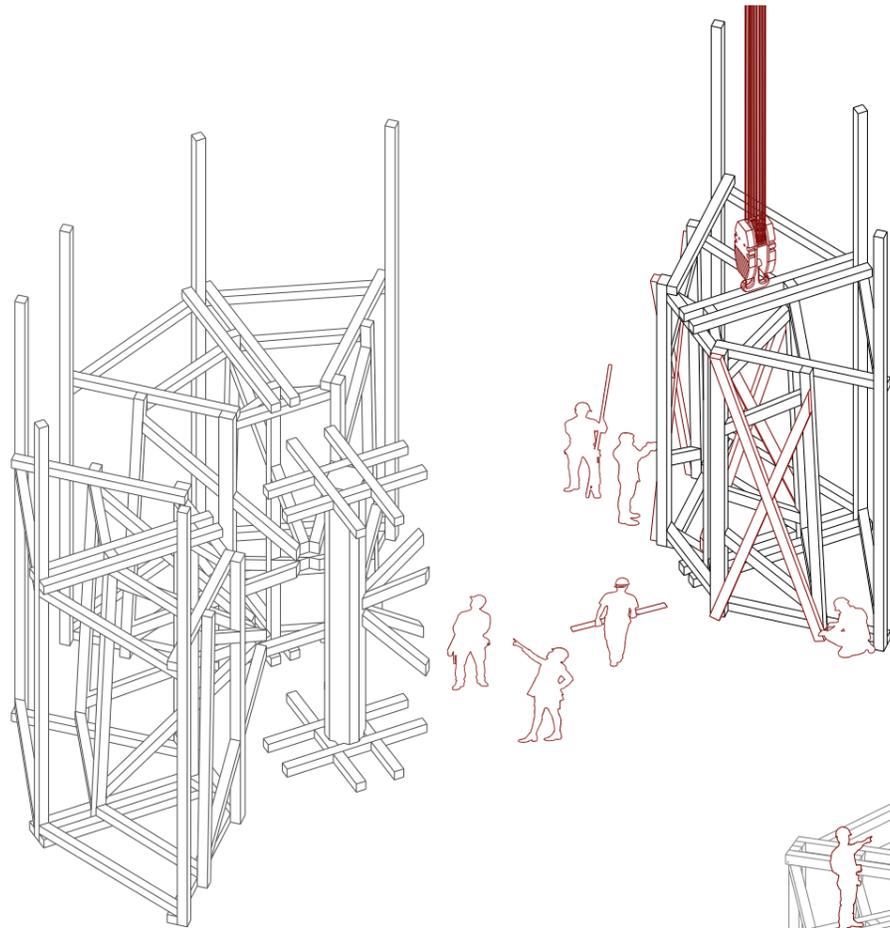


Figure 4

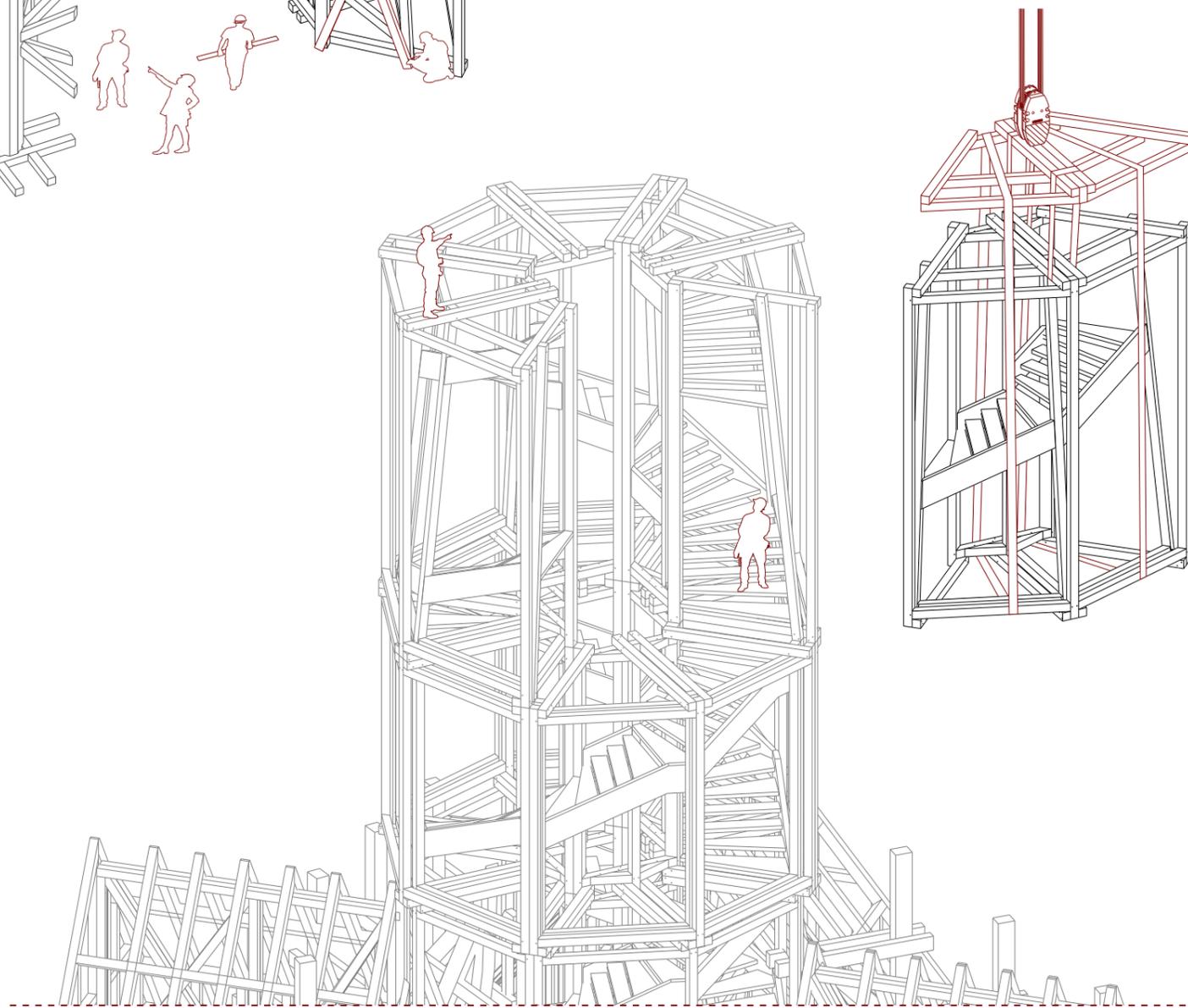


Figure 5



Figure 4 : Axonométrie avec une scène de montage d'un des modules de la flèche, échelle 1/100eme

Figure 5 : Axonométrie avec une scène de levage d'un des modules de la flèche avec son escalier, échelle 1/100eme

Figure 6 : Axonométrie éclatée représentant les sous-modules de la flèche, échelle 1/200eme

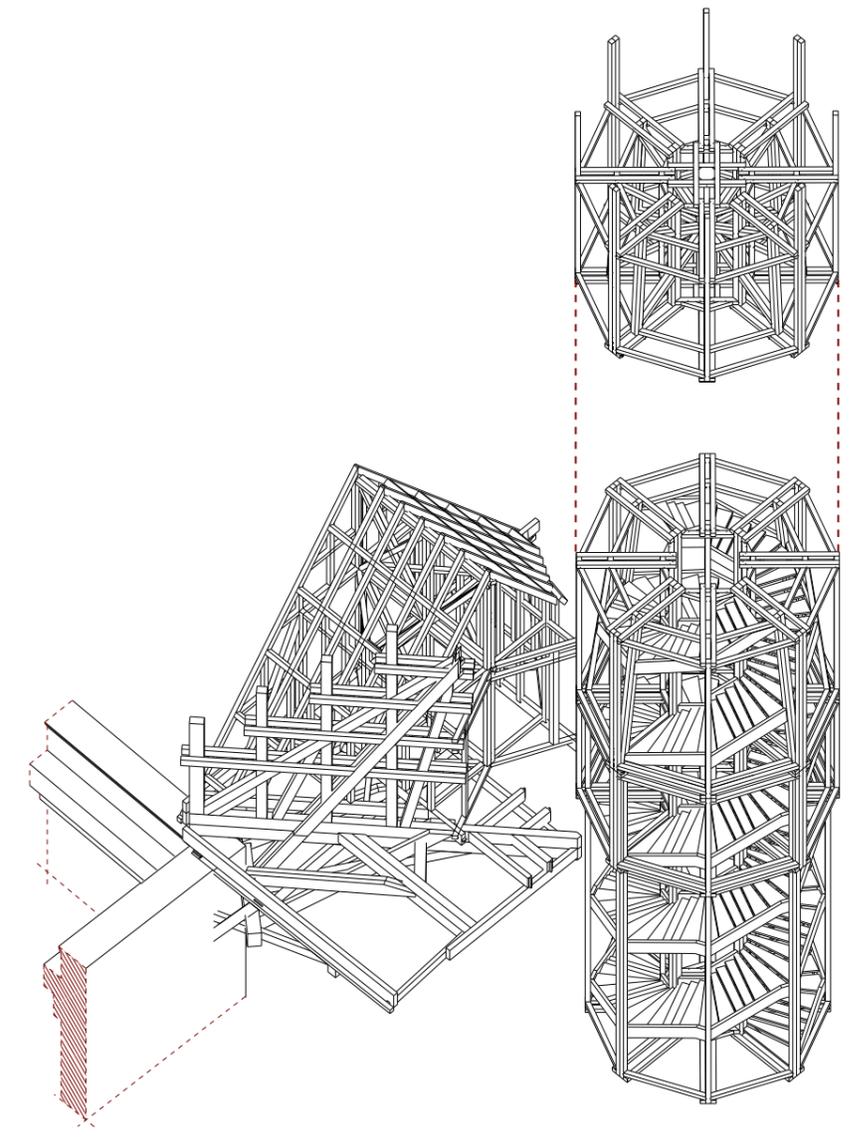


Figure 6



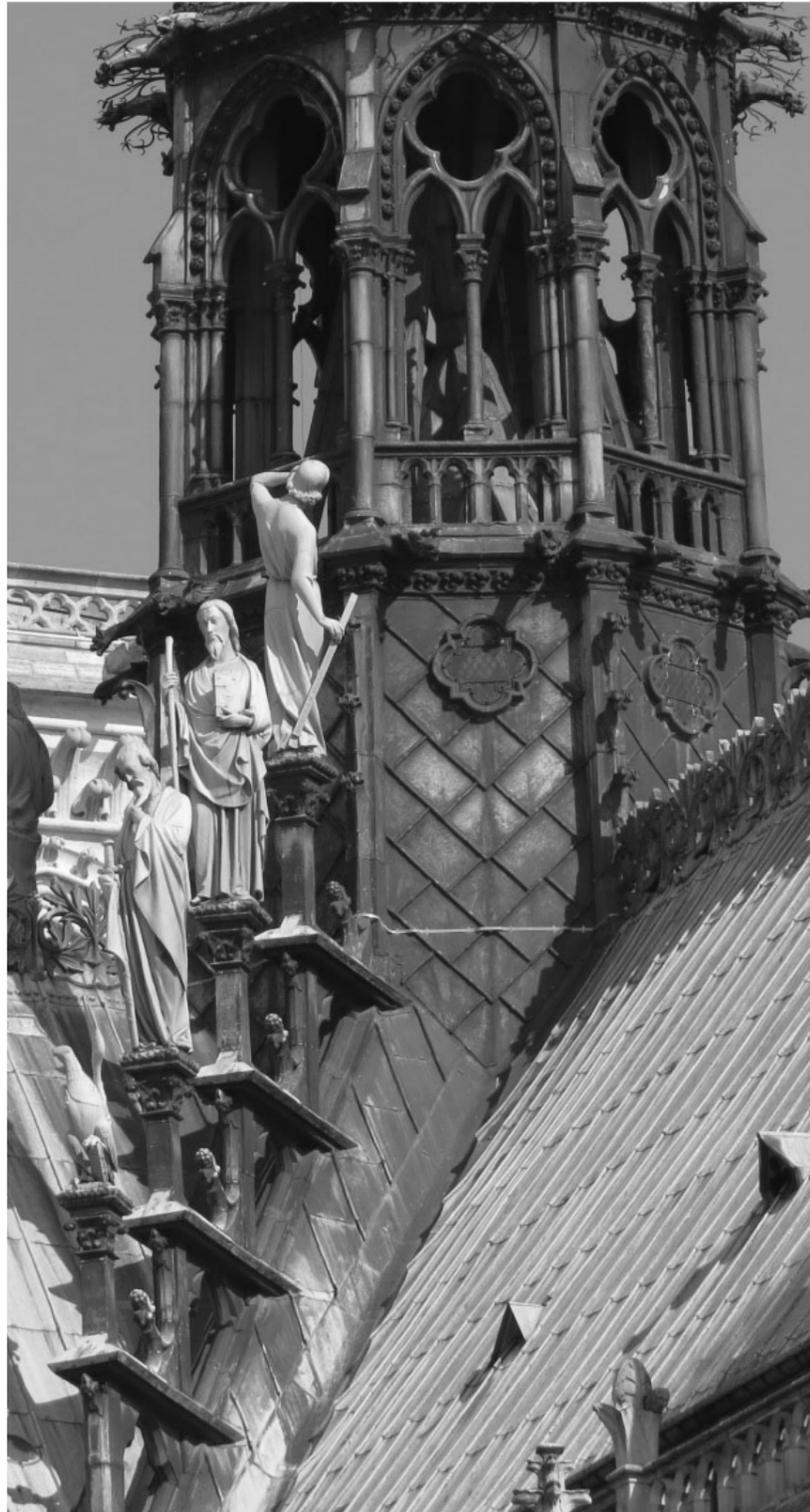


Photo de la toiture de Notre-Dame en plomb, recouvrant la charpente de la croisée des transepts et la charpente de la flèche

## La couverture

Dans cette partie nous détaillerons les choix de mise en œuvre qui concernent la couverture de la charpente, du faitage au cheneau. Dans un premier temps nous argumenterons le choix de notre matériau. Dans un second temps, nous décrirons le complexe de toiture et le traitement des eaux pluviales.

### *La matière*

Pour la couverture de notre charpente nous avons choisi d'opter pour l'alliage zinc-titane. Ce dernier est composé à plus de 99 % de zinc électrolytique pur, et à moins de 1% de titane et de cuivre, améliorant sa durabilité mais aussi sa malléabilité.

Selon notre étude, l'emploi du plomb pour couvrir la cathédrale Notre-Dame de Paris, n'est plus une solution aussi pertinente qu'elle a pu l'être dans le courant de l'époque médiévale. Le zinc est quant à lui un matériau tout à fait contemporain, auquel est associé un savoir-faire parfaitement maîtrisé autant par des industriels que par des artisans. Son emploi est aujourd'hui courant jusque dans les projets architecturaux les plus prestigieux.

Le premier argument qui favorise l'emploi du zinc-titane contre celui du plomb, est la toxicité. Nous ne pouvons ignorer que le plomb est un matériau dangereux pour l'environnement et la santé humaine quand le zinc, présent naturellement dans notre alimentation à un impact moindre, et n'est dangereux que dès lors qu'il est présent à très grande quantité.

Si le plomb et le zinc concèdent un niveau d'érosion relativement similaire (1), environ 0.3 mm de perte par

siècle, l'écart de leur masse volumique fait qu'une épaisseur de zinc-titane plus importante peut être employée à la réalisation de la couverture de la cathédrale sans générer une surcharge de la toiture dans son ensemble. Cette surépaisseur par rapport à l'état originel est pour nous, gage d'une plus grande performance de l'étanchéité de la couverture et donc de la durabilité de la charpente dans son ensemble.

Le zinc a une température de fusion supérieure de 90°C à celle du plomb, limitant légèrement sa réaction au feu. Cette caractéristique peut aussi être un atout dans un contexte de réchauffement climatique, où le cas échéant, la couverture de la cathédrale sera amenée à subir les effets de canicules récurrentes. C'est-à-dire une exposition à un ensoleillement intense sur de longues périodes et donc à des températures élevées, ce qui pourrait nuire à l'intégrité de la couverture.

Dans les deux cas, pour nous l'objectif est avant tout la combustion de la couverture qui doit être évitée afin de ne pas engendrer, à nouveau, un risque de pollution majeur. Notre choix du zinc-titane réside aussi dans la capacité de ce matériau à pouvoir être moulé avec une grande précision, garantissant la restitution de toutes les gargouilles et de toutes les modénatures ainsi que des lucarnes présentes la flèche et les pans de toiture.

Pour couvrir la flèche, nous choisiront d'en fermer les ouvertures à l'aide d'un polycarbonate transparent pour protéger les parties intérieures de la structure et ainsi protéger jusqu'à la croisée des transept qui se trouverait vulnérable de par l'impossibilité de réaliser des plancher entre modules amenée par la présence des escalier. La structure principale de la flèche sera réalisée en chêne, essence incompatible avec une couverture en zinc à cause de son acidité. La sur-structure qui servira à

(1) Pauline Sainte. Contribution des matériaux de couverture à la contamination métallique des eaux de ruissellement. Sciences de la Terre. Université Paris-Est, 2009.

accueillir les arches et les ornements et qui sera la seule à être couverte sera donc réalisée en sapin, essence plus compatible avec ce type de matériau.

Le zinc est aussi un matériau typique de la capitale, ce qui assure son intégration dans le paysage parisien. Les aspects du plomb et du zinc sont très similaires, d'un gris clair, tirant vers blanc par temps sec et au soleil, plus sombre par temps humide, et légèrement teinté de bleu. Des procédés industriels permettent de maîtriser la teinte du zinc-titane, ce qui offre la possibilité de définir la teinte la plus appropriée pour habiller la cathédrale.

#### *Du faîtage au chéneau, le dessin de la couverture*

Au niveau du faîtage, la crête dessinée par Viollet-le-duc peut être restituée en zinc-titane, perpétuant ainsi son esthétisme sans surcharger cette partie de la charpente. Sous la crête nous disposons un linéaire de crête qui vient lui aussi rapporter le dessin originel, composé de six clous émergeant et ponctuant le faîtage. Ce composant est cloué au voligeage et par endroit, aux arbalétriers et/ou sur une des pannes intermédiaires. Ensuite viennent les tuiles, elles prennent la dimension d'un gabarit unique similaire à l'original afin de pouvoir restituer les lignes et l'esthétique de la couverture tout en permettant une production sérielle de ces éléments. Au bénéfice d'un délai restreint de mise en œuvre. Le gabarit que nous avons défini d'après nos ressources est de 110 x 90 x 0,07 cm.

Nous avons décidé de créer un double voligeage croisé qui se superpose. Un premier voligeage permettant de contreventer le module de ferme. Il est fixé au niveau des arbalétriers et des pannes (sablière et faîtière). Le deuxième voligeage sert comme support pour la couverture en zinc-titane. Ainsi, toute maintenance est possible au niveau de la toiture sans porter préjudice à la structure. Et



Photo prise d'une toiture parisienne en zinc.



Photo prise d'un ouvrier travaillant sur une toiture en zinc.

Source : <http://www.riccoboni.fr/paris-ville-de-zinc-dardoise/>



Photo prise de l'intérieur de la flèche vers l'extérieur. La structure en bois de la charoente de la flèche est entièrement recouverte de plomb.



Photo prise par Lodoïs Gravel, pour France 3 Lorraine, de Julien le Bras près de la maquette réalisée par les couvreurs de l'entreprise Le Bras Frères en septembre 2019. Elle présente un moulage neuf basé sur une crête de toiture originale restaurée en 1856 par Viollet-le-Duc.



Couverture de plomb de la cathédrale Notre-Dame de Paris et sa crête de faîtage, cliché d'Arnaud Timbert pour le ministère de la culture

lors du levage ou des différentes manipulations du module, ce dernier reste contreventé même si la couverture n'est pas posée.

Du fait de l'orthogonalité de notre système modulaire de charpente, l'écart entre les pannes sablières et l'extrémité extérieure de l'arase du mur gouttereau est variable. En conséquence, nous avons donc dessiné un système de gouttière qui soit en mesure de s'adapter à l'existant.

La liberté de conception offerte par l'usage du zinc titane, nous permet de reproduire la crête comme Viollet le Duc l'a imaginé. Initialement en fonte, Viollet-le-Duc l'a reproduit en plomb en lui apportant des modifications esthétiques mais aussi techniques, car la méthode de fixation par percement dans le faîtage sans recouvrement favorisait la pénétration d'humidité dans la charpente. La fixation pensée par Viollet-le-Duc se traduit par une tige en acier inoxydable qui s'insère à l'intérieur de la moulure en plomb et la pénètre dans toute sa longueur pour ensuite, venir se fixer au faîtage. Nous avons repris ce même système pour la nouvelle crête en zinc-titane. A l'époque la crête n'était pas seulement un élément décoratif mais aussi un moyen de donner du poids aux feuilles de plomb qui couronnaient le faîtage et qui empêchaient le vent de les enlever sur les charpentes anciennes. Avec les systèmes employés de nos jours, il n'y plus cette question de soulèvement. Elle n'est donc qu'esthétique. Il est quand même possible de rajouter de la masse à la crête si nécessaire.

Cette nouvelle crête est donc fixée au faîtage grâce à une tige boulonnée qui parcourt toute la moulure pour lui donner de la rigidité et à cela, on ajoute des accroches de chaque côté du faîtage au niveau du voligeage. Nous éliminons toute possibilité d'infiltration d'eau via ces fixations grâce à un recouvrement comme on peut le voir dans le détail du faîtage.

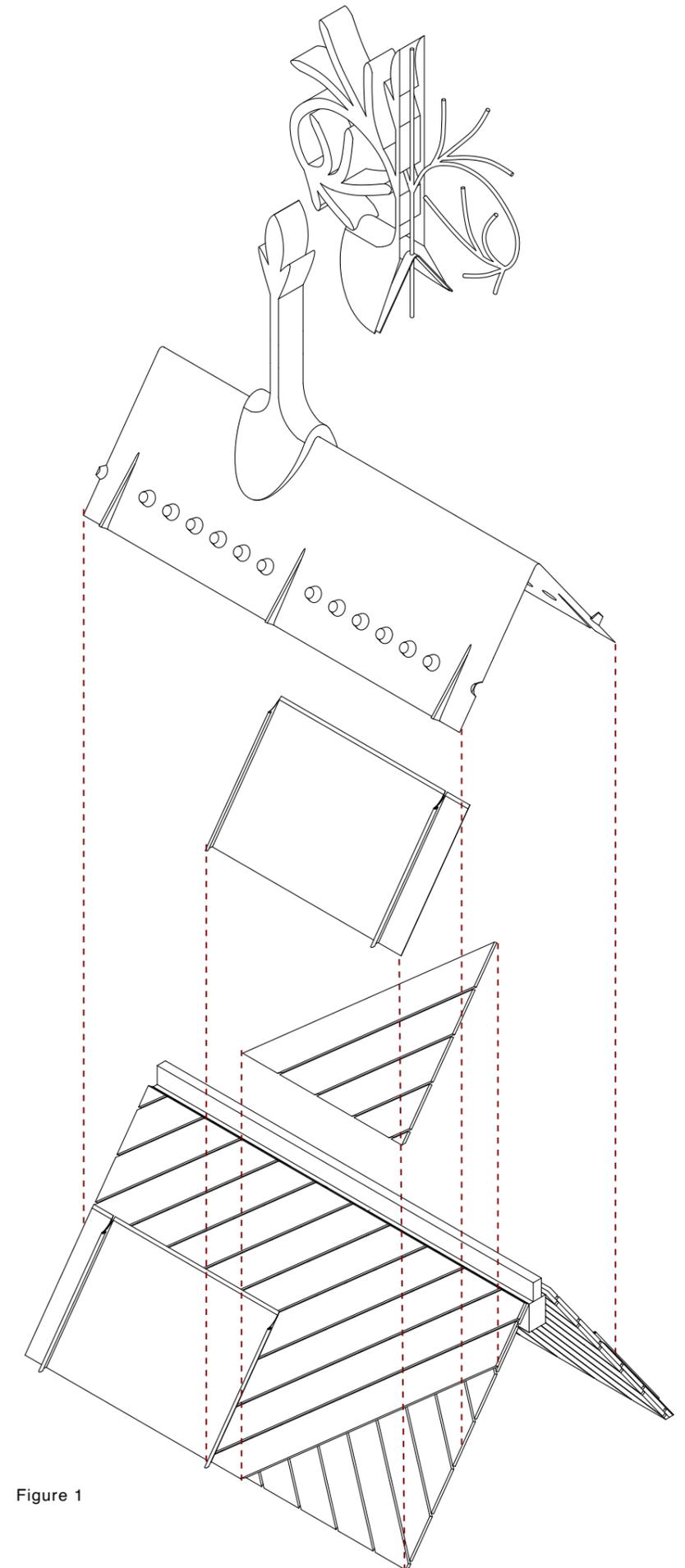


Figure 1

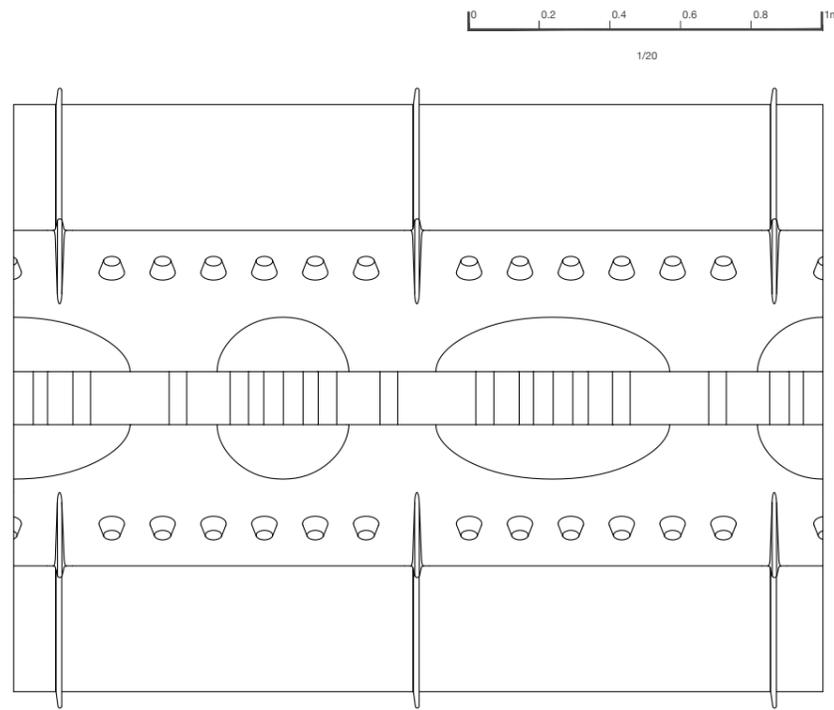


Figure 2

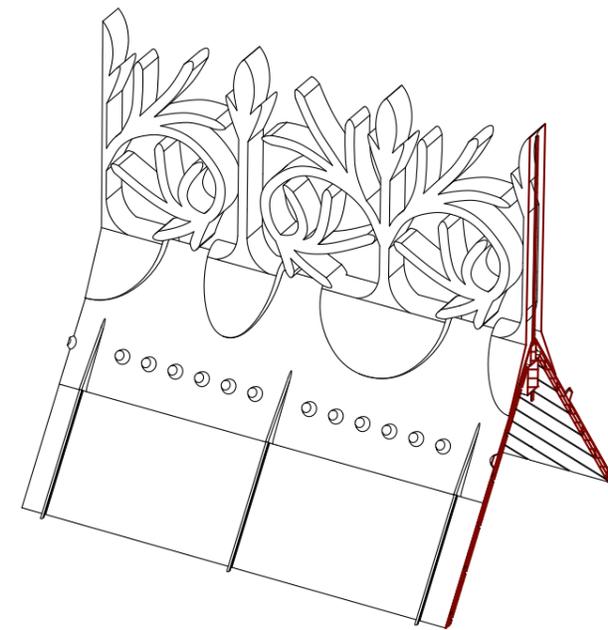


Figure 4

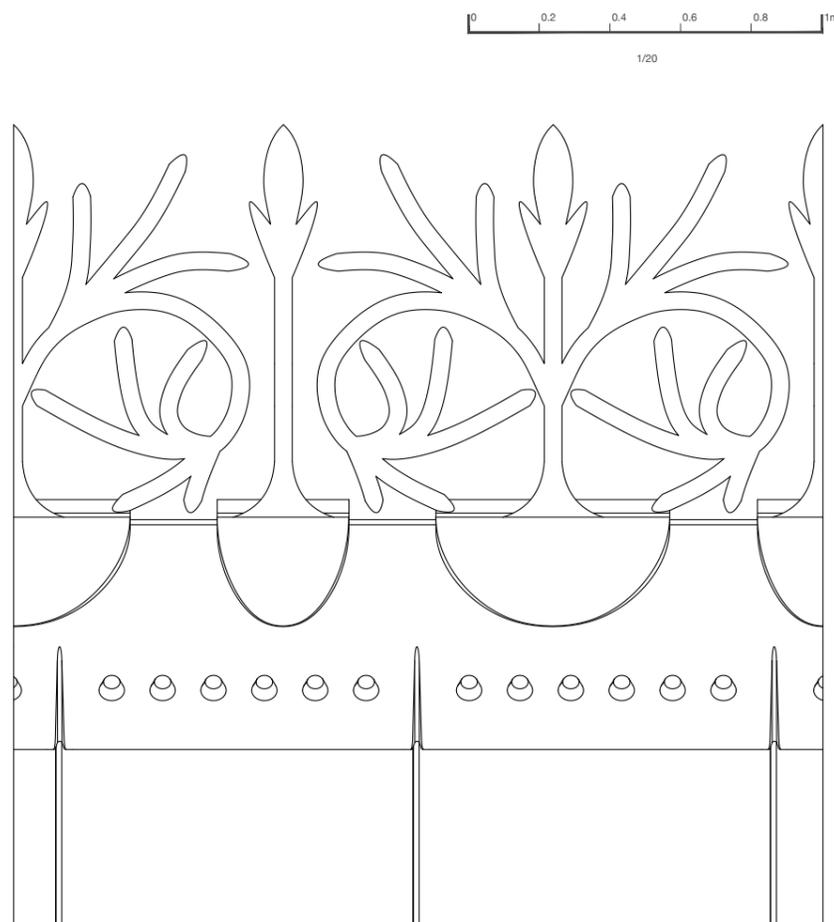


Figure 3

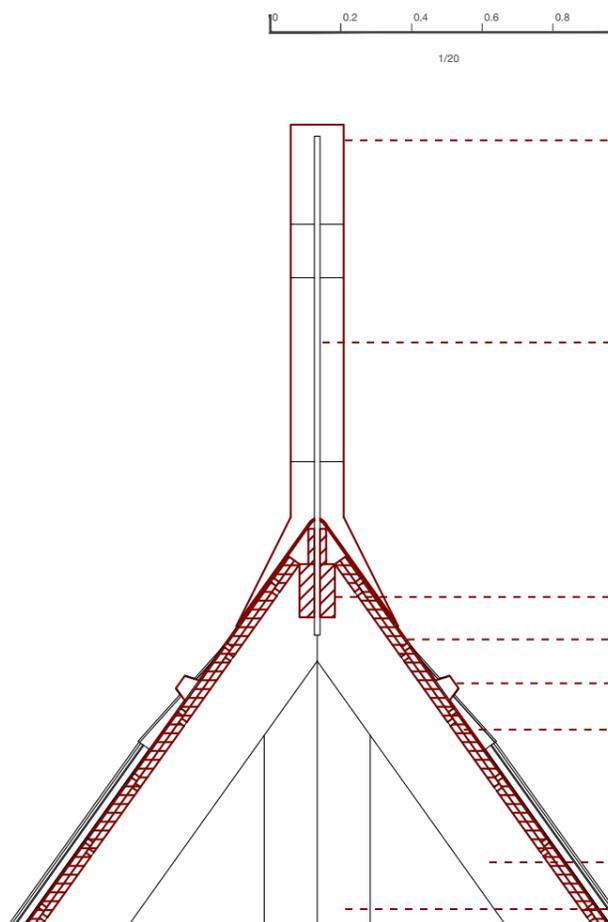


Figure 5

Figure 1 : Axonométrie éclatée du faîtage, échelle 1/20ème

Figure 2 : Plan du détail du faîtage, échelle 1/20ème

Figure 3 : Elévation du détail du faîtage, échelle 1/20ème

Figure 4 : Axonométrie du faîtage, échelle 1/20ème

Figure 5 : Coupe du détail du faîtage, échelle 1/20ème

Crête en zinc titane moulée ép. 7mm

Ossature de la crête avec une tige en fer avec fixation latérale sur le voligeage et boulonnée au faîtage

Panne faitière en chêne 150x100 mm

Revêtement en zinc titane, tuile 160x90cm ép. 0,07mm

Revêtement faîtage en zinc titane ép.7mm

Double voligeages croisés 45°, liteau en sapin 100x18mm

-Contreventement

-Support pour le revêtement

Arbalétrier en chêne, 150x200mm

Poinçon en chêne, 150x150mm

En ce qui concerne le chéneau, nous avons décidé de prendre une solution classique, également en zinc-titane. La dernière ligne de feuilles de zinc-titane vient recouvrir une pièce plus épaisse afin de servir de support pour le fond de chéneau, fait à l'aide de deux lattes de bois posées sur des cales en bois, permettant de créer la pente nécessaire au bon écoulement de l'eau. De plus, nous venons d'installer une plaque de zinc sous le chéneau afin de protéger la tête du mur bahut. Il faut également rappeler que la maniabilité du zinc-titane permet une certaine flexibilité pour faire face à la non-régularité des murs pour garantir une continuité d'écoulement sans faille d'étanchéité.

En ce qui concerne l'écoulement des eaux pluviales, actuellement, il existe des descentes d'eaux pluviales placées tous les six mètres environ. Nous avons donc une surface de pan reprise entre deux descentes d'EP de 36m<sup>2</sup> environ (cf surface représentée sur le schéma explicatif d'évacuation des EP). Selon le DTU, avec une section minimale de 90 cm<sup>2</sup> pour le chéneau, en se situant dans le cas le plus défavorable, une pente de 5mm/m est nécessaire, c'est-à-dire un maximum de 1,5 cm de dénivelé entre le point le plus haut et le point le plus bas.

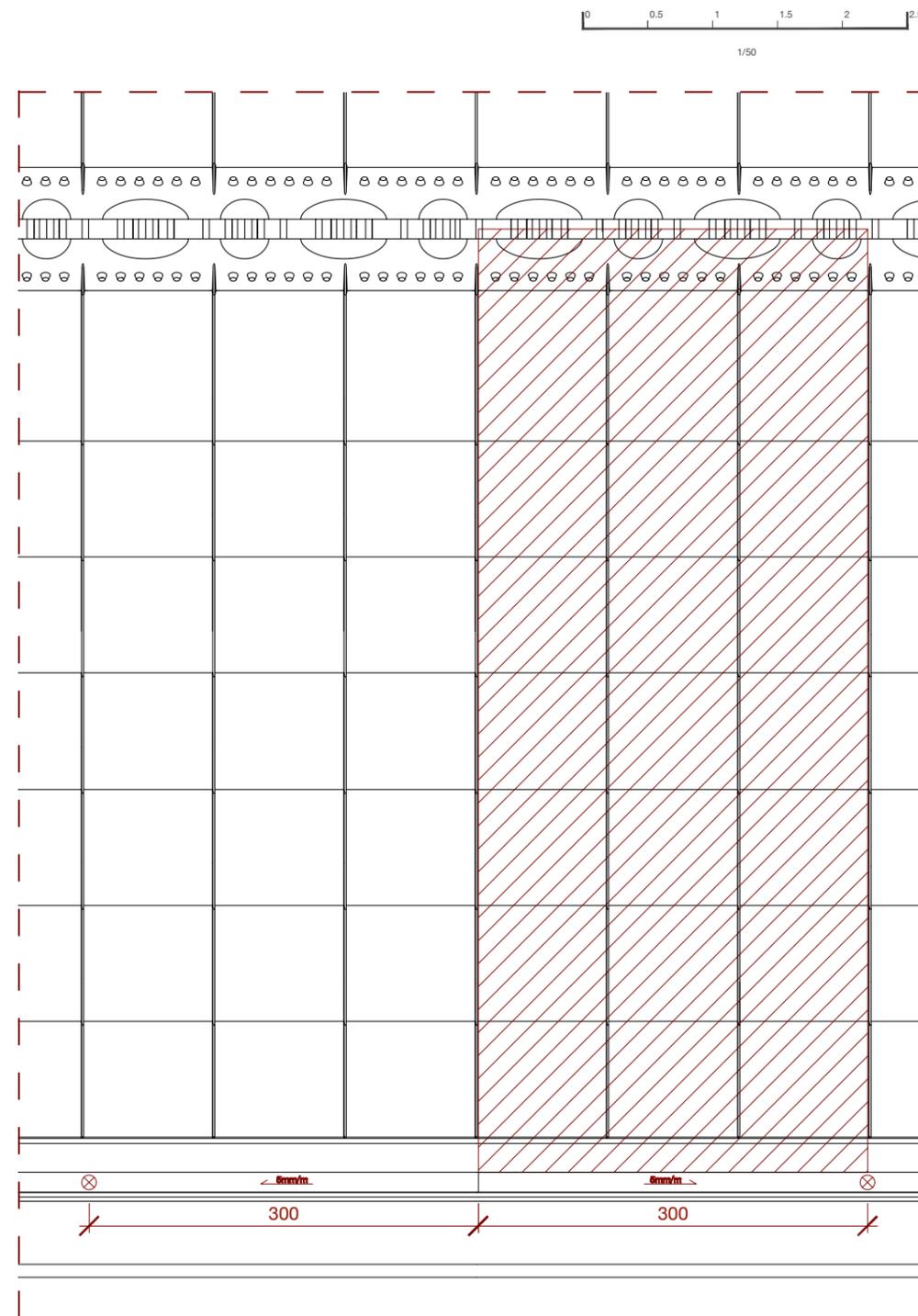


Figure 1

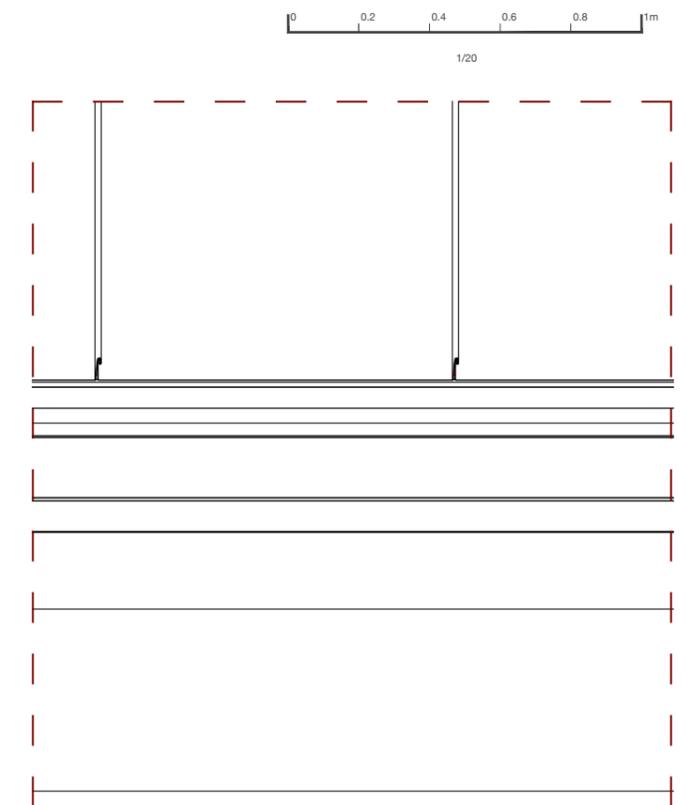


Figure 2

Figure 1 : Plan du réseaux d'EP, échelle 1/50eme

Figure 2 : Plan sur le détail du chéneau, échelle 1/20eme

Figure 3 : Axonométrie du détail du chéneau, échelle 1/20eme

Figure 4 : Coupe sur le détail du chéneau, échelle 1/20eme

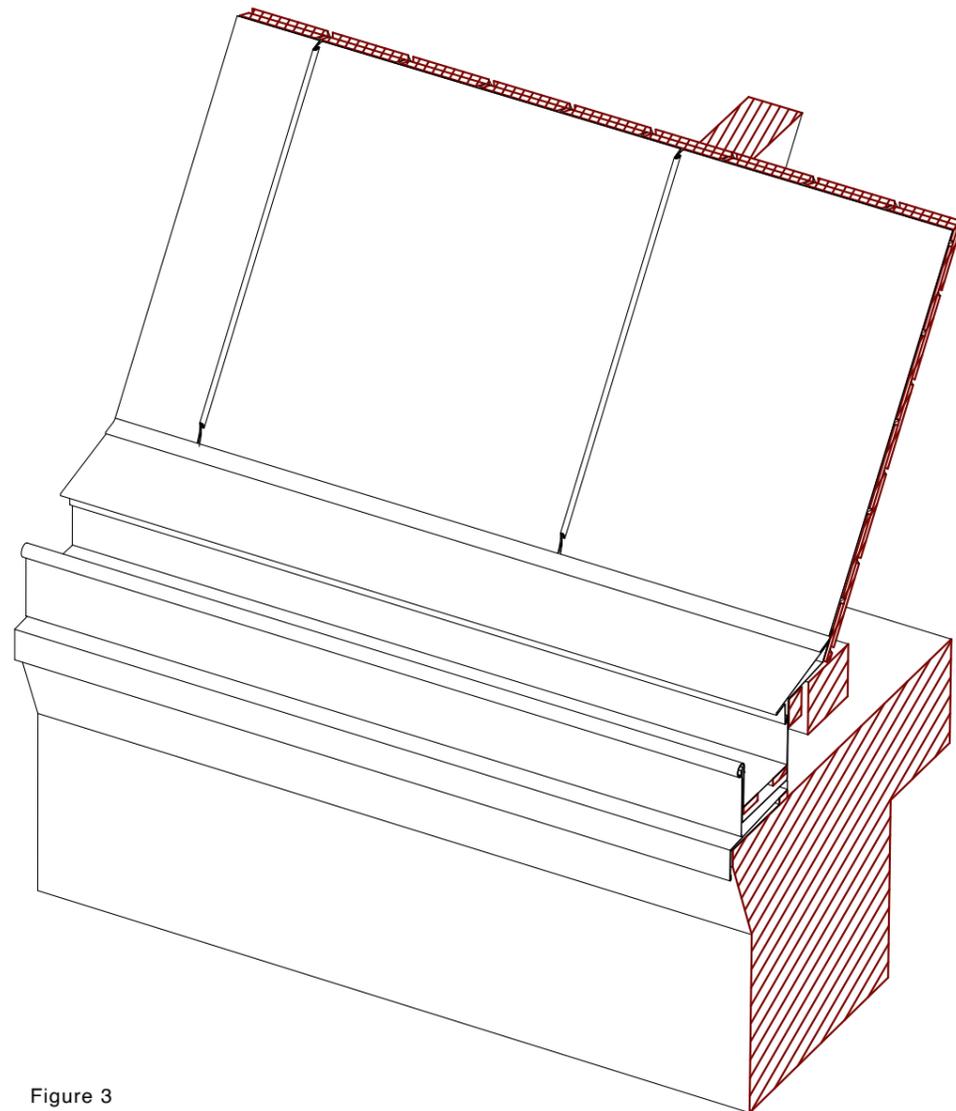
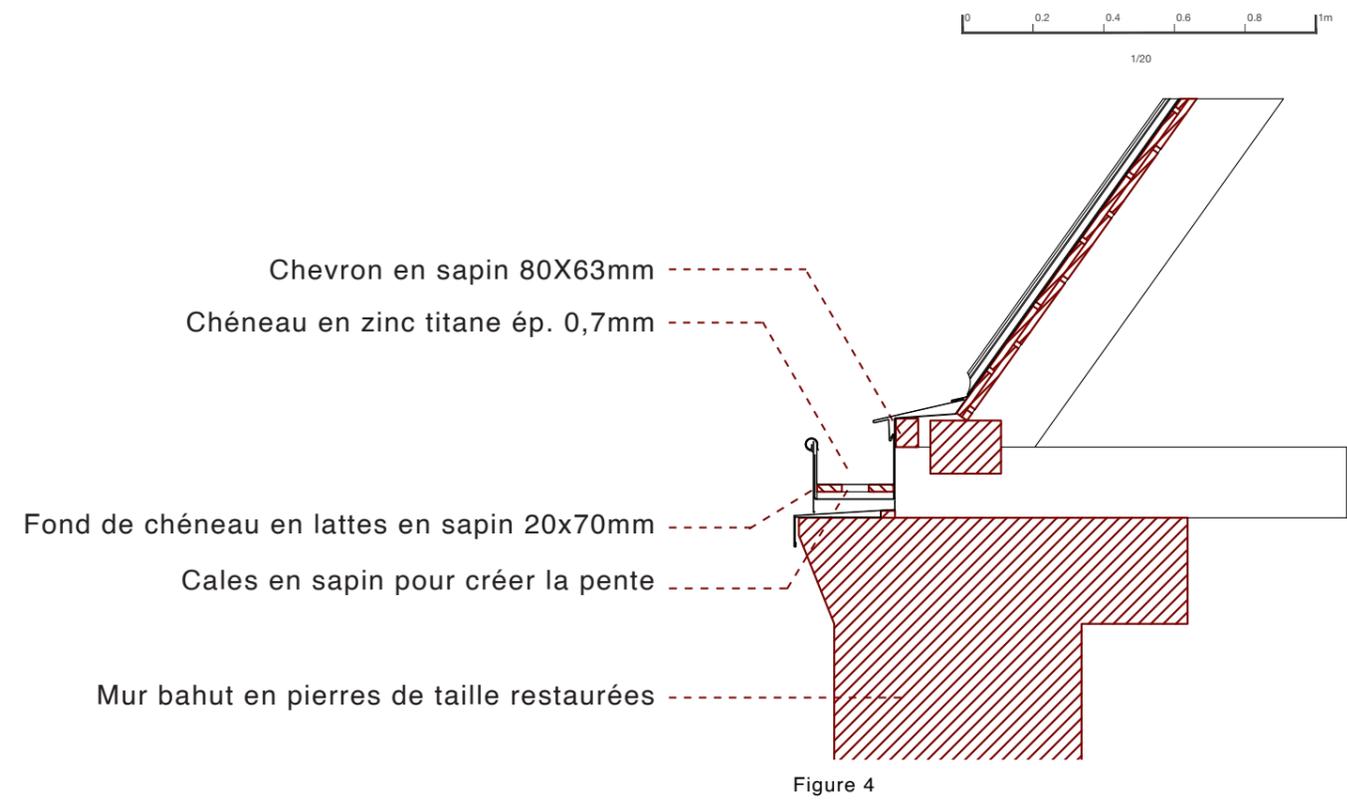
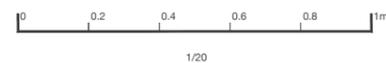


Figure 3



Chevron en sapin 80X63mm  
Chéneau en zinc titane ép. 0,7mm

Fond de chéneau en lattes en sapin 20x70mm  
Cales en sapin pour créer la pente

Mur bahut en pierres de taille restaurées

Figure 4



Revêtement en zinc titane, tuile 160x90cm ép. 0,7mm  
Double voligeages croisés 45°, liteau en sapin 100x18mm  
Contreventement + Support pour le revêtement

Arbalétrier en chêne, 150x200mm

Sablère en chêne, 150x200mm  
Entrait en chêne, 150x200mm

Figure 4



Figure 1 : Plan du détail de la couverture de la flèche, échelle 1/20eme

Figure 2 : Axonométrie sur le détail de la couverture de la flèche, échelle 1/20eme

Figure 3 : Elevation du détail de la couverture de la flèche, échelle 1/20eme

Figure 4 : Coupe sur le détail de la couverture de la flèche, échelle 1/20eme

*Couvrir la flèche*

Pour couvrir la flèche, le chêne étant incompatible avec une couverture en zinc, c'est en sapin que sera réalisée la sur-structure qui servira à accueillir les arches et les ornements. Le chêne de la structure principale vulnérable aux intempéries sera recouvert d'une membrane afin d'être également couvert en zinc-titane.

La durabilité de l'escalier sera assurée par une conception non piégeante, limon en V, possibilité de fentes en

milieu de marche, ceci afin d'encourager l'écoulement de l'eau. La durabilité naturelle du chêne dans ce type de circonstances suffira à assurer la pérennité de la structure. La maintenance étant également facilitée grâce à la présence de l'escalier, un entretien régulier de cette partie de la flèche sera plus aisée et permettra d'autant plus sa conservation dans le temps.

Des filets, discrets, en acier galvanisé seront placés aux niveaux des ouvertures pour empêcher les volatiles de venir s'installer dans la flèche.

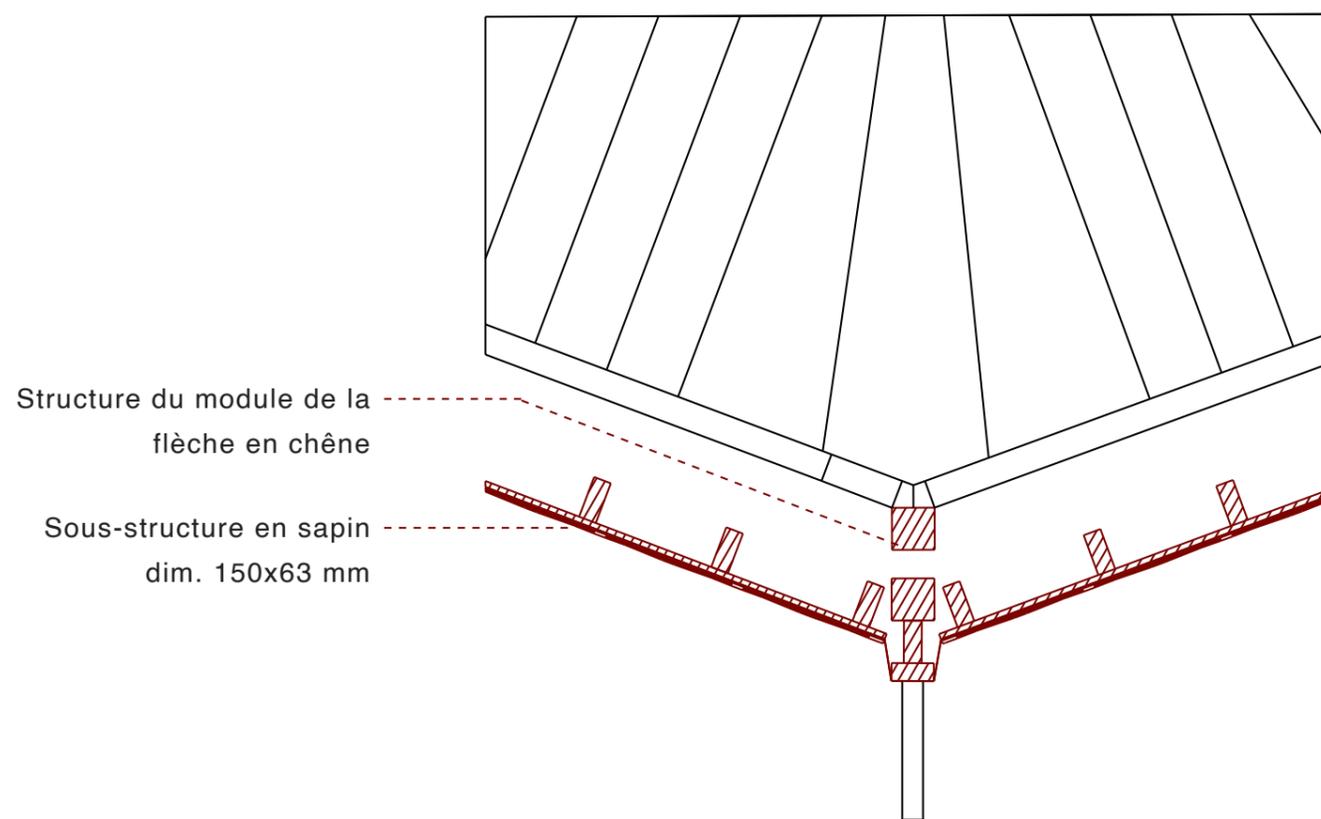
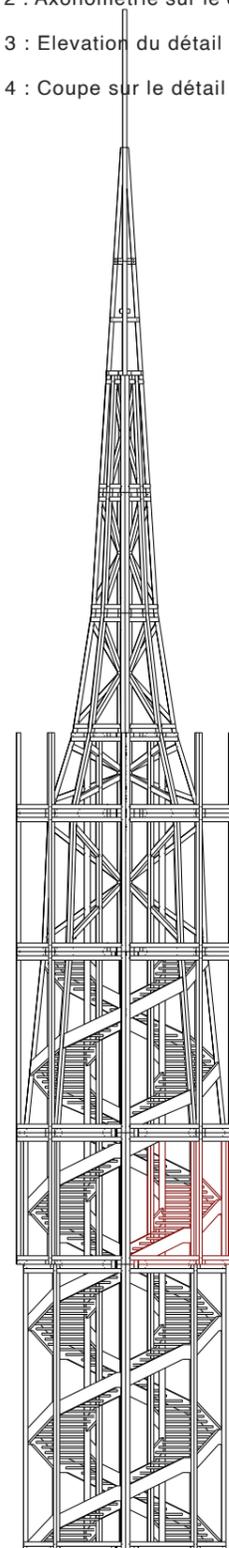
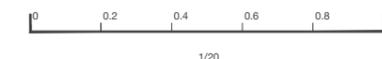


Figure 1

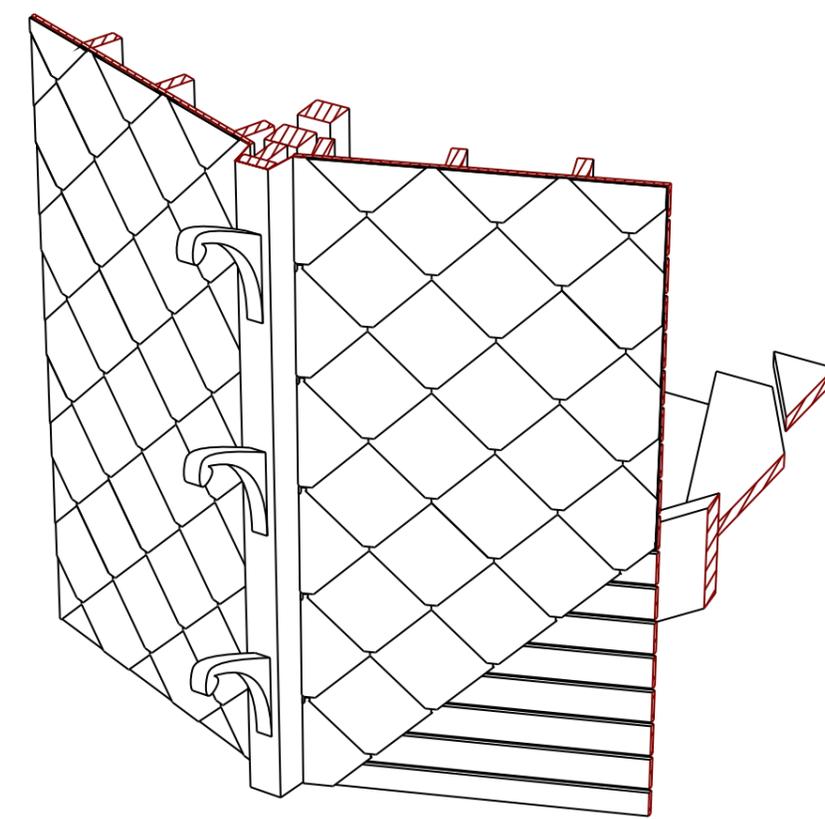


Figure 2

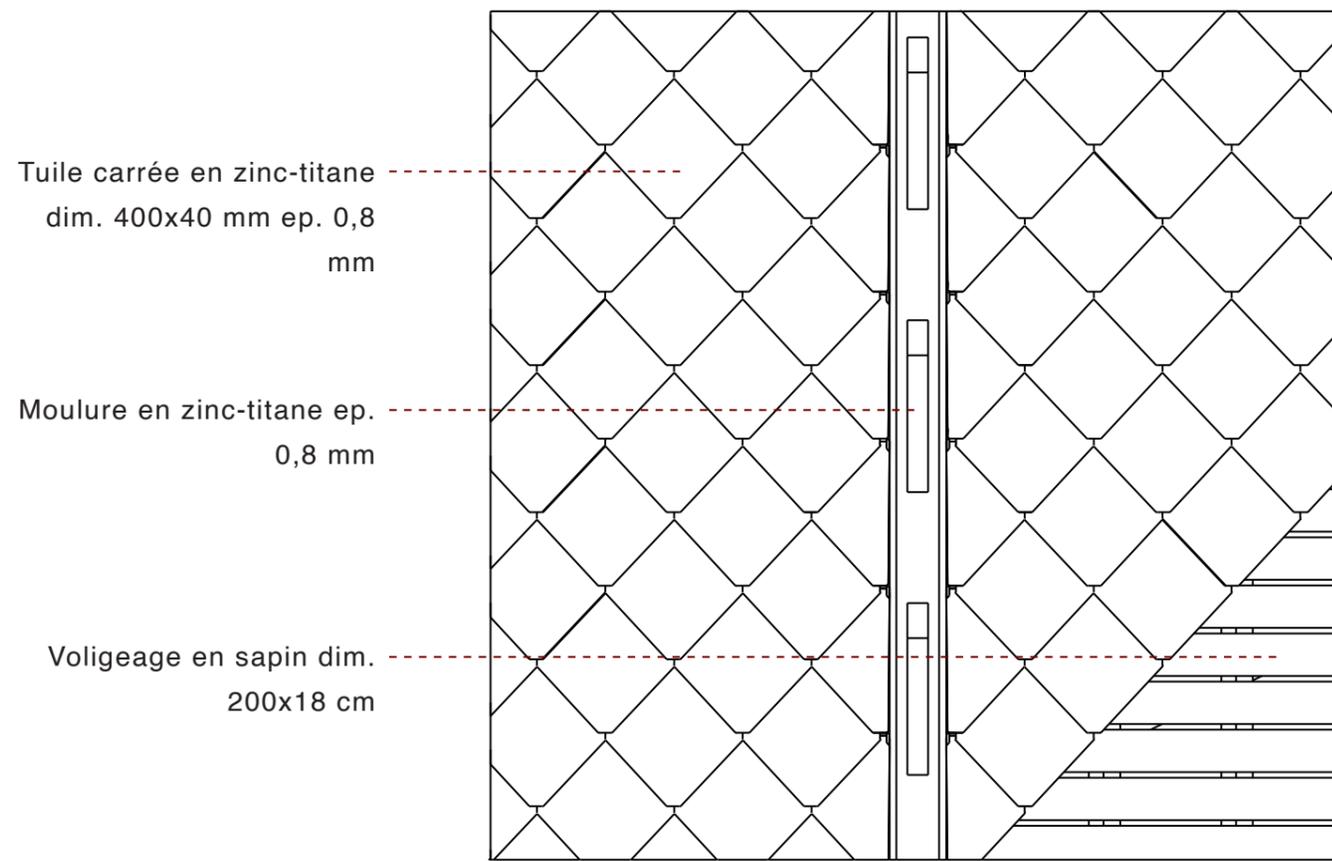


Figure 3

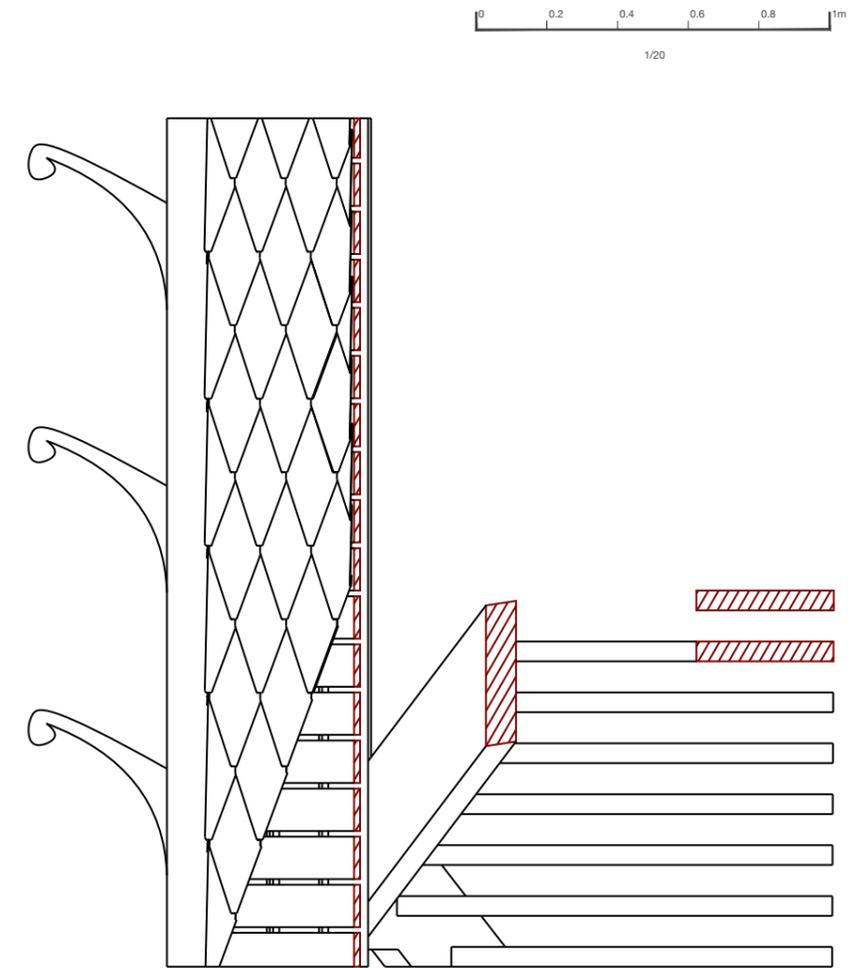


Figure 4

## Notice technique



Photo prise après l'incendie du 15 Avril 2019, montrant la destruction de la voûte et de la charpente de Notre-Dame de Paris

### Prévention incendie

La prévention des incendies est un point crucial du projet de reconstruction de la toiture de la cathédrale. Nos choix techniques reposent sur deux axes intrinsèques à la conception de la charpente :

- La veille, qui induit la possibilité de pouvoir circuler et surveiller la charpente en tous points, mais aussi de pouvoir intervenir rapidement et efficacement.
- Le compartimentage, qui permet de limiter, voire d'éviter la propagation du feu à travers l'édifice.

À ces deux axes nous pourrions ajouter un troisième argument qui est celui de la modularité. En effet, comme nous l'avons exprimé auparavant, la modularité des éléments qui composent la toiture a pour ambition de pouvoir permettre une maintenance que l'on peut qualifier d'aérienne, qui ne nécessite pas ou peu le recours à un échafaudage, limitant ainsi les interactions avec la toiture et donc les probabilités que s'y reproduise un incendie.

#### *La veille*

La surveillance physique de la charpente est permise par l'espace déambulatoire laissé libre aux travers de tous les modules qui composent la charpente. Cet espace dégagé permet à un opérateur de pouvoir effectuer des rondes en gardant une vision et un accès à l'ensemble des recoins de la toiture, de l'abside jusqu'au sommet de la flèche.

La veille est complète si elle inclut un dispositif dit SSI de catégorie A. Soit le niveau le plus élevé de prévention incendie qui intègre l'évacuation des usagers par mesure de sécurité et afin de faciliter l'intervention des pompiers.

La cathédrale étant un établissement recevant du public, même si la toiture n'a pas cette vocation.

Notre projet, car il reprend l'expression d'une forêt, comporte une forte densité d'éléments de charpente répartis dans le volume de la toiture. C'est pourquoi, nous privilégions l'emploi de détecteurs dits "combinés" ou "multi-capteurs", qui permettent d'identifier la présence d'un départ de feu et ce dès les premières émissions de fumées (avant l'apparition des premières flammes). La répartition des détecteurs dans le volume de la toiture suit la composition modulaire. Par exemple, nous estimons que pour garantir l'efficacité du SSI, des détecteurs doivent être implantés sous et au centre de la poutre inférieure d'un portique sur trois. Un module de Fermes sur deux dispose d'un détecteur placé sous et au centre du troisième faux-entrait, quand l'autre dispose d'un détecteur situé sous la panne faitière. Enfin, un module sur trois compte un extincteur, permettant le cas échéant à l'opérateur venu relever l'adresse de l'alarme incendie de pouvoir réagir avant même l'arrivée des pompiers.

Pour compléter ces systèmes, nous mettons en place des colonnes sèches qui traversent les différents modules dans la charpente de la nef jusqu'à celle de l'abside, en passant par les modules du transept. Ce dispositif existe dans d'autres monuments religieux comme la cathédrale Notre-Dame de Strasbourg et la cathédrale Saint-Pierre à Rennes. Elles permettent aux pompiers d'avoir un accès rapide à de l'eau en hauteur. Au centre de la croisée des transepts, la colonne remonte dans la flèche pour asperger celle-ci de l'intérieur si un incendie venait à se déclarer. Nous envisageons cela en réponse à ce qu'il s'est produit lors de l'incendie de Notre-Dame de Paris, le 15 Avril 2019, lorsque la flèche s'est écroulée pour faire tomber sous son poids la voûte du transept.

Pour compléter ces dispositifs de prévention incendie, nous mettons en place des accès pompiers par les horloges situées au niveau de la charpente du transept. Ces horloges sont accessibles par les murs gouttereaux, à l'extérieur où s'écoule également l'eau de pluie en cas d'intempéries. Ces portes «secrètes» permettent donc un accès rapide pour les pompiers, s'ils venaient à devoir rentrer à l'intérieur de la charpente rapidement pour déclencher les colonnes sèches manuellement, si celles-ci avaient faillit à leur tâche, lors de la déclaration d'un nouvel incendie. Ces accès pompiers créés par les horloges existe aussi dans d'autres édifices religieux comme la cathédrale de Strasbourg.

#### *Le compartimentage*

La logique modulaire comporte en elle-même un principe de partition de la charpente. Ainsi chaque partie de la toiture est isolée les unes des autres au niveau de leurs jonctions.

À l'instar de la cathédrale Notre-Dame de Strasbourg ou encore de la cathédrale Saint-Pierre de Rennes, ce type de dispositif est mis en place afin de ralentir de façon significative la propagation du feu. À l'inverse d'un contexte où le compartimentage serait mis en œuvre au sein d'une charpente préexistante, dans notre cas nous pouvons scinder les parties de la charpente avec un niveau d'hermétisme élevé.

Ce sont donc six "fermes coupe-feu" qui sont insérées, pour quatre d'entre elles aux jonctions de la croisée des transepts, les deux restantes sont situées, l'une au milieu de la nef, l'autre en avant de l'abside.

Cette ferme coupe-feu vient en contact, mais sans s'y poser, à l'intersection de deux voûtes afin de freiner la propagation du feu au niveau de l'extrados, par

l'intermédiaire des portiques et des pannes.

Ces fermes coupe-feu reprennent le dessin et la composition structurelle des modules dit des Fermes (nef, transepts, chœur). Cet élément est auto-portant et est maintenu dans sa position par l'appui horizontal qu'il partage avec les modules qui lui sont contiguës et en appui vertical sur deux corbeaux. Ces fermes coupe-feu ont donc une épaisseur de bois similaire à la section des barres utilisées dans les modules, soit 150 mm, que nous pouvons faire varier en fonction des besoins vis-à-vis des rattrapages de pose sur le chantier. Nous avons évalué que cette section peut descendre à 100 mm avant d'entraîner l'effondrement de la ferme. En somme, les éléments en bois peuvent se consumer pendant 77 minutes avant de ne plus être en mesure d'assurer leur performance mécanique. La ferme coupe-feu est comblée par un complexe de laine de roche, incombustible (A1) qui assure une protection de deux heures au feu, limitant aussi le fait que les flammes ne viennent consumer les pièces de bois sur toute leur faces. Bois et laine de roche sont enveloppés d'une épaisseur de 75mm de panneaux plâtre (produits dans le bassin parisien) aptent à éviter pendant quatre heures la transmission des flammes d'un compartiment à l'autre (EI 240 ou CF/SF 4h, procès verbal n°RS 06-024). Le cumule des matériaux offre donc un délai de réaction suffisant pour détecter, alerter et éteindre l'incendie avant que ce dernier ne se propage à l'ensemble de la toiture.

Chaque ferme coupe-feu, intègre une porte coupe-feu coulissante, qui répond aux mêmes exigences de résistance au feu que le reste de la ferme. Son dessin reprend le gabarit de chaque module, tout en laissant un accès confortable lors des opérations de maintenance d'ampleur.



Photo prise de la toiture avec une des horloges situées autour du transept

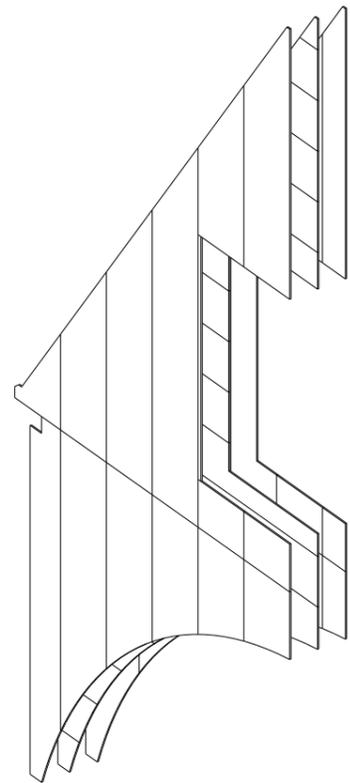
Figure 1 : Axonométrie détaillée de la composition d'une paroi coupe-feu, sans échelle

Figure 2 : Coupe longitudinale du module Abside avec sa liaison à la paroi coupe-feu, sans échelle

Figure 3 : Axonométrie situant le compartimentage des fermes coupe-feu, les accès pompiers par les horloges et les colonnes sèches, sans échelle

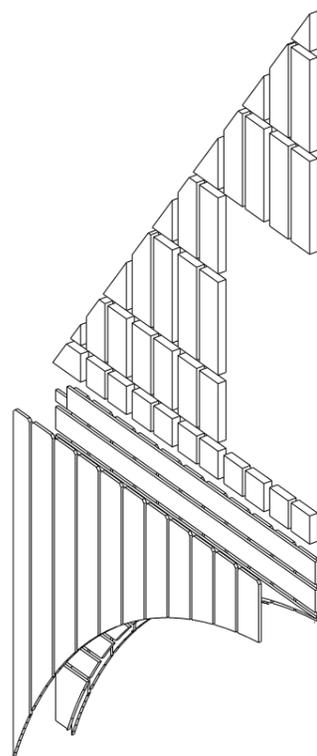
**EI 240 ou CF/SF 4h**

Calepinage croisé des panneaux de plâtre 25 mm x 3, suivant les dimensions standards



**EI 120 ou CF/SF 2h**

Laine de roche, 150 mm



Ossature complémentaire pour l'encastrement de l'isolant

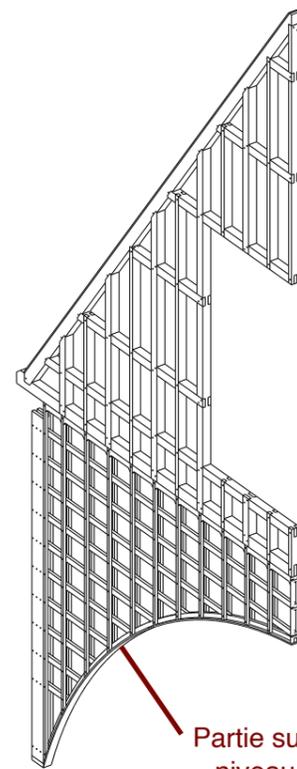


Figure 1

**Paroi CF**

Module ferme

Module liaison

Module abside

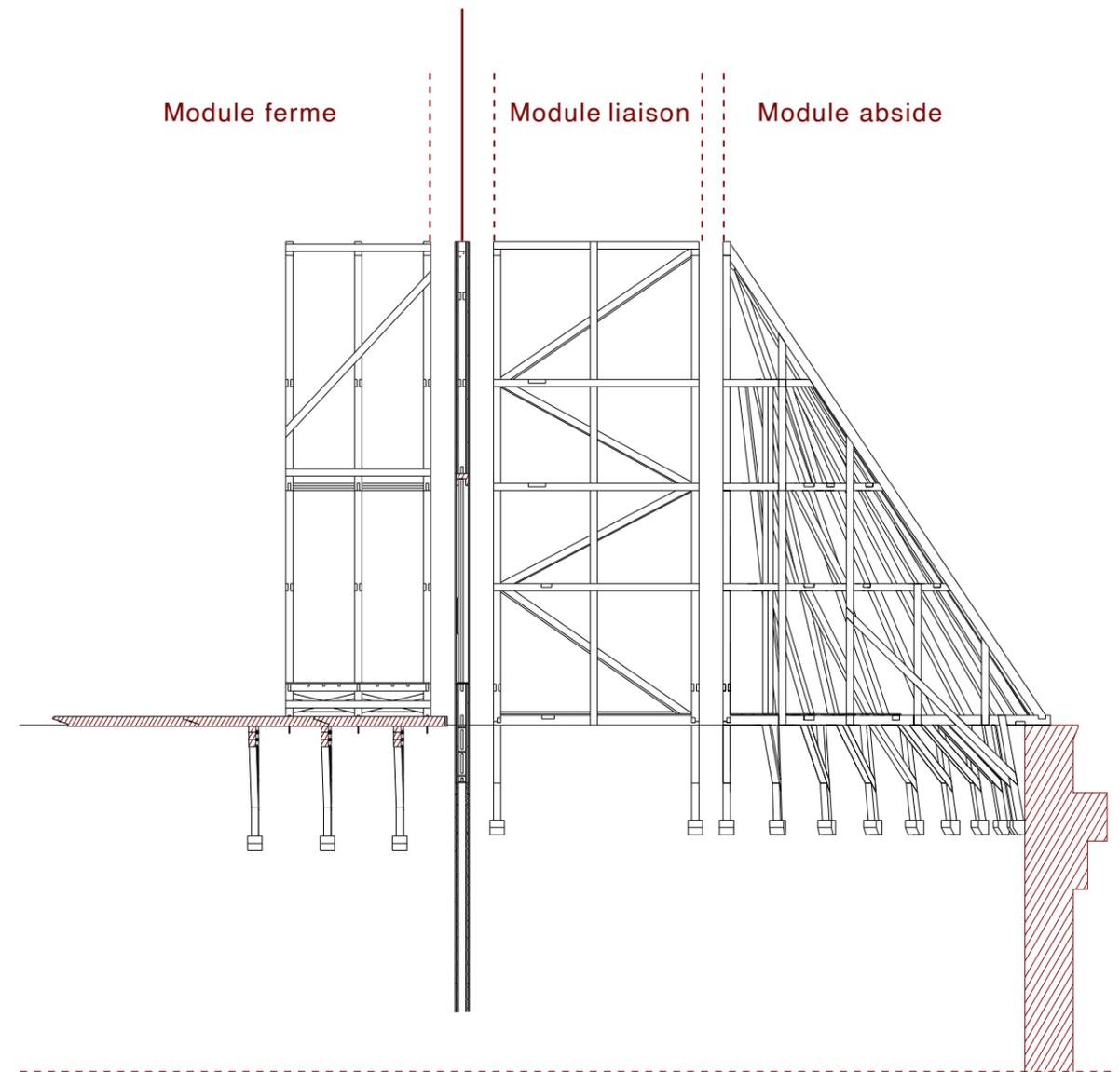


Figure 2

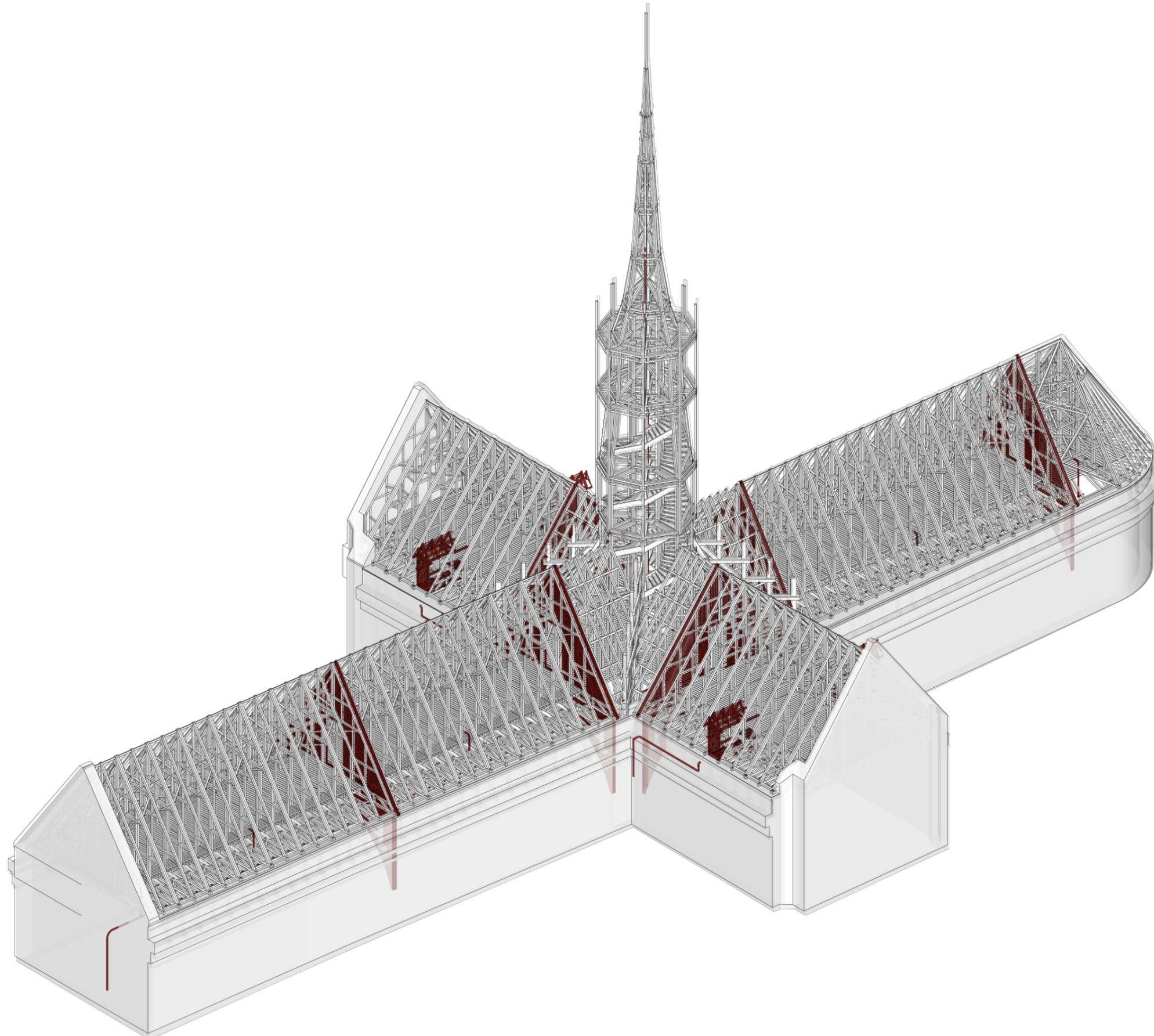


Figure 3

Figure 1 : Axonométrie sur la situation d'une paroi coupe-feu, échelle 1/200eme

Figure 2 : Axonométrie situant le compartimentage des fermes coupe-feu, les accès pompiers par les horloges et les colonnes sèches, sans échelle

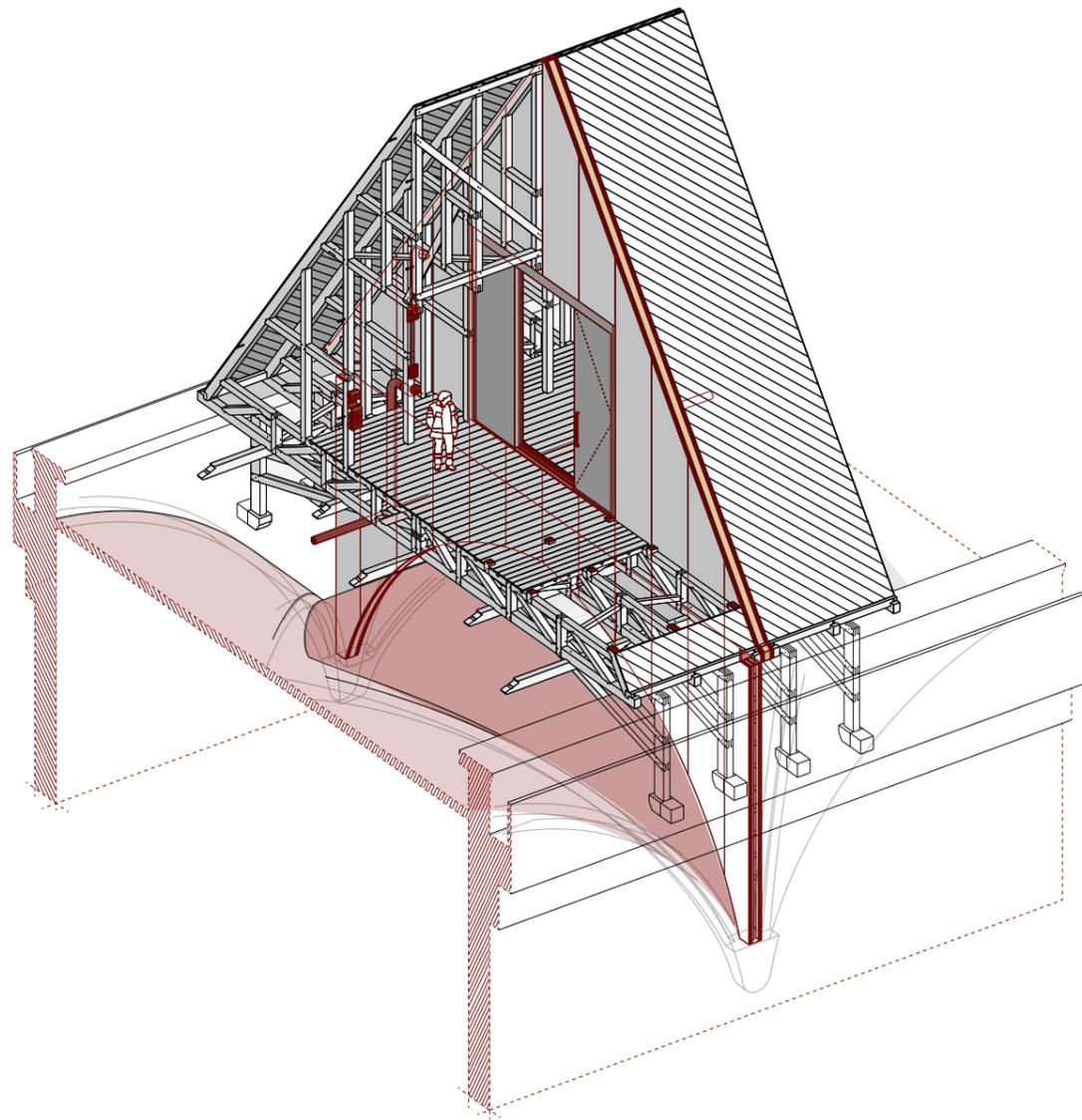


Figure 1

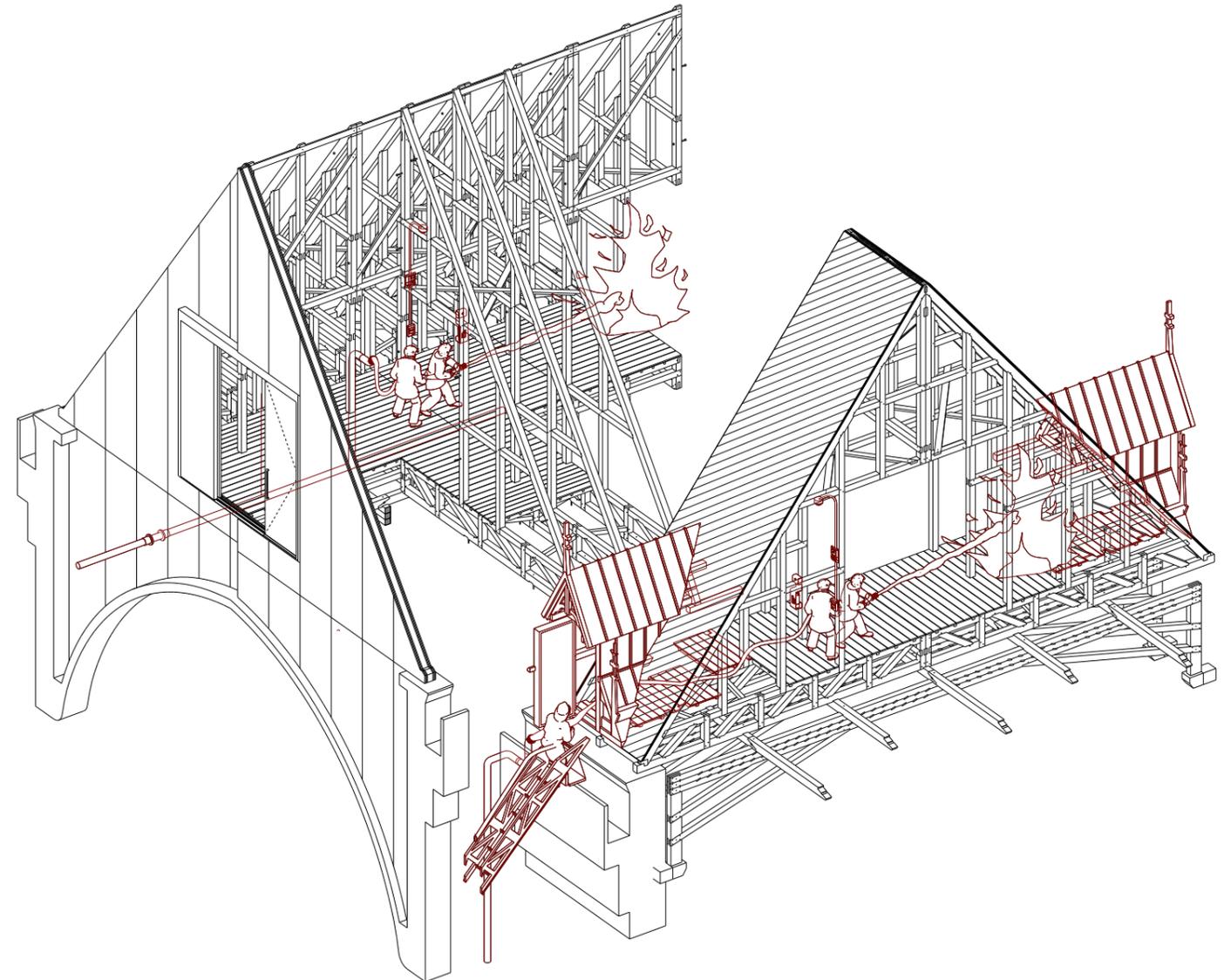
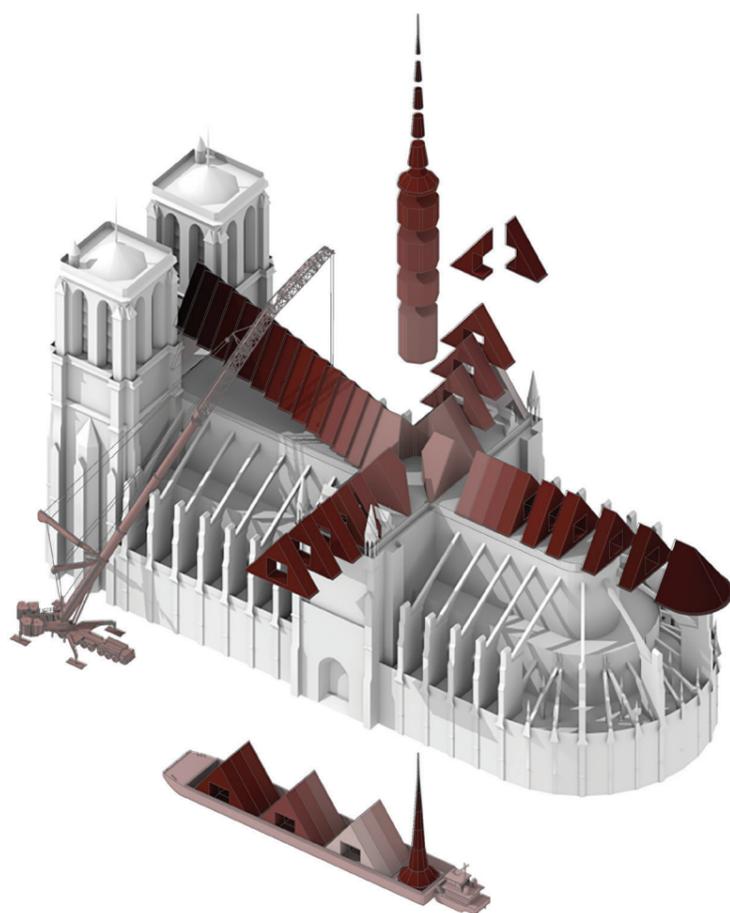


Figure 2



Schema de décomposition de la toiture de Notre-Dame

## Processus de mise en oeuvre

Le processus de mise en œuvre est intrinsèque à la conception modulaire, selon les possibilités offertes par les entreprises concourant à la reconstruction de la toiture nous avons donc imaginé trois scénarios de mise en œuvre.

Chaque scénario répond à un niveau de préfabrication de la charpente.

Scénarios :

- 1 - Scénario 3D (ex : demi-module)
- 2 - Scénario 2D (ex : demi-ferme de module)
- 3 - Scénario Unitaire (ex: Panne)

1 - Scénario 3D :

Dans ce scénario, les modules sont acheminés dans leur état final d'assemblage.

Ainsi, le montage de la charpente dans son ensemble peut se développer de la façon suivante:

Après réfection des voûtes, des murs gouttereaux et la rénovation des corbeaux, le chantier de maçonnerie est donc achevé. L'ensemble des portiques et des pannes sont acheminés par voie fluviale est levé par grutage pour être positionnés selon leur emplacement de références. Portiques et pannes sont assemblés successivement, de l'extérieur des volumes vers la croisée des transept. C'est le piètement de la croisée des transepts qui vient à être posé en dernier afin de fermer l'ensemble de cette sous-structure.

Afin de ne pas générer la création d'une surface au sol dédiée au stockage des éléments de la charpente,

le scénario 3D privilégie un flux tendu d'acheminement des modules afin que le chantier ne nécessite qu'un espace de manutention et de stationnement nécessaire aux déchargements des bateaux. C'est ainsi qu'une grue mobile (2) avec une capacité de levage adéquate pourra acheminer sur le maillage de portiques et de pannes les modules de chaque partie un à un, suivant la même logique de mise en oeuvre des portiques, soit de l'extérieur vers l'intérieur, puis de la base de la flèche vers son sommet.

Au fur et à mesure que sont assemblés les modules entre eux, ces derniers peuvent être couverts. Une fois que deux modules sont assemblés, le voligeage supérieur peut être posé, suivis de la couverture finale, allant de la crête de faitage au cheneau. Ce processus continue de montage a pour objectif de limiter le temps d'exposition de la charpente aux éventuelles intempéries qui pourrait nuire à son intégrité mécanique. C'est donc une fois la croisée des transepts couverte de son enveloppe de zinc-titane, que serait assemblée la flèche, alternant montage d'un module primaire (charpente) avec un module secondaire (modénature/couverture).

2 - Scénario 2D (ex : demi-ferme de module)

Dans ce scénario, les demi-modules sont décomposés pour être transportés en demi-fermes.

Le montage de la charpente dans son ensemble peut se développer de la façon suivante :

Après réfection des voûtes, des murs gouttereaux et la rénovation des corbeaux, le chantier de maçonnerie est donc achevé. L'ensemble des portiques, des pannes et des demi-fermes sont acheminés par voie fluviale pour ensuite, être placés sur le parvis. De là, l'assemblage des demi-fermes pour créer les demi-modules se fait sous un

<sup>(2)</sup> <https://www.liebherr.com/fr/int/produits/grues-mobiles-et-sur-chenilles/grues-mobiles/liebherr-grues-mobiles/ltm-information.html>

espace hors d'eau. La dernière étape consiste à lever par grutage les demi-modules pour être positionnés selon leur emplacement de références. Portiques et pannes sont assemblés successivement, de l'extérieur des volumes vers la croisée des transept. C'est le piètement de la croisée des transepts qui vient à être posé en dernier afin de fermer l'ensemble de cette sous-structure. C'est avec une grue mobile, tout comme le scénario 3D que, le levage sera fait afin de poser les demi-modules sur le maillage de portiques et de pannes.

Ce scénario génère une surface au sol dédiée au stockage des éléments de la charpente. Le scénario 2D privilégie le fait que les péniches seront chargées uniquement de plein, il n'y aura pas de perte de surface de stockage dans celles-ci. Cela permet également une bonne maîtrise de la construction des modules étant donné que les demi-fermes sont préfabriquées et montées en usine.

Dans la continuité du scénario 3D, dans le scénario 2D, les modules seront couverts au fur-et-à-mesure de leur pose. Le voligeage supérieur peut être posé, une fois que deux modules sont assemblés, suivis de la couverture finale, allant de la crête de faitage au cheneau.

### *3 - Scénario Unitaire (ex: Panne)*

Dans ce scénario, toutes les pièces sont préfabriquées et mises dans les péniches afin d'être transportées telles quelles.

Le montage de la charpente dans son ensemble peut se développer de la façon suivante :

Après réfection des voûtes, des murs gouttereaux et la rénovation des corbeaux, le chantier de maçonnerie est donc achevé. L'ensemble des pièces de la charpente sont

acheminées par voie fluviale pour ensuite, être stockées sur le parvis. Dès lors que les pièces se situent dans un espace hors d'eau, tout le montage et les assemblages des demi-modules se font sur place. Il s'agit premièrement, de réaliser les portiques qui seront positionnés selon leur emplacement de références et reliés par les pannes. Le travail se fait toujours de l'extérieur des volumes vers la croisée des transept. C'est le piètement de la croisée des transepts qui vient à être posé en dernier afin de fermer l'ensemble de cette sous-structure. Dès qu'un portique est fini, il peut être monté. Dans un second temps et dans la poursuite de ce travail à la chaîne, les demi-fermes seront assemblées pour réaliser les demi-modules. En fonctionnant de la même façon, dès qu'un demi-module est assemblé avec sa dernière pièce, il peut être soulevé par grutage pour être posé à son emplacement.

Ce troisième scénario génère une surface au sol dédiée au stockage et au montage des éléments de la charpente. Le scénario unitaire privilégie le fait que les péniches seront chargées uniquement de plein, il n'y aura pas de perte de surface de stockage dans celles-ci. Cela permet également de pouvoir aller chercher la ressource de bois dans un périmètre plus large étant donné que les demi-modules sont entièrement décomposés.

Dans la continuité des deux scénarios précédents, dans le scénario unitaire, les modules seront couverts au fur-et-à-mesure de leur pose. Le voligeage supérieur peut être posé, une fois que deux modules sont assemblés, suivis de la couverture finale, allant de la crête de faitage au cheneau.

### *La fabrication*

Quel que soit le scénario choisi, l'usinage des pièces pour

la fabrication des modules se fait en atelier. Contrairement à la réalisation initiale de la charpente pour laquelle le bois était vert et équarri, les sections plus faibles que nous employons pour notre système constructif impliquent un usinage des pièces plus conséquent. Pour éviter des variations dimensionnelles dues à des pertes et des reprises d'humidité du bois, la matière sera séchée avant usinage à un taux d'humidité correspondant au mieux au taux d'humidité auquel le bois sera durant sa période d'utilisation. Ce séchage du chêne sera d'autant plus envisageable que les sections seront plus faibles qu'initialement.

Les modules seront pré-assemblés en atelier afin de couvrir toute erreur éventuelle et y remédier au plus vite. Si les scénarios 2D et 1D ont été privilégiés ou si l'atelier ne permet pas un stockage des modules complets, un démontage de ceux-ci peut être envisagé. Les pièces seront alors scrupuleusement triées pour le stockage individuelles de ces dernières, modules par module. Elles seront stockées dans des conditions d'humidité stable pour éviter encore une fois toute variation dimensionnelle. Pour le scénario 3D et 2D, ce qui doit être assemblé avant d'arriver sur le parvis le sera juste avant l'acheminement.

### *Le montage*

Une fois les modules acheminés et, suivant le scénario choisi, montés sur le parvis, ils sont levés l'un après l'autre par une grue pour être amenés à leur position finale.

Le levage s'effectuera en positionnant les points d'accroche en partie basse du module, ceci pour éviter de lui imposer un effort de traction trop important. Les modules ne sont pas conçus pour.

La chronologie du montage de la charpente a déjà été explicitée dans les différents scénarios.

## Notes de calcul

### Modules Fermes

### RESULTATS SAP2000

#### 1. Matériels :

- Bois chêne sèche (D30)  
 Masse volumique : 650 kg/m<sup>3</sup>  
 Module d'élasticité : 13000 MPa  
 Sections : P15x15 (Barres ferme), Por15x30 (Portiques), C1.8x20 (Contreventements)

- Bois sapin sèche (C24)  
 Masse volumique : 435 kg/m<sup>3</sup>  
 Module d'élasticité : 14500 MPa  
 Sections : V1.8x20 (Voliges)

- Tuiles Zinc-Titane  
 Masse volumique : 7200 kg/m<sup>3</sup>  
 Module d'élasticité : 1078 MPa  
 Epaisseur : 0.7 mm

#### 2. Sections et poids propres :

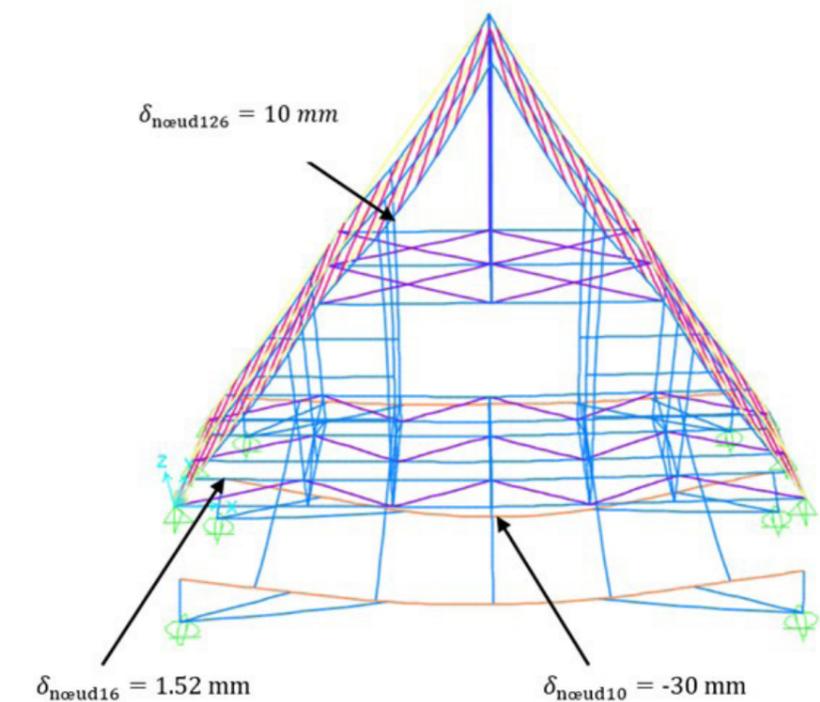
TABLEAU : LISTE DES SECTIONS				
Section	Total pièces	Total longueur (m)	Total poids (kg)	Volume (m <sup>3</sup> )
V1.8x20	40	119.867	187.711	0.432
P15x15	95	418.005	6113.324	9.405
Por15x30	3	39.000	1140.750	1.755
C1.8x20	30	94.955	222.195	0.342
Couverture			26.528	
<b>TOTAL</b>		<b>671.827</b>	<b>7690.508</b>	<b>11.933</b>

#### 3. Charges climatiques :

Type de Charge	Charge (KN/m)
Charge de vent versant Sud	0.64
Charge de vent versant Nord	0.07
Charge de neige	0.02

#### 4. Les déformations maximales ELU : 1.35G+1.5N+0.9V

Après l'analyse structurale effectuée sur SAP2000, nous avons obtenu les déformations les plus importantes dans les arbalétriers et l'un des portiques à l'intérieur du module. Ce qui prouve qu'elles sont les pièces qui soutiennent le plus de forces.

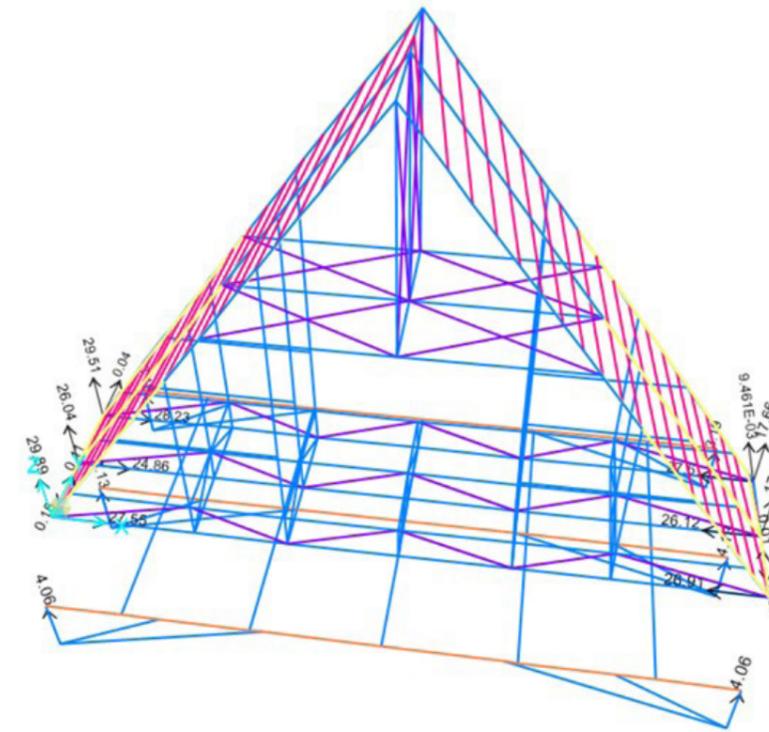


Le nœud 16 du corbeau a une déformation verticale de 1.52 mm en X(1). Le déplacement admissible pour cette barre de 1.3 m est de 2.16 mm. Ce qui signifie que le déplacement de 1.6 mm est inférieur à la valeur de la chute.

Le nœud 10 de l'entrait du corbeau a une déformation horizontale de 30 mm en -Z(3). Le déplacement admissible pour cette barre de 13 m est de 21,6 mm. Ce qui signifie que le déplacement de 30 mm est minime par rapport à la valeur de la chute.

Le nœud 126 de l'arbalétrier a une déformation verticale de 10 mm en X(3). Le déplacement admissible pour ces barres de plus de 12 m est de 20mm. Ce qui signifie que le déplacement de 10 mm est minime par rapport à la valeur de la chute.

5. Réactions Appuis ELU : 1.35G+1.5N+0.9V



Description de la flèche (déformation ou déplacement)	Diagramme
d) Déformation horizontale $\delta_y$ d'une poutre de roulement, mesurée au niveau de la partie supérieure du rail de pont roulant : $\delta_y \leq L/600$	
a) Déformation verticale $\delta_z$ d'une poutre de roulement : $\delta_z \leq L/600$ et $\delta_z \leq 25$ mm Il convient de prendre la déformation verticale $\delta_z$ égale à la déformation totale provoquée par les charges verticales, diminuée de la contreflèche préalable, comme pour $\delta_{max}$ dans la Figure 4.1 de l'ENV 1993-1-1.	

6. Taux de travail

- Compression d'Arbalétrier D:

$A = 22500 \text{ mm}^2$

$f_{c,o,k} = 23 \text{ MPa}$

$\sigma_{c,o,d} = 1.42 \text{ MPa}$

$f_{c,o,d} = 1.42 \text{ MPa}$

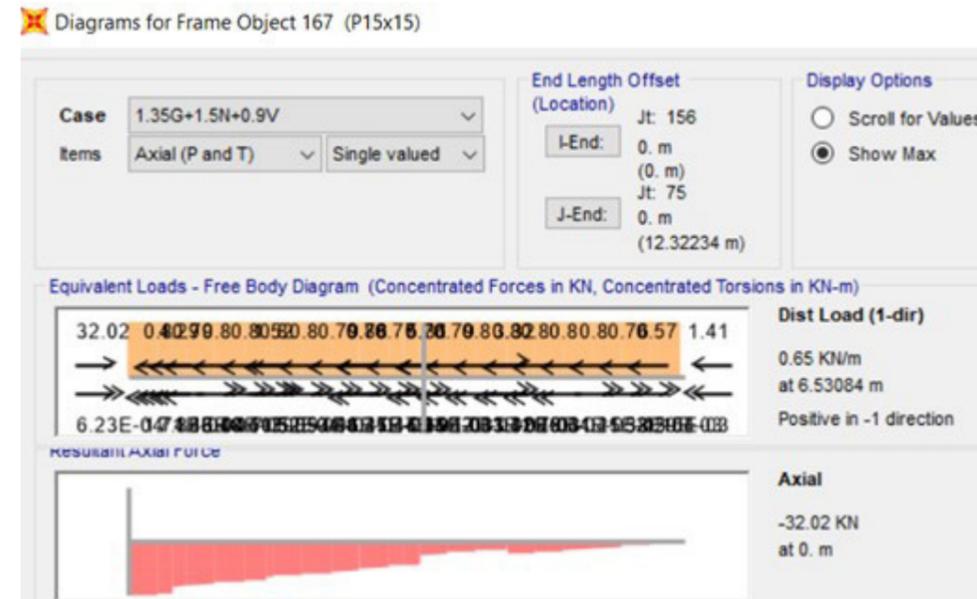
$\lambda_{rel} = 4.85$

$k = 12.74$

$k_c = 0.041$

$(\sigma_{c,o,d}) / (f_{c,o,d} * k_c) = 0.13 \leq 1$

Taux de travail = 13%



- Traction d'Entrait demi-module :

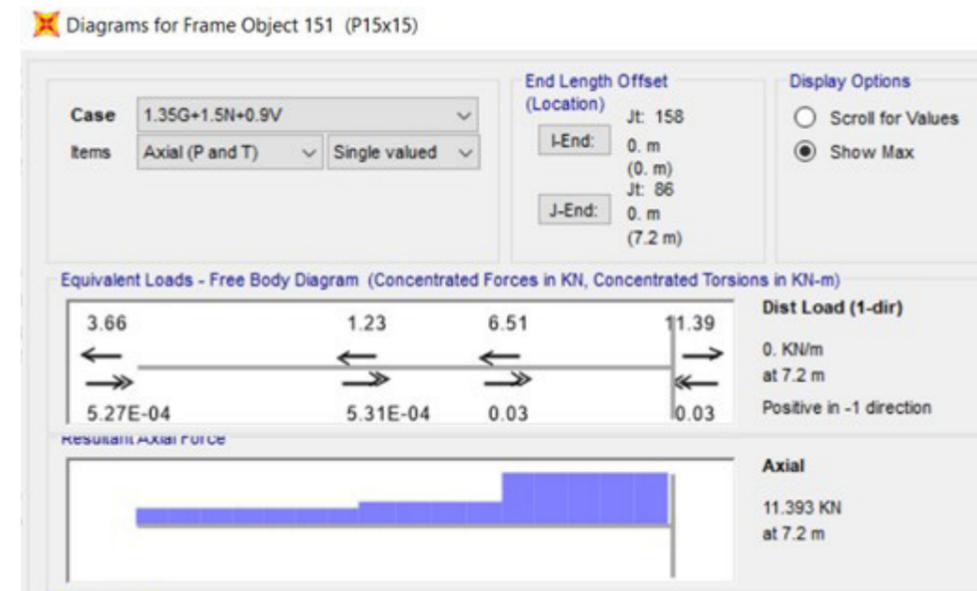
$f_{t,o,k} = 18 \text{ MPa}$

$\sigma_{t,o,d} = 0.38 \text{ MPa}$

$f_{t,o,d} = 8.30 \text{ MPa}$

$(\sigma_{t,o,d}) / (f_{t,o,d}) = 0.045 \leq 1$

Taux de travail = 4.5%



- Flexion :

Objet	Moment max (N*m)	k <sub>crit</sub>	f <sub>md</sub> (Mpa)	σ <sub>m,d</sub> (Mpa)	Verification $\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} * f_{m,d}} \leq 1$	Taux de travail
Albaletrier D	3030	1	13.846	5.387	0.389	38.90%
Portique Intérieur	10560	0.902	12.491	4.693	0.416	41.65%
Entrait demi-module G	830	1	13.846	1.476	0.107	10.66%
Faux entrain demi-module D	270	1	13.846	0.480	0.035	3.47%
Panne sablière G	240	1	13.846	0.427	0.031	3.08%
Montant D	740	1	13.846	1.316	0.095	9.50%

# Maquette finale

Figure 1 : Axonométrie générale du projet, sans échelle

Figure 2 : Axonométrie éclatée de nos différentes parties et modules, échelle 1/500eme

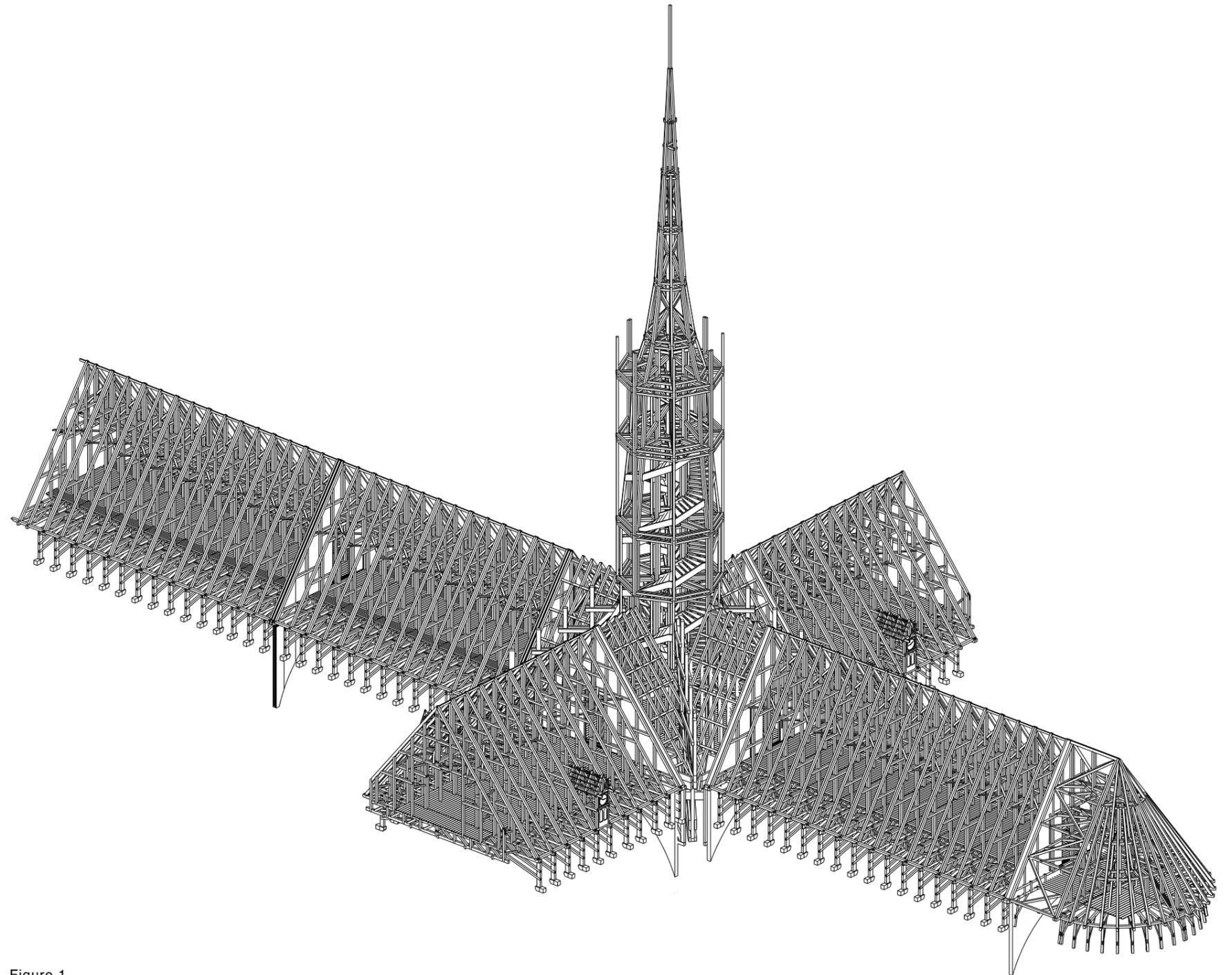


Figure 1

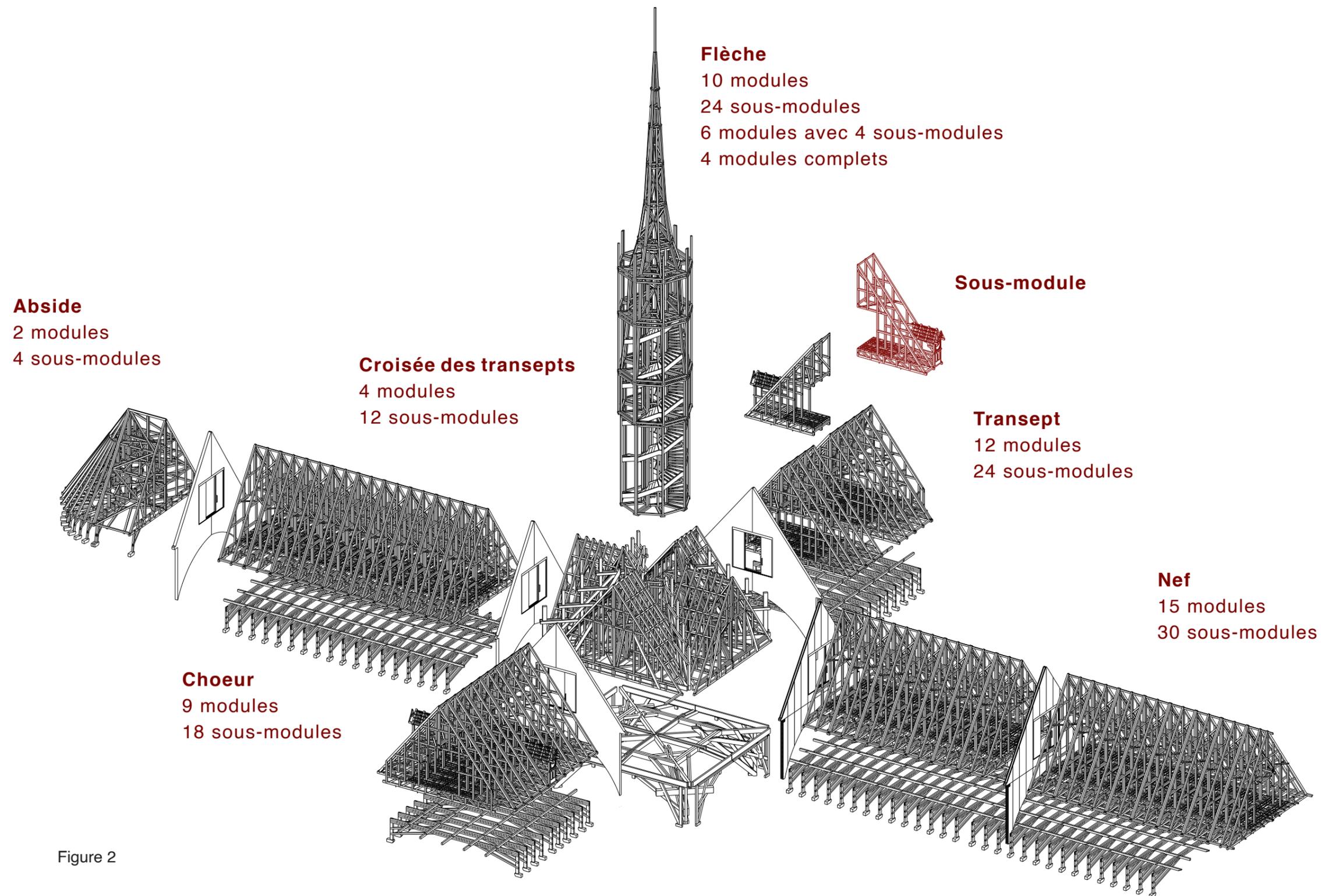


Figure 2

# Maquette finale



Figure 1 : Plan de la charpente coupé à 2m, échelle 1/500eme

Figure 2 : Plan de la charpente coupé à 4,25m, échelle 1/500eme

Figure 3 : Plan de la charpente complet, échelle 1/500eme

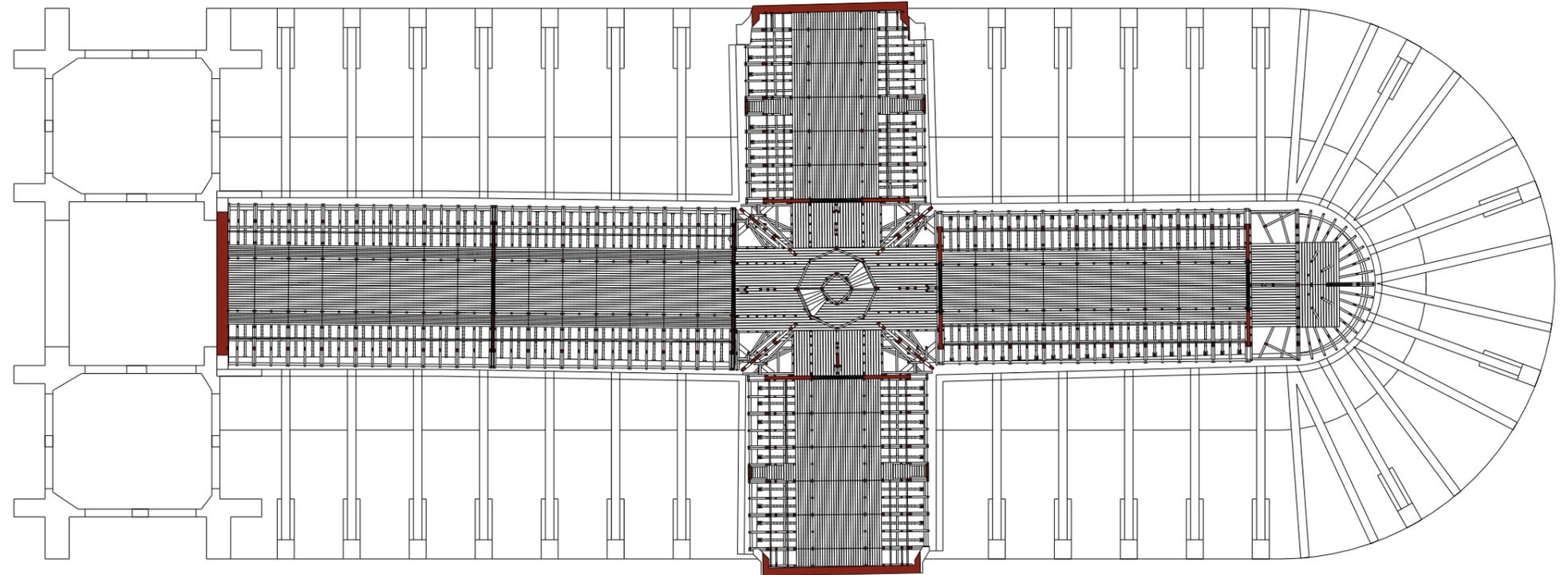


Figure 1

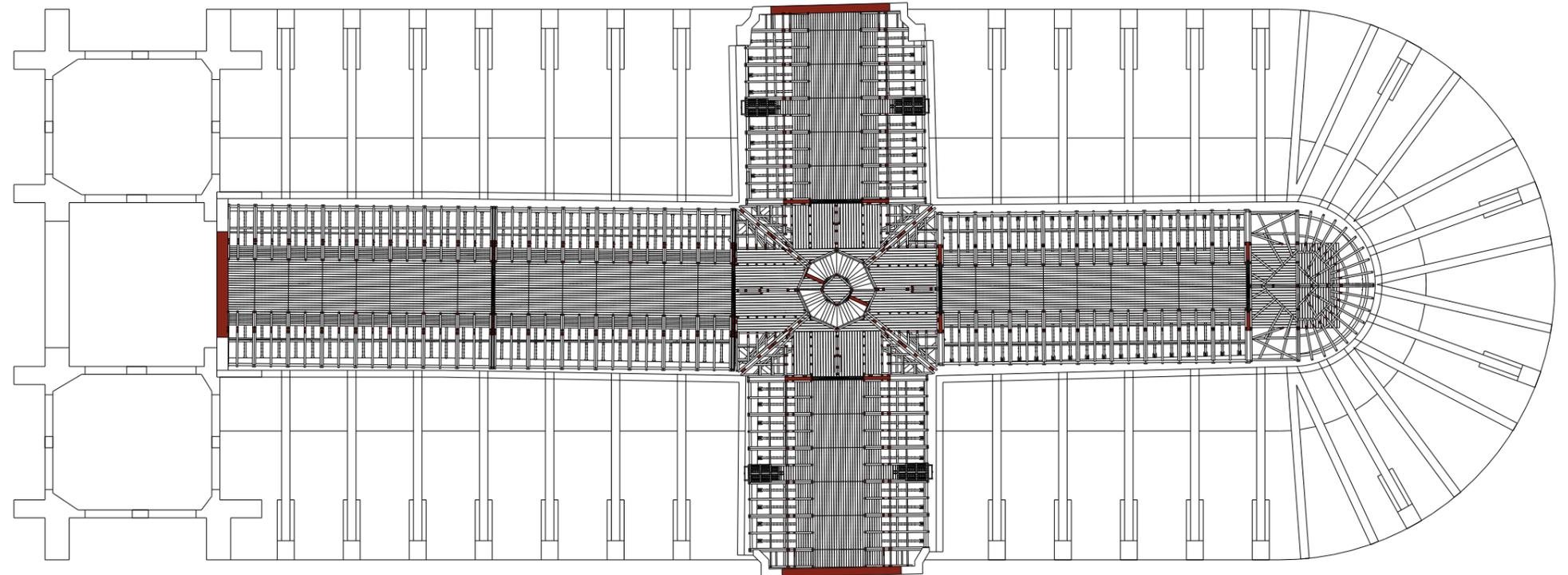


Figure 2

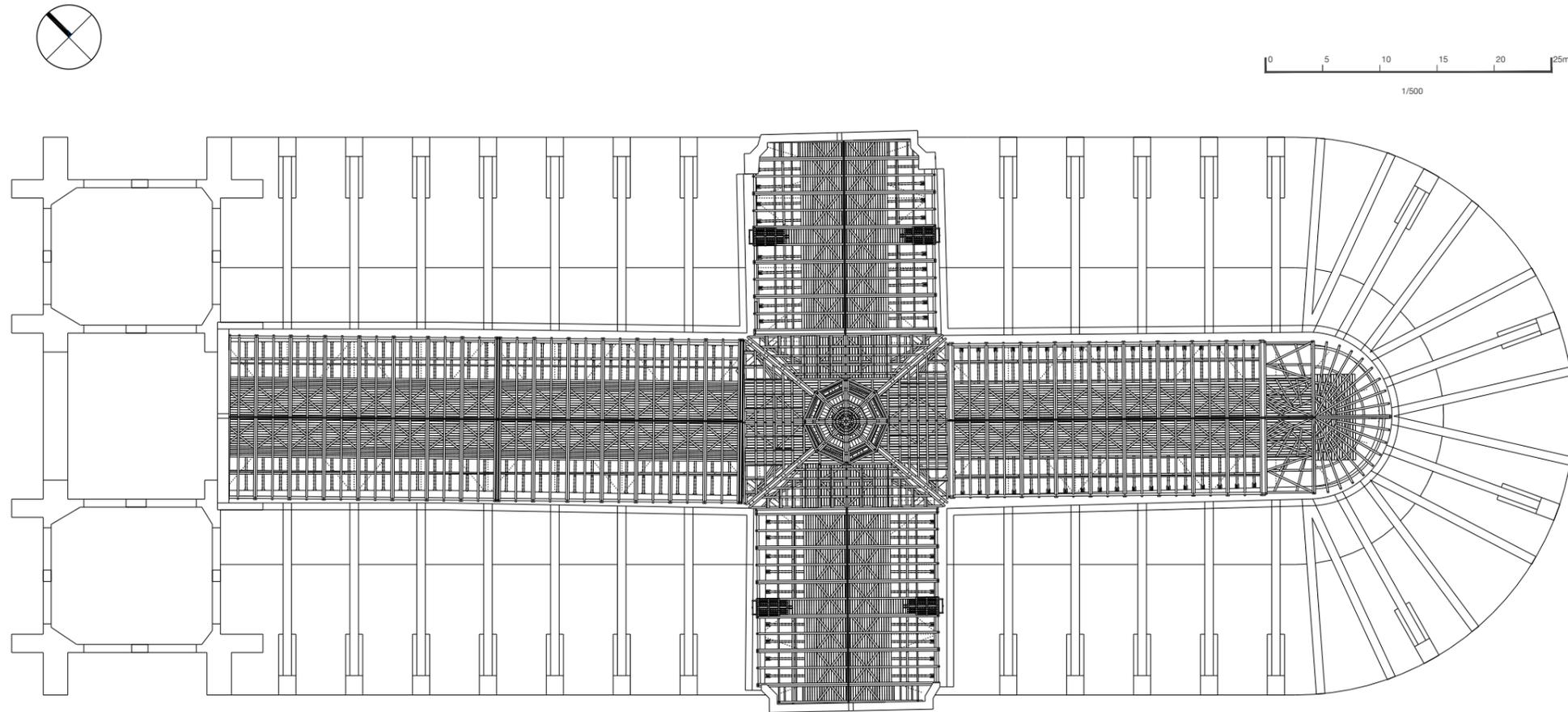


Figure 3



## Remerciements

Nous remercions l'équipe enseignante du master Architecture, Bois, Construction : Franck Besançon pour les nombreux cours théoriques que nous avons pu avoir durant ce semestre et Gilles Duchanois pour ses cours de résistance des matériaux qui ont été important pour le projet réalisé sur Notre-Dame. Nous les remercions également pour leur suivi tout le long du semestre, leur patience et leurs nombreux conseils, dans le cadre de ce projet.

Merci à nos camarades du master Architecture, Bois, Construction pour la bonne ambiance de travail et les échanges que nous avons pu avoir.

Merci à l'association Restaurons Notre-Dame de nous avoir permis de travailler sur un tel projet.

Merci à Mitek de nous avoir fourni une maquette numérique de la cathédrale Notre-Dame de Paris.

## Bibliographie

### *Revue et articles*

<https://www.restauronsnotredame.org/post/la-for%C3%AAt-de-notre-dame-reproduite-en-maquette-par-les-compagnons-charpentiers-du-tour-de-france>

[http://hermetism.free.fr/Viollet-le-duc\\_architecte.htm](http://hermetism.free.fr/Viollet-le-duc_architecte.htm)

<https://notre-dame-de-paris.culture.gouv.fr/fr/metal-0>

<https://france3-regions.francetvinfo.fr/grand-est/meurthe-et-moselle/nancy/notre-dame-paris-modele-toiture-conserve-lorraine-1725133.html>

### *Archives*

Pauline Robert, Marie-Christine Gromaire, Bernard de Gouvello, Ghassan Chebbo. Impact des matériaux de toitures sur la contamination métallique des eaux de ruissellement urbaines. 17èmes Journées Scientifiques de l'Environnement: le citoyen, la ville et l'environnement, May 2006, Créteil, France.

Pauline Sainte. Contribution des matériaux de couverture à la contamination métallique des eaux de ruissellement. Sciences de la Terre. Université Paris-Est, 2009. Français.

### *Reportages et émissions radios*

<https://soundcloud.com/institut-national-du-patrimoine/entre-monument-et-pittoresque?in=institut-national-du-patrimoine/sets/comprendre-notre-dame-de-paris-de-la-cathedrale-au-monument>

<https://soundcloud.com/institut-national-du-patrimoine/notre-dame-de-paris-lieu-de?in=institut-national-du-patrimoine/sets/comprendre-notre-dame-de-paris-de-la-cathedrale-au-monument>

<https://www.youtube.com/watch?v=CcrGf0ojFLU>

<https://www.youtube.com/watch?v=CcrGf0ojFLU>

<https://www.restauronsnotredame.org/post/audition-du-g%C3%A9ral-georgelin-au-s%C3%A9nat>

<https://www.restauronsnotredame.org/post/notre-dame-de-paris-le-g%C3%A9ral-jean-louis-georgelin-s-exprime>

### *Manuel de planification*

Protection incendie dans la construction en bois, Manuel de planification, Flumroc, 2008.

### *Colloques et conférences*

Frédéric Epaud. Les charpentes gothiques face au défi du gigantisme. Les structures gothiques: à la poursuite de l'équilibre. Publication des actes du 3ème colloque international, Feb 2017, Tournai, Belgique.

Éloge de la structure : l'actualité du rationalisme constructif, conférence avec Charlotte Hubert, Éric Lapière, Marc Mimram, Francis Rambert. Cité de l'architecture et du patrimoine, Jeudi 5 mars 2020 - 18h30.

[https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00539932/file/51\\_Sainte.pdf](https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00539932/file/51_Sainte.pdf)

### *Thèses et rapports*

SAINTE (Pauline). «Contribution des matériaux de couverture à la contamination métallique des eaux de

ruissellement.» Sciences de la Terre, Université Paris-Est, 2009

CAUX (Nicolas), Hye (Laurent), JUPON (Gaël), SAVREUX (Gwenola), THOMAS (Fabien), «Transport fluvial et navigation intérieure», synthèse de la conférence du Samedi 3 Octobre 2009, Université de Picardie Jules Vernes, 2009

Paris, rives de la Seine – France – bien n° 600, Rapport sur l'état de conservation en réponse à la décision n° 43 COM 7B.82, 2019.

Structural study of the Notre-Dame ancient charpente, P. Vannucci, 2020.

### *Sites internet*

#### **Général :**

<https://www.martinloyer.fr/realisations/fleche-notre-dame>

[https://www.youtube.com/watch?v=VOW3ShO\\_DJQ](https://www.youtube.com/watch?v=VOW3ShO_DJQ)

<https://www.notredamedeparis.fr/>

<https://www.youtube.com/channel/UCSIN0ZQzNVg1KdTF3vMVoLA>

<http://marpenformation.canalblog.com/archives/2015/12/28/33126006.html>

#### **Grue mobile :**

<https://www.liebherr.com/fr/int/produits/grues-mobiles-et-sur-chenilles/grues-mobiles/liebherr-grues-mobiles/ltm->

information.html

### **Couverture :**

Mazonnetto.com

Rheinzinc.com

Nipponsteel.com, Tran tixxi, Designing Titanium.

MetalClad.com

### **Zinc :**

<http://www.riccoboni.fr/paris-ville-de-zinc-dardoise/>

Photographies de Notre-Dame de Paris :

[http://paris1900.lartnouveau.com/paris04/notre\\_dame/vues.htm](http://paris1900.lartnouveau.com/paris04/notre_dame/vues.htm)

### **Fluvial :**

<https://www.pnich.com/carte-voies-navigables.pdf>

Fluviacarte, <http://www.fluviacarte.com>, (Parcours fluvial)

Schéma d'aménagement fluvial de la Seine, Fascicule stratégique, DREIA Ile-de-France, Mai 2019.

La problématique des gabarits, CLAC, juin 1998

### **Prévention incendie :**

CAMPISA.ma (Porte coupe-feu)

Placoplâtre.fr

Rockwool.com

Aviss.fr (Système de Sécurité Incendie)

Dans les combles de la Cathédrale : « Un accident peut toujours arriver », 2019. <https://www.rue89strasbourg.com/combles-cathedrale-strasbourg-accident-151723>

Guide Mégastil, Placo, 2016.

### **Cathédrale :**

La signification de la croix pour les chrétiens, Universal.fr, 2020.

Le toit de Nôtre Dame de Paris et la destruction par le feu du 15.04.2019, Matthias Burger. <https://youtu.be/uz4sugAxl>

### *Documents techniques*

Au fil de la Seine à Paris, Règles et conseils pratiques pour les plaisanciers, VNF, 2016.

3.2, Traversée de Paris en bateaux. [http://plaisancefluviale.fr/document/avis/avis\\_no1\\_2012\\_seine\\_yonne.pdf](http://plaisancefluviale.fr/document/avis/avis_no1_2012_seine_yonne.pdf)

Définition des convois-types et règles pour la vérification des ouvrages d'art, Ministère des transports, Direction des routes, SETRA 1982.

ANNEXE 4.6-1 Classes CEMT.

Complément d'information tirants d'air des bateaux et hauteurs libres sous les ponts, GPMH, Octobre 2009.

Grues mobiles, Manuel de sécurité, François-Xavier Artarit, Novembre 2018.

### *Maquette numérique*

<https://sketchfab.com/3d-models/notre-dame-paris-cathedral-037ac55699284aa4a33d7f09397a020f>

