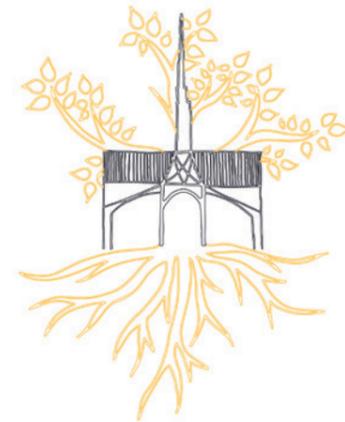


racines

restauration modulaire
de Notre-Dame de Paris

Master 2 « Architecture Bois Construction »



Maureen **FALVY**

Séverine **FUCHS**

Fabien **LAMY**

Félix **PERROT**

Paul-Emile **RINAUDO**

00 sommaire

01 contexte

- 03 **histoire et notoriété mondiale**
- 04 **incendie, réaction et constatation**
- 05 **jours du patrimoine**

02 notice architecturale

- 06 **contraintes comme base de conception**
- 09 **forme et techniques constructives**
- 12 **matériaux et ambiances**

03 notice technique

- 17 **hypothèse de charges**
- 18 **système constructif**
- 21 **carnet d'assemblage**
- 24 **notes de calcul**
- 32 **fabrication**

04 notice descriptive

- 34 **généralités**
- 36 **unités**
- 40 **abside**
- 42 **flèche**
- 45 **mise en oeuvre**
- 49 **géométriques / perspectives**

5305 conclusion

Fabien Lamy
*technicien G.C.
architecte D.E.*



Félix Perrot
ingénieur



Séverine Fuchs
architecte D.E.



Paul-Émile Rinaudo
*architecte D.E.
ingénieur*



Maureen Falvy
ingénieure



01 contexte

histoire et notoriété mondiale

incendie, réaction et constatation journées du patrimoine

La cathédrale de Notre-Dame de Paris est devenue, au fil des siècles et de l'histoire de France la cathédrale que l'on connaît aujourd'hui, inscrite en 1991 au patrimoine mondial de l'UNESCO. Véritable représentation iconique du gothique, elle n'a pas toujours eu l'attrait qu'elle a à notre époque. En effet, on notera les destructions de la révolution de 1789 qui obligea en 1804, lors du sacre de Napoléon 1er, qu'on habille la cathédrale d'un portique en bois, carton et stuc, de draperies de soie et de velours afin de cacher son fort délabrement. Il a fallu attendre le livre de Victor Hugo «Notre Dame de Paris» en 1831 pour déclencher une mobilisation nationale pour la sauvegarder. Prosper Mérimée, devenu en 1834 Inspecteur général des Monuments Historiques, a grandement participé à la restauration des monuments historique, dont la Cathédrale Notre-Dame fait partie. C'est ensuite en 1842 que Notre Dame de Paris entre dans un projet de restauration décidé par le Ministre de la Justice et des cultes. Deux ans plus tard, suite à un concours, Eugène Viollet-le-Duc et Jean-Baptiste Lassus sont choisis pour diriger les travaux. Ces travaux, que Viollet-le-Duc continuera seul, redonneront une notoriété certaine à Notre Dame, et en feront le monument le plus visité de France en 2018 avec une moyenne de 30 000 visiteurs par jour. Par son interprétation très personnelle de l'art médiéval, la création de cette flèche et des chimères, Viollet-le-Duc a réussi un tour de force en amenant le côté fantastique et hors norme de Notre Dame de Paris, qui lui permet d'être si important pour l'ensemble des Français et bien plus encore.



Notre-Dame avant la construction de la flèche - Bisson frères - 1857-1858
© Médiathèque de l'architecture et du patrimoine



Notre-Dame de Paris- Brenda Ciervo Adarna- 2006 - Wikipédia

01 contexte

histoire et notoriété mondiale

incendie, réaction et constatation

jours du patrimoine

Nous avons toutes et tous été heurtés par ces images de l'incendie de Notre-Dame de Paris le 15 et 16 avril 2019. Cet évènement, qui a détruit l'ensemble de la charpente, de la flèche et de la couverture, a créé une émulation assez incroyable autour de l'édifice, notamment par de nombreux dons et de commentaires du monde entier. De plus, la mobilisation rapide des professionnels de la construction, en particulier ceux de la filière bois et du patrimoine s'est observé à travers la création de l'association française RESTAURONS NOTRE-DAME le 20 juin 2019. Reconnu d'intérêt général par l'État, l'association souhaite agir pour la reconstruction à l'identique de la charpente et de la flèche de Notre Dame, dans le respect du patrimoine, tout en mettant en lumière les métiers et le savoir-faire de la filière bois dans son ensemble.

«Nous ne pouvons pas accepter que la «forêt» de Notre-Dame de Paris, cette majestueuse charpente de plus de 800 ans, soit définitivement évacuée de nos mémoires par des projets futuristes».

Philippe Gourmain, président d'Experts forestiers de France (EFF) - *Le figaro*

Philippe Gourmain nous rappelle ici la difficulté qui se pose lorsqu'on parle de patrimoine. Effectivement, nous avons vu peu après l'incendie, émerger un concours d'architecture non conventionnel, à l'aide de rendus 3D, proposant des projets plus futuristes les uns que les autres. Ces projets étaient pour la plupart en décalage avec les questions que posent un monument inscrit au Patrimoine Mondial de l'UNESCO. Il nous rappelle que la restitution d'un monument est avant tout une réflexion à opérer sur ce qu'est un monument classé et qui plus est véritable emblème de l'architecture gothique de la ville de Paris.

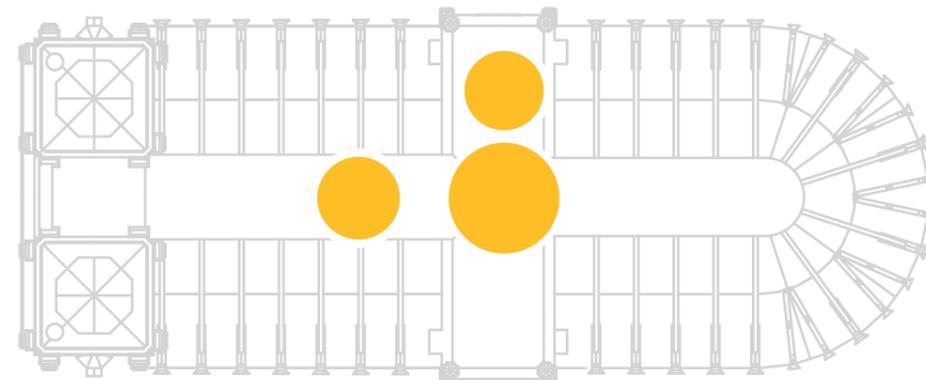
De plus, il semble important de prendre en compte les dégâts que l'incendie a laissé derrière lui. On observe alors des fragilités apparentes à trois endroits principaux, là où les voûtes se sont effondrées :

- à la croisée des transepts, là où la flèche s'est effondrée, finissant sa combustion au pied des piles de la nef, ce qui a pu détériorer la pierre,
- au niveau du transept nord,
- au niveau de la nef ouest

Par ces observations, on peut émettre l'hypothèse selon laquelle l'incendie a créé des faiblesses au niveau de l'effondrement des voûtes et des supports de charpente. De plus, les moyens mis en oeuvre pour éteindre le feu ont grandement participé à la dégradation des pierres. En effet, le feu et l'eau sont tous deux des causes d'altérations de la pierre pouvant conduire à des désordres et des affaiblissements des structures .



Croquis de Notre-Dame en feu



Plan des percements après incendie

01 contexte

histoire et notoriété mondiale incendie, réaction et constatation journées du patrimoine

A l'occasion de la 37ème édition des Journées Européennes du Patrimoine, l'établissement public chargé de la conservation et de la restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris a proposé un programme permettant au public de (re)découvrir la charpente de la cathédrale au travers des reproductions à taille réelle et à 75% de la ferme n°7 et de plonger à l'intérieur du chantier de sécurisation. Ces deux démonstrations donnent à voir la fabrication de la ferme numéro 7, considérée par beaucoup de professionnels comme étant la ferme ancienne la plus aboutie et la plus stable structurellement. Les Charpentiers sans Frontières ont pu montrer les techniques et savoir-faire de taille du XIIIe siècle (à la hache) à partir de chêne vert. Les Compagnons quant à eux ont essentiellement montré l'assemblage et le levage d'une travée reproduit à 75 % de sa taille d'origine. La coupe des pièces de charpente étant réalisée en scierie. Cette journée a permis de mettre en lumière les savoir-faire des charpentiers et d'informer le public sur le potentiel de la filière forêt-bois. Ainsi, elle est peut-être un aperçu du futur chantier de reconstruction.

Il est difficile en tant qu'étudiant de se positionner sur un monument tel que la cathédrale de Notre-Dame de Paris. De plus, notre marge de manoeuvre pourrait se trouver réduite du fait de la décision de reconstruire cette dernière à l'identique. S'offre à nous néanmoins une liberté toute proportion gardée, pour amener des suggestions sur ce que pourraient être la charpente, la flèche et la couverture de Notre-Dame dans le respect de la charpente disparue. Certes, nous nous attaquons à la reconstruction d'un monument inscrit au Patrimoine Mondial de l'UNESCO, mais cela veut-il dire que nos connaissances et nos évolutions techniques/technologiques ne peuvent pas apporter une aide à ce chantier immense qui nous attend ? Le fait que peu d'experts aient donné leurs conclusions suite à l'incendie, notre travail est d'autant plus fort qu'il souhaite avant tout ouvrir le champ des possibles. La restauration de Notre-Dame, aussi complexe qu'elle soit, va devenir la vitrine des restaurations futures. Il semble intéressant de prendre en compte son histoire et la restauration de Viollet-le-Duc, tout en y ajoutant nos réflexions, qui veulent ancrer cet événement dans la mémoire collective, comme une strate de l'histoire de la Cathédrale.

«Le bois est le matériau écologique du XXIe siècle : au XIIe siècle, il était la seule ressource disponible, mais, aujourd'hui, c'est un matériau choisi et renouvelable. Il permet de stocker durablement le carbone dans les bâtiments. Enfin, ce chantier de restauration exemplaire servirait de vitrine vivante des savoir-faire français. Par sa dimension collective, nationale, historique et symbolique, ce projet fait œuvre d'art immatérielle : un projet humain profondément ancré dans son temps.»

Philippe Gourmain, président d'Experts forestiers de France (EFF) - Propos recueillis par Oriane Masse pour Wood Surfer

La charpente est amenée à durer des centaines d'années ; cela dépasse le contexte des normes françaises et même européennes sur ce qu'il convient de faire. Il faut concevoir simplement, durablement et modestement.



37ème éditions des Journées du patrimoine - Bruno Levesque - Septembre 2019

02 notice architecturale

contraintes comme base de conception

forme et techniques constructives

matériaux et ambiances

Notre réflexion s'est en premier lieu basée sur les contraintes volumétriques et l'aspect extérieur de la toiture qui devaient être restitués à l'identique. Cette volumétrie fixée, il nous a paru évident que l'incendie était dors et déjà ancré dans l'histoire de la Cathédrale et qu'il fallait faire avec. Cet évènement s'apparente aux modifications que Viollet-le-Duc a apporté. Il doit se faire ressentir dans cette nouvelle charpente, comme une page de cet édifice. Une phrase de Viollet-le-Duc a retenu toute notre attention :

«Restaurer un édifice», ce n'est pas l'entretenir, le réparer ou le refaire, c'est le rétablir dans un état complet, qui peut n'avoir jamais existé à un moment donné.»

Il semble intéressant de prendre en compte que c'est la manière de penser de Viollet-le-Duc qui a notamment permis à la cathédrale de rester debout et d'arriver jusqu'à nous. Sa philosophie de restituer l'édifice à un état complet, qui ne peut jamais avoir existé est intéressante. Nous venons réinterroger la charte de Venise, en trouvant un équilibre entre ce qui existait et ce que le monde contemporain peut apporter à cette reconstruction. En effet, dans un premier temps, nous avons pris la décision de prendre appui sur l'unité de la ferme N°7. Elle est en accord avec les pensées de Viollet-le-Duc, mais aussi avec une logique constructive.

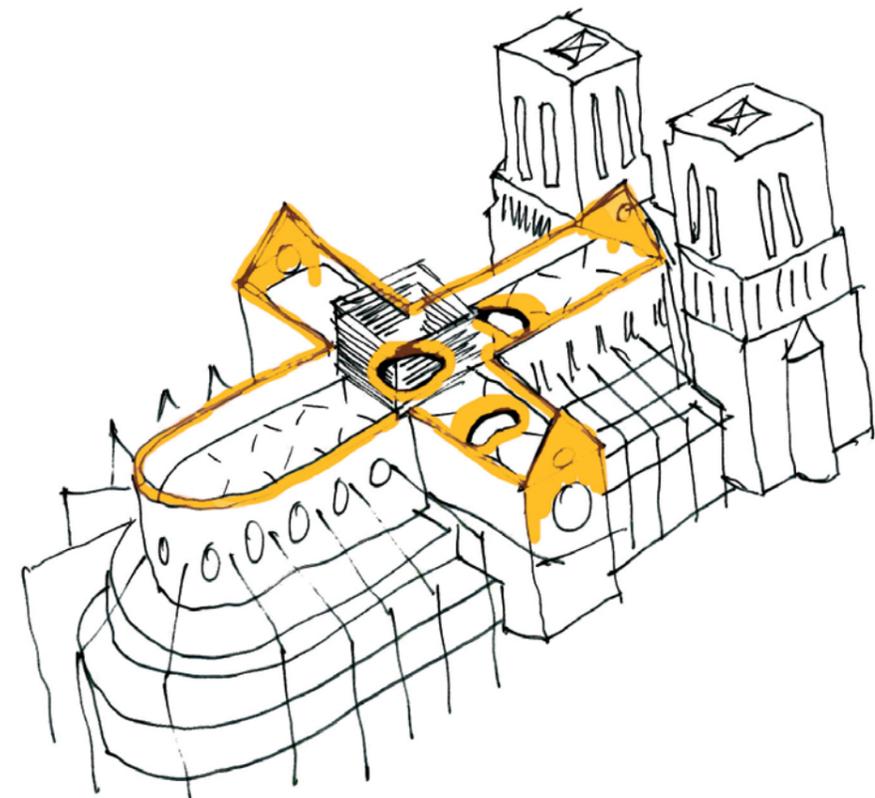
«La ferme n°7 est la version aboutie des fermes qui ont été conçues au Moyen Âge, qui ont évolué au fur et à mesure du chantier. Les premières étaient très primitives, ne fonctionnaient pas bien, elles ont montré des désordres et les charpentiers à l'époque les ont fait évoluer. Depuis la 1ère jusqu'à la n°7, elles ont évolué et la numéro 7 elle est au point, elle fonctionne et c'est celle qu'ils ont choisi de dupliquer dans le reste de la Cathédrale. Nous avons choisi de la reproduire car c'est la plus ancienne qui fonctionne.»

Florian Carpentier-Chef du chantier de la reproduction à la taille réelle de la ferme n°7 de la charpente de Notre Dame de Paris - Charpentier sans Frontières.

Les propos de ce charpentier nous conforte dans la manière dont nous avons appréhendé le projet. Si on relit les propos de Viollet-le-Duc et de Florian Carpentier, notre réflexion s'attache à restituer un état complet de

la charpente, qui aurait pu exister si la ferme n°7 avait été découverte dès le début du chantier. Certes l'expérimentation et l'évolution des charpentes n'auraient pas eu lieu, mais cette prise de position exprime un état idéal qui aurait pu exister. Elle aurait permis une homogénéisation structurelle de l'ensemble.

N'ayant pas d'étude précise sur les dégâts que le feu et l'eau ont pu engendrer sur les maçonneries, il nous était primordial de prendre en compte ce point. Nous avons émis des hypothèses sur les faiblesses que l'incendie avait pu générer, notamment en réalisant un diagramme des portances. On notera que nos hypothèses nous ont amenés à considérer que les faiblesses les plus importantes se situent au trois endroits où les voûtes se sont effondrées.



Croquis des potentielles faiblesses des maçonneries

02 notice architecturale

contraintes comme base de conception

forme et techniques constructives

matériaux et ambiances

Cette double réflexion autour de la ferme n°7 et de l'incendie a abouti à l'écriture de notre concept. L'unité de la ferme n°7 composée d'une ferme principale et de deux fermettes de part et d'autre, vient alors s'adapter en fonction des faiblesses de portance des appuis en pierre. N'ayant que très peu de données à ce sujet, nous nous sommes adaptés en réduisant le poids d'une unité de ferme. L'idée est de créer un catalogue des unités qui peuvent être choisies en fonction des capacités portantes actuelles des maçonneries. La conception de ce catalogue, détaillée dans la notice technique, se base sur le poids de l'unité de la ferme n°7 qui est de 16.4 tonnes. Il devient la valeur seuil à ne pas dépasser. L'adaptation de la ferme n°7 passe par diverses modifications, en particuliers la modification évolutive légère de l'écriture de la ferme de base, l'optimisation des sections et la mixité des essences. Cela mène à la création de ce catalogue dont le procédé de création attaché au poids et aux réactions d'appuis vous sera expliqué par la suite. La charpente sera donc constituée d'un ensemble d'unités structurales inspirées de la ferme n°7. Ces unités prennent en compte l'affaiblissement des maçonneries et leur capacité portante pour pouvoir s'adapter et ainsi permettre d'exploiter les appuis existants. Cette réflexion met en valeur les conséquences de l'incendie et cherche à assurer la pérennité de l'ouvrage en prévention des faiblesses qu'il a pu engendrer. De plus, cette conception permet de conserver l'esprit de «la forêt».

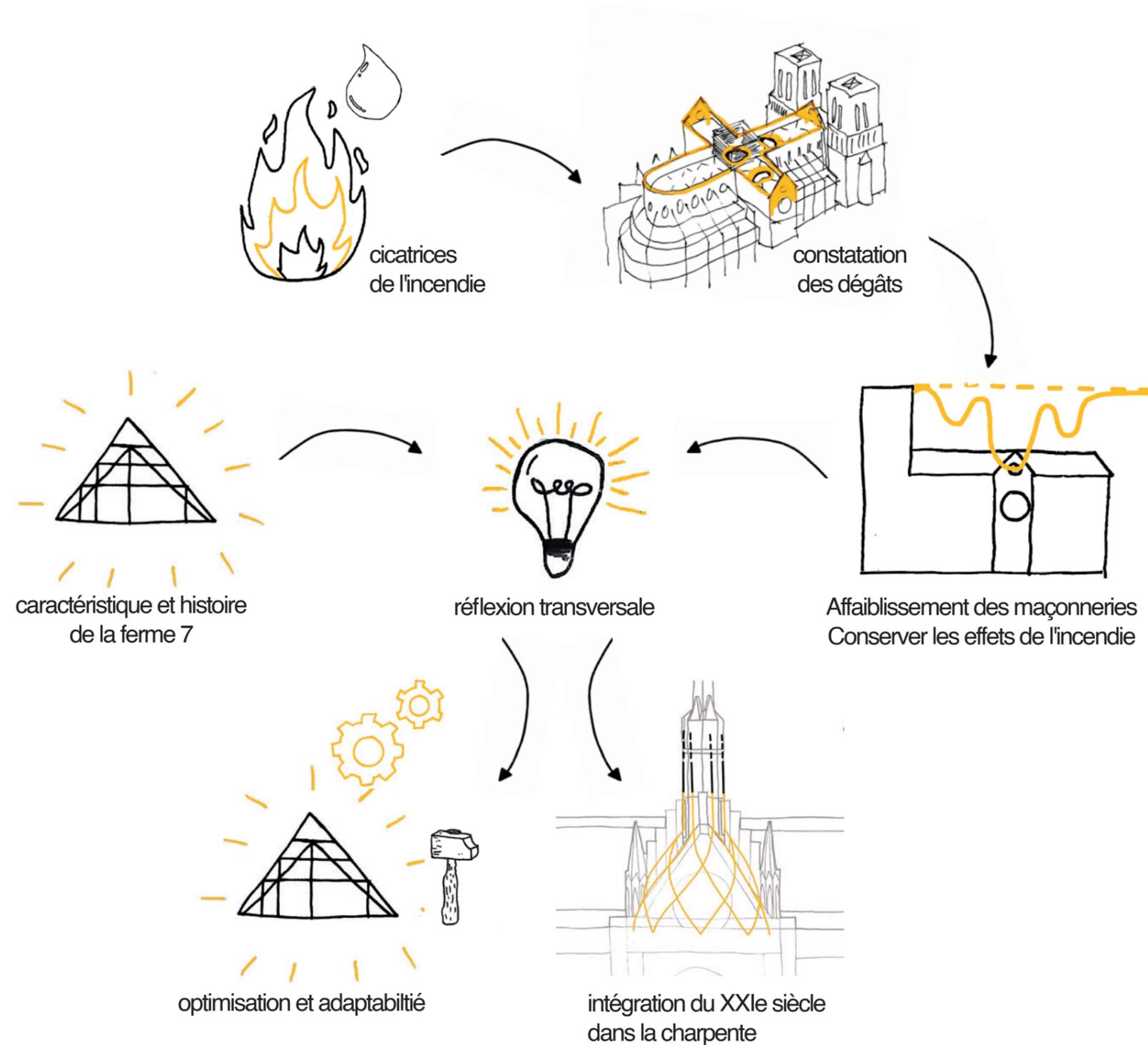


Schéma des réflexions menées sur le projet «Racine»

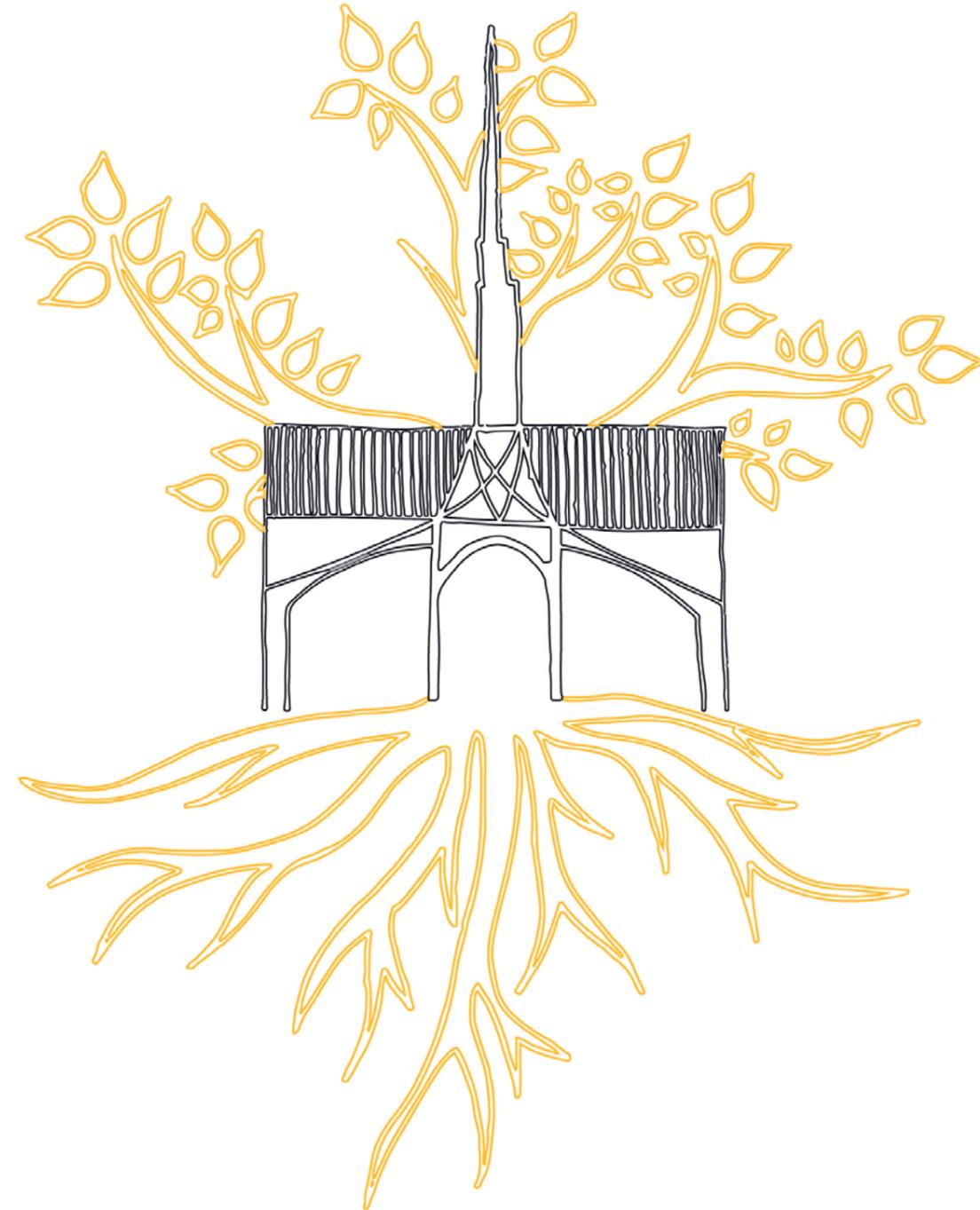
02 notice architecturale

contraintes comme base de conception

forme et techniques constructives

matériaux et ambiances

La restauration doit à la fois être bénéfique pour la cathédrale, et répondre à notre volonté première qu'est celle de garder les traces du passé tout en se projetant vers l'avenir. Bien que la Cathédrale soit inscrite au patrimoine Mondial de l'UNESCO, il nous semblait pertinent à l'image de Viollet-le-Duc à son époque d'apporter une touche de modernité à cette future charpente, en y intégrant les technologies de la construction bois du XXIème siècle. La flèche, symbole de l'histoire de Notre-Dame, sera pour sa partie haute reconstruite à l'identique. Elle exprime le travail de Viollet-le-Duc au XIXe siècle, permettant à Notre-Dame d'être ce patrimoine connu mondialement et permet de conserver le visuel extérieur. Cependant, il nous a paru important, de pouvoir lors de cette restauration, d'amener à cette croisée des transepts, la marque de cette époque dans laquelle cet incendie s'est produit. Ainsi, la base de la flèche, exprime ce récit de l'incendie. Par le mouvement courbe des pièces de charpente, cette base marque la page du XXI e siècle. Ce siècle des prises de conscience récentes vis-à-vis de l'environnement, dans lequel le bois reprend peu à peu sa place dans la construction. On retrouve dans ce socle de la flèche, une analogie à l'arbre, et plus particulièrement aux branches maîtresses, qui viendraient restaurer son houpier . Les piles en pierre forment le tronc, la charpente forme les rameaux et ramilles et la flèche définit le corps et la cime de l'arbre. De plus cette partie si emblématique, devenu en quelque sorte le coeur de la cathédrale après l'édification de la flèche par Viollet-le-Duc, se verra par ce socle, perpétuer l'histoire d'une cathédrale emblématique. L'utilisation de bois dit «techniques», amène ce qu'avait pu amener Viollet-le-Duc en son temps, de l'audace et la marque d'un temps présent de restauration. Il permet notamment à Notre-Dame de prendre racine au XXIème siècle.



Logo : la toiture vue comme le houpier d'un arbre qui enracine Notre-Dame au XXIe siècle

02 notice architecturale

contraintes comme base de conception forme et techniques constructives matériaux et ambiances

Inspirée mais pas identique, la charpente s'écrit à partir de la ferme n° 7, tout en s'adaptant aux dégâts que l'incendie a laissé derrière lui. Le bois massif est toujours de la partie, permettant de remettre en oeuvre les techniques d'antan. La mise en oeuvre de bois de brin, arbres jeunes de faible diamètre de 25 à 40 cm, est facilité par la réduction des sections. Cela permet de revenir aux méthodes constructives du Moyen-Âge, tout en prenant en compte que la qualité des arbres a évolué en même temps que la sylviculture. Les fermes du catalogue perdent peu à peu des pièces pour réduire le poids de leurs unités. Ainsi, en plus de l'optimisation des sections, la première évolution supprime un faux-entrait pour mieux positionner les deux autres. La suspente se voit dupliquer afin de créer deux passerelles et faciliter la déambulation dans «cette forêt » reconstituée. Par la suite, les deux autres paliers se voient retirer en partie ou totalement les faux arbalétriers. Les fermes secondaires sont modifiées et voient leurs sections réduites. Ces nouveaux dessins de ferme souhaitent marquer les savoir-faire de nos charpentiers, et conserver au maximum l'aspect originel.

Comme expliqué précédemment, le but du projet est de lier tradition et technique actuelle de construction. Certes le temps du chantier école pourrait permettre de refaire la charpente avec toutes les techniques manuelles anciennes. Mais il y a un équilibre selon nous à trouver entre «l'archaïque» et le «high-tech». Ainsi les techniques se mêlent. Les bois sont acheminés déjà équarris en scierie sur site au fur et à mesure de l'avancement du chantier, de sorte à réguler les flux et ne pas trop en stocker sur site afin d'en assurer un bon stockage à l'abri des intempéries. La taille des assemblages et le montage des fermes se font manuellement sur le parvis. Cette philosophie reprend les manières de faire de nos ancêtres. Pour ce faire, la conception des unités de ferme se base sur des assemblages traditionnelles, tenon/mortaise, moisement, mi-bois. Tout ces assemblages sont chevillés ou boulonnés. Ainsi, le choix de se tourner vers des solutions constructives simples et pérennes permettent d'intervenir facilement en utilisant les savoir-faire des charpentiers et en privilégiant leurs conditions de travail. Celle-ci se base tout d'abord par une conception ordonnée. Notre idée est que lorsque les études de portance de pierre seront réalisées, les constructeurs pourront se référer à notre catalogue d'unité, afin de les placer

au meilleur endroit dans la charpente. Cela marque la modularité et l'adaptabilité de notre système constructif. Ils pourront créer d'autres paliers que ceux que nous avons créés arbitrairement, pour s'adapter au mieux au problème de portance. Ainsi, leur placement dans la charpente marquera le temps de l'incendie, et il sera chose aisée de repérer grâce aux dessins des fermes l'endroit où l'incendie a mis le plus à l'épreuve les pierres et inversement. De plus, ce pragmatisme, permettra de mettre en place facilement ces unités, qui seront assemblées sur le parvis. En effet, la démarche est de former un véritable chantier école, structuré, avec un plan clair et établi, de la livraison des pièces de ferme à son assemblage. Il sera accessible au public, afin de montrer les savoir-faire et les métiers nécessaires à la restauration d'un patrimoine. Il a aussi pour but de montrer les différentes étapes pour fabriquer cette ferme, et d'amener un caractère exceptionnel lors de son levage.



37ème éditions des Journées du patrimoine - France Bois Forêt - Septembre 2019

02 notice architecturale

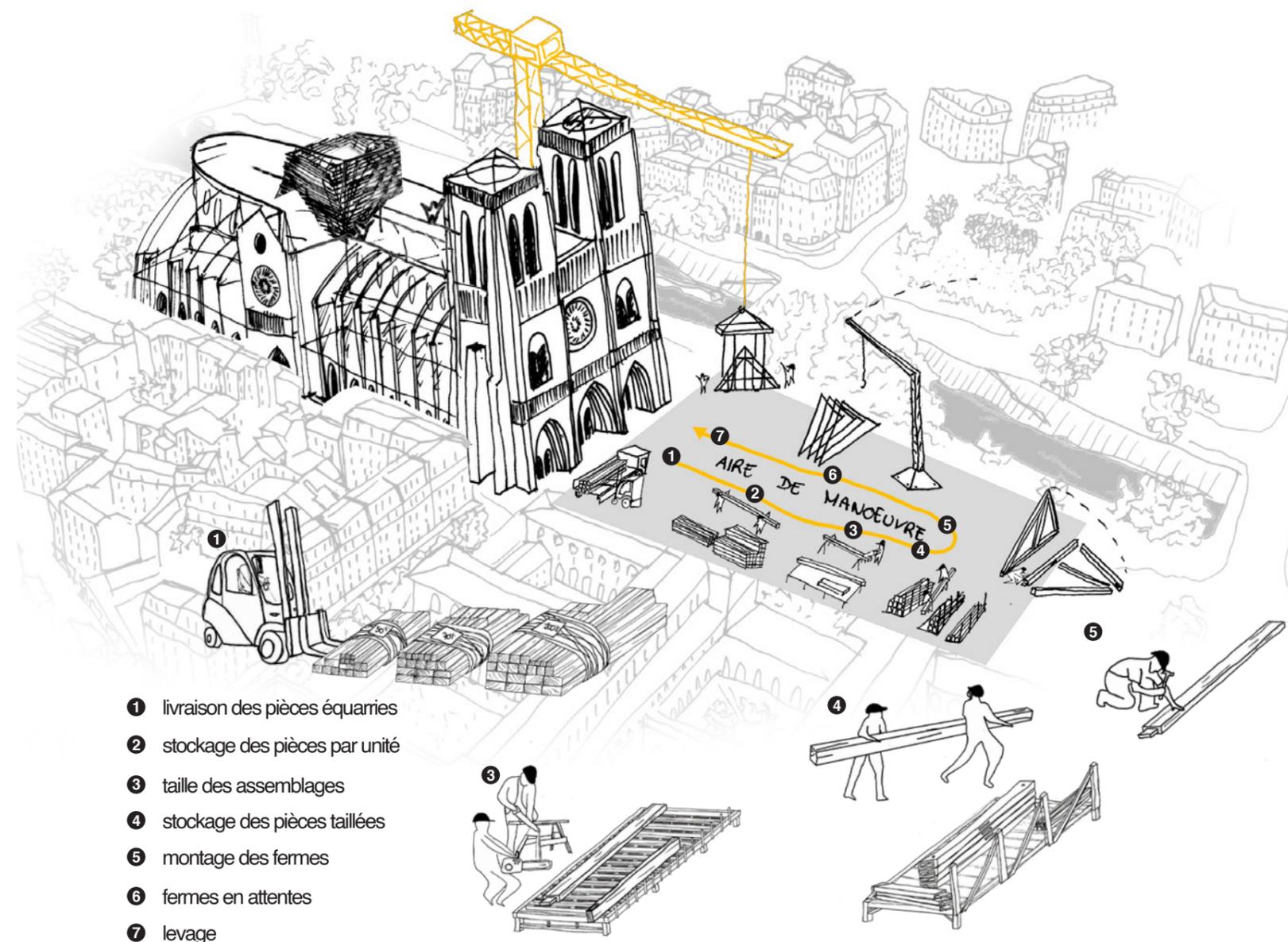
contraintes comme base de conception forme et techniques constructives matériaux et ambiances

La méthode dite par «levage» est aussi une démarche de notre temps, visible partout à notre époque à des échelles plus ou moins grandes. Il sera fascinant pour les visiteurs et le monde entiers de voir les fermes être montées à plus de 30 m du sol. C'est cet aspect qui devra permettre aux ouvriers de travailler sur la terre ferme et d'utiliser les moyens actuels de levage. Bien que des assemblages traditionnels soient mis en place, plusieurs moyens s'offrent à nous pour lever cette chapente dans son entiereté et d'offrir au monde un spectacle digne des grands chantiers de bâtisseurs (écharpe provisoire, sanglage...). Cela perpétuerait cette tradition innovante et expérimentale des chantiers de charpententers.

«Le temps politique, ce calendrier n'est pas le temps des bâtisseurs.... elle a mis 100 à 150 ans à se construire, elle a été remaniée et retravaillée par Viollet-le-Duc au XIXème,[...] pourquoi ne pas profiter de ce temps pour presque l'étirer. Ce chantier n'a-t-il pas le potentiel pour expérimenter, faire un chantier à ciel ouvert, faire revivre des techniques, partager une expérience et une émotion plutôt que de couper un ruban, y a-t-il un sens?»

Marie-Amélie Tek - Colloque Bois, matériau d'avenir - Reconstruction de Notre-Dame de Paris - France Bois Forêt

Ces propos expriment une partie de notre vision du chantier de Notre-Dame de Paris. Il serait alors LE chantier français du XXIème siècle, mêlant savoir, partage, transmission et prestige. Qu'y a-t-il de plus valorisant et «éducatif» qu'un chantier accessible, faisant vibrer les gens en les incluant dans la restauration de notre patrimoine ? Car n'oublions pas que Notre-Dame de Paris est un des symboles de l'humanité depuis qu'elle a été inscrite au patrimoine mondial de l'UNESCO. Ainsi, le chantier de Notre-Dame pourrait durer 5 - 6 ans, sans forcément avoir cette contrainte de temps régis par les échéances politiques. Notre système constructif pourrait permettre de tenir ces délais, tout en amenant un échange avec la population. En effet, le temps long serait intéressant pour expérimenter d'avantage, mais le but premier est de reconstruire au plus vite la toiture, afin de mettre en sécurité l'ensemble de la cathédrale. Le fait de pouvoir piocher dans un catalogue de ferme basé sur la ferme n°7, permet d'harmoniser l'écriture de la charpente et réduit grandement la durée de chantier en formant des modules identiques.



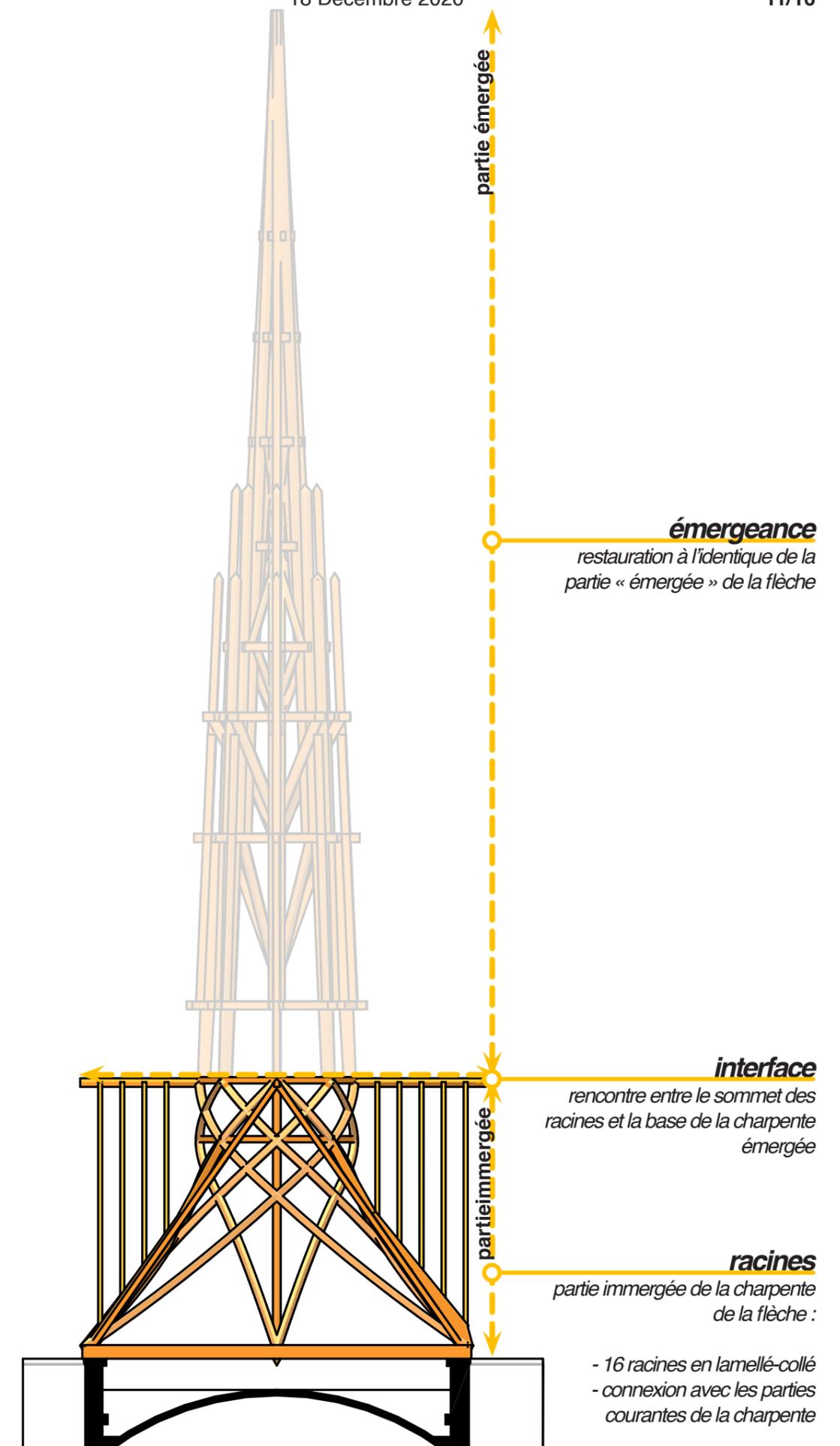
- 1 livraison des pièces équarries
- 2 stockage des pièces par unité
- 3 taille des assemblages
- 4 stockage des pièces taillées
- 5 montage des fermes
- 6 fermes en attentes
- 7 levage

Schéma de principe de l'atelier sur le parvis de la Cathédrale

02 notice architecturale

contraintes comme base de conception forme et techniques constructives matériaux et ambiances

A cette évolution du chantier, s'ajoute l'évolution de l'utilisation du bois dans la construction. Les bois techniques, tels que le lamellé collé ou encore le CLT(Cross Laminated Timber) expriment l'utilisation nouvelle du bois dans la construction depuis le XXème siècle. Obtenu par collage de morceaux de bois, ce principe accroît les propriétés mécaniques du bois. Bien que nous puissions émettre des doutes sur l'Analyse de Cycle de Vie de ce type de matériaux, il nous a toutefois semblé important d'inscrire la cathédrale dans ce siècle et de marquer cet événement bien qu'il soit tragique. Nous avons donc réfléchi à un moyen d'apporter constructivement parlant le XXIème au sein de la charpente. C'est aux travers de la partie basse de la flèche et les coupes feu que ces bois techniques seront mis en oeuvre. Comme expliqué précédemment, cette partie basse de la flèche permet à l'ensemble de prendre racine dans le temps présent. Le lamellé collé est usiné de sorte à créer de véritables pièces de sculpture. Ces pièces assemblées entre elles forment ce système de branches maîtresses, dansant à la croisée des transepts et redonnant toute l'énergie nécessaire à l'ensemble de la charpente et à la partie haute de la flèche créées par Viollet-le-Duc. Leur liaison complexe ne fait qu'ajouter à la technicité qui sera détaillée dans la notice technique.



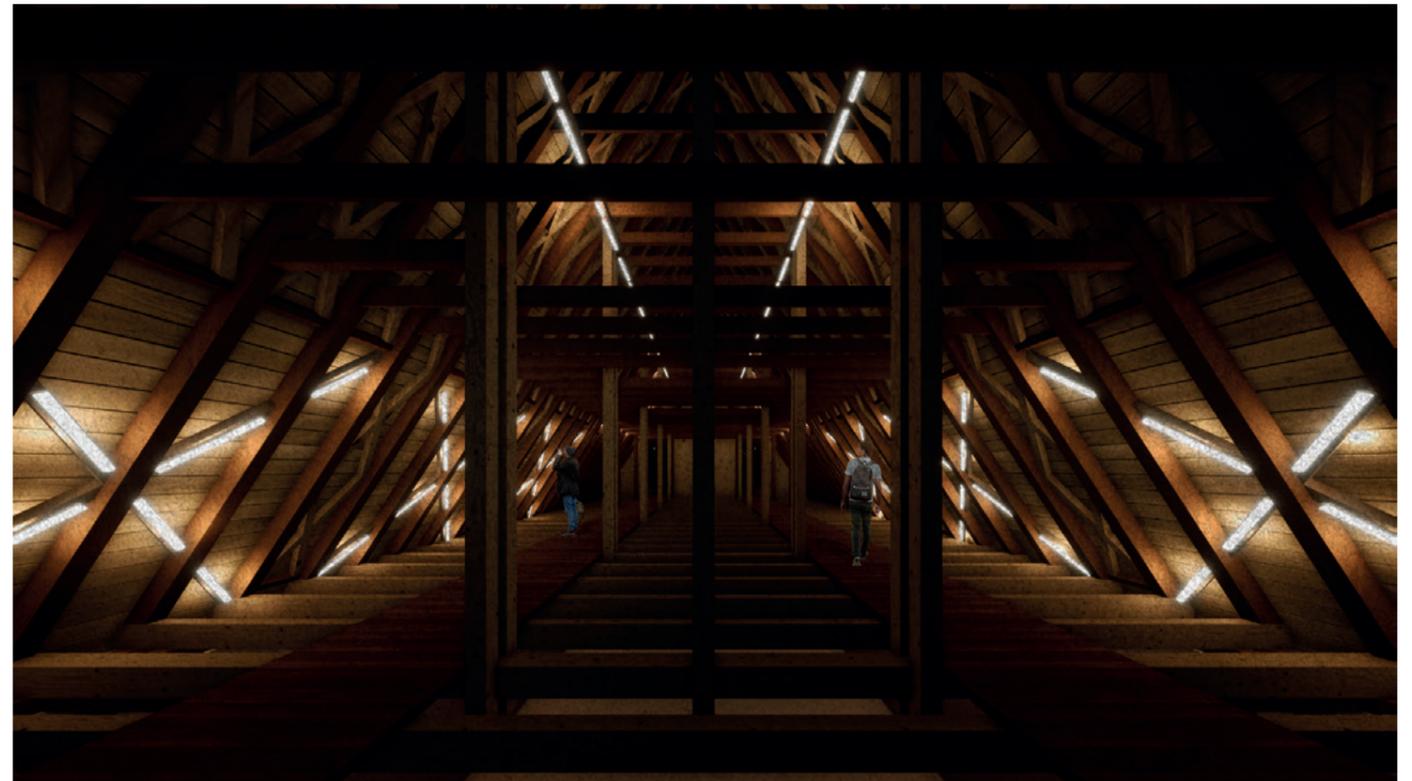
Coupe de la flèche du socle à sa cime

02 notice architecturale

contraintes comme base de conception forme et techniques constructives matériaux et ambiances

Cette charpente associe les essences, mêlant l'épicéa avec le chêne, pour réduire le poids des fermes et mettre en place un principe de juste usage de la ressource. En effet l'épicéa travaille mieux en traction et le chêne en compression. Ainsi chaque essence est répartie dans chaque ferme pour utiliser au mieux leurs caractéristiques intrinsèques. L'épicéa, d'une couleur blanche, contraste avec le chêne brun clair. Cela crée une ambiance particulière au sein de la charpente et accentuée par l'ajout de pièces verticales, la charpente, conserve l'écriture globale de celle disparue et permet de retrouver l'emblématique «forêt». Le bois, matériau de construction primitif, n'a jamais cessé de s'adapter pour revenir au premier plan dans la construction. Son retour est notamment lié à une prise de conscience sur le changement nécessaire de nos manières de construire. Matériau fer de lance de la construction durable, le bois a évolué avec son temps, pour créer des bois dit «techniques», améliorant ses propriétés à la fois mécanique, de durabilité ou encore esthétique. Cependant, il nous semble intéressant de réévaluer ces évolutions techniques et de revenir au matériau primitif, brut : le bois massif. Ce bois massif se déploie dans l'ensemble de la charpente et dans la partie haute de la flèche. Il est mis en oeuvre vert. Car il semble important de rappeler que les caractéristiques du chêne et les sections employées pour réaliser les fermes ne permettent pas le séchage optimal des pièces avant pose. En effet, le bois nécessite un délai important pour atteindre des taux d'humidité recommandés pour la pose de pièces de charpente. Cette utilisation du bois vert implique des contraintes de retrait, qu'il convient de gérer à travers les assemblages. De ce fait réduire les sections permettra aussi de réduire leur temps de séchage lorsque qu'ils seront en place.

Nous avons fait le choix de mettre en place un éclairage artificielle, qui vient souligner la signalétique du contreventement principal, évoquant la variation des contrainte admissible dans la maçonnerie. Afin de garantir un confort d'usage optimal, les liernes sont également équipé d'éclairage. Les deux passerelles faciliteront la maintenance des deux pans de la charpente et permettront aussi le passage des gaines techniques sous platelage de celles-ci, qui pourront être facilement accessible à l'aide de regard.



Vue depuis une passerelle centrale - nef

02 notice architecturale

contraintes comme base de conception
forme et techniques constructives
matériaux et ambiances

La partie basse de la flèche sera réalisée en lamellé collé de douglas, produit en France depuis plusieurs années et mettra en place des techniques récente d'assemblage. Elle est la partie qui enracine la cathédrale dans ce siècle. Elle s'apparente aux branches maîtresse d'un arbre, socle à partir duquel se déploie les branches. Ainsi, cette partie en double courbure amène le côté paramétrique et innovant du projet, tout en explorant une écriture exprimant l'arborescence. Le processus de fabrication de ces pièces techniques s'élaborent sur la base d'un collage de lame de bois. Cela permet d'augmenter grandement les capacités structurelles du bois. La mixité des essences est présente avec la mise en oeuvre du chêne au coeur de ce socle.

Le concept de racine prend finalement ici tout son sens, dégagant un grand volume central, mis en valeur à la fois par l'éclairage artificielle proposé et l'éclairage naturelle prodigué par la flèche de Viollet le duc, ramenant ainsi une importante part de symbolisme dans le projet.



Vue sur le socle de la flèche - Croisée des transepts

02 notice architecturale

contraintes comme base de conception
forme et techniques constructives
matériaux et ambiances

La couverture, autrefois en plomb, était composée de grandes plaques de 97cm de largeur. Cependant, il semble aujourd'hui impossible de reproduire ce type de couverture pour des raisons de santé, environnementales mais aussi de poids. Cette possibilité s'est rapidement retirée de notre réflexion. Nous avons donc cherché à se rapprocher au maximum de l'aspect du plomb. Le zinc nous est apparu comme le meilleur compromis esthétique et technique. En effet, le zinc participe à l'allègement de la charpente, toujours en prévision des faiblesses de portance de la pierre. De plus, ce choix va dans le sens de ce qui se trouve autour, les fameux toits de Paris qui sont le plus souvent réalisés en Zinc. La partie émergée de la flèche étant réalisée à l'identique, nous avons fait le choix de conserver sur cette partie le plomb, pour faciliter la mise en œuvre des ornements. De plus, étant une partie isolée, il sera plus aisé de récolter les eaux polluées afin de les traiter.



Flèche de Viollet-le-Duc qui sera reconstruite à l'identique - notredamedeparis.fr

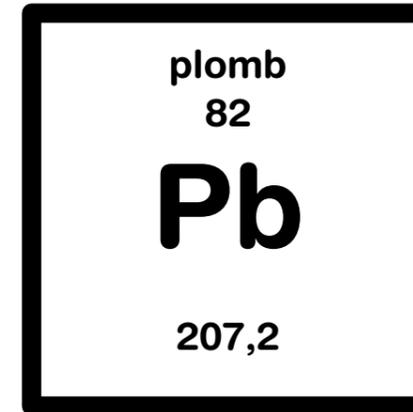


Image de la couverture originelle de la cathédrale - France 3

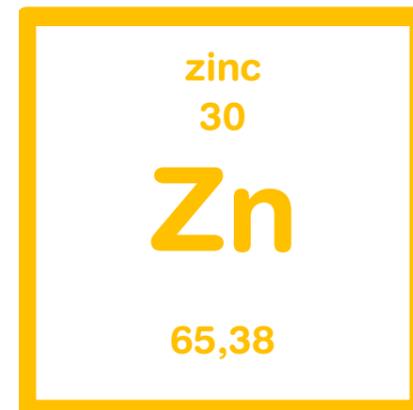
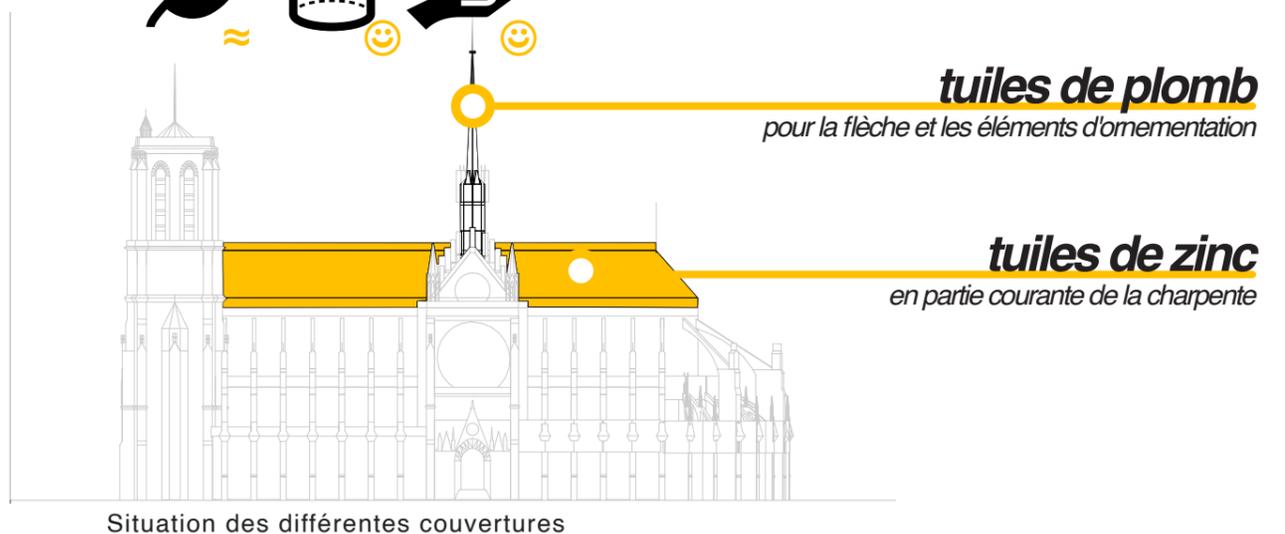


Image de la couverture proposée pour la reconstruction - Toit pro



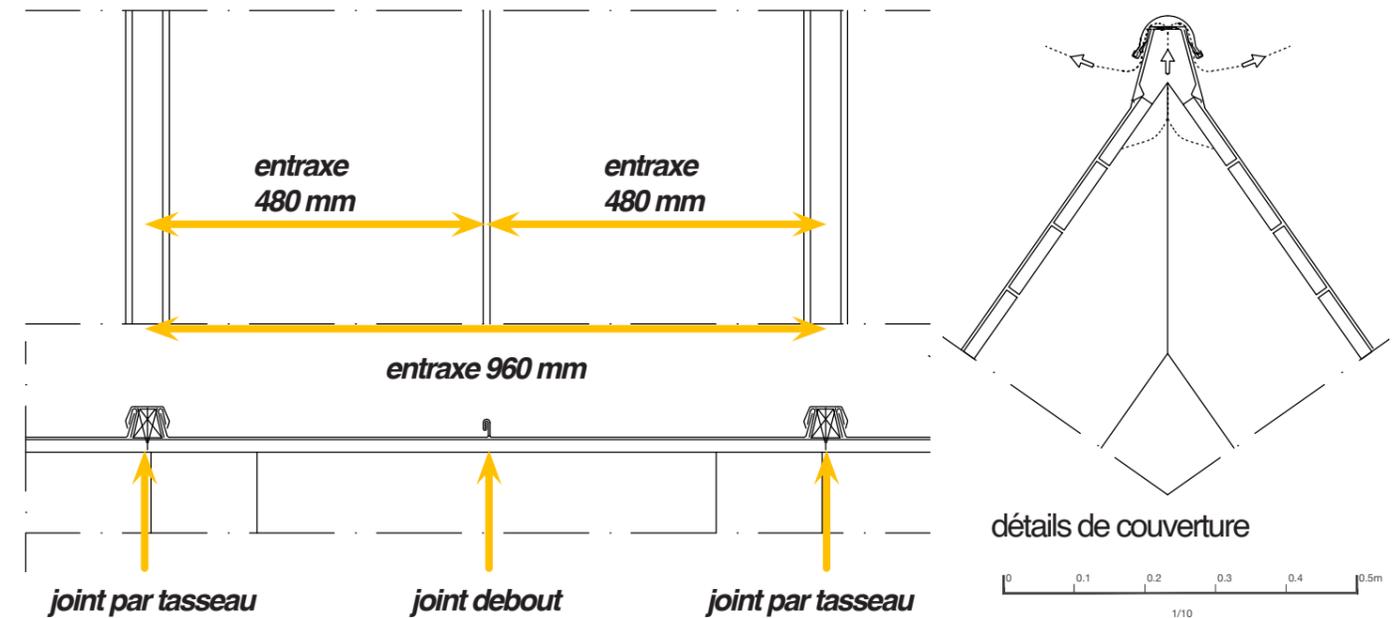
02 notice architecturale

contraintes comme base de conception
forme et techniques constructives
matériaux et ambiances

L'une de nos propositions, essaie à partir des techniques actuelles de pose du Zinc, de reproduire ces bandes de 97 cm. Or, techniquement, il nous est impossible de réaliser des toitures en zinc avec un entraxe entre joints par tasseaux de plus de 63 cm. Outre cette limite, qui est due au risque de déchirement par le vent des bandes de zinc, cette couverture peut être une véritable expérimentation digne des plus grands chantiers du Moyen-Age. Ainsi, sur les voliges de 18mm d'épaisseur en sapin/épicéa fixées sur les arbalétriers et les chevrons, le revêtement de couverture viendrait mettre en oeuvre un joint sur deux des tasseaux et un joint sur deux des joints debouts. Cela permettrait avec un entraxe entre joints de 48 cm d'obtenir un entraxe entre joints par tasseaux de 96 cm. On retrouverait presque la dimension des plaques de plomb mises en oeuvre au Moyen-Age et lors de la restauration de Viollet-le-Duc. Le zinc permettra de réaliser les ornements mis en oeuvre sur l'ensemble de la toiture (flèche, faitage...). Les évacuations des eaux pluviales reprendront les principes mis en oeuvre dans la toiture disparue, tout en les adaptant aux techniques actuelles afin d'assurer la pérennité de l'ouvrage. En effet les arcs-boutants dotés de chaperons à chéneaux, permettent de manière ingénieuse l'évacuation des eaux de pluie de la partie supérieure de l'édifice. Les gargouilles complètent ce système en protégeant les murs en pierre du ruissellement de l'eau de pluie. Elles évacuent au plus loin l'eau provenant de la toiture. Des chéneaux complètent le dispositif.



Systèmes d'évacuation des eaux pluviales des arcs boutants - batirama



faitage avec ornement

non visible sur dessin

zinc

0.8 mm

joint debout

$h = 25 \text{ mm}$ $e = 10 \text{ mm}$

tasseau trapézoïdal

40 mm

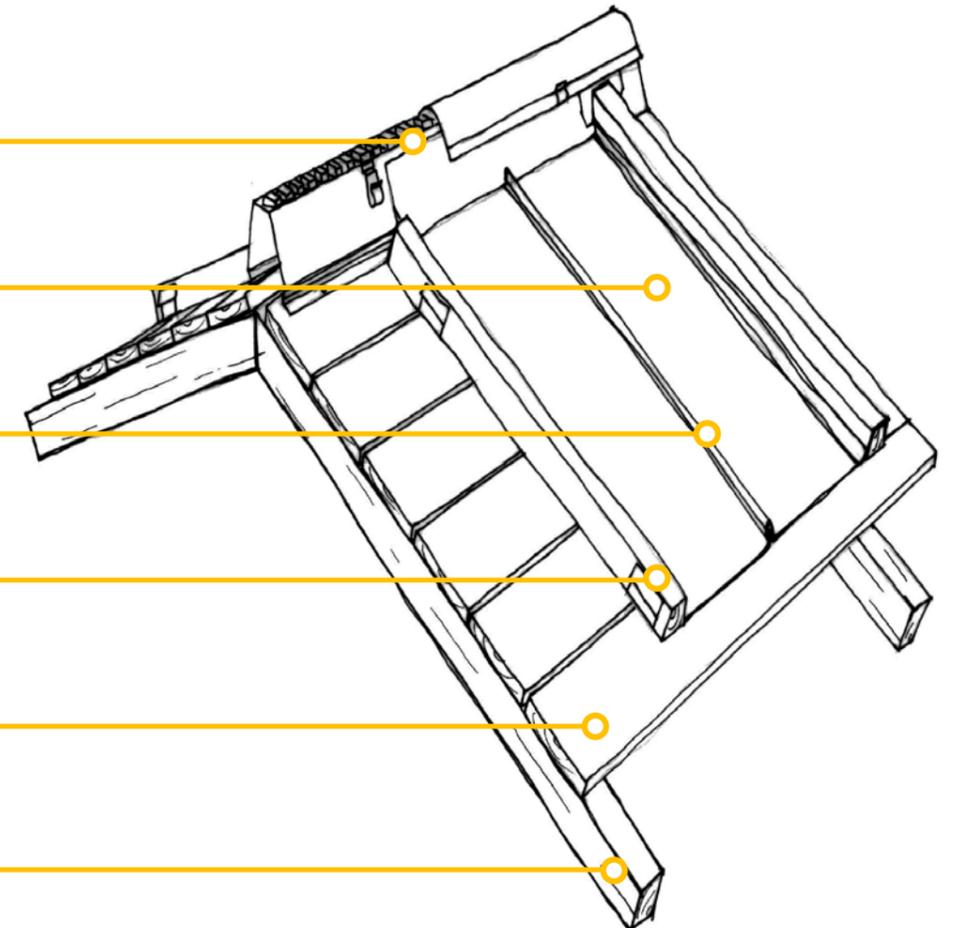
voligeage

18 mm

arbalétrier

150*220 mm

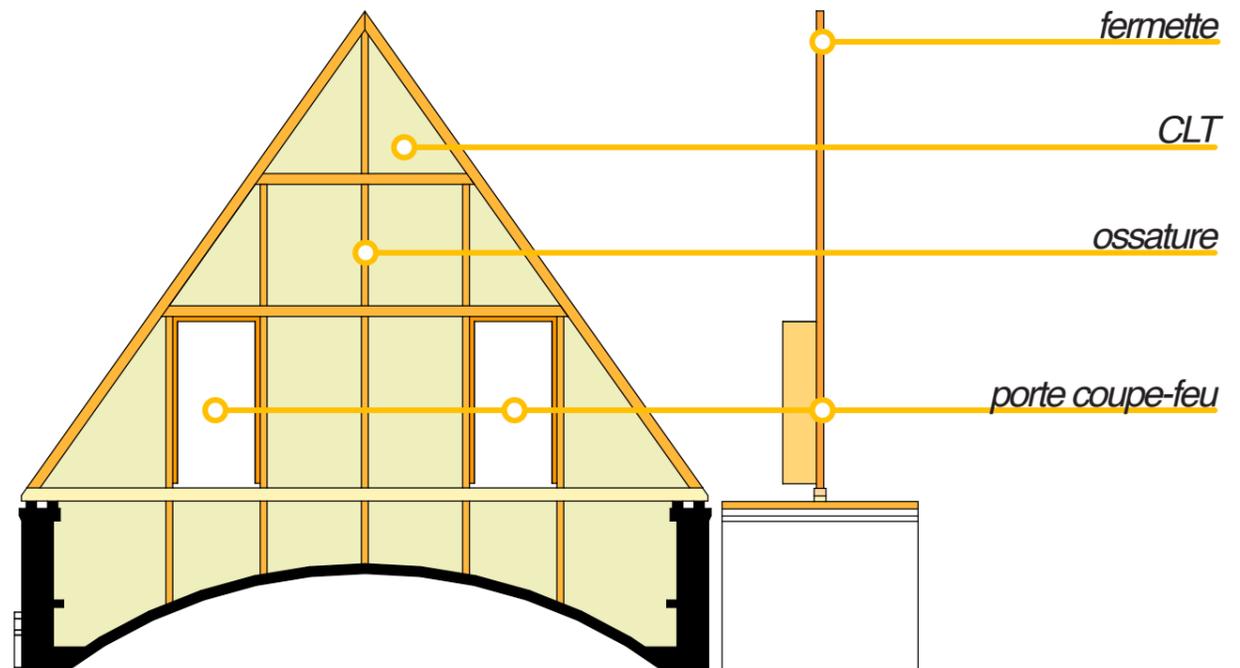
Croquis du complexe de couverture



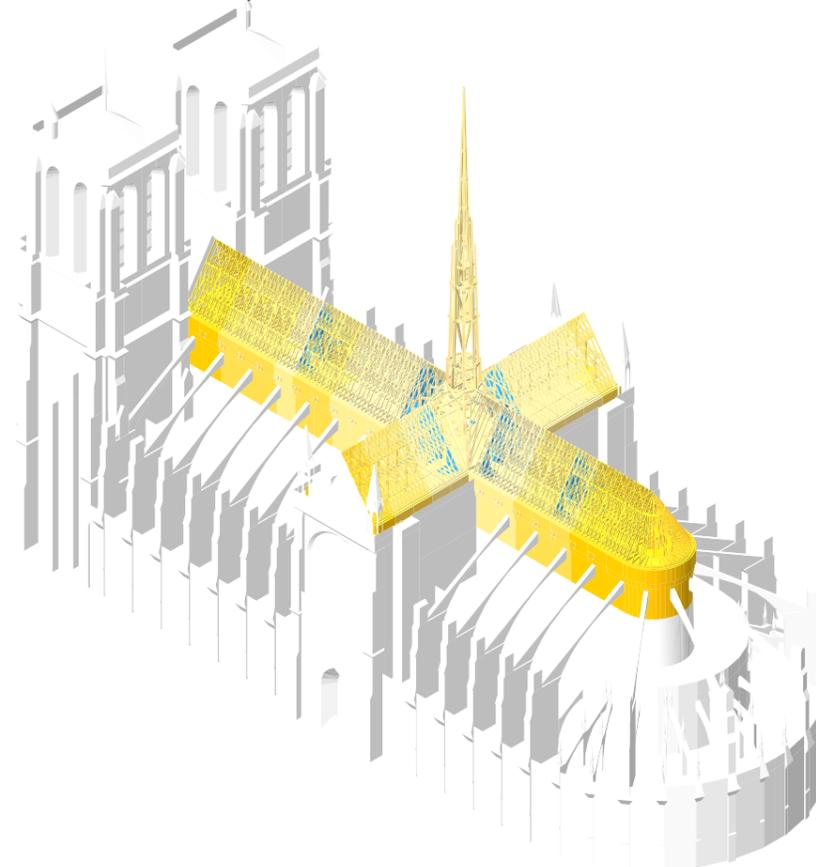
02 notice architecturale

contraintes comme base de conception forme et techniques constructives matériaux et ambiances

Une réflexion poussée sur le risque d'incendie a été une question centrale dans notre travail. Notre idée s'est basée une nouvelle fois sur l'histoire de la construction de Notre-Dame. Le chœur, construit en premier, vient à être fermé provisoirement par un mur à pans de bois rempli de torchis pour pouvoir célébrer les premières messes. Nous avons donc conçu les murs coupe-feu se basant sur cette technique de pan de bois. Ces coupe-feu associées aux plaques de 12 cm de CLT (Cross Laminated Timber) sont mis en oeuvre dans une ferme secondaire dimensionnée en conséquence. Ce matériau technique contemporain a une très bonne résistance au feu. Ces murs coupe-feu seront au nombre de six et permettront de compartimenter la charpente en sept parties. L'idée étant d'isoler la flèche, de compartimenter la nef et le chœur afin de pouvoir contenir le feu dans un volume plus restreint. Ce nombre limité de coupe-feu s'explique par la volonté de conserver une perspective sur la forêt. Ces fermes spécifiques seront pré-assemblées et taillées afin de s'adapter au mieux à l'existant. Des portes coupe feu sont mise en place au niveau des passerelles. Enfin, le choix de la solution tout bois est pour nous intéressante. Tout d'abord, cela facilite le montage et l'usinage des remplissages de ces coupes feu. En terme d'écriture architecturale, ce choix cherche à intégrer au mieux ce dispositif dans cette forêt. C'est aussi une volonté de promouvoir le bois dans la construction, dans toute ces formes et mises en oeuvre.



Constitution du mur coupe feu



Axonométrie - Placement des murs coupe-feu et des unités

03 notice technique

hypothèse de charges
système constructif
carnet d'assemblage
notes de calcul
fabrication

ETUDE DE CHARGES

Les hypothèses de charge ont été établies sur la base des EUROCODES 1-3 et 1-4, à l'image de l'étude de Paolo Vanucci.

Les charges climatiques sont prises en compte dans l'état actuel des choses, cependant il ne faut pas oublier qu'avec les modifications du climat dans les années à venir, ces valeurs peuvent ne plus être adaptées. Il aurait convenu de les majorer à l'aide d'un coefficient ou d'une valeur sécuritaire qui nous sera communiquée à l'issue des PFEs associés.

Concernant l'arrachement, ce dernier est très élevé si on considère le vent parallèle aux transepts. Cependant, nous avons fait l'hypothèse que ce vent dit parallèle, générant un poids à l'arrachement minimal de 16 tonnes, ne pouvait pas avoir lieu sur la partie courante de la charpente concernant la nef et le chœur. Concernant les transepts, le choix a été fait d'ancrer les fermes dans les maçonneries à ce niveau pour éviter tout soucis dûs à l'arrachement.

Le complexe de toiture compris dans les charges permanentes comprend une volige en sapin et une couverture à base de tuiles de zinc. Pour plus de détails, se référer à la notice architecturale.

CHARGES CLIMATIQUES

Charge de neige :

Région	A1
Altitude	40 m
Pente de toiture	55%

Coefficient d'exposition C_e 1 Site normal : zone urbaine
 Coefficient thermique C_t 1 Toiture sans transmittance thermique élevée
 Coefficient de forme s 0,13 Pente de 55% compris entre 30 et 60%
 Valeurs caractéristique de la charge de neige au niveau de la mer s_{k0} 0,45 kN/m² Région A1
 Charge de neige supplémentaire s_1 0 kN/m² Pente de la toiture > 5%
 Valeurs de la charge exceptionnelle de neige s_{k1} 0 kN/m² Région A1

Total de charge de neige :

s 0,060 kN/m²

Charge de vent : (Pour la Nef et le Chœur)

Région	2
Altitude	40m
Hauteur du faitage	43m

Coefficient d'exposition $C_e(43m)$ 2 Hauteur faitage 43m et Zone IV
 Coefficient de rugosité $C_r(43m)$ 0,9 Hauteur faitage 43m et Zone IV
 Vitesse de référence du vent $v_{b,0}$ 24 m/s Zone 2
 Pression de pointe dynamique de pointe $q_p(43m)$ 0,71 kN/m²

Détermination des coefficients de pression :

Vent perpendiculaire à la toiture

Coefficient de pression extérieure : C_{pe10}

Angle pente	Zone				
	F	G	H	I	J
45°C	0	0	0	-0,2	-0,3
60°C	0,7	0,7	0,6	0	0
55°C	0,7	0,7	0,7	-0,2	-0,3
55°C	0,7	0,7	0,67	0	0

Coefficient de pression intérieure : C_{pi}

Zone				
F	G	H	I	J
0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Pression 0,710 0,710 0,686 0,213 0,213
Dépression -0,142 -0,142 -0,142 -0,284 -0,355

Symbole Valeurs Unité Commentaires
 W^*_{max} 0,71 kN/m² En zone G et F
 W^-_{max} -0,36 kN/m² En zone J
 W^* 0,71 kN/m² Hyp : Pression identique sur tout un versant
 W^- -0,36 kN/m² Hyp : Dépression identique sur tout l'autre versant

Total de charge de vent :

Vent parallèle à la toiture

Coefficient de pression extérieure : C_{pe0}

Angle pente	Zone		
	F	G	I
45°C	-1,1	-1,4	-2
60°C	-1,1	-1,2	-0,8
55°C	-1,1	-1,267	-1,2

Coefficient de pression intérieure : C_{pi}

Zone		
F	G	I
0,2	0,2	0,2

Dépression -0,923 -1,041 -0,994 -0,497

Symbole Valeurs Unité Commentaires
 W^-_{max} -1,04 kN/m² En zone G
 W^- -1,04 kN/m² Hyp : Dépression identique sur tout l'autre versant

Total de charge de vent :

ARRACHEMENT

Vent perpendiculaire

Dépression maximale	W	-0,36	kN/m ²
Combinaison d'action : 0,9G + 1,5W	S	95,2	m ²
Surface de chargement du vent sur unité			
Poids minimal de l'unité structurelle	G_{min}	57,12	kN
		5,7	tonnes

Vent parallèle

Cas le plus défavorable : unité située entre la zone F, G et H

Dépression en zone F	W	-0,92	kN/m ²
Dépression en zone G	W	-1,04	kN/m ²
Dépression en zone H	W	-0,99	kN/m ²

$e_{max} = 14$ m

Surface en zone F de chargement du vent sur unité	S	16,85	m ²
Surface en zone G de chargement du vent sur unité	S	16,85	m ²
Surface en zone H de chargement du vent sur unité	S	62,58	m ²

Combinaison d'action : 0,9G + 1,5W

Poids minimal de l'unité structurelle **G_{min} 158,83 kN**
15,88 tonnes

CHARGES PERMANENTES

COUVERTURE DE PROJET

Charges de toiture :

pois du zinc	5,6	daN/m ²
pois de la volige	8,9	daN/m ²
Total	14,5	daN/m²

COUVERTURE D'ORIGINE

Charges de toiture :

pois du plomb	56	daN/m ²
pois de la volige	8,9	daN/m ²
Total	64,9	daN/m²

03 notice technique

hypothèse de charges

système constructif

carnet d'assemblage

notes de calcul

fabrication

CAPACITE RESISTANTE DES APPUIS

L'incendie a endommagé en plusieurs endroit les voûtes et a endommagé de manière généralisé les maçonneries de la cathédrale. Les appuis de la charpente reposant sur maçonnerie, nous avons donc fait l'hypothèse d'une capacité resistente de ces appuis diminuée plus ou moins fortement selon leur localisation dans la charpente.

En l'absence de données officielles de calcul, nous avons fait le choix de diminuer la capacité resistente initiale de 70, 60 et 50% afin de simuler l'affaiblissement des maçonneries post-incendie en différents endroits. Ce sont ces diminution qui ont guidé notre conception de nos trois unités structurelles 70,60 et 50.

Pour estimer la capacité resistente originale des maçonneries, nous avons analysé l'unité de ferme N°7 de la charpente orginelle afin d'en récupérer un poids. En faisant l'hypothèse que cette unité fonctionnait de manière symétrique, nous avons pu estimer les efforts maximums que pouvaient récupérer les maçonneries avant l'incendie par le biais du poids de la structure.

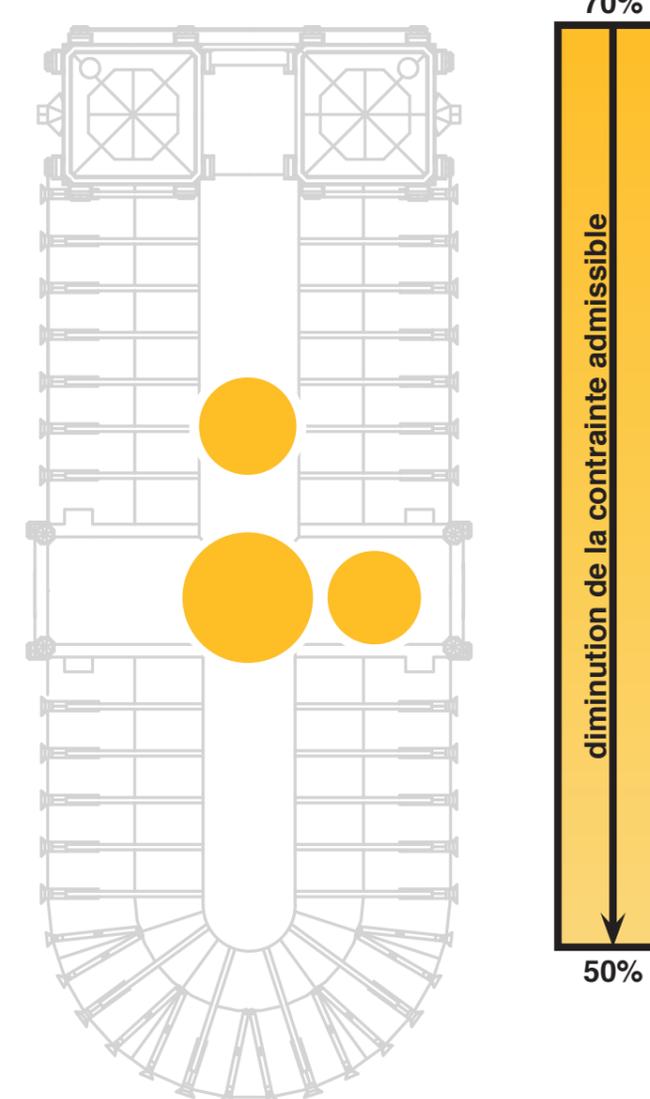
L'unité numéro 7 pesant ainsi 16,4 tonnes à son plus lourd (tuiles de plomb de 0,5mm), elle reportait donc 8,2 tonnes sur chaque appui sans considérer les charges climatiques, sujettes à évolution.

C'est donc ce poids de 16,4 tonnes qui a fait office de référence pour la suite de notre projet. A partir de cette valeur, nous avons calculé nos objectifs de poids à 70, 60 et 50% qui donneront par la suite naissance à nos unités structurelles du même nom.

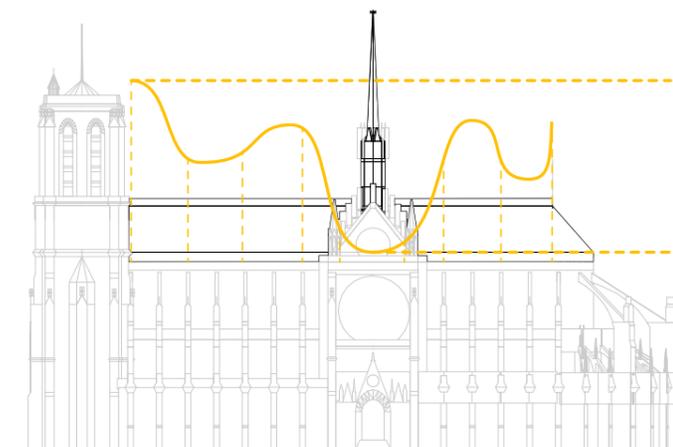
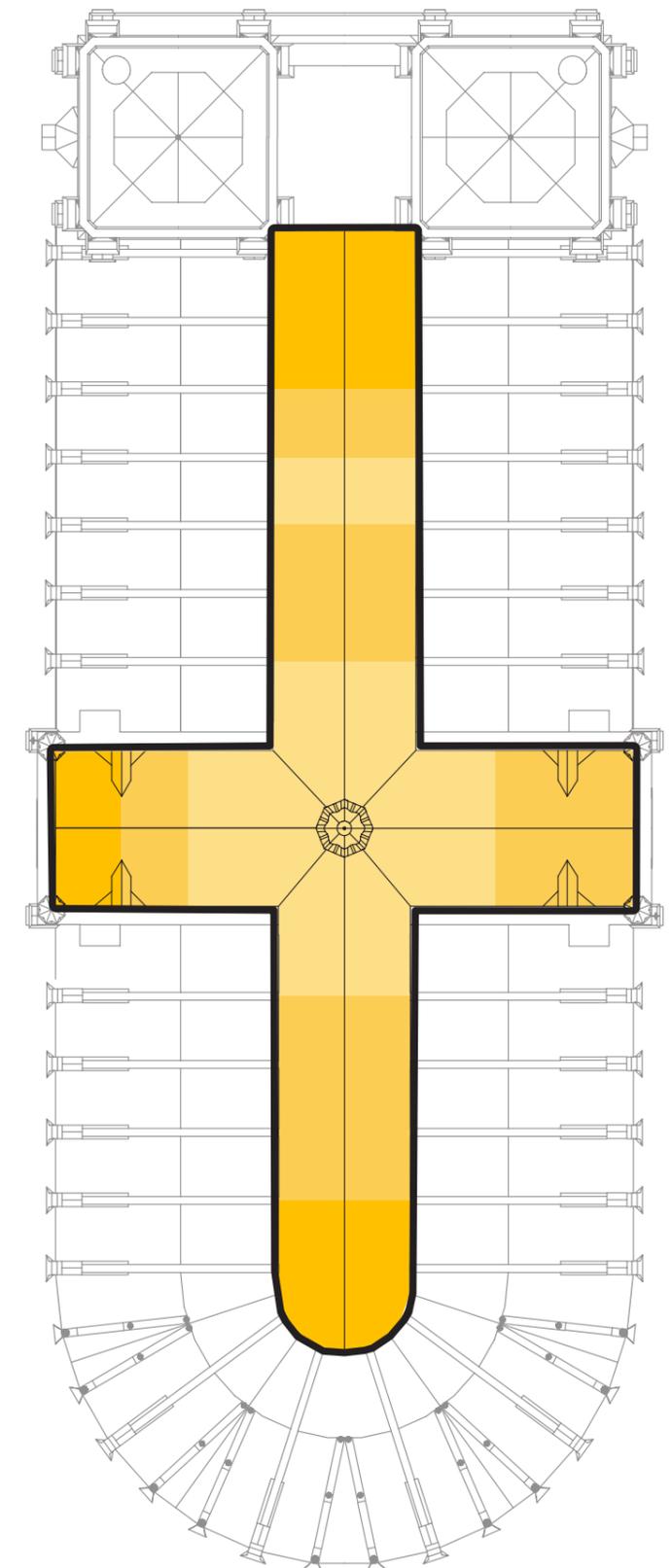
L'unité originelle, la N°7 et donc par équivalence «l'unité 100» ne sera pas remise en place dans notre proposition, considérant que l'incendie avait endommagé l'intégralité des maçonneries ce qui peut ne pas être réellement le cas.

Un dernier palier à été établi, 35%, qui correspond le minimum à ne pas dépasser pour éviter toute problématique d'arrachement dû au vent.

Effondrements localisés des voûtes de Notre-Dame de Paris



Plan synthétique des hypothèses de réduction des capacités résistantes des maçonneries



Estimation qualitative de la réduction des capacités portantes des maçonneries

03 notice technique

hypothèse de charges

système constructif

carnet d'assemblage

notes de calcul

fabrication

UNITES 70,60,50

Le système constructif retenu pour la conception des unités structurales, coeur de notre projet, est directement inspiré du système constructif d'origine de la charpente en partie courante.

Comme l'unité structurale de la ferme 7 avant elles, les unités 70 à 50 sont composées d'une Ferme Principale autour de laquelle sont symétriquement réparties quatre fermes secondaires (ou fermettes). Ces cinq éléments sont répartis avec un entraxe de quatre-vingt centimètres, au plus proche encore une fois de l'entraxe d'origine de la charpente.

Les fermes principales, porteuses, sont quant à elles disposées tous les quatre mètres. Il y a donc une unité structurale tout les quatre mètres également.

La cohérence et l'auto-stabilité de l'unité structurale est assurée par une série de modules de contreventement parmi lesquels on retrouve le contreventement principal, grandes croix de Saint-André qui tiennent également un rôle signalétique dans la charpente et dans le projet. Le contreventement secondaire quant à lui sert à assurer la cohérence et l'homogénéité structurale et esthétique du projet.

La densité apportée par le contreventement secondaire ne met que plus en valeur le contreventement principal.

Les passerelles, au nombre de deux, peuvent aussi participer au contreventement de l'ensemble de l'unité à l'aide des solives qui supportent le platelage de la circulation. Les liernes enfin, assurent elles-aussi un petit rôle de contreventement mais surtout de support logistique et technique pour l'apport d'éclairage artificiel dans le volume de la charpente.

Chaque unité est alors auto-stable et peut-être assemblée directement sur la charpente, après que chaque élément composant l'unité ait été assemblé au sol avant levage.

Les assemblages traditionnels pourront être renforcés lors du levage pour permettre d'assurer l'intégrité du système d'assemblage qui a par ailleurs été renforcé par des organes métalliques qui participent au verrouillage des noeuds d'assemblage.

■	chêne
D40	NF EN 338
CV1	NF B 52-001
700	kg/m ³
■	épicéa
C30	NF EN 338
ST I	NF B 52-001
500	kg/m ³

contreventement principal

- structurel
- signalétique
- support d'éclairage

contreventement secondaire

- structurel
- cohérence spatiale

passerelles (x 2)

- entretien et circulation
- stabilisation

liernes (x 2)

- levage
- stabilisation

fermettes (x 4)

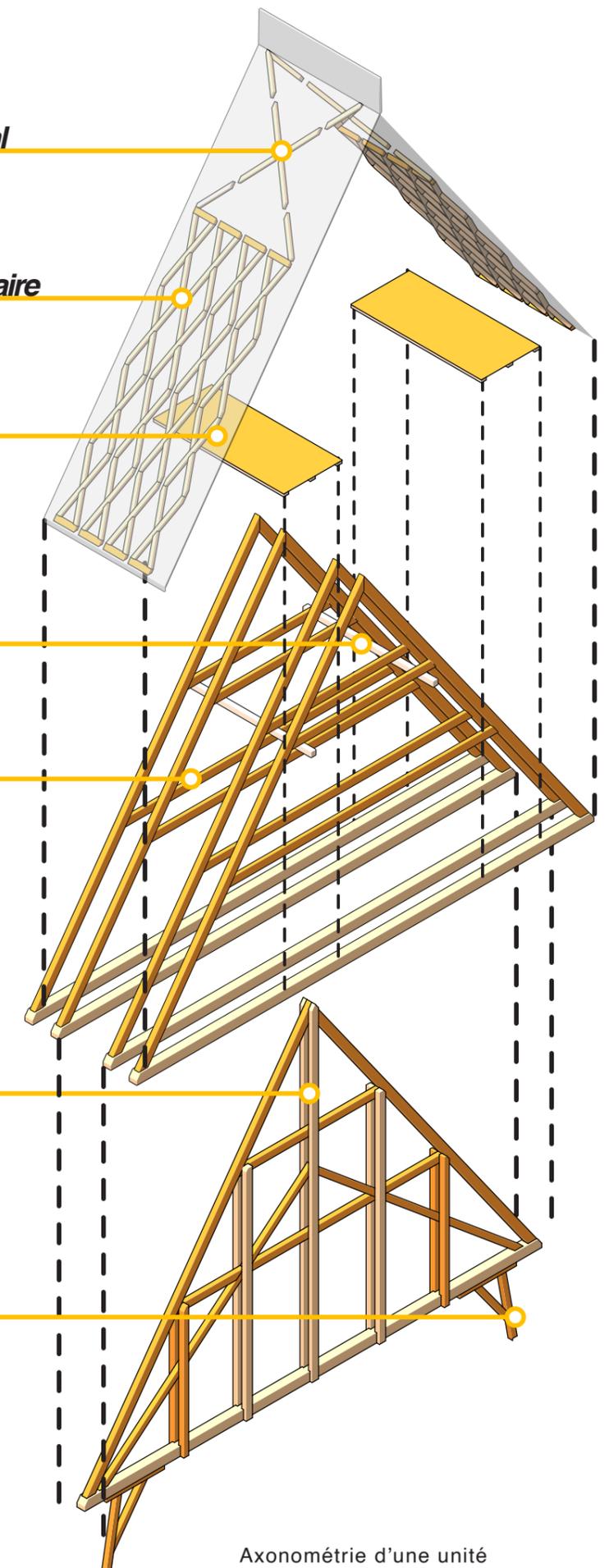
- support de couverture
- stabilisation

ferme principale

- structurelle
- support de couverture
- signalétique

appuis sur corbeaux (x2)

- structurel



Axonométrie d'une unité

03 notice technique

hypothèse de charges

système constructif

carnet d'assemblage

notes de calcul

fabrication

FLECHE ET RACINES

La flèche se compose de 16 racines. Ces éléments sont en lamellé-collé de Douglas (GL24), plus durable résistant aux intempéries. Les racines sont cintrées dans les deux dimensions de la section pour leur permettre de suivre la courbure de la flèche. Elles sont assemblées entre elles par un assemblage composé d'une tige en acier et de résine époxy haute performance. Ces assemblages permettent une continuité des efforts dans les barres dû à l'absence de jeu dans l'assemblage. Leur mise en oeuvre les protège efficacement du feu et des aléas climatiques (pluie, neige, gel...)

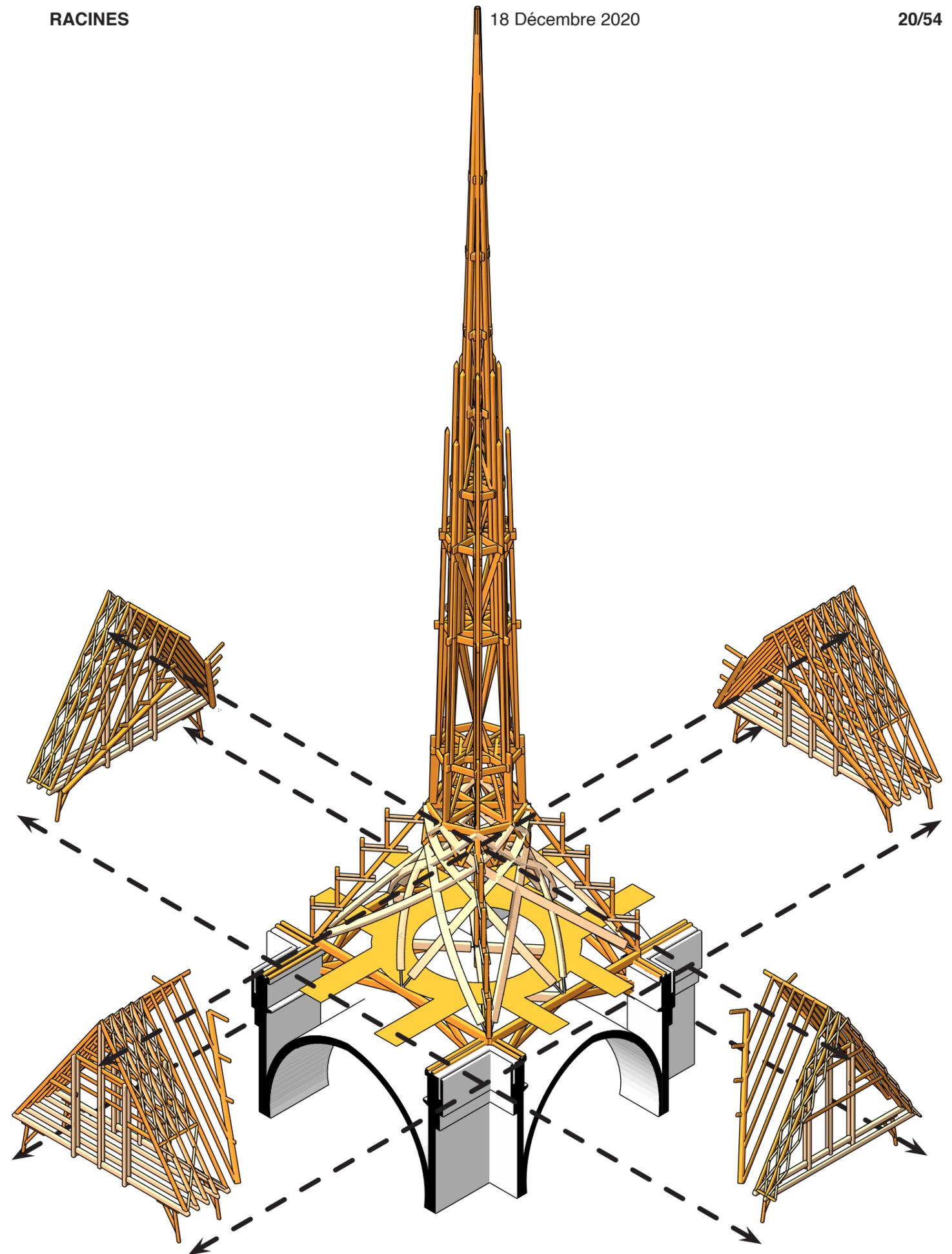
Pour limiter la poussée des pièces sur les maçonneries, un ceinturage composé de quatre entrails en chêne (D40) est mis en place. Ils travailleront essentiellement en traction et en flexion. Des renforts viendront limiter le travail en flexion des entrails qui s'appuieront sur les maçonneries qui seront elles localement renforcées.

En partie haute les racines se resserrent pour effectuer la liaison avec la partie émergée de la flèche. Elles sont rigidifiées par deux octogones en partie haute permettent aux racines de ne pas s'affaisser vers l'intérieur, notamment lors du changement brutal de courbure lorsque les racines effectuent la liaison vers la partie supérieure de la flèche.

Cette dernière est reliée au reste de la charpente par une panne faitière qui repose sur la première ferme de chaque partie de la cathédrale et sur l'octogone supérieur. Sur ces pannes viennent se fixer les chevrons qui supporteront la couverture, qui eux reposent en partie basse sur les noues secondaires.

Les supports des 12 statues ont quant à eux été remis en place comme ils étaient originellement. Ils s'appuient sur les 4 noues de la flèche.

La stabilité de la structure a été vérifiée à l'aide du logiciel Karamba sur RhinoGrasshoper, la vérification des sections pourra être réalisée à l'aide du même logiciel.



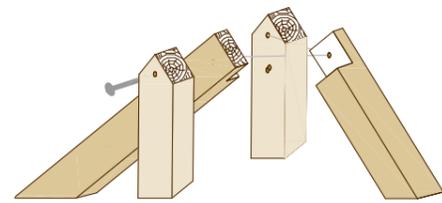
Axonométrie de l'installation de la flèche à la croisée des transepts

03 notice technique

hypothèse de charges
système constructif
carnet d'assemblage
notes de calcul
fabrication

ASSEMBLAGES TRADITIONNELS

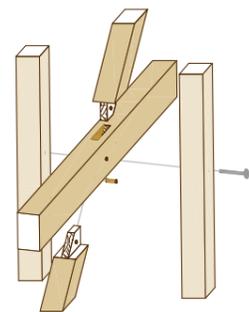
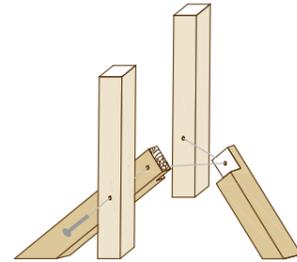
Les unités structurales de la partie courante de la charpente étant toutes réalisées en bois massif, le choix a été fait d'utiliser des assemblages dits traditionnels. Ils sont verrouillés par l'ajout d'organes métalliques pour assurer une bonne stabilité et durée dans le temps.



1 Moisement par le poinçon des arbalétriers à mi-bois

Moisement par les poteaux des faux-arbalétriers à mi-bois

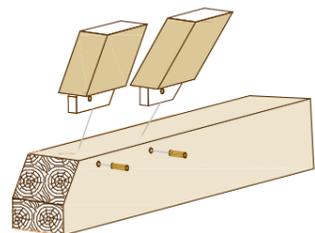
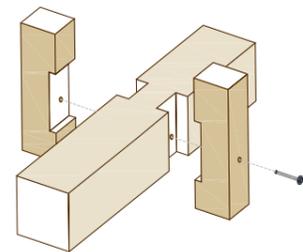
2



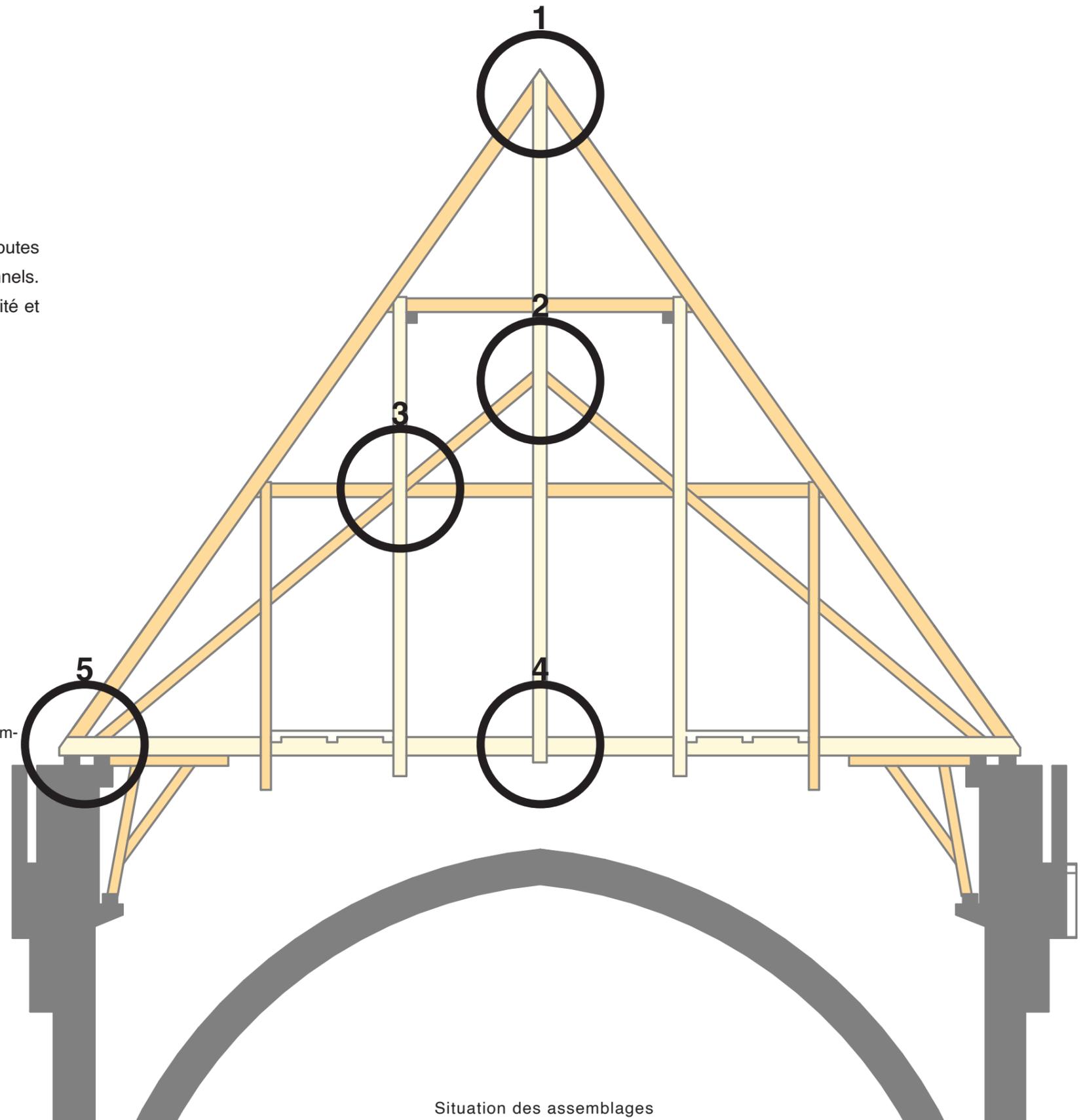
3 Moisement par les poteaux des faux-arbalétriers et du faux-entrait assemblés par tenon-mortaise

Moisement à mi-bois par les poteaux de l'entrait principal de la ferme

4



5 Assemblage par tenons-mortaise des arbalétriers et faux-arbalétriers

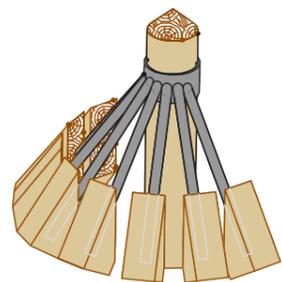


03 notice technique

hypothèse de charges
système constructif
carnet d'assemblage
notes de calcul
fabrication

ASSEMBLAGES CONTEMPORAINS & TRADITIONNELS

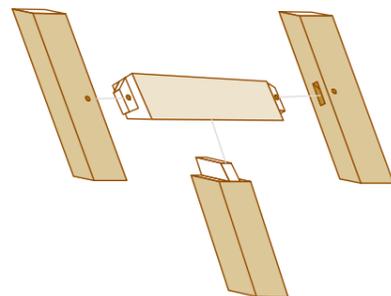
L'abside est composée de demi-fermes principales et demi-fermes secondaires. On y retrouve donc les mêmes assemblages que pour les unités structurels précédentes. Cependant, au niveau du poinçon la concentration des pièces de bois ne permettait plus d'utiliser des assemblages traditionnels. Nous venons donc apporter de la contemporanéité en proposant des assemblages métalliques type ferrures en âme et couronnes.



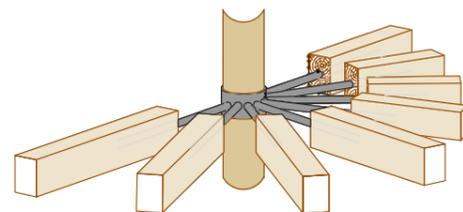
1 Couronne métallique recevant les arbalétriers des fermes principales

Lisse haute recevant les arbalétriers des fermes secondaires, interrompue par les arbalétriers des fermes principales

2

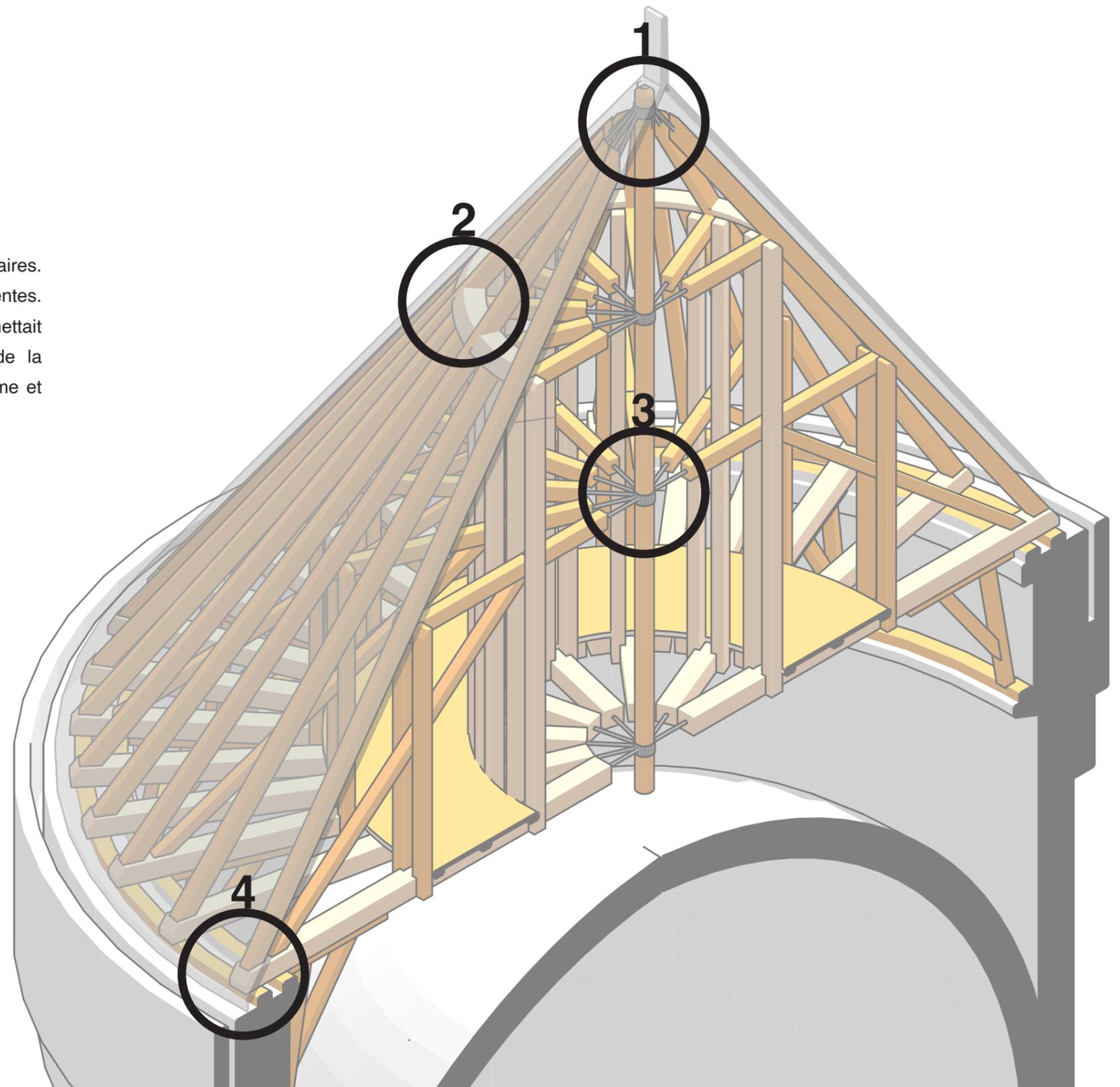
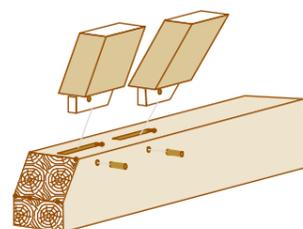


3 Couronne métallique recevant les entrails et faux-entrails des fermes principales et secondaires.



Assemblage par tenons-mortaise des arbalétriers et faux-arbalétriers

4



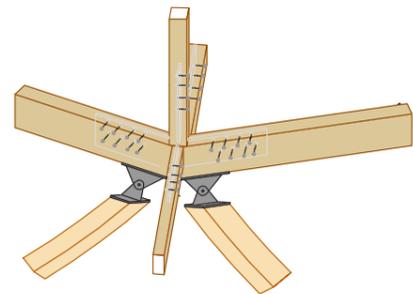
Situation des assemblages dans l'abside

03 notice technique

hypothèse de charges
système constructif
carnet d'assemblage
notes de calcul
fabrication

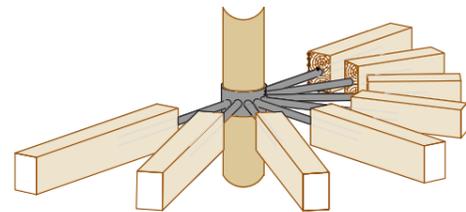
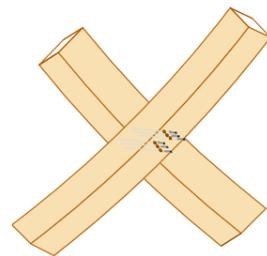
ASSEMBLAGES MULTI-NODAUX CONTEMPORAINS

La flèche représente l'apogée des technologies du XXI^e siècle, autant dans les matériaux mis en oeuvre que les techniques d'assemblage. Nous retrouvons essentiellement des assemblages métalliques voir des assemblages nouvelle génération à base de résine époxy.



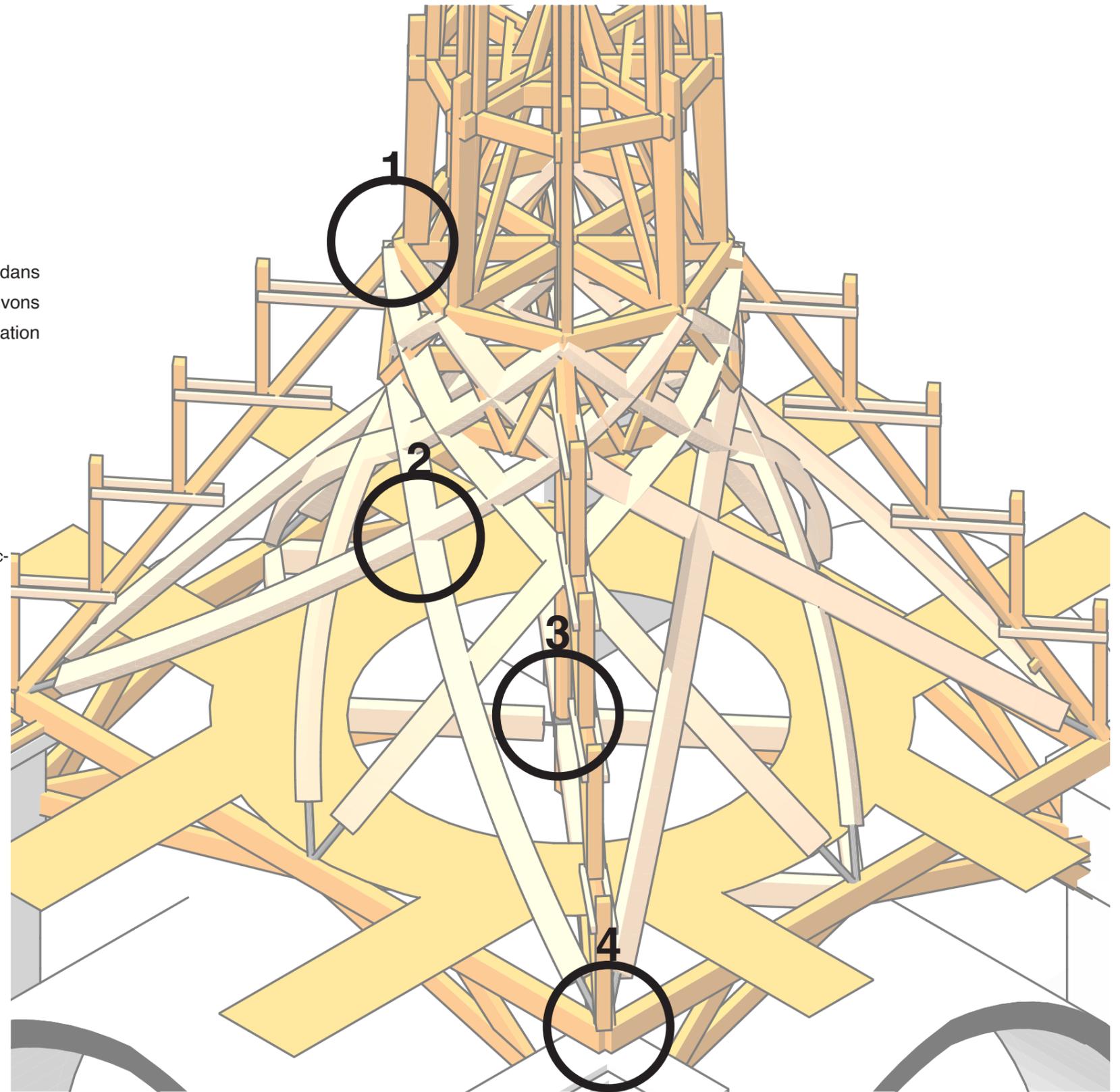
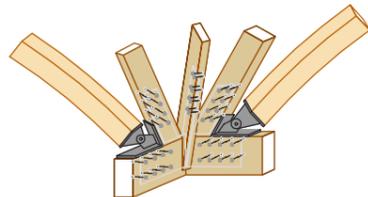
1 Ferrure métallique à âmes multiples et connecteurs métalliques articulés pour l'octogone supérieur

Croisement des racines en utilisant des assemblages métalliques et de la résine époxy **2**



3 Couronne métallique recevant les diagonales de des entrants de la base de la flèche

Ferrure métallique à âmes multiples et connecteurs métalliques articulés pour la base de la flèche **4**



Situation des assemblages pour le socle de la flèche

03 notice technique

hypothèse de charges

système constructif

carnet d'assemblage

notes de calcul

fabrication

GENERALITES

Tout d'abord, les unités de la nef et du chœur ne sont pas fixées sur la maçonnerie de la cathédrale. On a donc calculé le poids minimal d'une unité à l'arrachement au vent perpendiculaire, calculé à partir de la combinaison d'action de risque au soulèvement. Après calculs, on trouve que le poids d'une unité doit être supérieur à 5.7 tonnes pour résister à l'arrachement. Le poids de l'unité de la ferme numéro 7 est de 16.4 tonnes.

On a donc choisi de construire 3 unités qui seront un exemple de palier de poids que la maçonnerie de la cathédrale peut supporter, en effectuant en pourcentage de poids cible du poids de l'unité de la ferme numéro 7 sans jamais être inférieur à 5.7 tonnes. On a donc déterminé pour nos paliers, trois pourcentages de poids cible : 70%, 60% et 50% du poids de l'unité structurelle 7.

Pour pouvoir déterminer les différentes géométries de nos paliers, on a tout d'abord modélisé la ferme numéro 7 sur MdBat pour comprendre son fonctionnement (le fonctionnement en compression, traction et flexion de chaque pièce de bois) et comment le poids de la ferme était réparti sur les différents appuis. On a ensuite déterminé la géométrie de nos 3 fermes principales ainsi que celle de nos fermes secondaires. Par la suite on les a modélisés sur MdBat pour obtenir un pré-dimensionnement des sections de chaque pièce qui composent les fermes. Le concept de notre charpente se base avant tout sur un travail à partir des contraintes. On a donc choisis de mettre en résineux toutes les pièces qui travaillent en traction et en feuillus toutes les pièces qui travaillent principalement en compression. Ce travail de modélisation nous a permis d'identifier les contraintes dans les pièces et de mettre la bonne essence au bon endroit. La modélisation de ces fermes nous a permis aussi d'avoir un ordre de grandeur de poids et de pouvoir les comparer à nos objectifs cible.

Une fois la conception de nos unités structurelles finies on a pu les modéliser sur le logiciel Rhino Grasshopper. Actuellement, nos unités demeurent toujours en calcul sur grasshopper. En effet, nous avons des difficultés à faire correspondre de manière satisfaisante notre logique de modélisation et la logique de calcul du module EUROCODES5 développé sur KARAMBA. Ce travail en cours d'élaboration est présenté ci-après.

ANALYSE DU MODELE ACORD

Les réactions d'appuis totales des différentes unités (70, 60, 50) sont positives : il n'y a pas de soulèvement au vent

Les taux de travaux étant tous inférieures à 100% (hormis les bracons que l'on explique par la suite) les contraintes dans les différentes pièces de bois sont bien inférieures aux efforts qui s'appliquent dessus

Les efforts maximaux dans les assemblages ont été répertorié afin de pouvoir vérifier par la suite les différents assemblages qui devront être mis en place (travail réalisé par le PFE assemblage).

Limite du modèle Acord

On a considéré des appuis simples partout (lisses basses et un appui sur corbeau) sauf un appui sur un corbeau où on considère une rotule, or en réalité on n'a pas réellement une rotule mais un appui simple. Cela explique les efforts trop important (taux de travail >100%) dans le bracon gauche mais en réalité le bracon est sensé tenir (en tout cas cela a déjà tenu 800ans).

Dans l'ensemble du modèle on a considéré des assemblages rotules alors qu'en réalité, les assemblages ont très probablement une rigidité (rigidité qui doit être déterminé par le PFE assemblage) qui empêche en parti la rotation.

Comparaison Acord-Grasshopper

Sur Acord on constate qu'il y a bien un fonctionnement en unité structurel et que les efforts des fermes secondaires sont bien transmis à la ferme principale, ce qui explique les efforts plus conséquent dans la ferme principale et donc les taux de travaux plus importants dans celle-ci. Cela est sûrement dû au fait que notre modélisation sur Grasshopper n'est pas complètement correcte car certains problèmes n'ont pas été résolu dans le temps imparti.

Les assemblages dans Grasshopper tiennent compte d'une rigidité à l'inverse de Acord

03 notice technique

hypothèse de charges
système constructif
carnet d'assemblage
notes de calcul
fabrication

UNITE 70

EFFORTS DANS LES BARRES

FERMETTES

N°	Eléments	Sections cm	Classe	Taux de travail %	Déplacements mm
1	Arbalétrier droit	22x19	D40	16,55	35,81
2	Arbalétrier gauche	22x19	D40	16,55	35,81
3	Entrait	27x24	C30	6,57	0,07
4	Faux-Entrait haut	22x15	D40	0,91	0
5	Faux-Entrait bas	22x15	D40	0,91	0

TRAVAIL MAXIMUM

Arbalétrier droit	16,55
-------------------	-------

FERME PRINCIPALE

N°	Eléments	Sections cm	Classe	Taux de travail %	Déplacements mm
6	Arbalétrier droit	22x19	D40	71,53	8,86
7	Arbalétrier gauche	22x19	D40	71,53	8,86
8	Bracon droit	15x15	D40	154,54	14,54
9	Bracon gauche	15x15	D40	154,54	14,54
10	Entrait	27x24	C30	81,94	5,99
11	Faux-entrait	22x17	D40	23,48	2,47
12	Faux arbalétrier droit	16x17	D40	67,28	4,44
13	Faux arbalétrier gauche	16x17	D40	67,28	4,44
14	Grand poteau	16x10(10)	C30	85,73	3,32
15	Jambière droite	15x15	D40	24,66	0
16	Jambière gauche	15x15	D40	24,66	0
17	Petit poteau	14x11(11)	D40	85,73	3,32
18	Poinçon	20x11(11)	C30	53,69	8,5

TRAVAIL MAXIMUM

Bracon droit	154,54
--------------	--------

CONTREVENTEMENT

N°	Eléments	Sections cm	Classe	Taux de travail %	Déplacements mm
19	Contreventement	10x10	C30	34,67	2,01

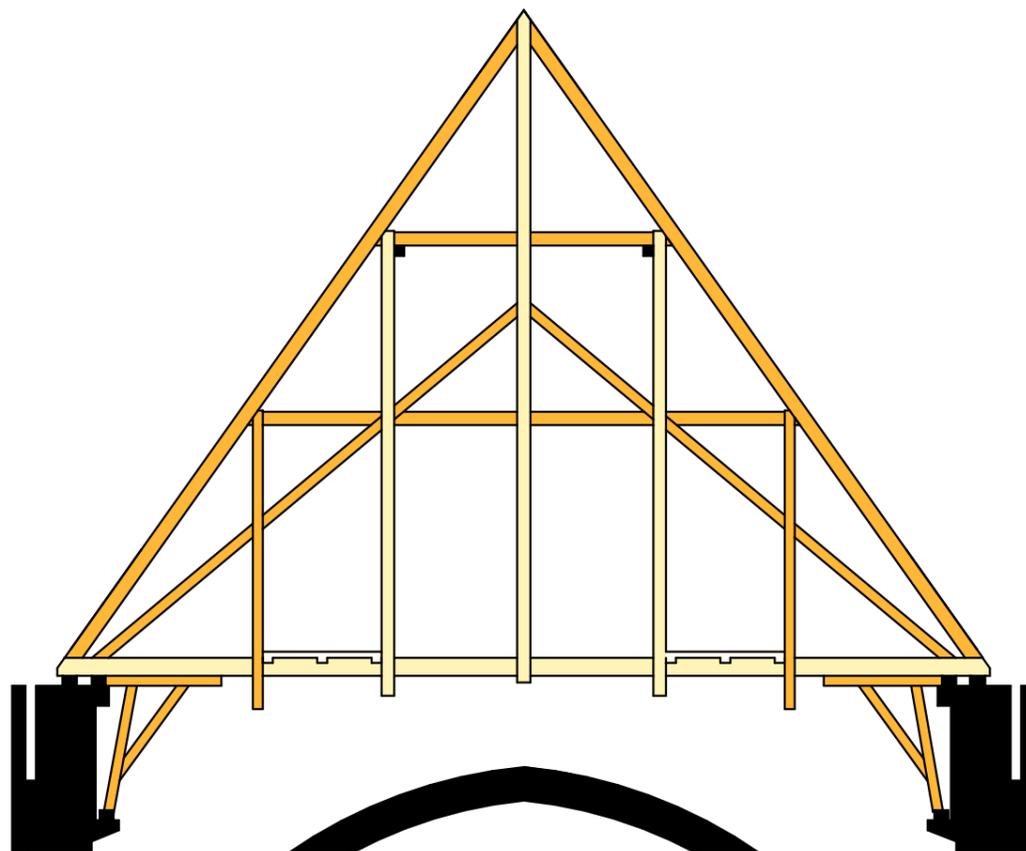
REACTIONS D'APPUIS

FERMETTES

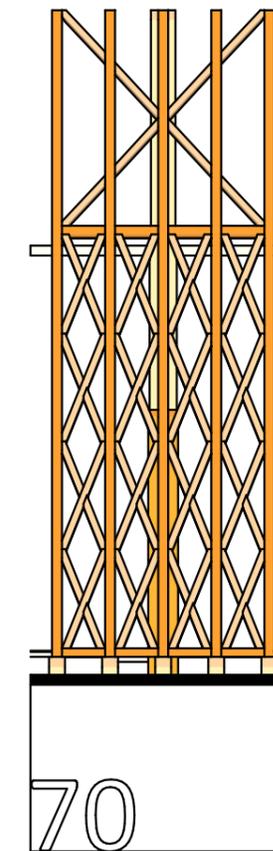
N°	Dénomination	Nœud u	RX kN	RY kN	RZ kN
A	F1EG	1	0	0	-17,49
B	F1IG	2	0	0	-0,09
C	F1ED	3	0	0	-2,97
D	F1ID	4	0	0	0,08
E	F2EG	5	0	0	-16,65
F	F2IG	6	0	0	0,03
G	F2ED	7	0	0	-4,99
H	F2ID	8	0	0	-0,05
I	F3EG	9	0	0	-16,43
J	F3IG	10	0	0	0,02
K	F3ED	11	0	0	-4,71
L	F3ID	12	0	0	-0,05
M	F4EG	13	0	0	-16,31
N	F4IG	14	0	0	-0,07
O	F4ED	15	0	0	0,07
P	F4ID	16	0	0	-2,75

FERME PRINCIPALE

N°	Dénomination	Nœud u	RX kN	RY kN	RZ kN
Q	AEG	17	0	0	11,77
R	AED	18	0	0	10,97
S	AIG	19	0	0	-52,81
T	AID	20	0	0	-42,31
U	CG	21	64,2	0	150,75
V	CD	22	0	0	9,1



Vue de face de la ferme 70



Vue de profil

TOTAL	64,2	0	5,11
-------	------	---	------

VOLUMETRIE ET DIMENSIONS

FERMETTES

Eléments	Longueur m	Essence	Volume m3	Poids kg
Arbalétriers	12	Chêne	0,98	696
Entrait principal	14	Epicea	0,91	455
Entrants secondaires	13	Chêne	0,41	291
Sous-poids unitaire				1442
Sous-poids total				5768

FERME PRINCIPALE

Eléments	Longueur m	Essence	Volume m3	Poids kg
Entrait principal	14	Epicea	0,88	440
Entrants secondaires	13	Chêne	0,41	291,1
Arbalétriers	12	Chêne	0,98	695,8
Faux-arbalétriers	8,5	Chêne	0,46	326,6
Poinçon	11	Epicea	0,44	220
Grands poteaux	7	Epicea	0,52	260
Petits poteaux	4,5	Chêne	0,28	198,8
Appuis inférieurs	3	Chêne	0,22	156,2
Sous-poids total				2589

CONTREVENTEMENT

Eléments	Longueur m	Essence	Volume m3	Poids kg
Croix principale	X	Epicea	0,16	80
Croix secondaire	X	Epicea	1,28	640
Couture	X	Epicea	0,48	240
Liernes	X	Epicea	0,18	90
Solivage	X	Epicea	0,24	120
Platelage	X	Chêne	0,26	184,6
Sous-poids total				1355

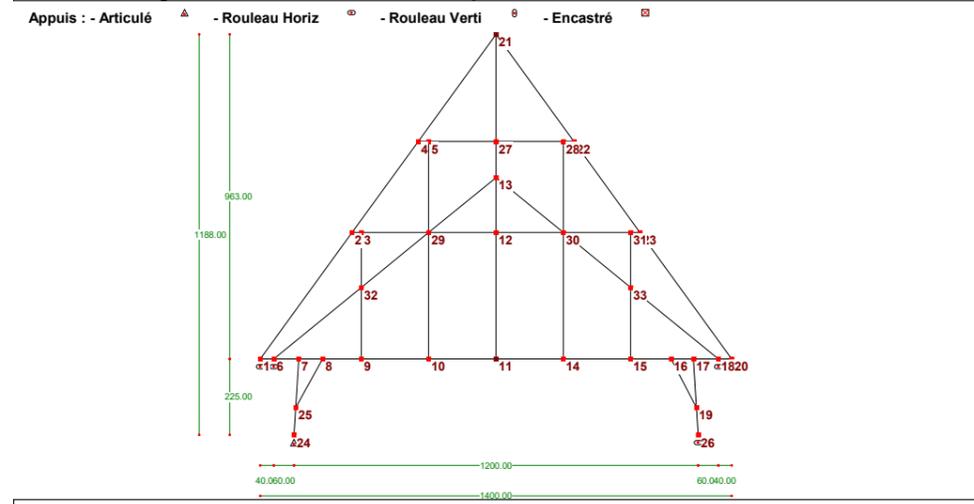
COUVERTURE

Eléments	Longueur m	Essence	Volume m3	Poids kg
Voligeage	X	Epicea	1,76	880
Tasseaux	X	Zinc	0,08	572
Sous-poids total				1452
Poids total unité				11163

03 notice technique

hypothèse de charges
 système constructif
 carnet d'assemblage
 notes de calcul
 fabrication

Date : 18/12/2020 Pg 1	
Nom du fichier : FERME_70 Edit 28	
Notes de calcul - Logiciel STRUCTUR - Eurocode 5 - Annexe Française	



LISTE/DÉFINITION DES CAS DE CHARGES	
Nombre de cas de chargement étudiés : 38 (19 ELS et 19 ELU)	
Cas ELS 1 : Permanente	Cas ELS 2 : Permanente + Neige
Cas ELS 3 : Permanente + Vent A	Cas ELS 5 : Permanente + Expl. Toiture
Cas ELS 9 : Permanente + Neige + 0.6°Vent A	Cas ELS 15 : Permanente + Vent A + 0.5°Neige
Cas ELS 33 : Permanente + Expl. Toiture + 0.5°Neige	Cas ELS 34 : Permanente + Expl. Toiture + 0.6°Vent A
Cas ELS 69 : Permanente + Expl. Toiture + 0.6°Vent A + 0.5°Neige	Cas ELS (Neige redistribuée 1) 2 : Permanente + Neige
Cas ELS (Neige redistribuée 1) 3 : Permanente + Neige + 0.6°Vent A	Cas ELS (Neige redistribuée 1) 9 : Permanente + Vent A + 0.5°Neige
Cas ELS (Neige redistribuée 1) 14 : Permanente + Expl. Toiture + 0.5°Neige	Cas ELS (Neige redistribuée 1) 37 : Permanente + Expl. Toiture + 0.6°Vent A + 0.5°Neige
Cas ELS (Neige redistribuée 2) 2 : Permanente + Neige	Cas ELS (Neige redistribuée 2) 14 : Permanente + Expl. Toiture + 0.5°Neige
Cas ELS (Neige redistribuée 2) 37 : Permanente + Expl. Toiture + 0.6°Vent A + 0.5°Neige	Cas ELU 2 : 1.35°Permanente + 1.5°Neige
Cas ELU 1 : 1.35°Permanente	Cas ELU 8 : 1.35°Permanente + 1.5°Vent A
Cas ELU 3 : 0.9°Permanente + 1.5°Vent A	Cas ELU 15 : 1.35°Permanente + 1.5°Vent A + 0.75°Neige
Cas ELU 9 : 1.35°Permanente + 1.5°Neige + 0.9°Vent A	Cas ELU 34 : 1.35°Permanente + 1.5°Expl. Toiture + 0.9°Vent A
Cas ELU 33 : 1.35°Permanente + 1.5°Expl. Toiture + 0.75°Neige	Cas ELU (Neige redistribuée 1) 2 : 1.35°Permanente + 1.5°Neige
Cas ELU (Neige redistribuée 1) 3 : 1.35°Permanente + 0.9°Vent A + 0.75°Neige	Cas ELU (Neige redistribuée 1) 9 : 1.35°Permanente + 1.5°Vent A + 0.75°Neige
Cas ELU (Neige redistribuée 1) 14 : 1.35°Permanente + 1.5°Expl. Toiture + 0.75°Neige	Cas ELU (Neige redistribuée 1) 37 : 1.35°Permanente + 1.5°Expl. Toiture + 0.9°Vent A + 0.75°Neige
Cas ELU (Neige redistribuée 2) 2 : 1.35°Permanente + 1.5°Neige	Cas ELU (Neige redistribuée 2) 3 : 1.35°Permanente + 1.5°Neige + 0.9°Vent A
Cas ELU (Neige redistribuée 2) 14 : 1.35°Permanente + 1.5°Expl. Toiture + 0.75°Neige	Cas ELU (Neige redistribuée 2) 14 : 1.35°Permanente + 1.5°Expl. Toiture + 0.75°Neige
Cas ELU (Neige redistribuée 2) 37 : 1.35°Permanente + 1.5°Expl. Toiture + 0.9°Vent A + 0.75°Neige	

CHARGES NODALES						
Unités : daN	Perma	Neige	Vent A	Exploit	Neige Redistribuée	
Noeud	Vrt	Exc.	Vrt	Vrt	Cas 1	Cas 2
11	-70.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	-47.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

CHARGES UNIFORMÈMENT REPARTIES						
Unités : Charges Saisies (daN/m²) - Vent Coef (Cpe-Cpl)	Permanente	Neige	Vent A	Exploit Vrt	Neige Redistribuée	
Barres					Neige 1	Neige 2
Arbalétrier	-15.00	-7.20	36.00	0.00	-3.60	-7.20
2/4	-15.00	-7.20	36.00	0.00	-3.60	-7.20
4/21	-15.00	-7.20	36.00	0.00	-3.60	-7.20
21/22	-15.00	-7.20	-71.00	0.00	-7.20	-3.60
22/23	-15.00	-7.20	-71.00	0.00	-7.20	-3.60
23/20	-15.00	-7.20	-71.00	0.00	-7.20	-3.60
6/32	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
32/29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
29/13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13/30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30/33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
33/18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Entrait						
1/6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6/7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7/8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8/9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9/10	0.00	0.00	0.00	-10.00 (Cat : H)	0.00	0.00
10/11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11/14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14/15	0.00	0.00	0.00	-10.00 (Cat : H)	0.00	0.00
15/16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16/17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17/18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18/20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4/5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Date : 18/12/2020 Pg 1					
Nom du fichier : FERME_70 Edit 28					

REACTIONS PONDERÉES AUX APPUIS					
Unités : Efforts (daN) - Moment (daN.cm)					
Noeuds	Horiz.	Vertic.	Moments	Cas + Déf	
1	-----	5930.2	-----	ELU 15	ELU 15
6	-----	822.0	-----	ELU (NR 1) 14	ELU (NR 1) 14
18	-----	824.1	-----	ELU (NR 2) 14	ELU (NR 2) 14
20	-----	2472.2	-----	ELU 15	ELU 15
24	6182.5	10005.6	-----	ELU 15	ELU (NR 2) 9
26	-----	1782.1	-----	ELU (NR 1) 9	ELU (NR 1) 9

EFFORTS, CONTRAINTES NORMALES ET TAUX DE TRAVAIL										
Flambement(ATF: Anti-flambement(s) Plan et Perpendiculaire, EI: Elancement); Norm: effort normal; Moment Maxi et sa position										
Unités : Moment (daN.cm) - Eff. Normal, Effort Tranchant (daN)										
Barres	ATF	Flambement	El	Kc	Kc	Moment Maxi	Pos	Moment Nul	Taux Travail	Cas + Déf
Arbalétrier										
1/2	CT	1	-	159	0.15	0.59	1590	-11684	44%	ELU 1
2/4	CT	1	-	159	0.15	0.82	4639	11090	0%	ELU 1
4/21	C	1	-	105	0.33	0.72	1528	31927	50%	ELU 3
21/22	CT	1	-	317			-324	-76002	44%	ELU (NR 1) 9
22/23	C	1	-	106	0.32	0.82	2802	87168	100%	ELU 15
23/20	C	1	-	106	0.32	0.59	3983	-92887	55%	ELU 15
6/32	C	1	-	105	0.32	0.59	7896	15391	100%	ELU (NR 1) 9
32/29	C	1	-	105	0.32	0.78	7717	25660	0%	ELU (NR 1) 9
29/13	C	1	-	105	0.32	0.78	4190	13685	0%	ELU (NR 1) 9
13/30	CT	1	-	211			-3624	-18264	100%	ELU 3
30/33	CT	1	-	211			-7183	-6034	72%	ELU 3
33/18	CT	1	-	211			-7025	-3465	22%	ELU 3
Entrait										
1/6	CT	-	-	6	1.00	1.00	3723	-443662	100%	ELU 3
6/7	T	-	-	191			-2171	-441357	0%	ELU (NR 1) 9
7/8	T	-	-	191			-5795	655098	100%	ELU 15
8/9	CT	-	-	170	0.11	1.00	4636	655216	0%	ELU 3
9/10	CT	-	-	170	0.11	0.97	4471	56135	100%	ELU 3
10/11	CT	-	-	170	0.11	0.97	4435	56135	0%	ELU 3
11/14	CT	-	-	170	0.11	0.97	4232	-102543	100%	ELU 3
14/15	CT	-	-	170	0.11	0.97	4207	-102543	0%	ELU 3
15/16	CT	-	-	170	0.11	1.00	4147	-75409	0%	ELU 3
16/17	CT	-	-	170	0.11	1.00	4329	109411	100%	ELU 3
17/18	CT	-	-	170	0.11	1.00	4147	109411	0%	ELU 3
18/20	T	-	-	6			-1679	59490	0%	ELU (NR 1) 9
4/5	CT	-	-	114			-1636	39277	100%	ELU 3
5/27	CT	-	-	114			-1600	-92947	100%	ELU 3
27/28	C	-	-	57	0.77	0.94	2943	90059	0%	ELU 3
28/22	C	-	-	57	0.77	1.00	2960	-32746	0%	ELU (NR 1) 9
2/3	CT	-	-	56			-4729	140891	100%	ELU 3
3/29	CT	-	-	56			-4904	140891	0%	ELU 3
29/12	CT	-	-	99	0.36	0.94	816	1145	100%	ELU 1
12/30	CT	-	-	99	0.36	0.94	816	1144	0%	ELU 1
30/31	C	-	-	56	0.78	0.94	2472	16547	100%	ELU (NR 1) 9
31/23	C	-	-	56	0.78	1.00	2409	16547	0%	ELU (NR 1) 9
Poteau										
10/29	T	-	-	279			-903	13589	100%	ELU (NR 1) 9
29/5	CT	-	-	117	0.23	0.59	1976	-9589	0%	ELU (NR 1) 9
30/14	CT	-	-	146	0.15	0.41	563	-9344	0%	ELU 3
28/30	CT	-	-	251			-1605	-4725	100%	ELU 3
15/33	CT	-	-	162	0.15	0.87	689	13154	100%	ELU (NR 1) 9
33/31	CT	-	-	162	0.15	0.94	752	10341	0%	ELU (NR 1) 9
9/32	CT	-	-	162	0.15	0.87	6456	34951	100%	ELU 3
32/3	CT	-	-	162	0.15	0.94	5899	28502	0%	ELU 3
Poinçon										
11/12	T	-	-	303			-539	76532	100%	ELU (NR 1) 9
12/13	T	-	-	303			-630	-199262	100%	ELU (NR 1) 9
13/27	CT	-	-	303			-295	250534	100%	ELU (NR 1) 9
27/21	CT	-	-	303			-301	67747	0%	ELU (NR 1) 9
Jambe de force										
25/8	CT	-	-	38	0.92	0.92	20160	-330	50%	ELU (NR 1) 9
16/19	T	-	-	38			-418	-305	50%	ELU (NR 1) 9
Blochset										
24/25	C	-	-	19	1.00	1.00	10257	450194	100%	ELU 3
25/7	CT	-	-	52			-7972	450194	0%	ELU 3
17/19	C	-	-	52	0.82	0.94	2129	-8928	100%	ELU (NR 1) 9
19/26	C	-	-	52	0.82	1.00	1762	-8928	0%	ELU (NR 1) 9

03 notice technique

hypothèse de charges
système constructif
carnet d'assemblage
notes de calcul
fabrication

UNITE 60

EFFORTS DANS LES BARRES

FERMETTES

N°	Éléments	Sections cm	Classe	Taux de travail %	Déplacements cm
1	Arbalétrier droit	22x17	D40	29%	3.84
2	Arbalétrier gauche	22x17	D40	35%	4.57
3	Entrait	27x20	C30	37%	1.95
4	Faux-Entrait haut	22x9	D40	3%	2.79
5	Faux-Entrait bas	22x9	D40	24%	4.61

TRAVAIL MAXIMUM

Entrait

37%

FERME PRINCIPALE

N°	Éléments	Sections cm	Classe	Taux de travail %	Déplacements cm
6	Arbalétrier droit	22x13	D40	16%	1.75
7	Arbalétrier gauche	22x13	D40	14%	1.12
8	Bracon droit	15x15	D40	1%	0.14
9	Bracon gauche	15x15	D40	5%	0.01
10	Entrait	27x24	C30	20%	0.6
11	Faux-entrait	20x14	D40	2%	1.11
12	Faux-entrait gauche	20x13	D40	1%	1.16
13	Faux-entrait droit	20x13	D40	1%	1.75
14	Demi faux arbalétrier droit	16x13	D40	2%	1.78
15	Demi faux arbalétrier gauche	16x13	D40	2%	1.37
16	Grand poteau	16x8(8)	C30	42%	1.31
17	Jambière droite	15x15	D40	1%	0.22
18	Jambière gauche	15x15	D40	4%	0.02
19	Petit poteau	14x8(8)	D40	2%	1.45
20	Poinçon	20x11(11)	C30	4%	1.29

TRAVAIL MAXIMUM

Grand poteau

42%

CONTREVENTEMENT

N°	Éléments	Sections cm	Classe	Taux de travail %	Déplacements cm
21	Contreventement	10x10	C30	30%	3.95

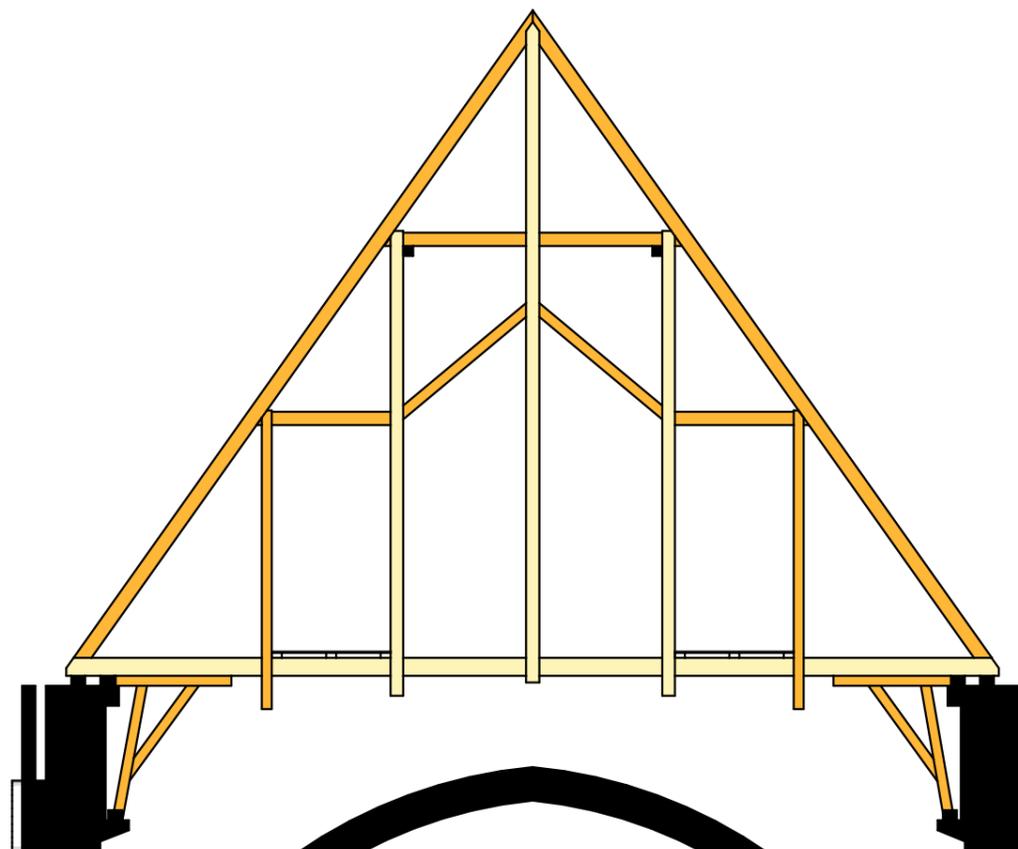
REACTIONS D'APPUIS

FERMETTES

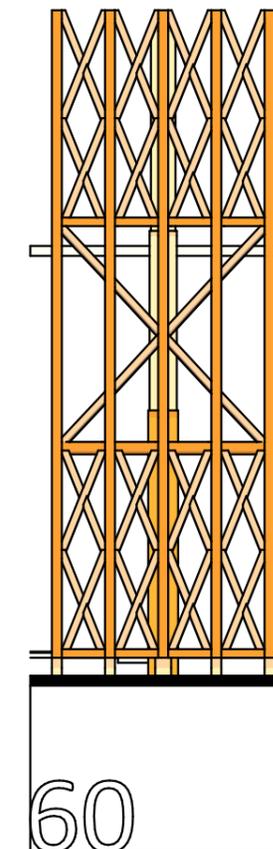
N°	Dénomination	Nœud u	RX kN	RY kN	RZ kN
A	F1G	1	-3.84	0.1	9.85
B	F1D	2	3.99	-0.01	12.37
C	F2G	3	-3.08	-0.93	7.63
D	F2D	4	3.88	-0.01	-6.31
E	F3G	5	8.23	1.61	10.56
F	F3D	6	-3.1	0.91	7.66
G	F4G	7	9.98	-0.08	13.26
H	F4D	8	-3.83	-0.07	9.83

FERME PRINCIPALE

N°	Dénomination	Nœud u	RX kN	RY kN	RZ kN
I	AEG	9	0	-0.02	7.42
J	AED	10	0	-0.02	14.07
K	AIG	11	8.06	-1.58	10.41
L	AID	12	10.05	0.11	13.34
M	CG	13	-1.41	0	4.3
N	CD	14	0.83	0	2.64



Vue de face de la ferme 60



60

Vue de profil

VOLUMETRIE ET DIMENSIONS

FERMETTES

Éléments	Longueur m	Essence	Volume m3	Poids kg
Arbalétriers	12	Chêne	0,88	625
Entrait principal	14	Epicea	0,75	375
Entrails secondaires	13	Chêne	0,25	178
Sous-poids unitaire				1177
Sous-poids total				4709

FERME PRINCIPALE

Éléments	Longueur m	Essence	Volume m3	Poids kg
Entrait principal	14	Epicea	0,88	440
Entrails secondaires	13	Chêne	0,22	156,2
Arbalétriers	12	Chêne	0,78	553,8
Faux-arbalétriers	8,5	Chêne	0,1	71
Poinçon	11	Epicea	0,44	220
Grands poteaux	7	Epicea	0,76	380
Petits poteaux	4,5	Chêne	0,22	156,2
Appuis inférieurs	3	Chêne	0,22	156,2
Sous-poids total				2133

CONTREVENTEMENT

Éléments	Longueur m	Essence	Volume m3	Poids kg
Croix principale	X	Epicea	0,16	80
Croix secondaire	X	Epicea	1,28	640
Couture	X	Epicea	0,48	240
Liernes	X	Epicea	0,18	90
Solivage	X	Epicea	0,24	120
Platelage	X	Chêne	0,26	184,6
Sous-poids total				1355

COUVERTURE

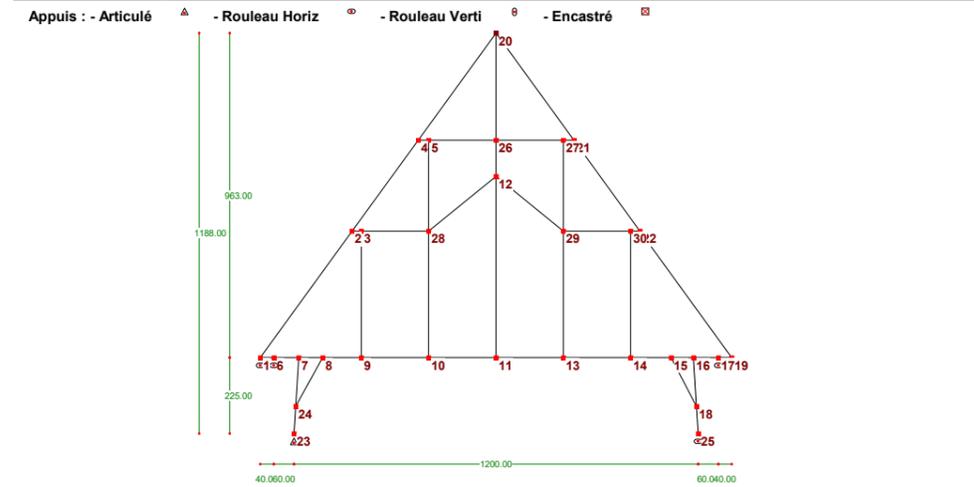
Éléments	Longueur m	Essence	Volume m3	Poids kg
Voligeage	X	Epicea	2	1000
Tasseaux	X	Zinc	0,08	572
Sous-poids total				1572
Poids total unité				9769

03 notice technique

hypothèse de charges
 système constructif
 carnet d'assemblage
 notes de calcul
 fabrication

Date : 18/12/2020 Pg 1
 Nom du fichier : FERME_60 Edit 29

Notes de calcul - Logiciel STRUCTUR - Eurocode 5 - Annexe Française



LISTE/DÉFINITION DES CAS DE CHARGES

Cas	Description
Cas ELS 1 :	Permanente
Cas ELS 2 :	Permanente + Neige
Cas ELS 3 :	Permanente + Vent A
Cas ELS 4 :	Permanente + Neige + 0.6*Vent A
Cas ELS 5 :	Permanente + Expl. Toiture + 0.5*Neige
Cas ELS 6 :	Permanente + Expl. Toiture + 0.6*Vent A + 0.5*Neige
Cas ELS (Neige redistribuée 1) 1.1 :	Permanente + Neige + 0.6*Vent A
Cas ELS (Neige redistribuée 1) 1.2 :	Permanente + Vent A + 0.5*Neige
Cas ELS (Neige redistribuée 1) 1.3 :	Permanente + Neige + 0.6*Vent A + 0.5*Neige
Cas ELS (Neige redistribuée 1) 1.4 :	Permanente + Expl. Toiture + 0.5*Neige
Cas ELS (Neige redistribuée 2) 1.1 :	Permanente + Neige
Cas ELS (Neige redistribuée 2) 1.2 :	Permanente + Vent A + 0.5*Neige
Cas ELS (Neige redistribuée 2) 1.3 :	Permanente + Expl. Toiture + 0.6*Vent A + 0.5*Neige
Cas ELS (Neige redistribuée 2) 1.4 :	Permanente + Expl. Toiture + 0.5*Neige
Cas ELU 1 :	1.35*Permanente + 1.5*Neige
Cas ELU 2 :	1.35*Permanente + 1.5*Neige + 1.5*Expl. Toiture
Cas ELU 3 :	1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.9*Vent A
Cas ELU 4 :	1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.9*Vent A + 0.75*Neige
Cas ELU 5 :	1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.9*Vent A + 0.75*Neige + 0.9*Vent A
Cas ELU 6 :	1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.9*Vent A + 0.75*Neige + 0.9*Vent A + 0.75*Neige
Cas ELU 7 :	1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.9*Vent A + 0.75*Neige + 0.9*Vent A + 0.75*Neige + 0.9*Vent A + 0.75*Neige
Cas ELU 8 :	1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.9*Vent A + 0.75*Neige
Cas ELU 9 :	1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.9*Vent A + 0.75*Neige
Cas ELU 10 :	1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.9*Vent A + 0.75*Neige
Cas ELU 11 :	1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.9*Vent A + 0.75*Neige
Cas ELU 12 :	1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.9*Vent A + 0.75*Neige
Cas ELU 13 :	1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.9*Vent A + 0.75*Neige
Cas ELU 14 :	1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.9*Vent A + 0.75*Neige
Cas ELU 15 :	1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.9*Vent A + 0.75*Neige
Cas ELU 16 :	1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.9*Vent A + 0.75*Neige
Cas ELU 17 :	1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.9*Vent A + 0.75*Neige
Cas ELU 18 :	1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.9*Vent A + 0.75*Neige
Cas ELU 19 :	1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.9*Vent A + 0.75*Neige
Cas ELU 20 :	1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.9*Vent A + 0.75*Neige
Cas ELU 21 :	1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.9*Vent A + 0.75*Neige
Cas ELU 22 :	1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.9*Vent A + 0.75*Neige
Cas ELU 23 :	1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.9*Vent A + 0.75*Neige
Cas ELU 24 :	1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.9*Vent A + 0.75*Neige
Cas ELU 25 :	1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.9*Vent A + 0.75*Neige

CHARGES NODALES

Unités : daN	Perma	Neige	Vent A	Exploit	Neige Redistribuée
Noeud	Vrt	Exc.	Vrt	Vrt	Cas 1
20	-47.00	0.00	0.00	0.00	0.00

CHARGES UNIFORMÉMENT REPARTIES

Unités : Charges Saisies (daN/m²) - Vent Coef (Cpe-Cpi)	Permanente	Neige	Vent A	Exploit Vrt	Neige Redistribuée
Barres					Neige 1
Arbalétrier	-15.00	-7.20	36.00	0.00	-3.60
1/2	-15.00	-7.20	36.00	0.00	-3.60
2/4	-15.00	-7.20	36.00	0.00	-3.60
4/20	-15.00	-7.20	36.00	0.00	-3.60
20/21	-15.00	-7.20	-71.00	0.00	-7.20
21/22	-15.00	-7.20	-71.00	0.00	-7.20
22/19	-15.00	-7.20	-71.00	0.00	-7.20
28/12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12/29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Entrait	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1/6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6/7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7/8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8/9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9/10	0.00	0.00	0.00	-15.00 (Cat : H)	0.00
10/11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11/13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13/14	0.00	0.00	0.00	-15.00 (Cat : H)	0.00
14/15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15/16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16/17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17/19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4/5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5/26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26/27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27/21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2/3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3/28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Date : 18/12/2020 Pg 1
 Nom du fichier : FERME_60 Edit 29

Unités : Charges Résultantes (daNm)	Permanente	Neige	Vent A	Exploit Vrt	Neige Redistribuée
Barres					Neige 1
Entrait	0.00	0.0			

03 notice technique

hypothèse de charges
système constructif
carnet d'assemblage
notes de calcul
fabrication

UNITE 50

EFFORTS DANS LES BARRES

FERMETTES

N°	Éléments	Sections cm	Classe	Taux de travail %	Déplacements cm
1	Arbalétrier droit	22x13	D40	80%	12
2	Arbalétrier gauche	22x13	D40	90%	13
3	Entrait	27x13	C30	82%	6
4	Faux-Entrait haut	20x5	D40	5%	7
5	Faux-Entrait bas	20x5	D40	30%	12

TRAVAIL MAXIMUM

Arbalétrier gauche

90%

FERME PRINCIPALE

N°	Éléments	Sections cm	Classe	Taux de travail %	Déplacements cm
6	Arbalétrier droit	22x13	D40	58%	7
7	Arbalétrier gauche	22x13	D40	49%	6
8	Bracon droit	15x15	D40	2%	4
9	Bracon gauche	15x15	D40	5%	0
10	Entrait	27x24	C30	42%	0
11	Faux-entrait	20x13	D40	4%	0
12	Faux-entrait gauche	20x13	D40	6%	X
13	Faux-entrait droit	20x13	D40	6%	X
14	Grand poteau	18x11(11)	C30	65%	5
15	Jambière droite	15x15	D40	6%	4
16	Jambière gauche	15x15	D40	6%	0
17	Poinçon	20x11(11)	C30	5%	2

TRAVAIL MAXIMUM

Grand poteau

65%

CONTREVENTEMENT

N°	Éléments	Sections cm	Classe	Taux de travail %	Déplacements cm
18	Contreventement	10x10	C30	78%	12

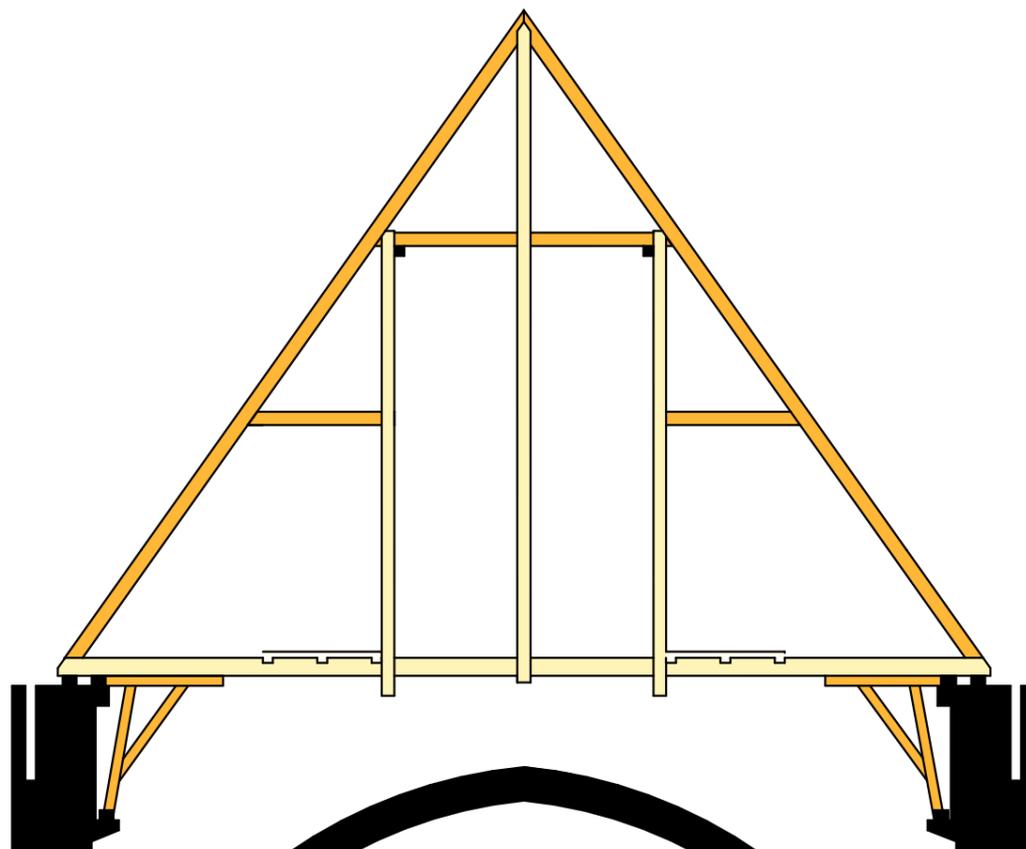
REACTIONS D'APPUIS

FERMETTES

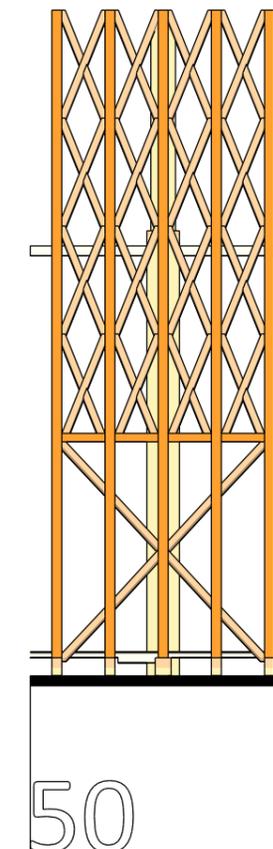
N°	Dénomination	Nœud u	RX kN	RY kN	RZ kN
A	F1G	1	-2,86	7,07	0,42
B	F1D	2	4,34	-6,87	-0,33
C	F2G	3	-3,93	8,27	1,99
D	F2D	4	15,82	10,56	-0,63
E	F3G	5	9,85	9,62	-2
F	F3D	6	-3,91	8,25	-1,86
G	F4G	7	6,46	9,24	-0,46
H	F4D	8	-2,83	7,08	-0,35

FERME PRINCIPALE

N°	Dénomination	Nœud u	RX kN	RY kN	RZ kN
I	AEG	9	0	13,2	0,11
J	AED	10	0	4,76	0,12
K	AIG	11	10,45	9,52	2,55
L	AID	12	7,28	8,68	0,52
M	CG	13	-1,87	5,38	0
N	CD	14	0,76	2,35	0



Vue de face de la ferme 50



50

Vue de profil

VOLUMETRIE ET DIMENSIONS

FERMETTES

Éléments	Longueur m	Essence	Volume m3	Poids kg
Arbalétriers	12	Chêne	0,68	483
Entrait principal	14	Epicea	0,49	245
Entrants secondaires	13	Chêne	0,14	99
		I		
Sous-poids unitaire				827
Sous-poids total				3309

FERME PRINCIPALE

Éléments	Longueur m	Essence	Volume m3	Poids kg
Entrait principal	14	Epicea	0,88	440
Entrants secondaires	13	Chêne	0,22	156,2
Arbalétriers	12	Chêne	0,78	553,8
Faux-arbalétriers	0	Chêne	0	0
Poinçon	11	Epicea	0,44	220
Grands poteaux	7	Epicea	0,96	480
Petits poteaux	0	Chêne	0	0
Appuis inférieurs	3	Chêne	0,22	156,2
Sous-poids total				2006

CONTREVENTEMENT

Éléments	Longueur m	Essence	Volume m3	Poids kg
Croix principale	X	Epicea	0,16	80
Croix secondaire	X	Epicea	1,28	640
Couture	X	Epicea	0,48	240
Liernes	X	Epicea	0,18	90
Sollivage	X	Epicea	0,24	120
Platelage	X	Chêne	0,26	184,6
Sous-poids total				1355

COUVERTURE

Éléments	Longueur m	Essence	Volume m3	Poids kg
Voligeage	X	Epicea	2	1000
Tasseaux	X	Zinc	0,08	572
Sous-poids total				1572

Poids total unité

8242

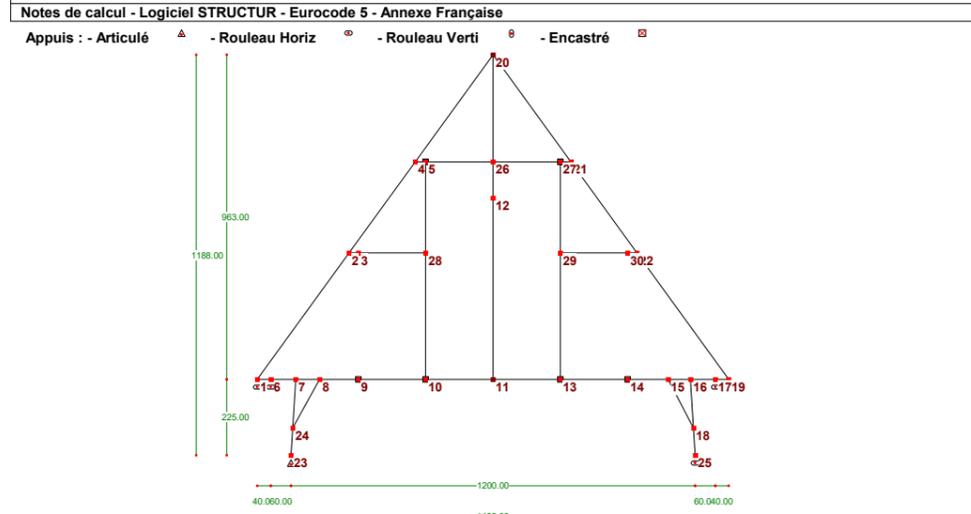
Objectif à 50%

8200

03 notice technique

hypothèse de charges
système constructif
carnet d'assemblage
notes de calcul
fabrication

Date : 18/12/2020 Nom du fichier : FERME_50	Pg 1 Edit 30
--	-----------------



LISTE/DÉFINITION DES CAS DE CHARGES	
Nombre de cas de chargement étudiés : 38 (19 ELS et 19 ELU)	Nombre de cas dimensionnant (soulignés) : 18
Cas ELS 1 : Permanente	Cas ELS 2 : Permanente + Neige
Cas ELS 3 : Permanente + Vent A	Cas ELS 4 : Permanente + Expl. Toiture
Cas ELS 9 : Permanente + Neige + 0.6*Vent A	Cas ELS 15 : Permanente + Vent A + 0.5*Neige
Cas ELS 33 : Permanente + Expl. Toiture + 0.5*Neige	Cas ELS 34 : Permanente + Expl. Toiture + 0.6*Vent A
Cas ELS 69 : Permanente + Expl. Toiture + 0.6*Vent A + 0.5*Neige	Cas ELS (Neige redistribuée 1) 2 : Permanente + Neige
Cas ELS (Neige redistribuée 1) 3 : Permanente + Neige + 0.6*Vent A	Cas ELS (Neige redistribuée 1) 9 : Permanente + Vent A + 0.5*Neige
Cas ELS (Neige redistribuée 1) 14 : Permanente + Expl. Toiture + 0.5*Neige	Cas ELS (Neige redistribuée 1) 37 : Permanente + Expl. Toiture + 0.6*Vent A + 0.5*Neige
Cas ELS (Neige redistribuée 2) 2 : Permanente + Neige	Cas ELS (Neige redistribuée 2) 3 : Permanente + Neige + 0.6*Vent A
Cas ELS (Neige redistribuée 2) 9 : Permanente + Vent A + 0.5*Neige	Cas ELS (Neige redistribuée 2) 14 : Permanente + Expl. Toiture + 0.5*Neige
Cas ELS (Neige redistribuée 2) 37 : Permanente + Expl. Toiture + 0.6*Vent A + 0.5*Neige	Cas ELS 2 : 1.35*Permanente + 1.5*Neige
Cas ELU 1 : 1.35*Permanente	Cas ELU 8 : 1.35*Permanente + 1.5*Expl. Toiture
Cas ELU 3 : 0.9*Permanente + 1.5*Vent A	Cas ELU 15 : 1.35*Permanente + 1.5*Vent A + 0.75*Neige
Cas ELU 9 : 1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.9*Vent A	Cas ELU 34 : 1.35*Permanente + 1.5*Expl. Toiture + 0.9*Vent A
Cas ELU 33 : 1.35*Permanente + 1.5*Expl. Toiture + 0.75*Neige	Cas ELU (Neige redistribuée 1) 2 : 1.35*Permanente + 1.5*Neige
Cas ELU 69 : 1.35*Permanente + 1.5*Expl. Toiture + 0.9*Vent A + 0.75*Neige	Cas ELU (Neige redistribuée 1) 9 : 1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.6*Vent A + 0.75*Neige
Cas ELU (Neige redistribuée 1) 14 : 1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.9*Vent A	Cas ELU (Neige redistribuée 1) 37 : 1.35*Permanente + 1.5*Expl. Toiture + 0.6*Vent A + 0.75*Neige
Cas ELU (Neige redistribuée 2) 2 : 1.35*Permanente + 1.5*Neige	Cas ELU (Neige redistribuée 2) 3 : 1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.6*Vent A
Cas ELU (Neige redistribuée 2) 9 : 1.35*Permanente + 1.5*Neige + 0.6*Vent A + 0.75*Neige	Cas ELU (Neige redistribuée 2) 14 : 1.35*Permanente + 1.5*Expl. Toiture + 0.75*Neige
Cas ELU (Neige redistribuée 2) 37 : 1.35*Permanente + 1.5*Expl. Toiture + 0.9*Vent A + 0.75*Neige	

CHARGES NODALES	
Unités : daN	
Noeud	Perma Vrt, Neige Norm, Neige Exc., Vent A Vrt, Exploit Vrt, Neige Redistribuée Cas 1, Neige Redistribuée Cas 2
11	-70.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
20	-47.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00

CHARGES UNIFORMÈMENT REPARTIES	
Unités : Charges Saisies (daN/m²) - Vent Coef (Cpe-Cpi)	
Barres	Permanente, Neige, Vent A, Exploit Vrt, Neige Redistribuée Neige 1, Neige Redistribuée Neige 2
Arbalétrier	
1/2	-15.00, -7.20, 36.00, 0.00, -3.60, -7.20
2/4	-15.00, -7.20, 36.00, 0.00, -3.60, -7.20
4/20	-15.00, -7.20, 36.00, 0.00, -3.60, -7.20
20/21	-15.00, -7.20, 36.00, 0.00, -3.60, -7.20
21/22	-15.00, -7.20, 36.00, 0.00, -3.60, -7.20
22/19	-15.00, -7.20, 36.00, 0.00, -3.60, -7.20
Entrait	
1/6	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
6/7	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
7/8	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
8/9	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
9/10	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
10/11	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
11/13	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
13/14	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
14/15	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
15/16	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
16/17	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
17/19	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
4/5	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
5/26	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
26/27	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
27/21	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
2/3	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
3/28	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
29/30	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00

Date : 18/12/2020 Nom du fichier : FERME_50	Pg 1 Edit 30
--	-----------------

Notes de calcul - Logiciel STRUCTUR - Eurocode 5 - Annexe Française	
Appuis : - Articulé	- Rouleau Horiz
- Rouleau Vert	- Encastré
Entrait	
30/22	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
Poteau	
10/28	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
28/5	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
29/27	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
13/29	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
Poinçon	
11/12	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
12/26	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
26/20	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
Jambe de force	
24/8	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
15/18	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
Bloch	
23/24	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
24/7	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
16/18	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
18/25	0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00

Unités : Charges Résultantes (daNm)	
Barres	Permanente, Neige, Vent A, Exploit Vrt, Neige Redistribuée Neige 1, Neige Redistribuée Neige 2
Arbalétrier	
1/2	-78.9, -16.9, 144.0, 0.0, -8.5, -16.9
2/4	-78.9, -16.9, 144.0, 0.0, -8.5, -16.9
4/20	-78.9, -16.9, 144.0, 0.0, -8.5, -16.9
20/21	-78.9, -16.9, -284.0, 0.0, -16.9, -8.5
21/22	-78.9, -16.9, -284.0, 0.0, -16.9, -8.5
22/19	-78.9, -16.9, -284.0, 0.0, -16.9, -8.5
Entrait	
1/6	-29.8, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
6/7	-29.8, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
7/8	-29.8, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
8/9	-29.8, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
9/10	-29.8, 0.0, 0.0, -60.0, 0.0, 0.0
10/11	-29.8, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
11/13	-29.8, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
13/14	-29.8, 0.0, 0.0, -60.0, 0.0, 0.0
14/15	-29.8, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
15/16	-29.8, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
16/17	-29.8, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
17/19	-29.8, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
4/5	-17.2, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
5/26	-17.2, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
26/27	-17.2, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
27/21	-17.2, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
2/3	-17.2, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
3/28	-17.2, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
29/30	-17.2, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
30/22	-17.2, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
Poteau	
10/28	-18.2, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
28/5	-18.2, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
29/27	-18.2, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
13/29	-18.2, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
Poinçon	
11/12	-20.2, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
12/26	-20.2, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
26/20	-20.2, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
Jambe de force	
24/8	-14.8, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
15/18	-14.8, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
Bloch	
23/24	-14.8, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
24/7	-14.8, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
16/18	-14.8, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
18/25	-14.8, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0

Date : 18/12/2020 Nom du fichier : FERME_50	Pg 1 Edit 30
--	-----------------

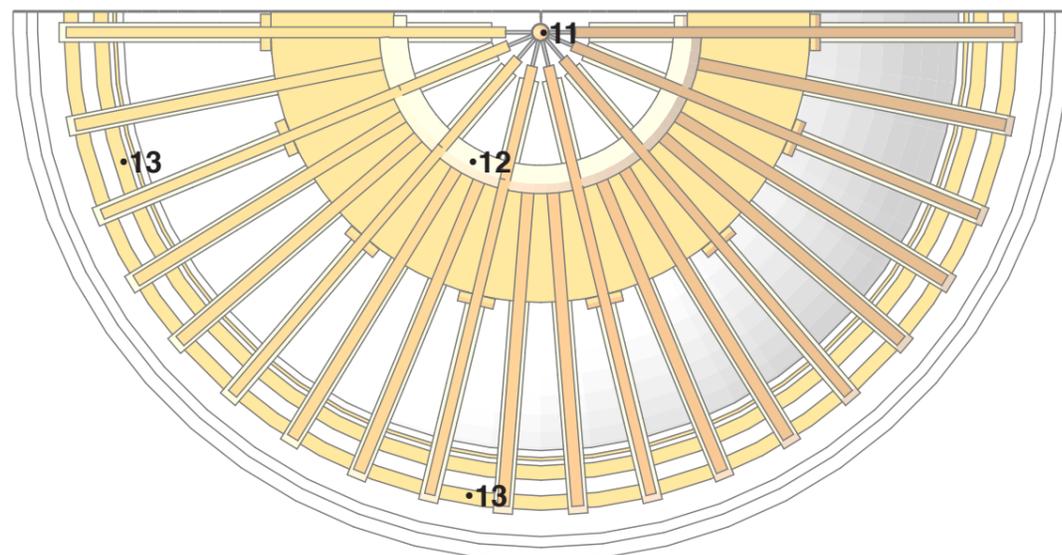
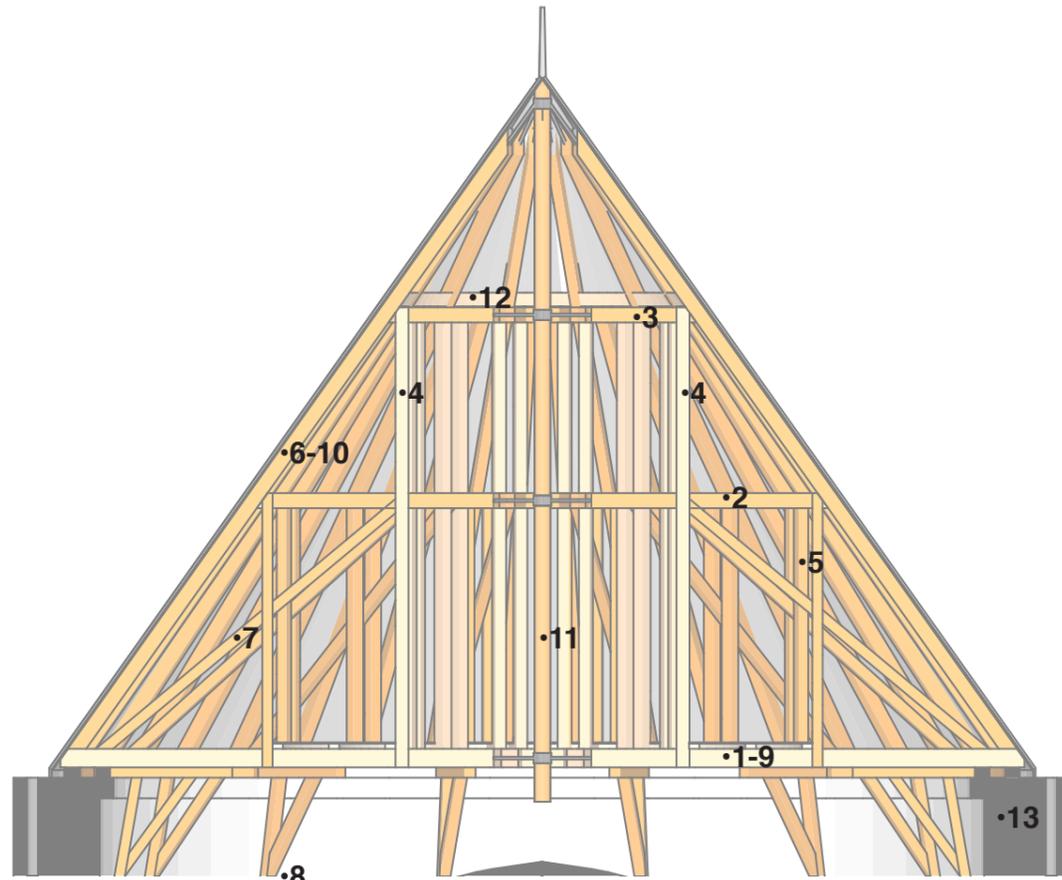
Notes de calcul - Logiciel STRUCTUR - Eurocode 5 - Annexe Française	
Appuis : - Articulé	- Rouleau Horiz
- Rouleau Vert	- Encastré
Entrait	
22/19	CI 1, -317, -2228, -199571, 38%, -1407, 100%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 58%, ELU (NR 1) 9
1/6	T -, -6, -2778, -736645, 100%, 18424, 0%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 102%, ELU (NR 1) 9
6/7	T -, -38, -2778, -736645, 0%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 102%, ELU (NR 1) 9
7/8	T -, -38, -7348, -725187, 0%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 105%, ELU (NR 1) 9
8/9	CI -, -40, 0.90, 0.88, 3847, 588988, 0%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 83%, ELU 3
9/10	CI -, -40, 0.95, 0.88, 3847, 495955, 0%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 70%, ELU 3
10/11	CI -, -58, 0.70, 0.97, 3557, 342783, 0%, 1713, 99%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 50%, ELU 3
11/13	CI -, -58, 0.70, 0.97, 3297, -611367, 100%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 86%, ELU 3
13/14	CI -, -41, 0.95, 0.88, 2288, -614836, 0%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 85%, ELU (NR 1) 9
14/15	CI -, -41, 0.90, 0.88, 2736, 152376, 100%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 23%, ELU 3
15/16	CI -, -38, 0.90, 1.00, 2871, 392385, 100%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 56%, ELU (NR 1) 9
16/17	CI -, -38, 0.90, 1.00, 2288, 392385, 0%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 55%, ELU (NR 1) 9
17/19	CI -, -6, 1.00, 1.00, 2288, 169988, 0%, 4742, 100%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 25%, ELU (NR 1) 9
4/5	C -, -8, 1.00, 1.00, 597, -43248, 100%, 1392, 0%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 15%, ELU (NR 1) 9
5/26	CI -, -107, 0.32, 0.94, 244, -65181, 100%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 24%, ELU 15
26/27	C -, -107, 0.32, 0.94, 787, 139609, 100%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 52%, ELU (NR 1) 9
27/21	CI -, -8, -297, 141226, 0%, 4530, 100%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 49%, ELU 3
2/3	CI -, -61, -693, -423, 100%, 18, 0%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 1%, ELU 3
3/28	CI -, -61, -638, -1496, 44%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 2%, ELU (NR 1) 9
29/30	C -, -61, 0.73, 0.91, 1405, -1497, 55%, 26, 0%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 4%, ELU (NR 1) 9
30/22	C -, -61, 0.73, 0.91, 1405, -635, 0%, -26, 100%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 4%, ELU (NR 1) 9
Poteau	
10/28	T -, -203, -1088, 108803, 100%, -290, 0%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 38%, ELU 3
28/5	T -, -203, -1106, 108803, 0%, 403, 100%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 38%, ELU 3
29/27	CI 1, -91, 0.35, 0.83, 5233, 220662, 0%, 817, 100%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 92%, ELU (NR 1) 9
13/29	CI 1, -91, 0.35, 0.81, 5280, -220662, 100%, -588, 0%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 92%, ELU (NR 1) 9
Poinçon	
11/12	T -, -303, -1637, 140393, 100%, -261, 0%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 40%, ELU (NR 1) 9
12/26	T -, -303, -1666, 168305, 100%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 48%, ELU (NR 1) 9
26/20	T -, -303, -943, 95385, 0%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 27%, ELU (NR 1) 9
Jambe de force	
24/8	CI -, -38, 0.92, 0.92, 22162, -330, 50%, 8, 0%, -8, 100%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 49%, ELU (NR 1) 9
15/18	T -, -38, -1264, -305, 50%, 8, 0%, -8, 100%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 3%, ELU (NR 1) 9
Bloch	
23/24	C -, -19, 1.00, 1.00, 1417, 494759, 100%, -6106, 0%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 260%, ELU 3
24/7	CI -, -52, 0.82, 0.94, 6433, 494759, 0%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 301%, ELU 3
16/18	C -, -52, 0.82, 0.94, 6433, -26734, 100%, 186, 0%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 30%, ELU (NR 1) 9
18/25	C -, -52, 0.82, 1.00, 5294, -26734, 0%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 27%, ELU (NR 1) 9

RÉACTIONS PONDÉRÉES AUX APPUIS	
Unités : Efforts (daN) - Moment (daN.cm)	
Noeuds	Réactions Positives Horiz., Vertic. Moments, Cas + Déf Horiz., Vertic., Réactions Négatives Horiz., Vertic. Moments, Cas + Déf Horiz., Vertic.
1	21502.6, ELU 15, ELU 15
6	174.5, ELU (NR 2) 14, ELU (NR 2) 14
17	2037.6, ELU (NR 1) 9, ELU (NR 1) 9
19	2000.0, ELU 2, ELU 2
23	6182.5, 1156.9, ELU 3, ELU (NR 2) 9
25	5320.2, ELU (NR 1) 9, ELU (NR 1) 9

EFFORTS, CONTRAINTES NORMALES ET TAUX DE TRAVAIL	
Flambement(ATF: Anti-flambement(s) Plan et Perpendiculaire, El: Elancement); Norm: effort normal; Moment Maxi et sa position	
Unités : Moment (daN.cm) - Eff. Normal, Effort Tranchant (daN)	
Barres	Flambement ATF, EI, Kc, Kc, Norm Moment Pos, Moment Nul Tran1 Pos1, Tran2 Pos2, Kmod, Gm, Ke, Kh, Taux Travail, Cas + Déf
Arbalétrier	
1/2	C 1, -159, 0.15, 0.59, 3855, 67788, 66%, -445, 0%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 59%, ELU 15
2/4	C 1, -159, 0.15, 0.82, 3858, 78773, 61%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 63%, ELU 15
4/20	C 1, -159, 0.15, 0.72, 2180, 70702, 22%, 454, 100%, 1.10, 1.30, 1.00, 1.00, 43%, ELU 15
20/21	CI 1, -159, 0.15, 0.72, 823, 26658, 100%, 55, 0%, 0.60, 1.30, 1.00, 1.00, 30%, ELU 1
21/22	CI 1, -159, 0.15, 0.82, 1400, 26658, 0%, 131, 45%, 0.60, 1.30, 1.00, 1.00, 41%, ELU 1

03 notice technique

hypothèse de charges
système constructif
carnet d'assemblage
notes de calcul
fabrication



Situation des pièces calculées sur l'abside

VOLUMETRIE DE LA FLECHE

BASE					
Éléments		Longueur m	Essence	Volume m3	Poids kg
1	Entrait	13	Chêne	1,95	1385
2	Losange	9	Douglas	1,35	567
3	Croix	4,1	Douglas	0,615	258
4	Poinçon	10,0	Chêne	0,9	639
5	Renforts	31,8	Chêne	2,5	1775
Sous-poids unitaire					3985
Sous-poids total					16578,2

RACINES					
Éléments		Longueur m	Essence	Volume m3	Poids kg
6	Racines	16	Douglas	2	840
Sous-poids unitaire					840
Sous-poids total					13440

OCTOGONES					
Éléments		Longueur m	Essence	Volume m3	Poids kg
7	Octogone	18,4	Chêne	1,5	1065
Sous-poids unitaire					1065
Sous-poids total					2130

SUPPORT DE TOITURE					
Éléments		Longueur m	Essence	Volume m3	Poids kg
8	Noue	11,2	Chêne	1	710
9	Noues secondaires	19,4	Chêne	1,2	852
10	Chevrans	73,4	Chêne	1,5	1065
11	Panne	4,6	Chêne	0,18	127,8
12	poteaux statues	10,4	Chêne	0,52	369,2
13	moises statues	10,4	Douglas	0,312	131,04
Sous-poids unitaire					3255,04
Sous-poids total					13020

Poids total Flèche **45168**

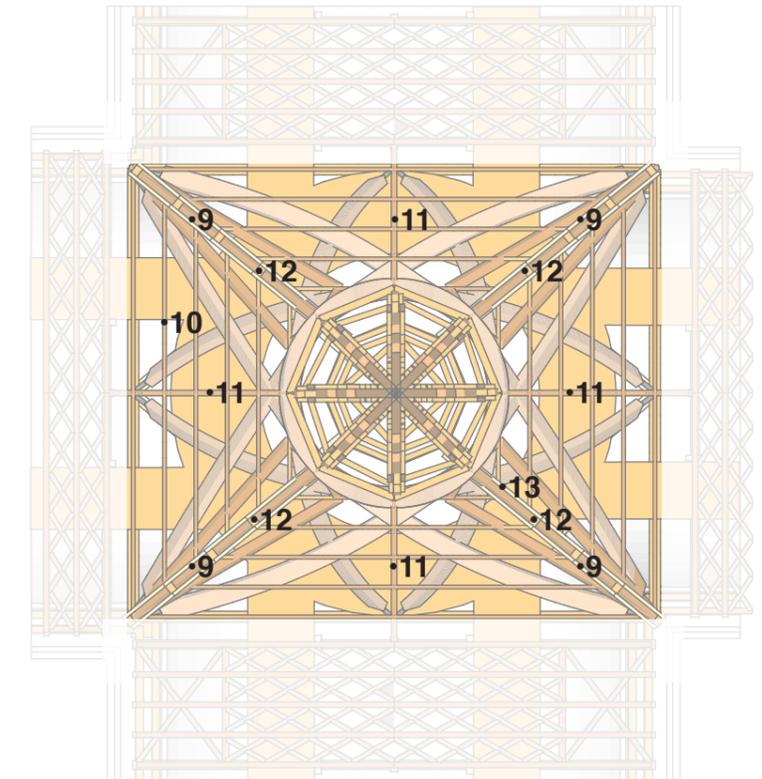
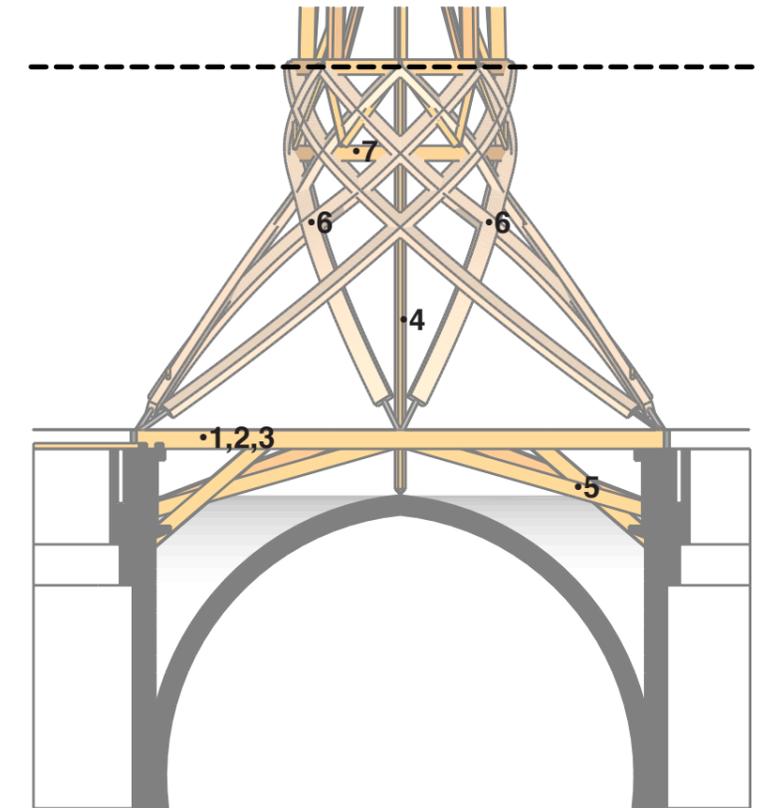
VOLUMETRIE DE L'ABSIDE

DEMI FERMES					
Éléments		Longueur m	Essence	Volume m3	Poids kg
1	Entrait	5,4	Epicéa	0,35	175
2	Faux-entrait bas	2,9	Chêne	0,09	64
3	Faux-entrait haut	1,3	Chêne	0,037	26
4	Grands poteaux	6,7	Epicéa	0,3	150
5	Petits poteaux	4,0	Chêne	0,17	121
6	Arbalétrier	10,5	Chêne	0,27	192
7	Faux-arbalétrier	4,9	Chêne	0,01	7
8	Corbeau	5,1	Chêne	0,09	64
Sous-poids unitaire					799
Sous-poids total					6388,56

DEMI FERMES SECONDAIRES					
Éléments		Longueur m	Essence	Volume m3	Poids kg
9	Entrait	5,4	Epicéa	0,35	175
10	Arbalétrier	7,5	Chêne	0,225	160
Sous-poids unitaire					335
Sous-poids total					4017

AUTRES					
Éléments		Longueur m	Essence	Volume m3	Poids kg
11	Poinçon	10,4	Chêne	0,32656	232
12	Lisse Haute	10,3	Epicéa	0,590525	295
13	Lisses Basses	74,8	Chêne	2,01852	1433
Sous-poids total					1960

Poids total Abside **12366**



Situation des pièces calculées sur la flèche

03 notice technique

hypothèse de charges

système constructif

carnet d'assemblage

notes de calcul

fabrication

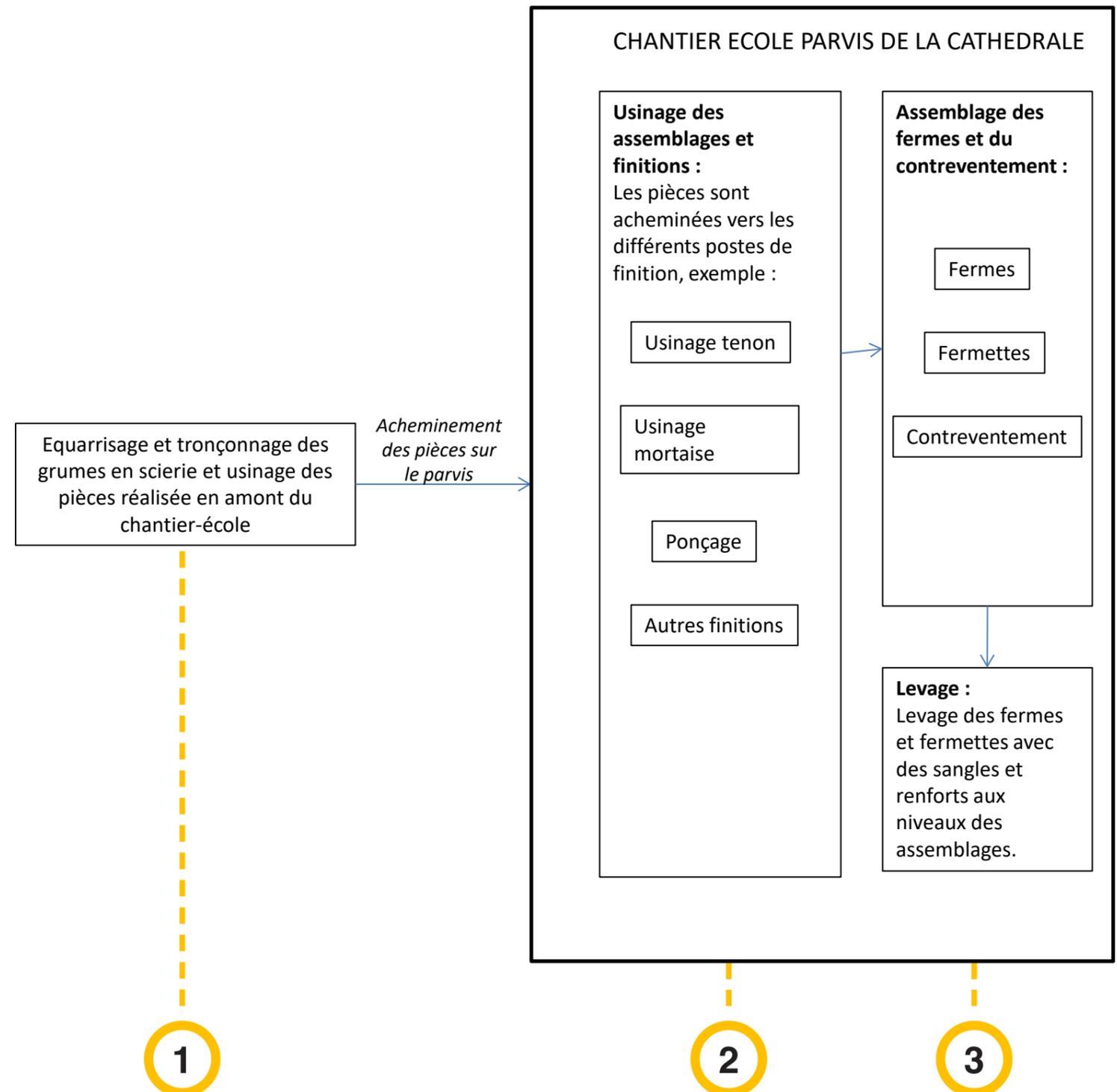
LOGIQUE DE PREFABRICATION SUR SITE

Tout le processus de fabrication de la charpente se fera sur le parvis de la cathédrale Notre Dame de Paris, depuis le tronçonnage jusqu'au levage des fermes. Le chantier sera visible de tous et permettra de mettre en lumière le travail des compagnons.

Les troncs seront équarris et tronçonnés industriellement puis usinés aux bonnes dimensions de chaque pièces avant d'être acheminées par camion ou par péniche (ou dirigeable) sur le site du parvis de la cathédrale.

Elles sont ensuite acheminées vers le poste d'usinage des assemblages et des finitions. Ce poste est divisé selon les différentes finitions à effectuer (tenon, mortaise, ponçage,...). Les pièces arrivent ensuite en zone d'assemblage, plusieurs fermes pourront être assemblées simultanément ainsi que l'assemblage des croix de contreventement, dans une logique de fonctionnement à flux tendus.

La ferme principale de chaque unité est ensuite levée sur la maçonnerie de la cathédrale, on lève ensuite une fermette et on y insère les barres de contreventement entre les deux. On fait de même avec les autres fermettes. Les liernes sont fixées à la fin sur chaque unité. Les différentes fermes sont levées à l'aide de sangle et éventuellement de renforts au niveau des assemblages pour que ceux-ci ne soient pas détériorés lors du levage.



03 notice technique

hypothèse de charges
système constructif
carnet d'assemblage
notes de calcul
fabrication

LOGIQUE D'ASSEMBLAGE

Assemblage des unités

Chaque ferme ou fermette est levé et posé sur la maçonnerie une par une. Le contreventement est alors mis en place dès que la ferme d'à coté est positionnées. Une fois l'unité positionné on y ajoute les liernes.

Ordre d'assemblage des barres des fermes

Les fermes du palier à 70% se construisent en assemblant premièrement les pièces basses des faux-arbalétriers à l'entrait. Ensuite, on vient assembler les faux-entrants aux pièces précédentes et aux arbalétriers. Pour finir, on ajoute les pièces hautes des faux-arbalétriers ainsi que le poinçon et les poteaux.

Les fermes du palier à 60% se construisent en assemblant le faux-entrait haut aux arbalétriers qui viennent ensuite se fixer dans l'entrait. On ajoute ensuite les demis faux-entrants et les demis faux-arbalétriers puis le poinçon et les poteaux.

Les fermes du palier à 50% se construisent en assemblant le faux-entrait haut aux arbalétriers qui viennent ensuite se fixer dans l'entrait. On ajoute ensuite les demis faux-entrants puis le poinçon et les poteaux.

Les fermettes se construisent en assemblant les faux entrants aux arbalétriers qui viennent ensuite se fixer à l'entrait.

contreventement principal

- structurel
- signalétique
- support d'éclairage

contreventement secondaire

- structurel
- cohérence spatiale

passerelles (x 2)

- entretien et circulation
- stabilisation

liernes (x 2)

- levage
- stabilisation

fermettes (x 4)

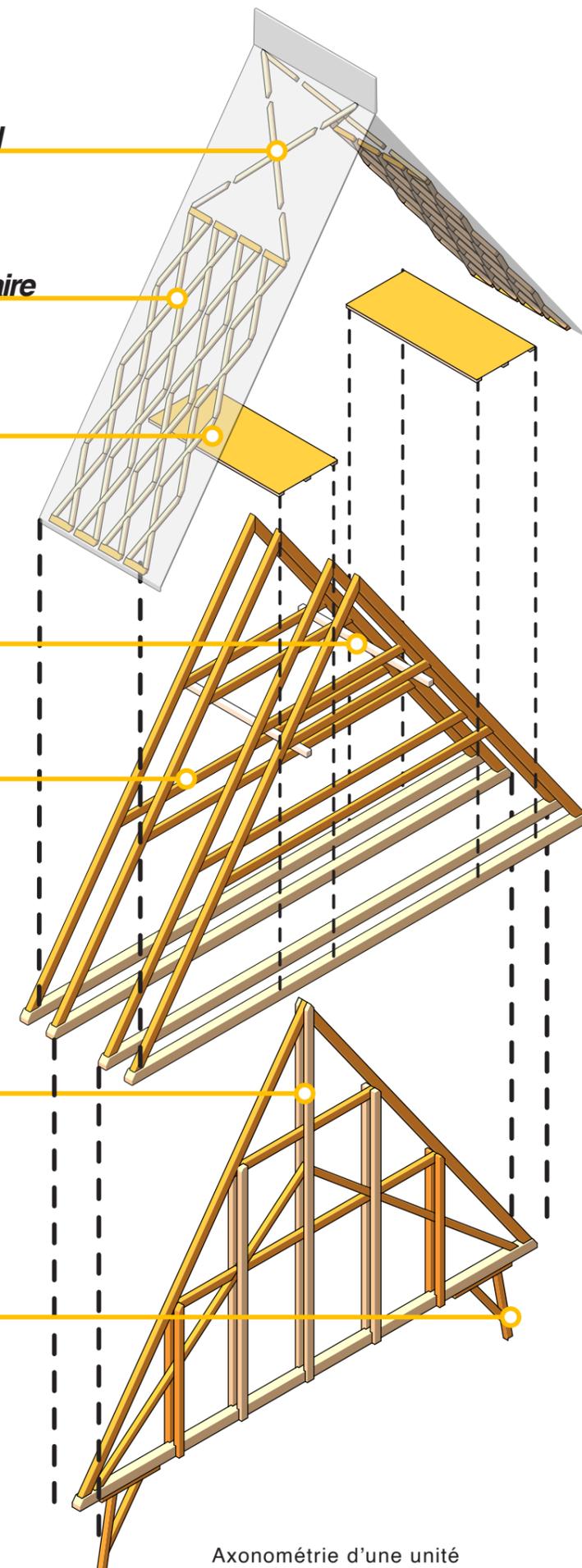
- support de couverture
- stabilisation

ferme principale

- structurelle
- support de couverture
- signalétique

appuis sur corbeaux (x2)

- structurel



Axonométrie d'une unité

3

2

1

04 notice descriptive

généralités

unités

abside

flèche

mise en oeuvre

géométraux / perspectives

1 sélection du palier adapté

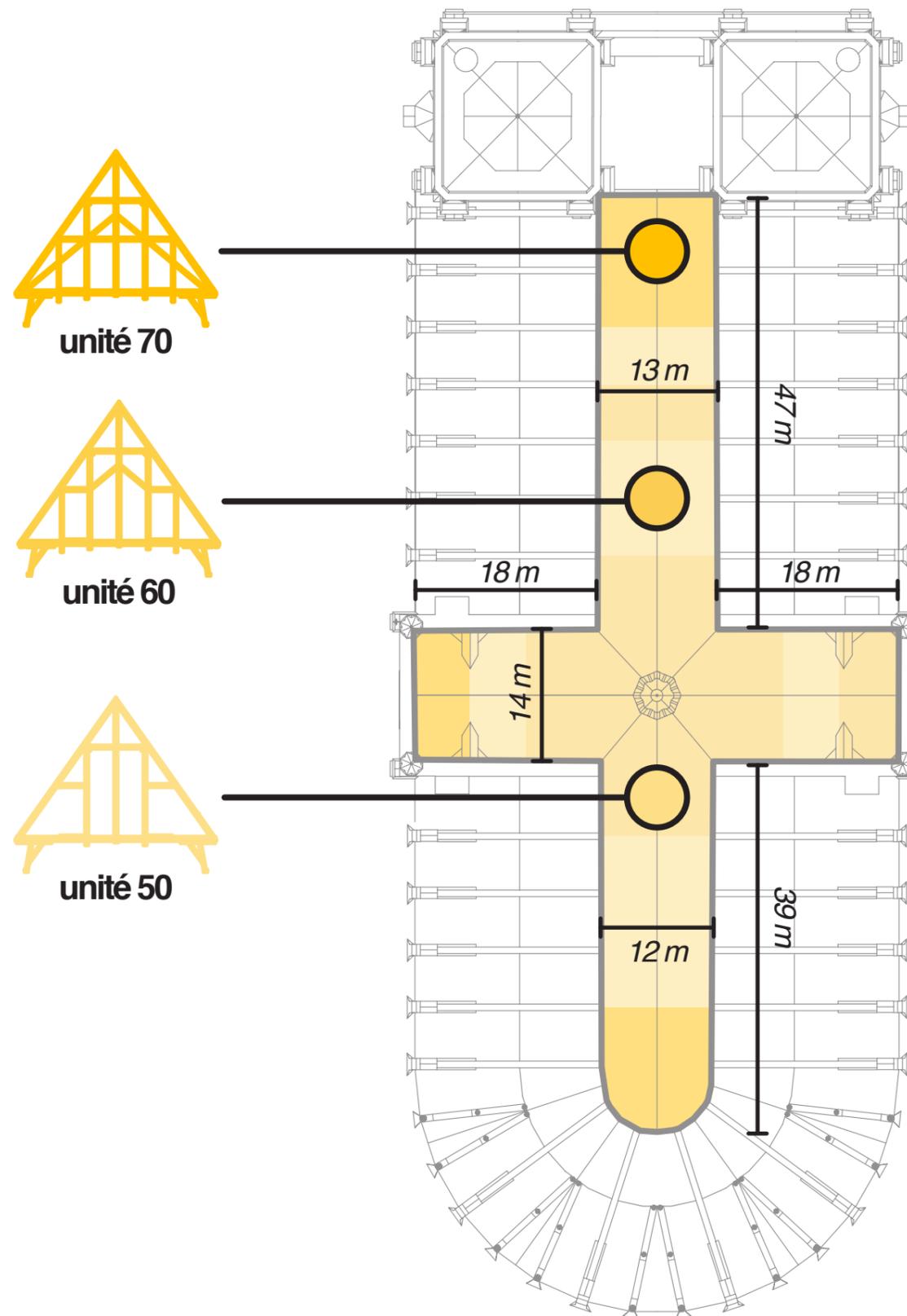
- 70%
- 60%
- 50%

2 composition de l'unité

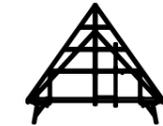
- 1 ferme principale
- 4 fermes secondaires
- contreventement
- 2 passerelles
- couverture

3 mise en oeuvre

- levage par éléments
- positionnement
- stabilisation



Implantation des différentes unités



unité n°7



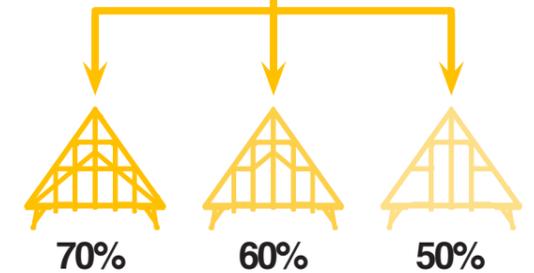
analyse structurelle

pois
contraintes



optimisation

sections
pièces
essences



70%

60%

50%

04 notice descriptive

généralités

unités

abside

flèche

mise en oeuvre

géométraux / perspectives

- 1** sélection du palier adapté
- 70%
 - 60%
 - 50%

- 2** composition de l'unité
- 1 ferme principale
 - 4 fermes secondaires
 - contreventement
 - 2 passerelles
 - couverture

- 3** mise en oeuvre
- levage par éléments
 - positionnement
 - stabilisation

contreventement principal

- structurel
- signalétique
- support d'éclairage

contreventement secondaire

- structurel
- cohérence spatiale

passerelles (x 2)

- entretien et circulation
- stabilisation

liernes (x 2)

- levage
- stabilisation

fermes secondaires (x 4)

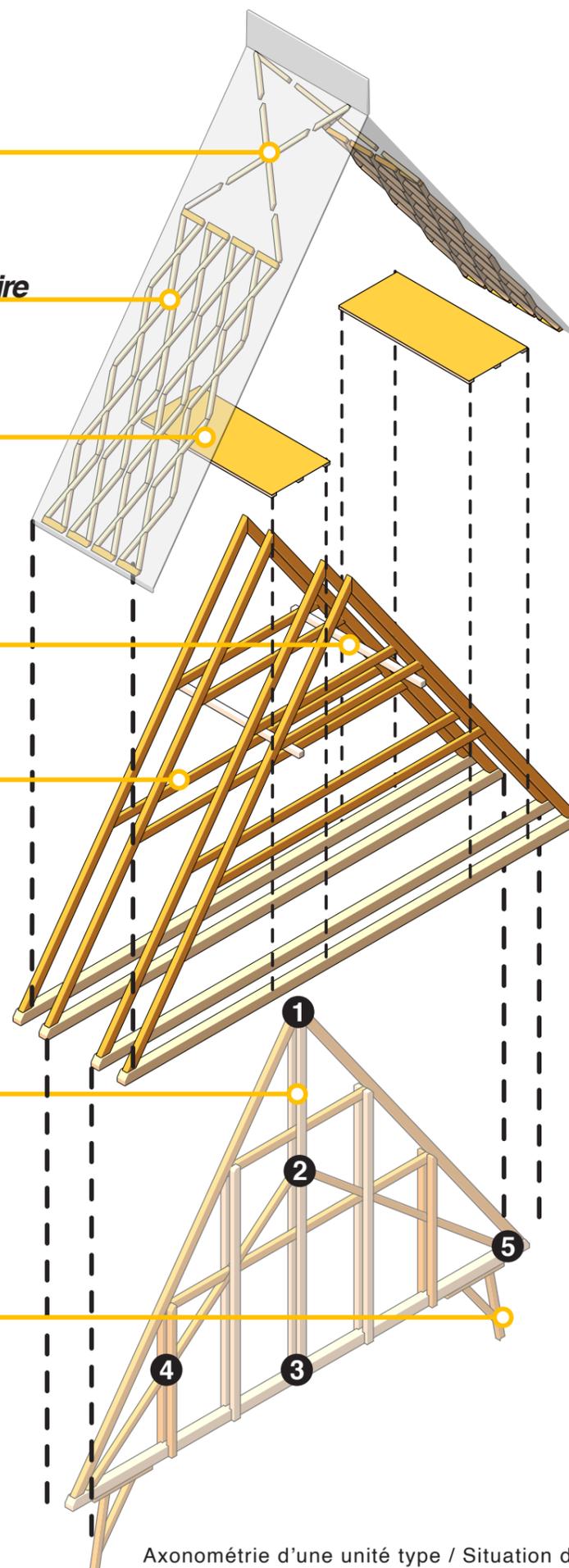
- support de couverture
- stabilisation

ferme principale

- structurelle
- support de couverture
- signalétique

appuis sur corbeaux (x2)

- structurel



description & assemblages

chêne

D40 NF EN 338

CV1 NF B 52-001

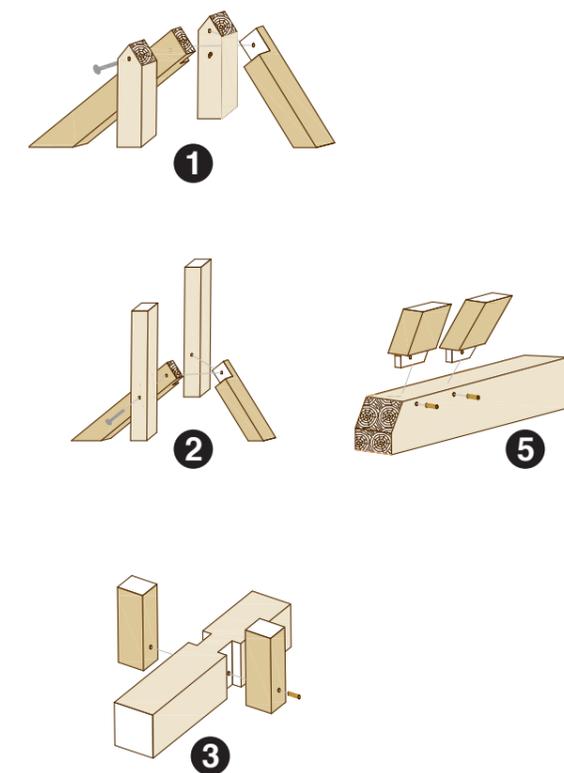
700 kg/m³

épicéa

C30 NF EN 338

STI NF B 52-001

500 kg/m³



Axonométrie d'une unité type / Situation des assemblages

04 notice descriptive

généralités

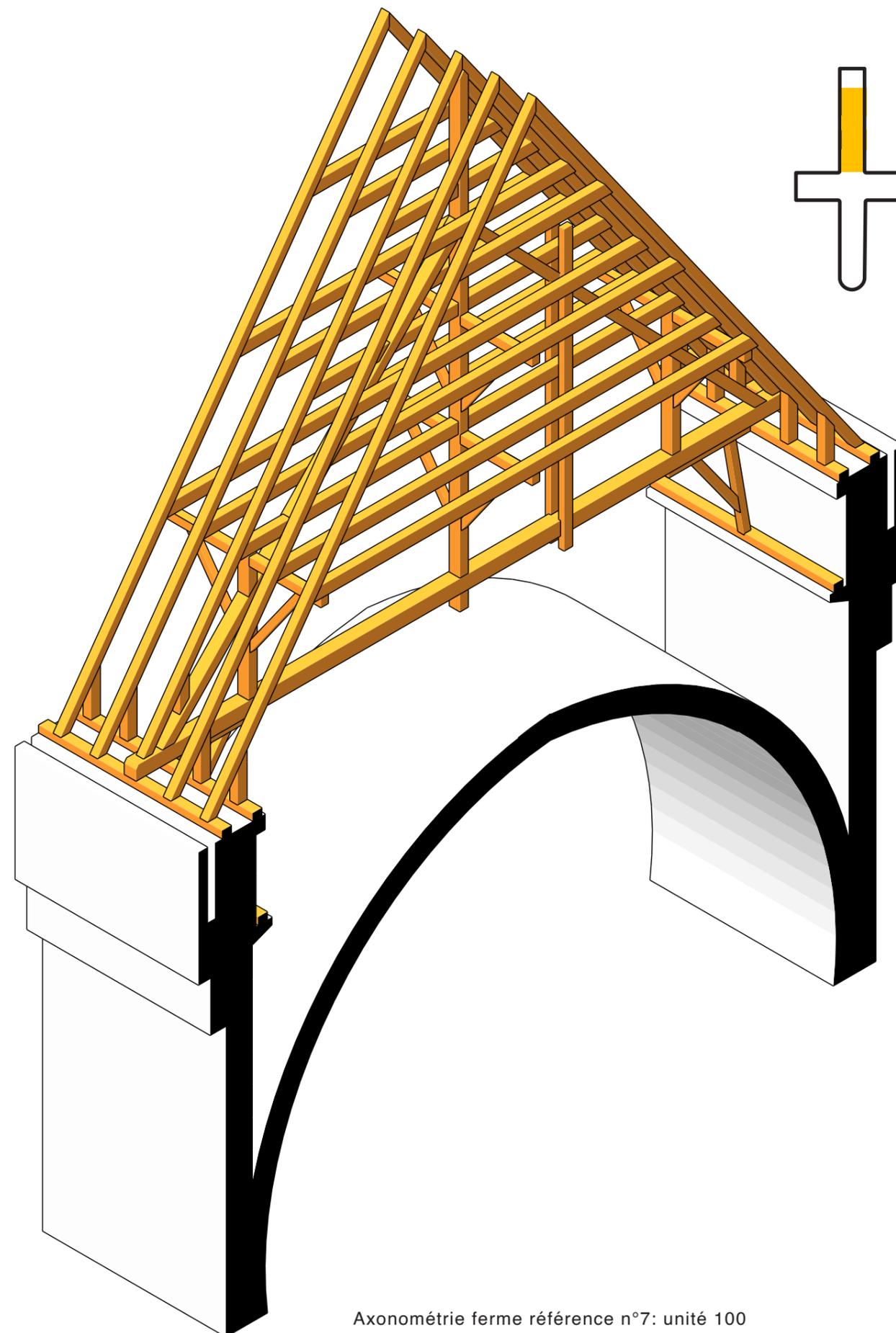
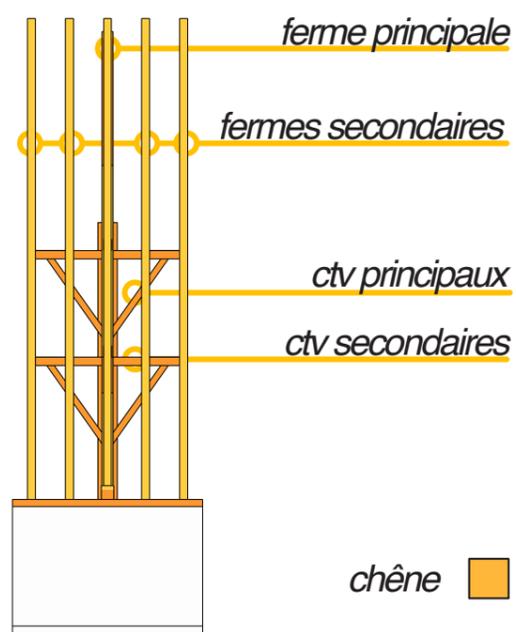
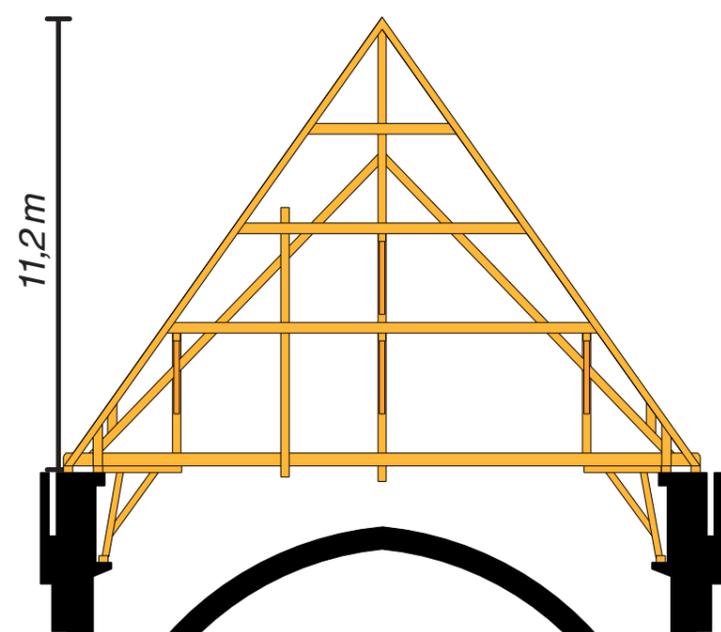
unités

abside

flèche

mise en oeuvre

géométraux / perspectives



 **11 m³ de bois**

38 % ferme principale

56 % fermes secondaires

06 % contreventement

 **16,4 t au total**

66 % structure

33 % couverture

01 % divers

unité d'origine
ferme n°7

Sections (mm)

160*250 arbalétriers

170*190 faux-arbalétriers

260*290 entrain

240*190 poinçon

Axonométrie ferme référence n°7: unité 100

04 notice descriptive

généralités

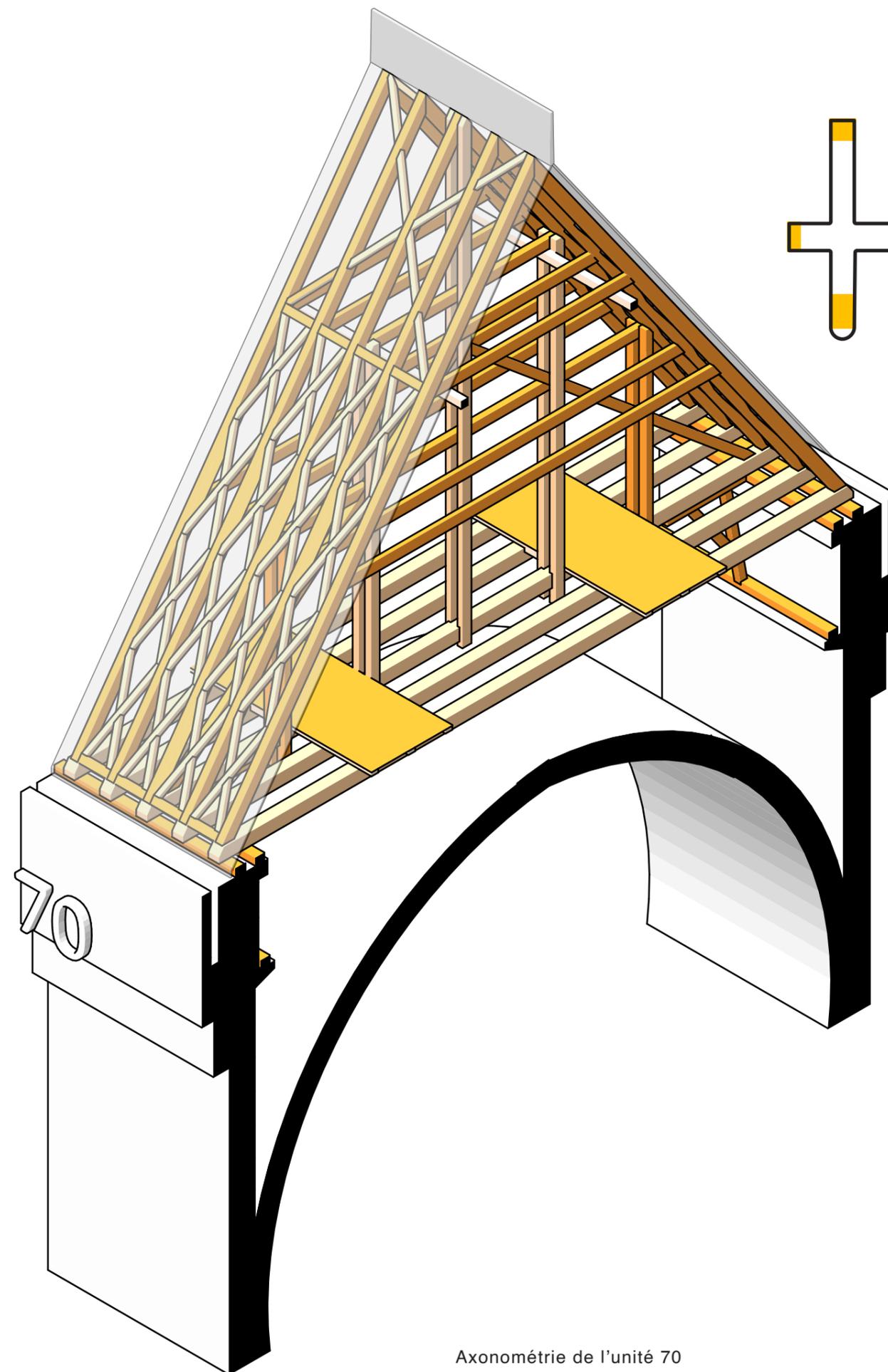
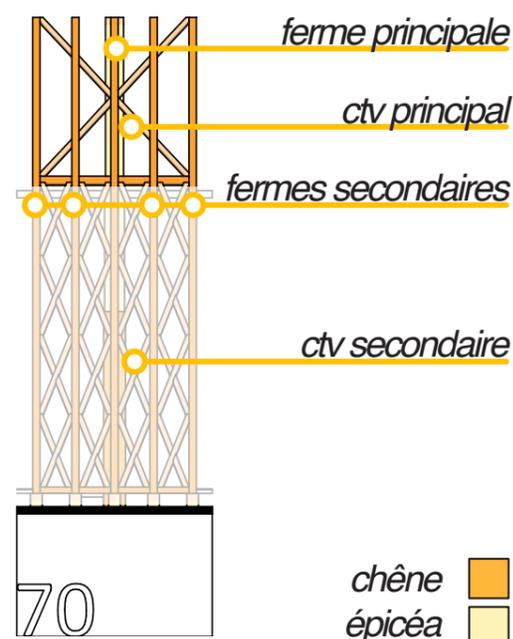
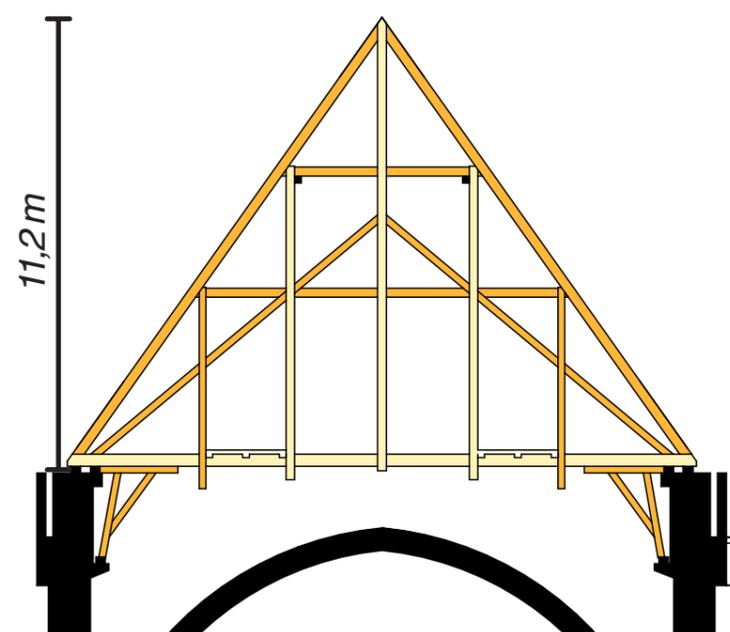
unités

abside

flèche

mise en oeuvre

géométraux / perspectives



12 m³ de bois

- 30% ferme principale
- 50% fermes secondaires
- 20% contreventement

11,5 t au total

- 84% structure
- 15% couverture
- 01% divers

70% du poids de l'unité n°7

Sections (mm)

- 220*190 arbalétriers
- 160*170 faux-arbalétriers
- 270*240 entrant
- 200*110 poinçon

Axonométrie de l'unité 70

04 notice descriptive

généralités

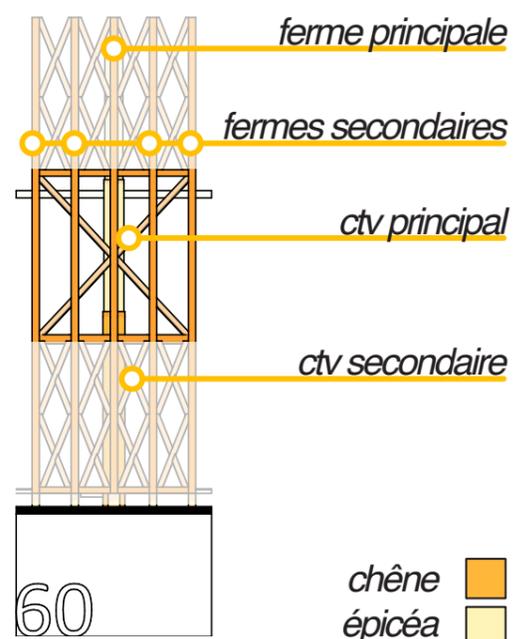
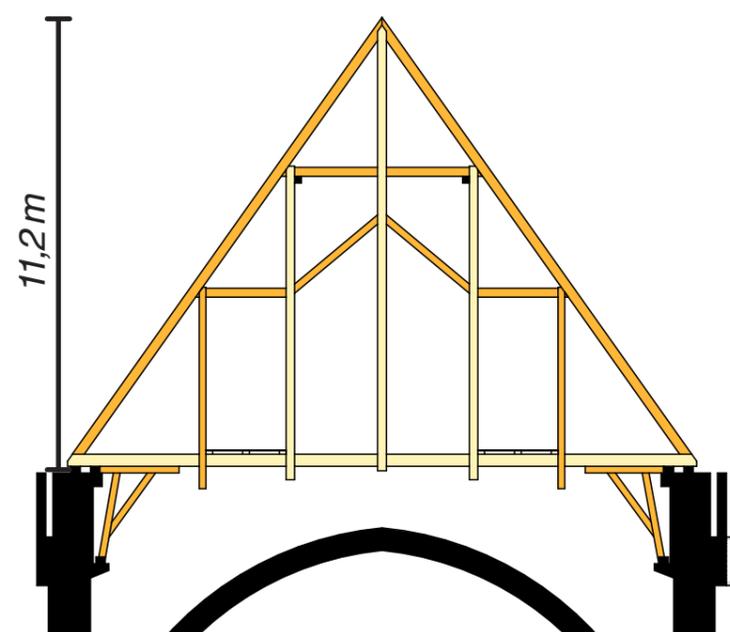
unités

abside

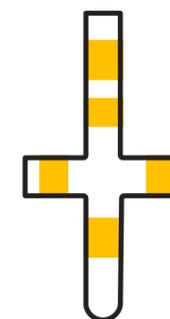
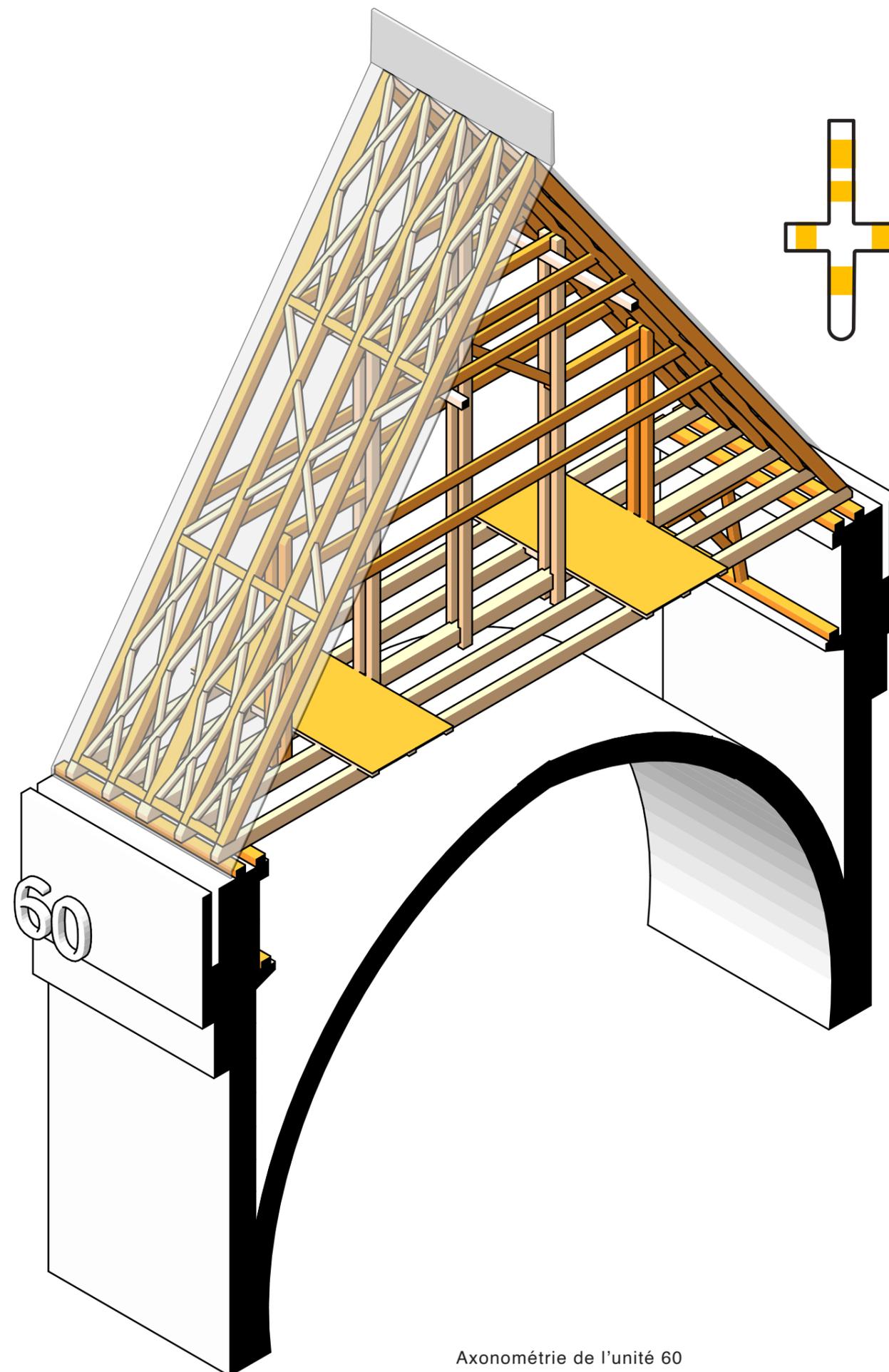
flèche

mise en oeuvre

géométraux / perspectives



chêne ■
épicéa ■



 **10 m³ de bois**

- 33% ferme principale
- 44% fermes secondaires
- 33% contreventement

 **9,8 t au total**

- 82% structure
- 17% couverture
- 01% divers

60% du poids de l'unité n°7

Sections (mm)

- 220*130 arbalétriers
- 160*130 demi-faux arbalétriers
- 270*240 entrain
- 200*110 poinçon

Axonométrie de l'unité 60

04 notice descriptive

généralités

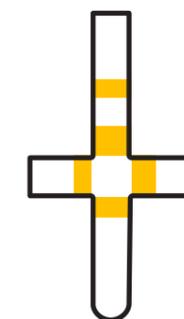
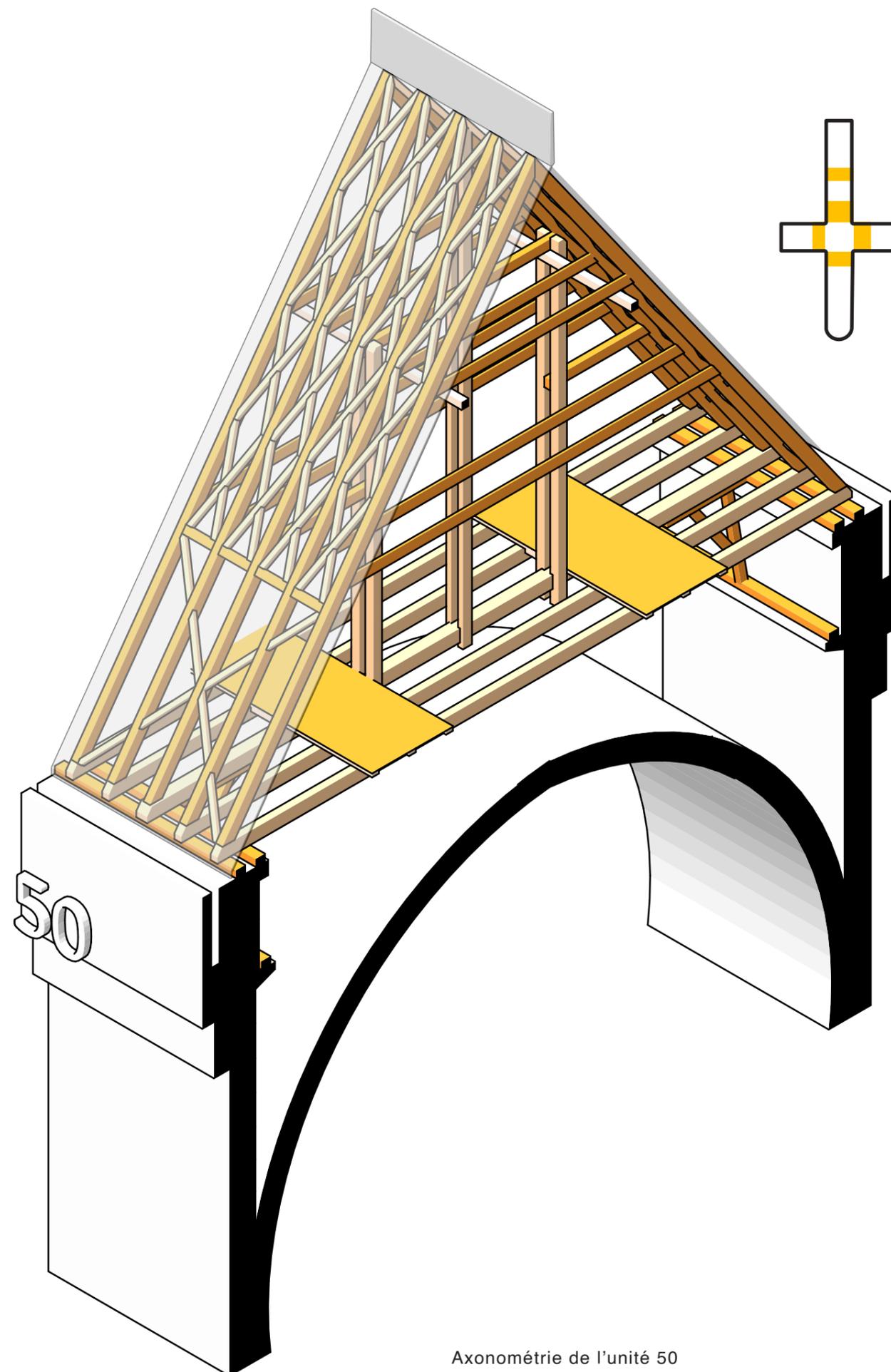
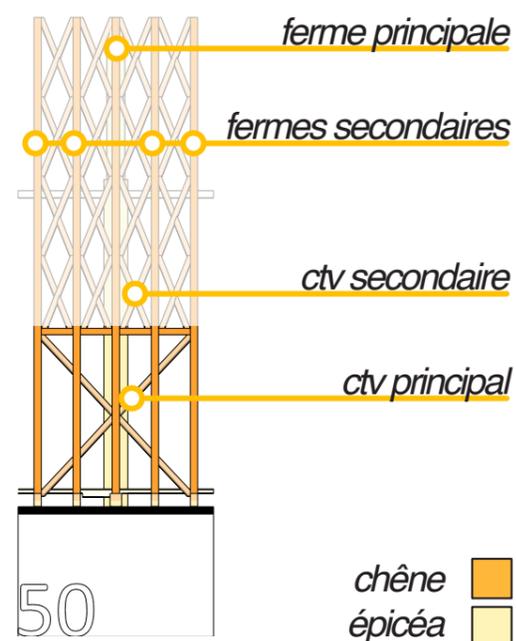
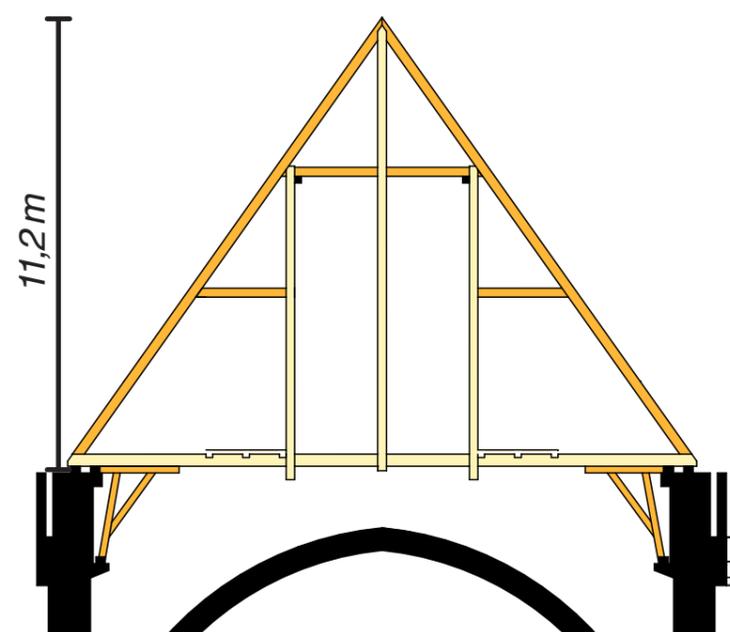
unités

abside

flèche

mise en oeuvre

géométraux / perspectives



 **09 m³ de bois**

- 36 % ferme principale
- 37 % fermes secondaires
- 27 % contreventement

 **8,2 t au total**

- 78 % structure
- 20 % couverture
- 01 % divers

50% du poids de l'unité n°7

Sections (mm)

- 220*130 arbalétriers
- 270*240 entrails
- 200*130 faux-entrait
- 200*110 poinçon

Axonométrie de l'unité 50

04 notice descriptive

généralités

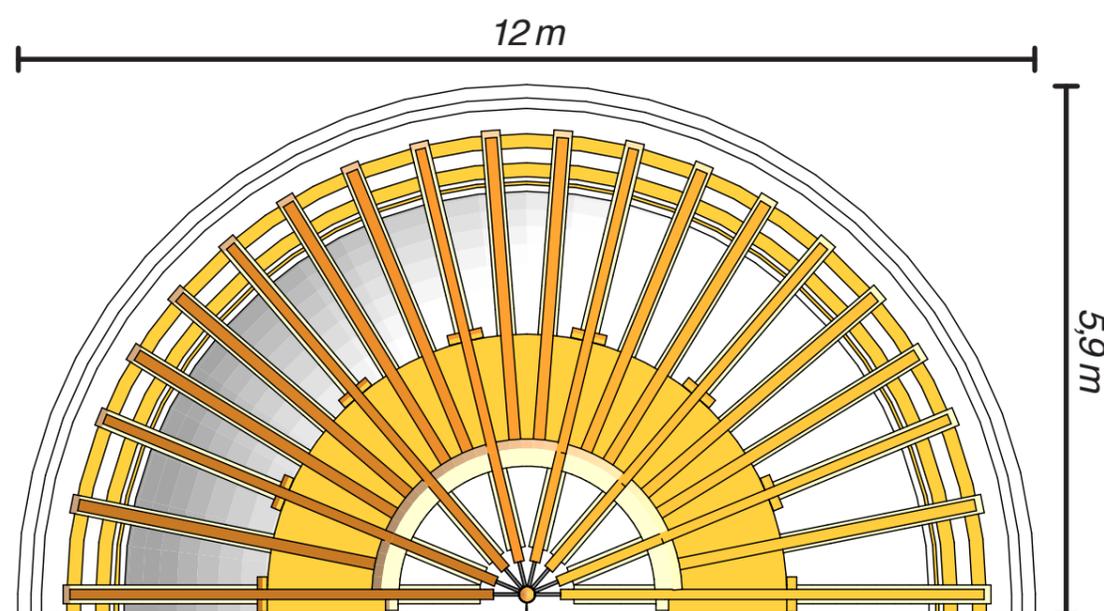
unités

abside

flèche

mise en oeuvre

géométraux / perspectives



Plan structural de l'abside

 **24 m³ de bois**

61 % demi-fermes fermes principales

37 % demi-fermes secondaires

02 % poinçon

 **15 t au total**

49 % demi-fermes fermes principales

49 % demi-fermes secondaires

02 % poinçon

Base
ferme à 70 %

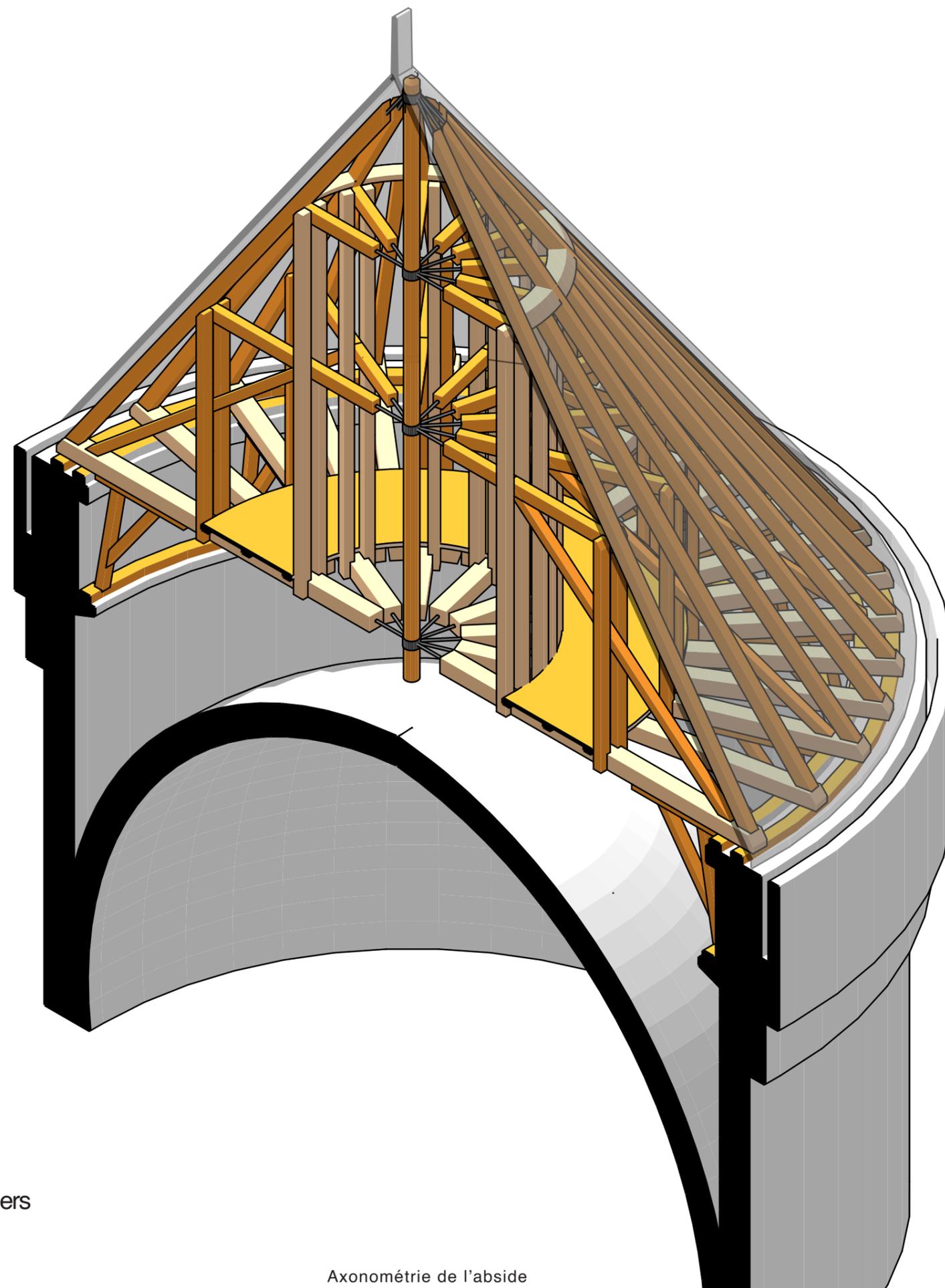
Sections (mm)

220*190 arbalétriers

160*170 faux-arbalétriers

270*240 entrain

Ø 200 poinçon



Axonométrie de l'abside

04 notice descriptive

généralités

unités

abside

flèche

mise en oeuvre

géométraux / perspectives

description & assemblages

chêne

D40 NF EN 338

CV1 NF B 52-001

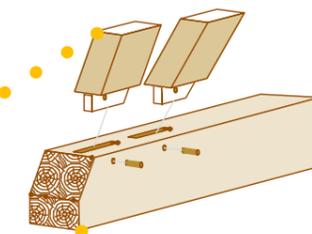
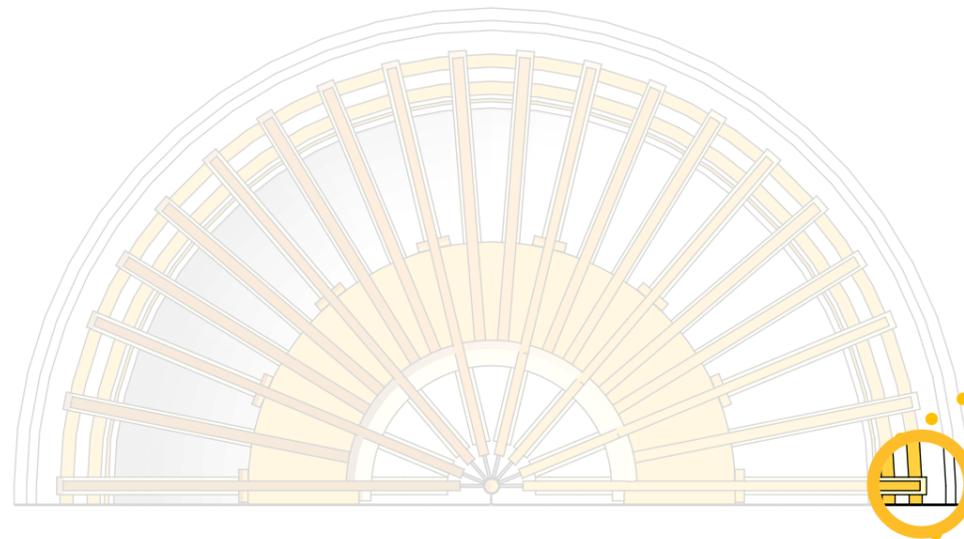
700 kg/m³

épicéa

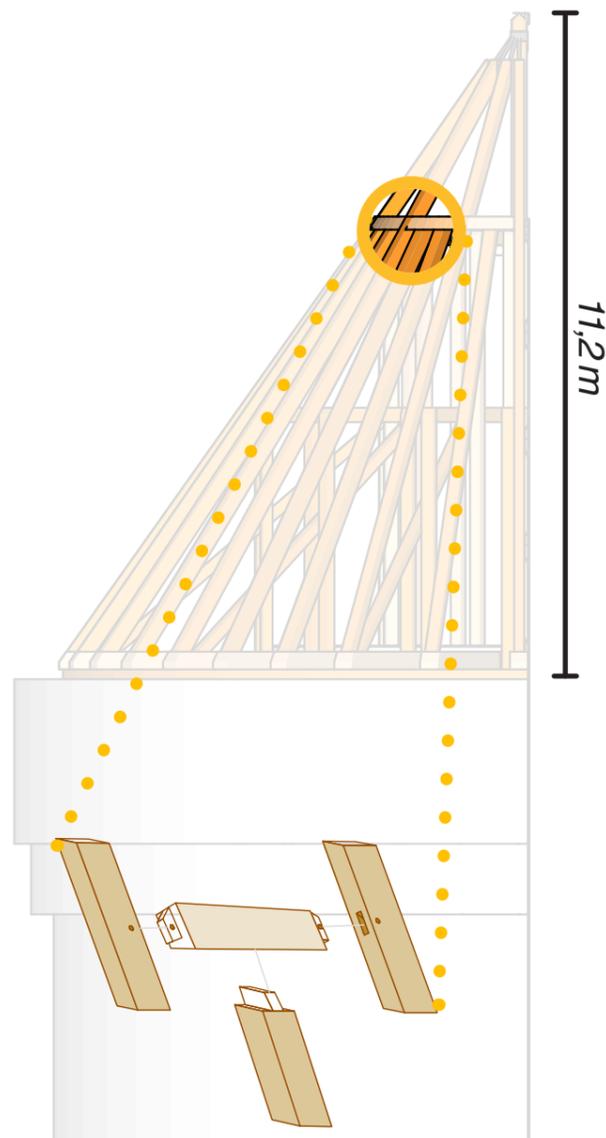
C30 NF EN 338

STI NF B 52-001

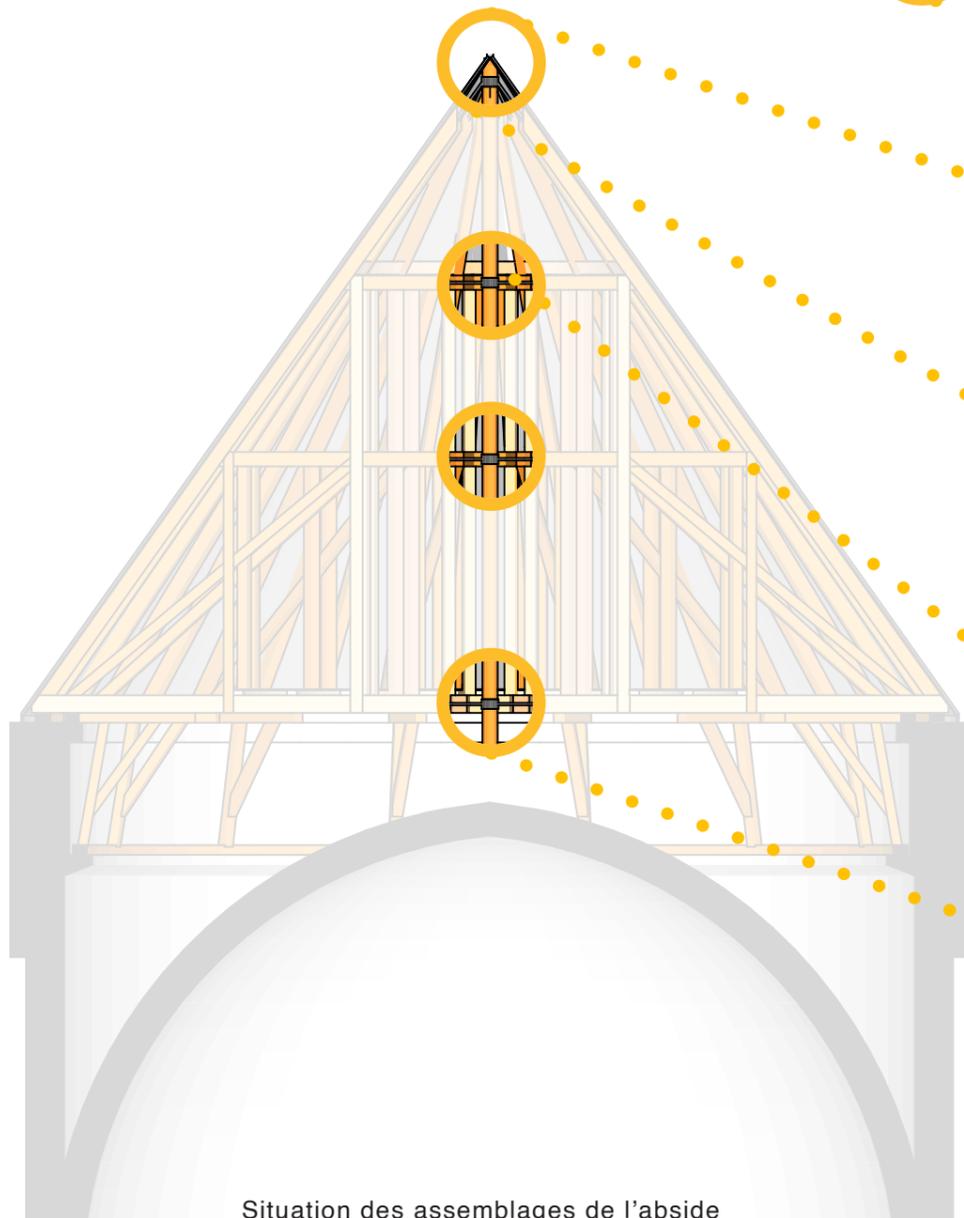
500 kg/m³



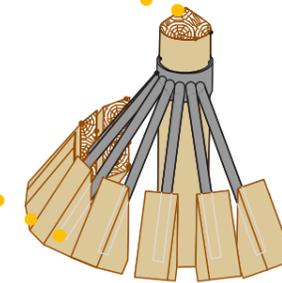
Assemblage tenon-mortaise entre arbalétrier et entrain



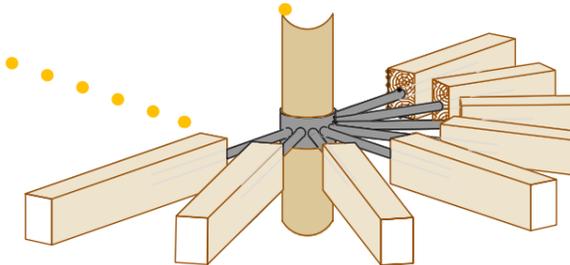
Assemblage tenon-mortaise arbalétriers



Situation des assemblages de l'abside



Couronne métallique jonction arbalétriers poinçon



Couronne métallique jonction entrains poinçon

04 notice descriptive

généralités

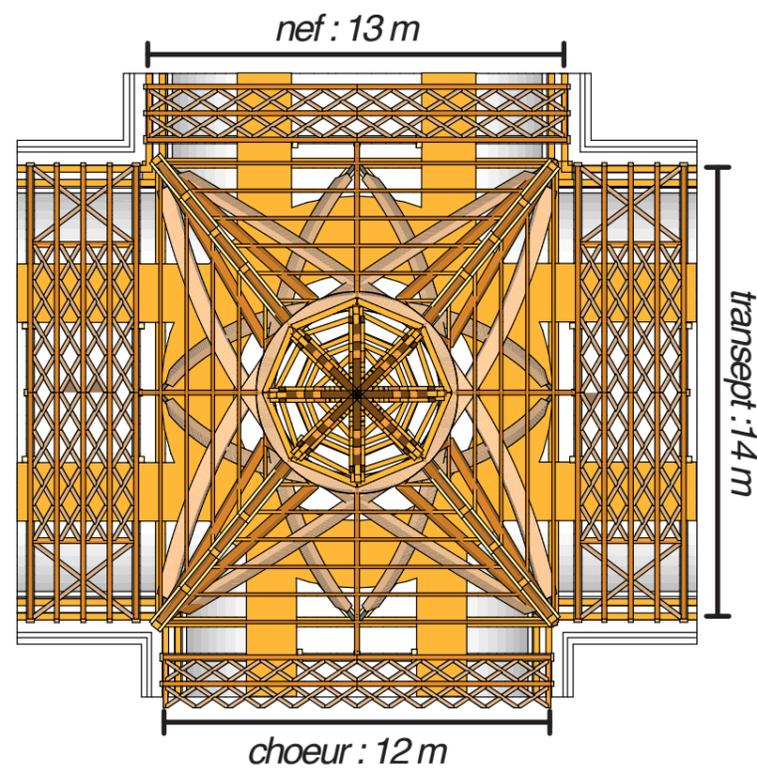
unités

abside

flèche

mise en oeuvre

géométraux / perspectives



 **430 m³ de bois**

83 % flèche émergée

16 % racines

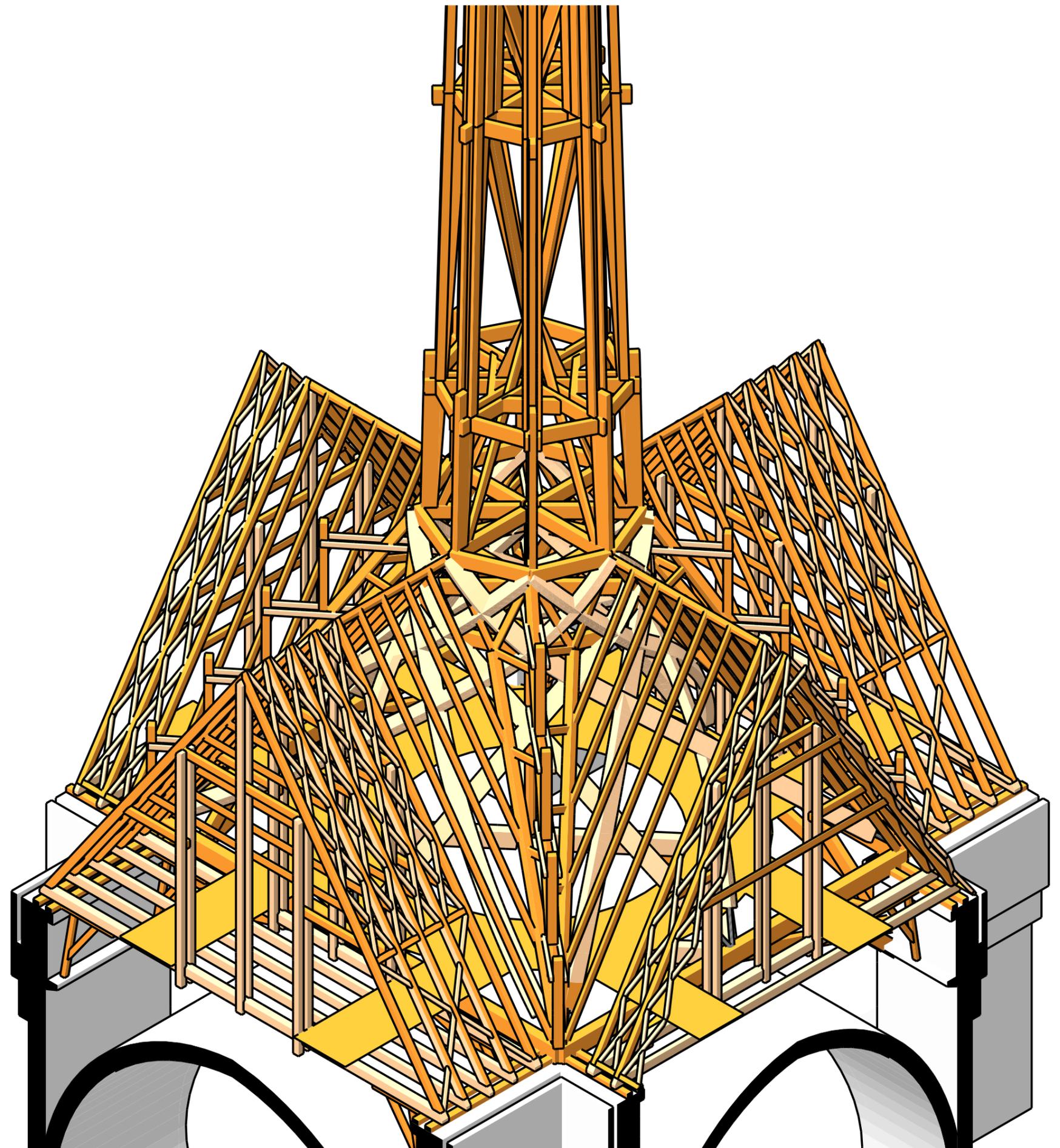
01 % divers

 **300 t au total**

84 % flèche émergée

15 % racines

01 % divers



Axonométrie structurelle à la croisée du transept

04 notice descriptive

généralités

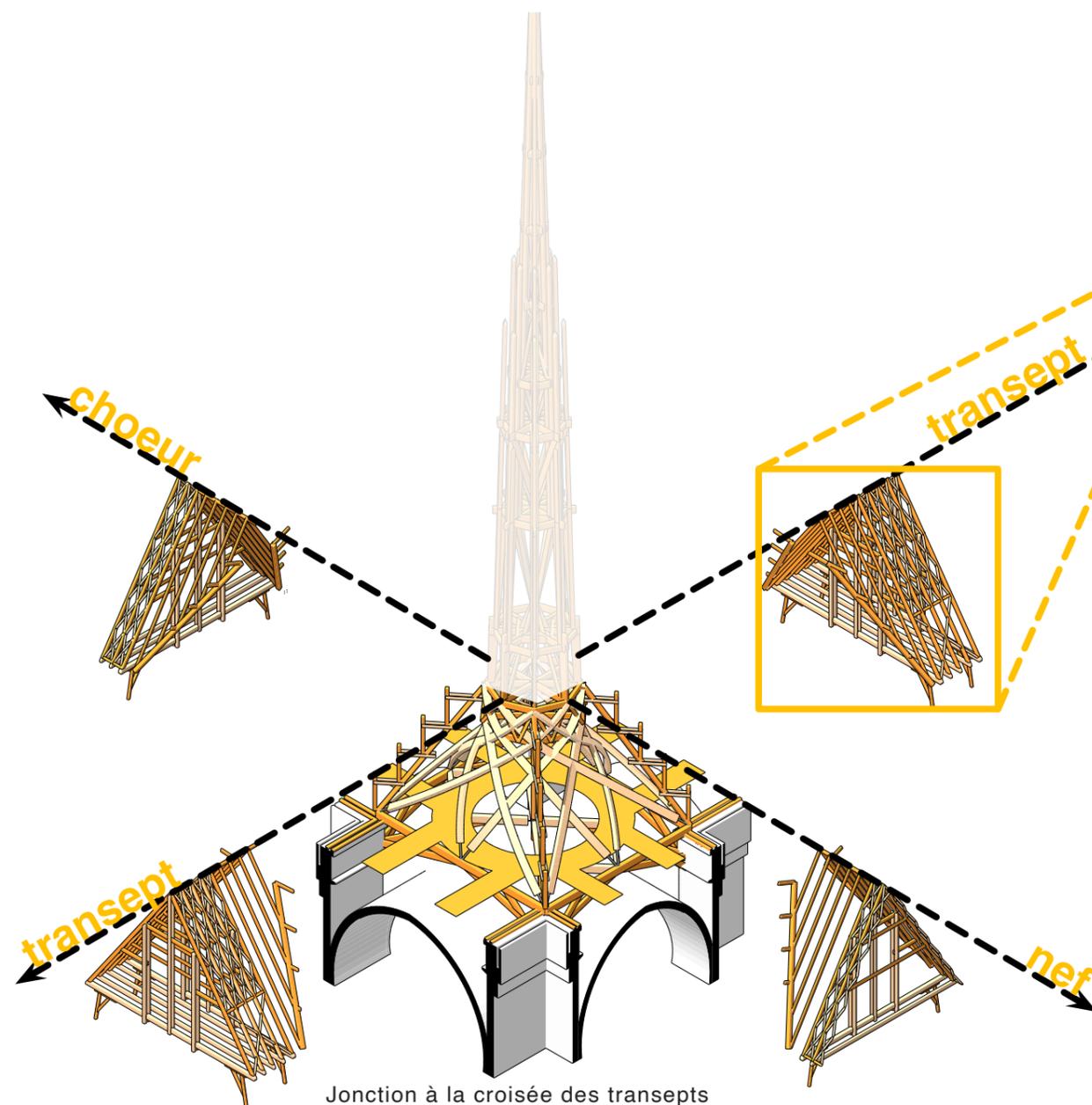
unités

abside

flèche

mise en oeuvre

géométraux / perspectives



flèche

restauration à l'identique de la partie « émergée » de la flèche

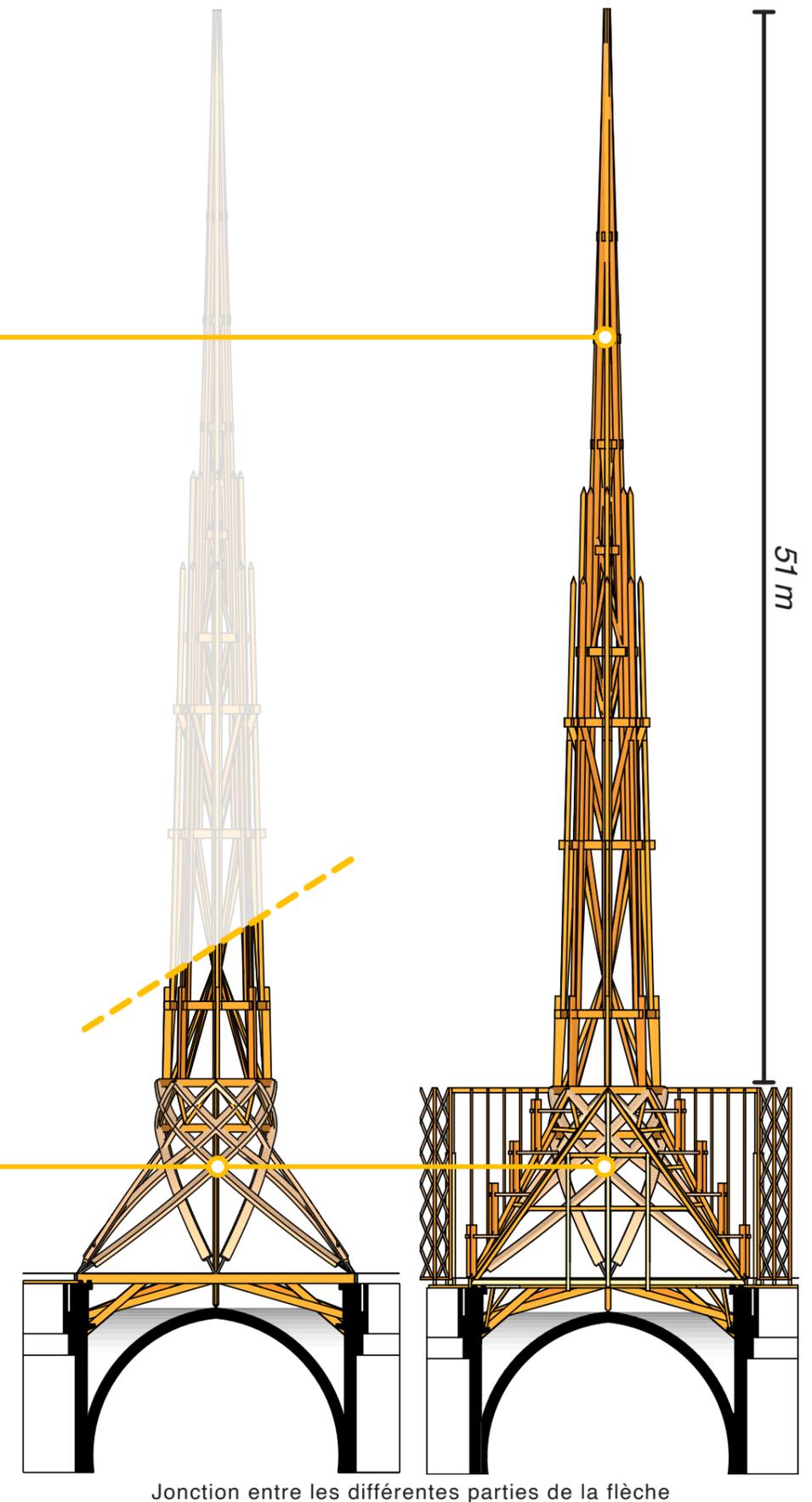
unité 50

Gestion de l'interface entre la partie courante de la charpente et de la flèche

racines

partie immergée de la charpente de la flèche :

- 16 racines en lamellé-collé
- connexion avec les parties courantes de la charpente



04 notice descriptive

généralités

unités

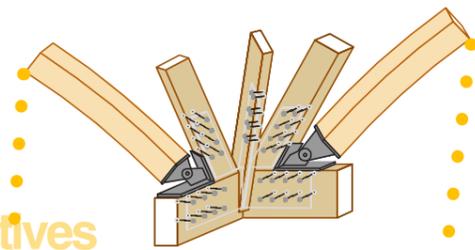
abside

flèche

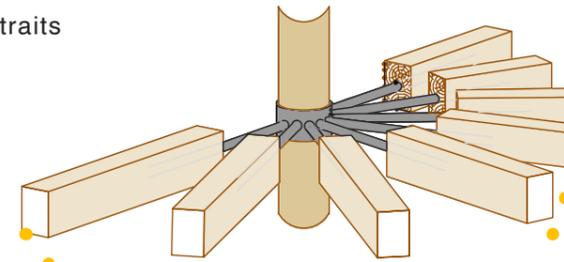
mise en oeuvre

géométraux / perspectives

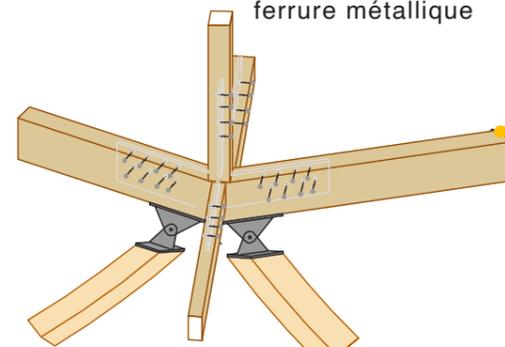
Assemblage en pied de noue



Couronne métallique jonction poinçon et entrails



Assemblage de la ceinture par ferrure métallique



description & assemblages

 **chêne**

D40 NF EN 338

CV1 NF B 52-001

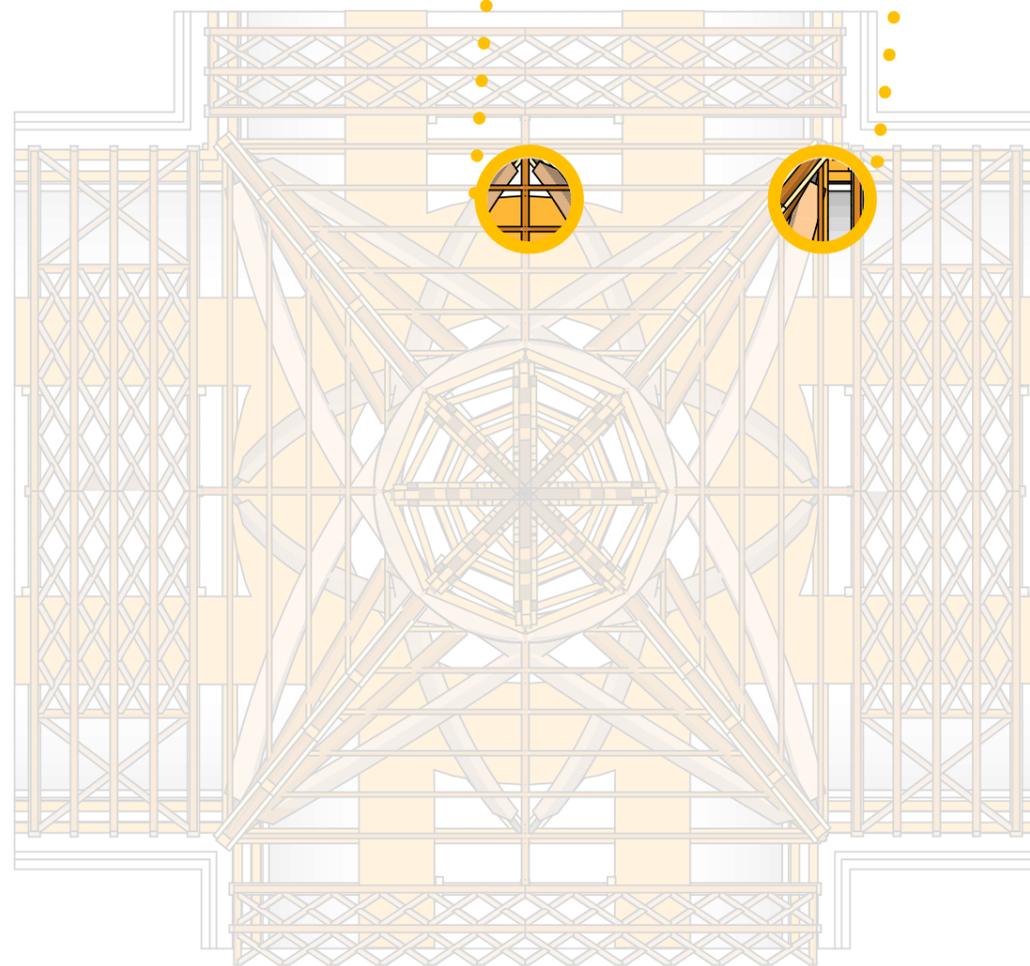
700 kg/m³

 **douglas**

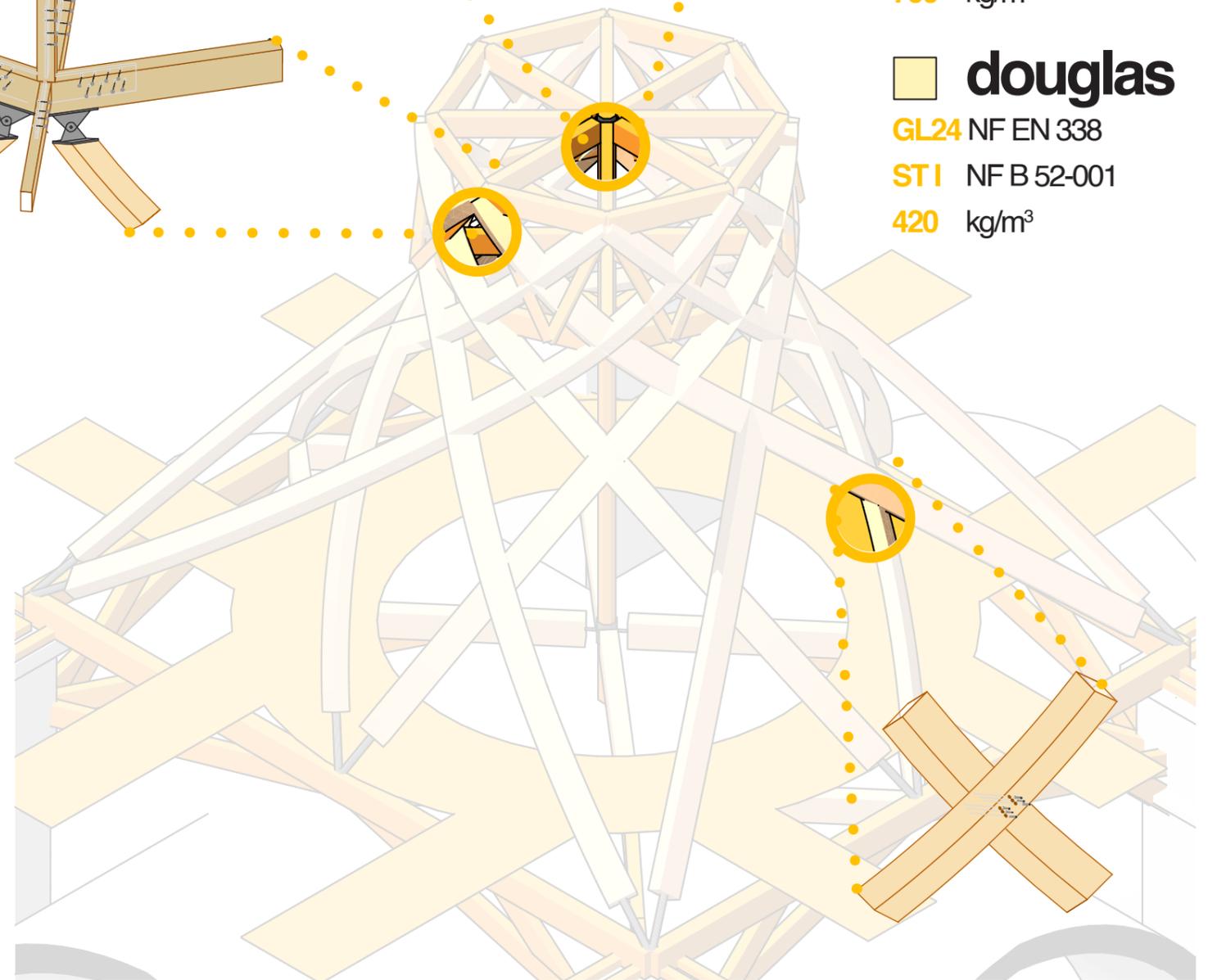
GL24 NF EN 338

ST1 NF B 52-001

420 kg/m³



Situation des assemblages à la base de la flèche



Assemblage des pièces du socle de la flèche

04 notice descriptive

généralités

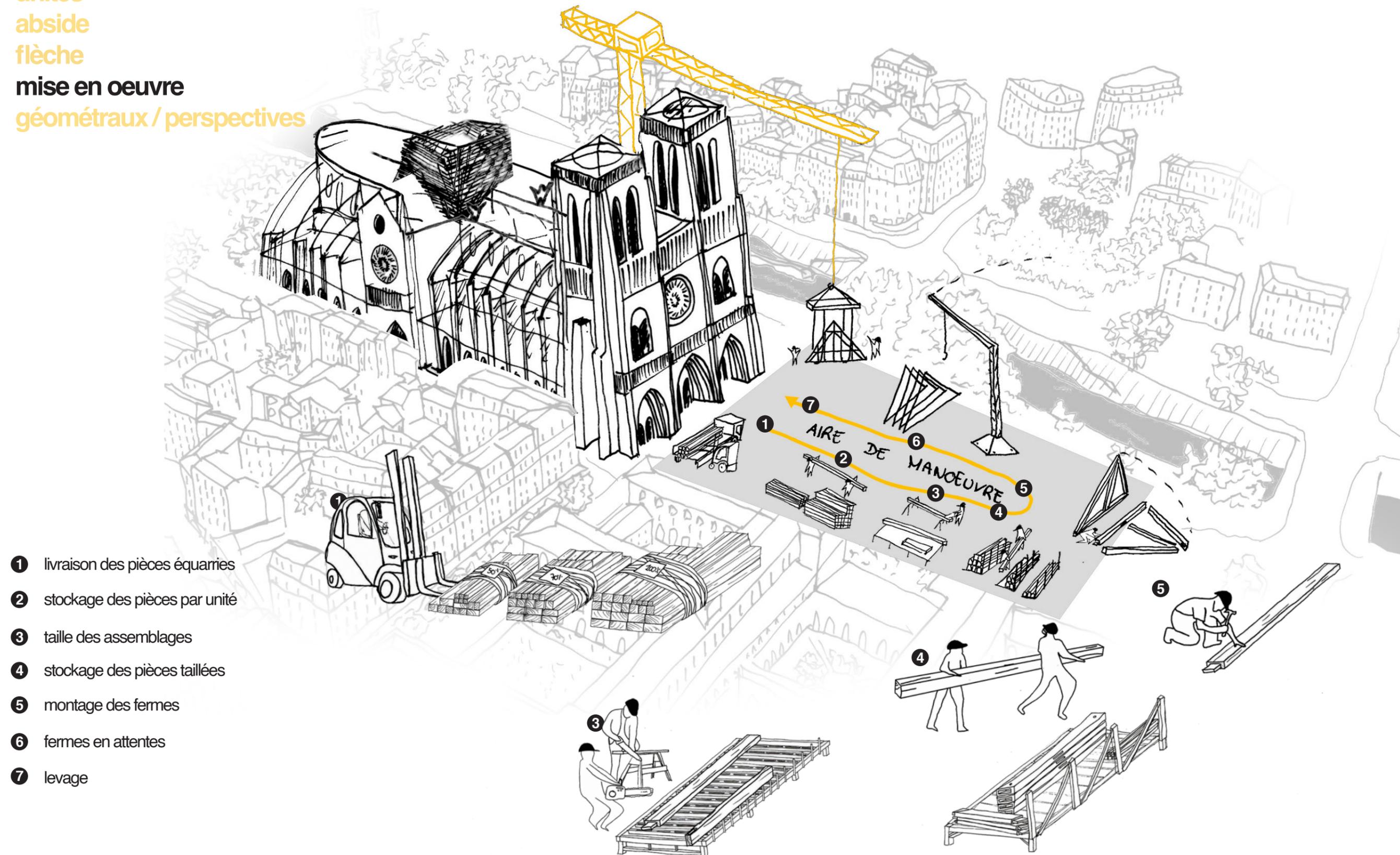
unités

abside

flèche

mise en oeuvre

géométraux / perspectives



- ❶ livraison des pièces équarries
- ❷ stockage des pièces par unité
- ❸ taille des assemblages
- ❹ stockage des pièces taillées
- ❺ montage des fermes
- ❻ fermes en attentes
- ❼ levage

04 notice descriptive

généralités

unités

abside

flèche

mise en oeuvre

géométraux / perspectives

1 sélection du palier adapté

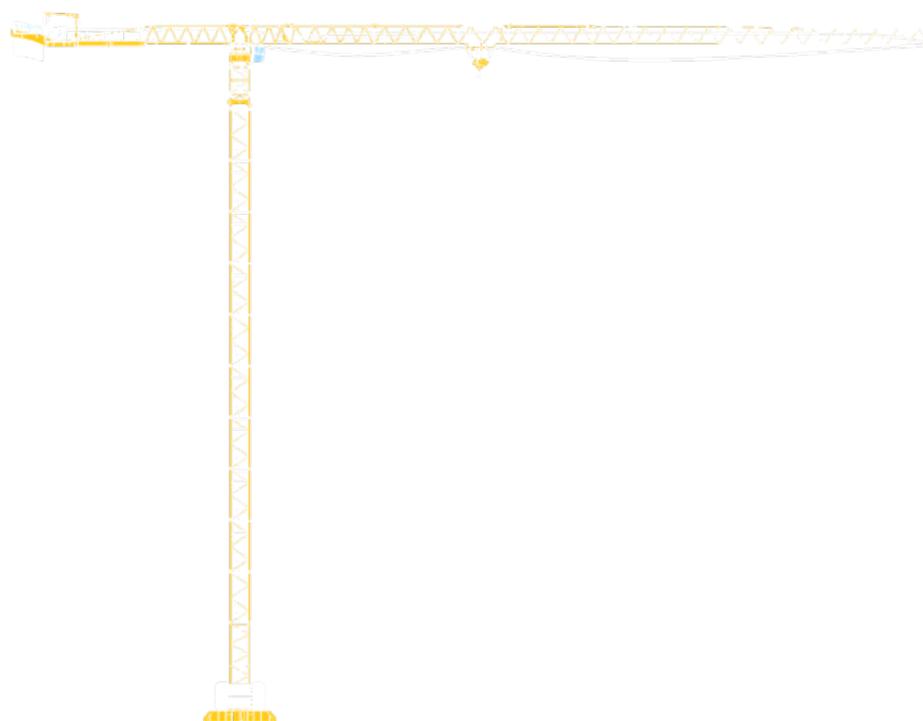
- 70%
- 60%
- 50%

2 composition de l'unité

- 1 ferme principale
- 4 fermes secondaires
- contreventement
- 2 passerelles
- couverture

3 mise en oeuvre

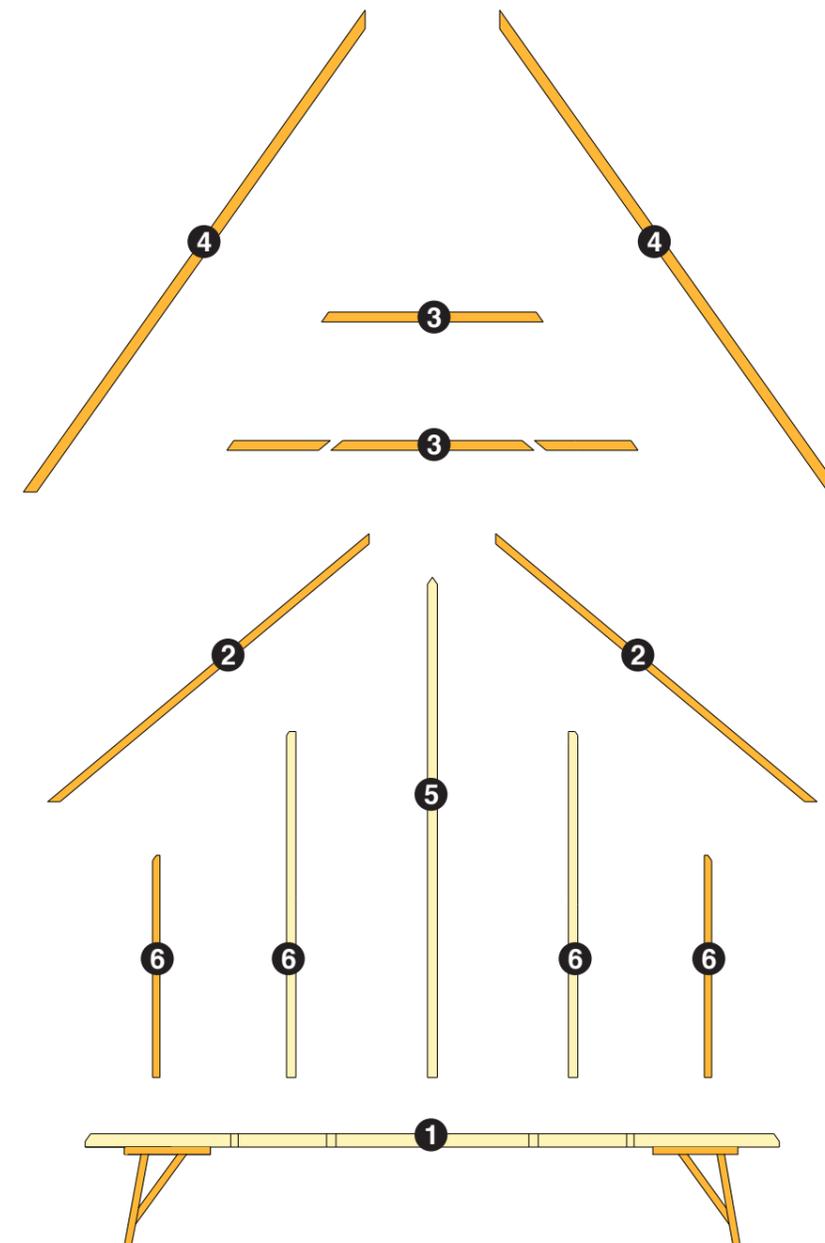
- levage par éléments
- positionnement
- stabilisation



Grue à montage par éléments (déjà en place)
MDT 809 M25 - Marque Potain



Suggestion de machine pouvant être utilisée pour
le débit des pièces - Canter à grumes - Marque sawquip



notice de montage d'une ferme de A à C

$$\begin{aligned}
 A &= \textcircled{1} + \textcircled{2} \\
 B &= \textcircled{3} + \textcircled{4} + A \\
 C &= \textcircled{5} + \textcircled{6} + A + B
 \end{aligned}$$

04 notice descriptive

généralités

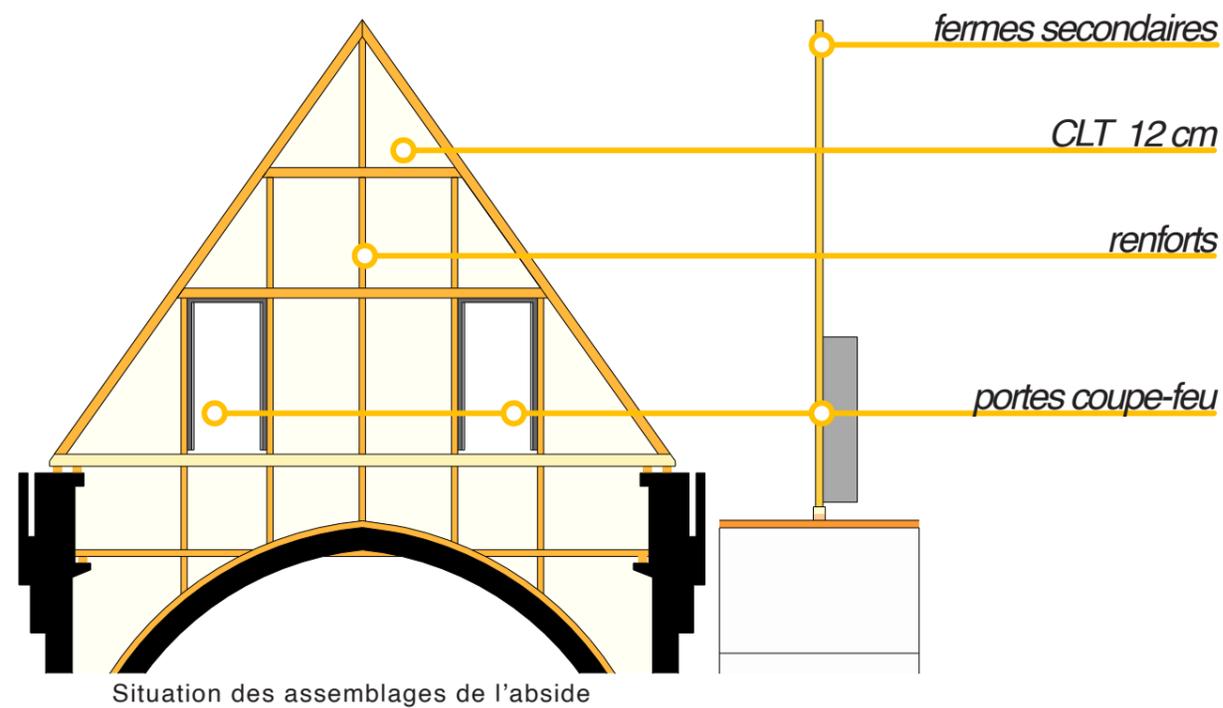
unités

abside

flèche

mise en oeuvre

géométraux / perspectives



 **11 m³ de bois**

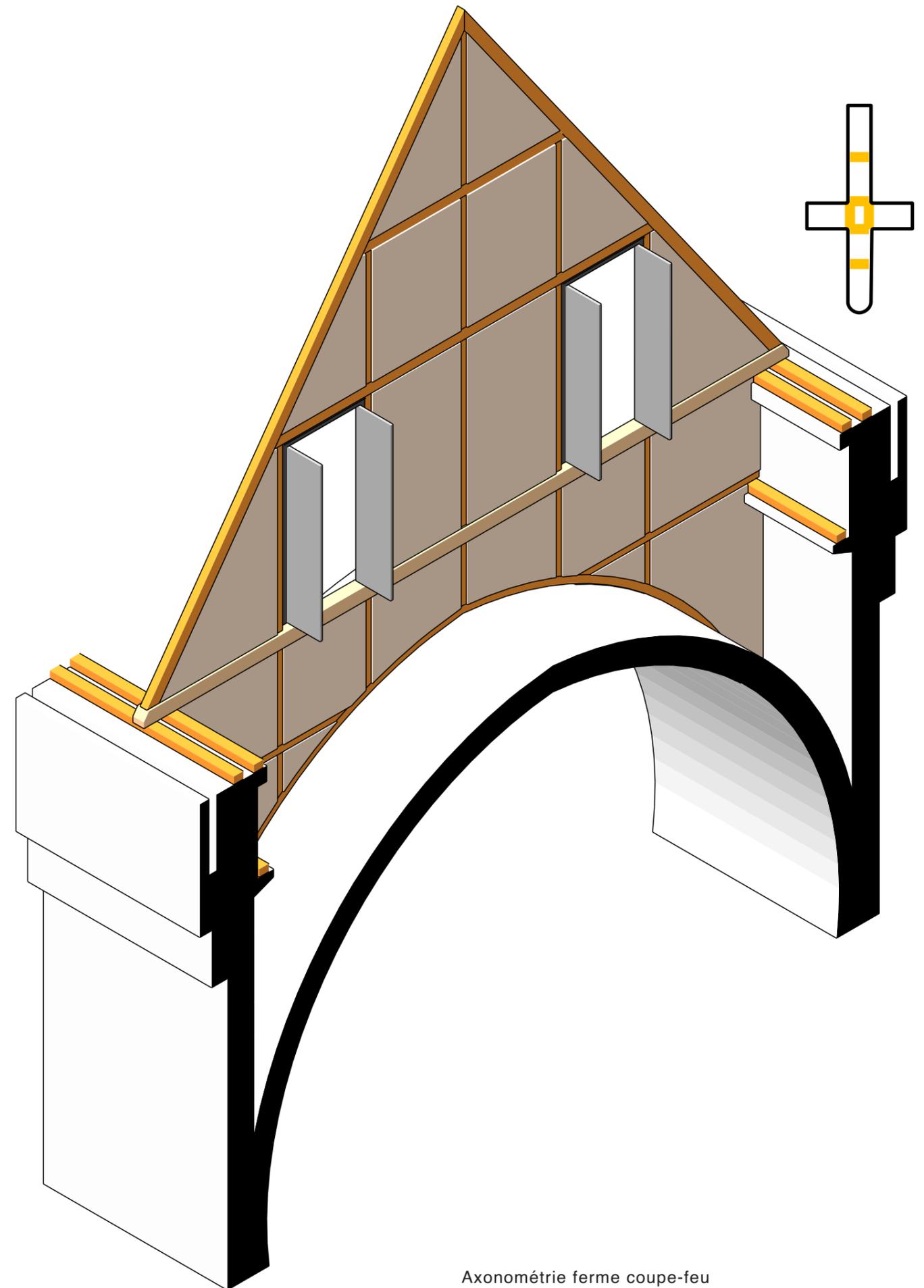
87 % coupe-feu

13 % ferme secondaire

04 t CLT

 **R60 au feu**

**renfort ponctuel
des appuis sous
les coupe-feu**



Axonométrie ferme coupe-feu

04 notice descriptive

généralités

unités

abside

flèche

mise en oeuvre

géométraux / perspectives

plomb
82
Pb
207,2



Image de la couverture originelle de la cathédrale - France 3

zinc
30
Zn
65,38



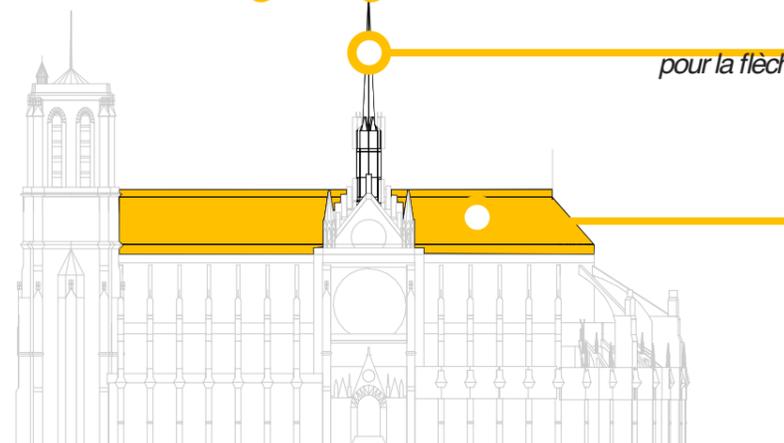
Image de la couverture proposée pour la reconstruction - Toit pro

tuiles de plomb

pour la flèche et les éléments d'ornementation

tuiles de zinc

en partie courante de la charpente



Situation des différentes couvertures

faitage avec ornement

non visible sur dessin

zinc

0.8 mm

joint debout

h = 25 mm e = 10mm

tasseau trapézoïdal

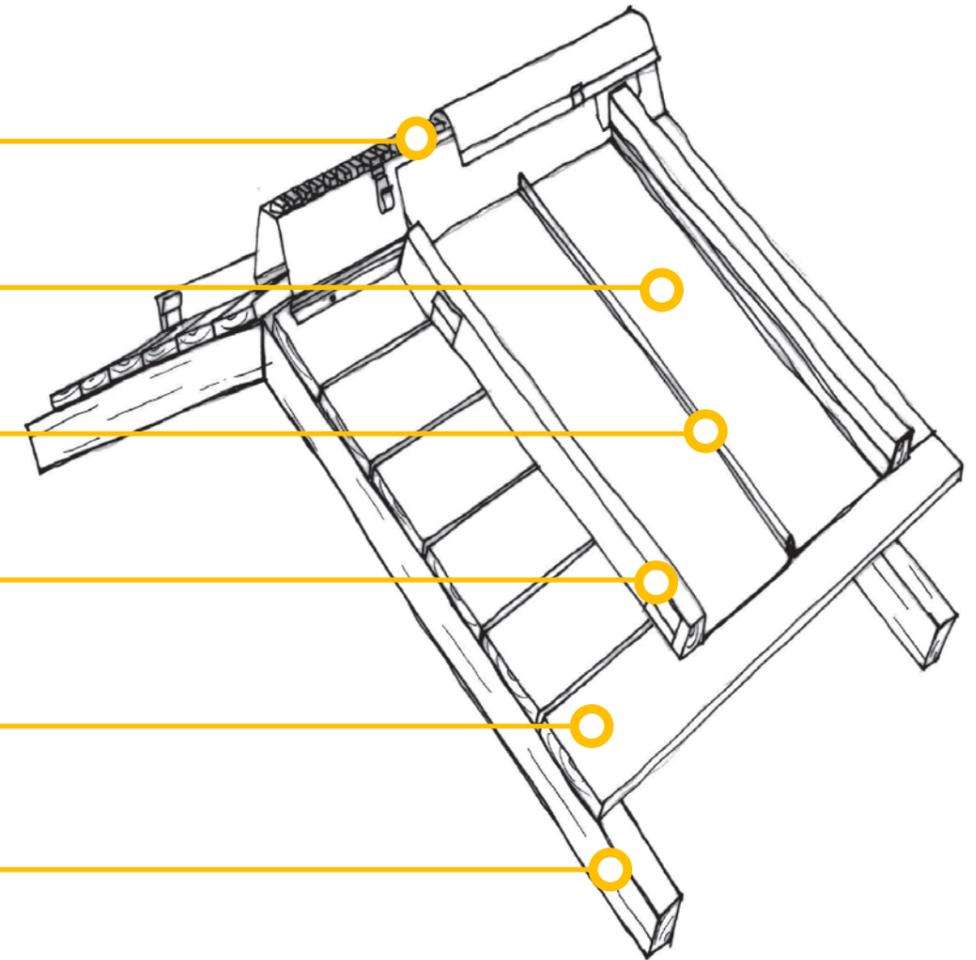
40 mm

voligeage

18 mm

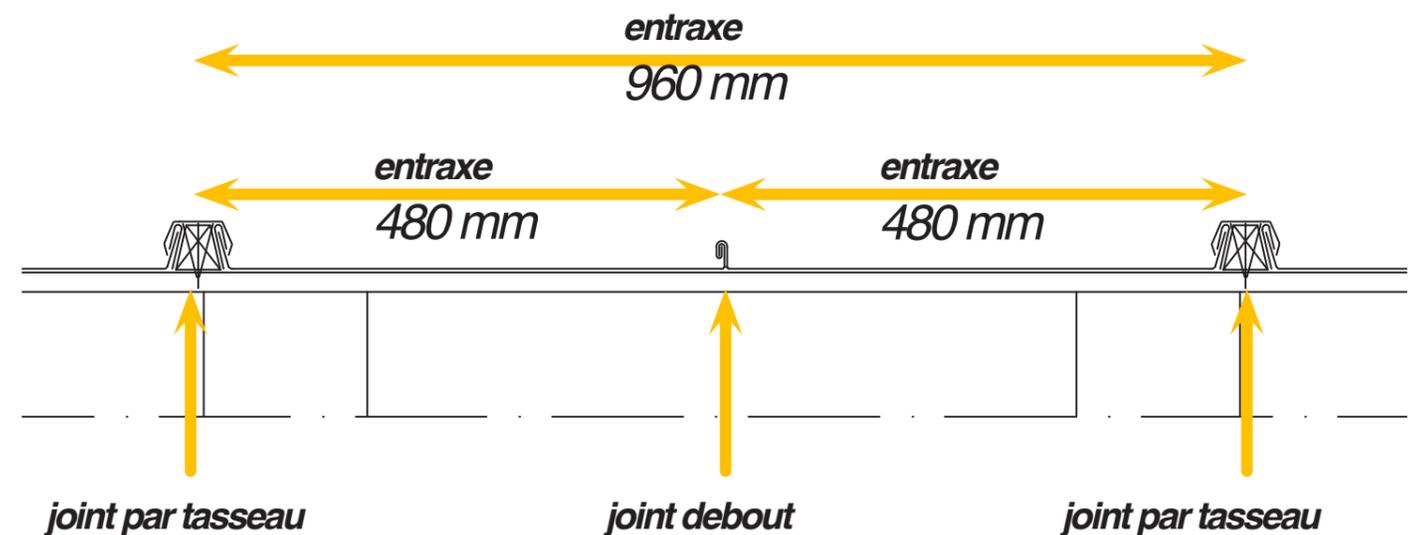
arbalétrier

150*220 mm



Croquis du complexe de toiture

Coupe détail



04 notice descriptive

généralités

unités

abside

flèche

mise en oeuvre

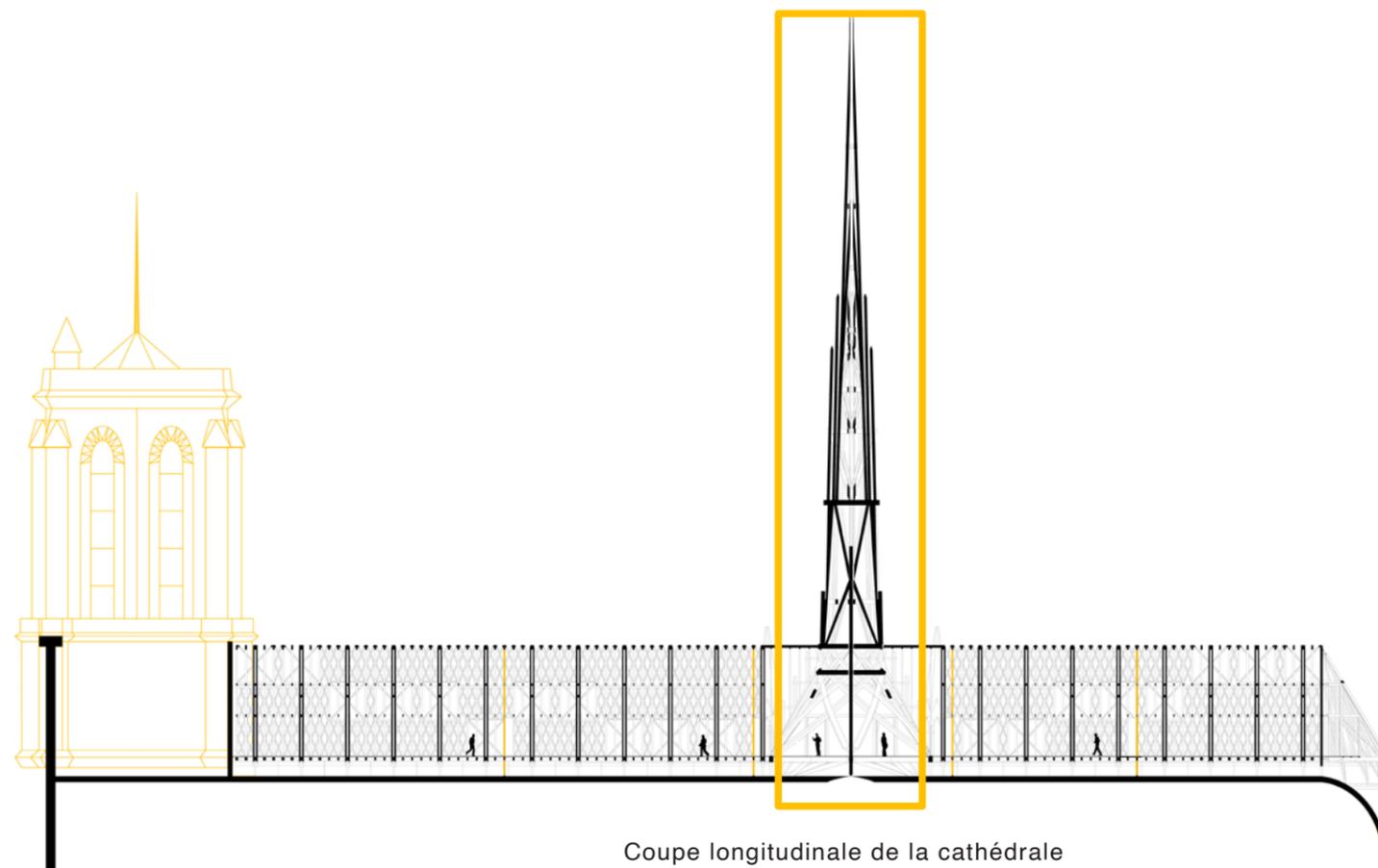
géométraux / perspectives



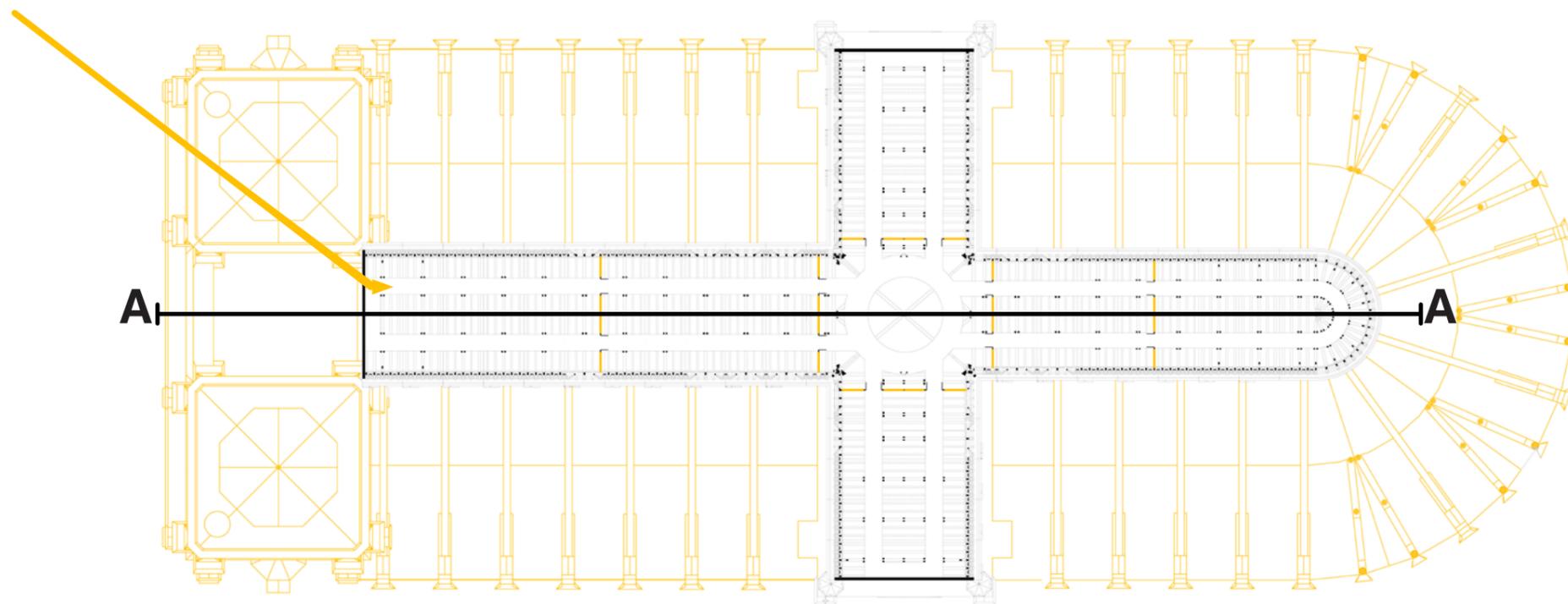
Coupe sur la flèche

0 2 4 6 8 10m
1/200

accès principal



Coupe longitudinale de la cathédrale



Plan général de la cathédrale

0 10 20 30 40 50m
1/1000

04 notice descriptive

généralités

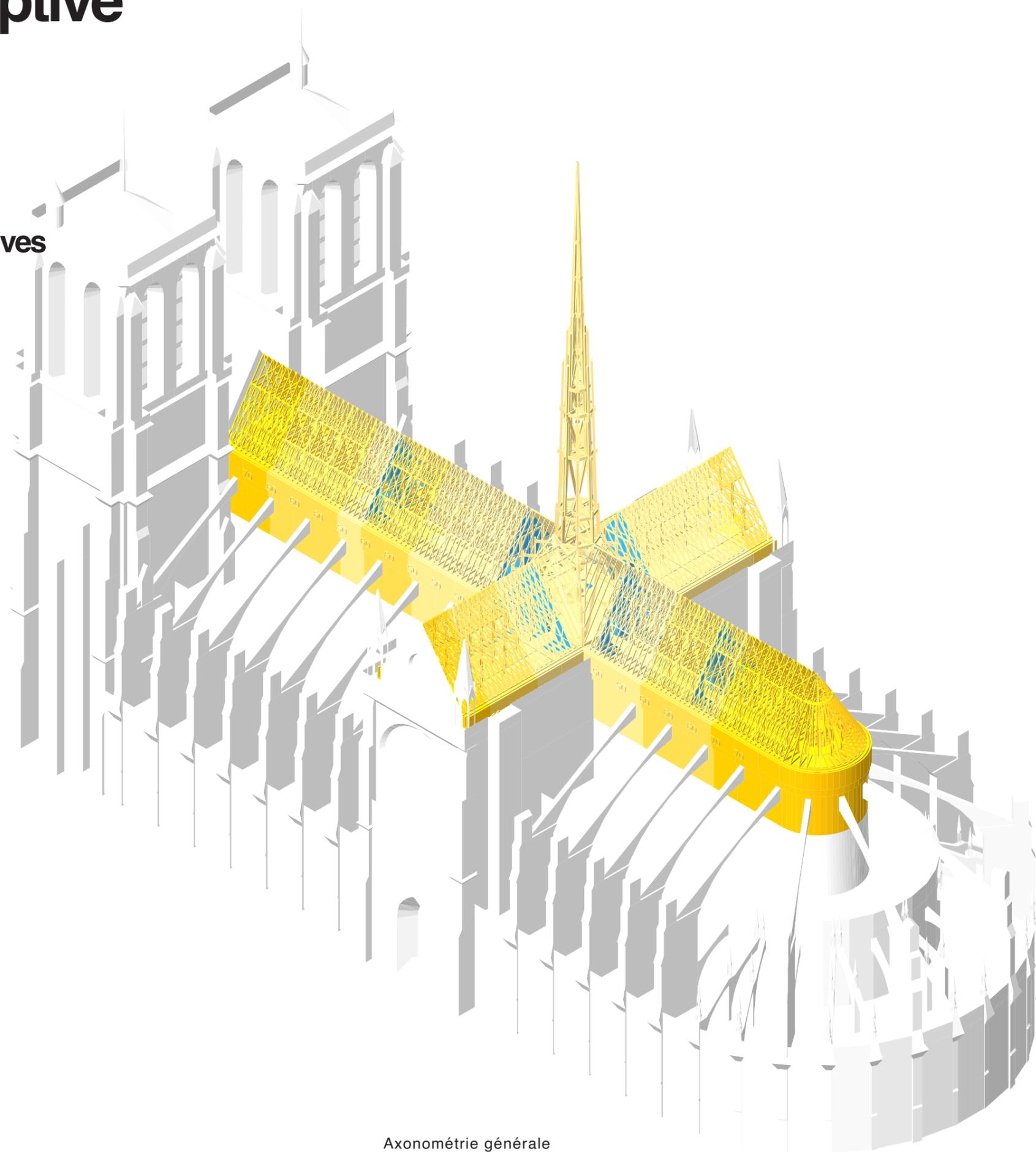
unités

abside

flèche

mise en oeuvre

géométraux / perspectives



Axonométrie générale

04 notice descriptive

généralités

unités

abside

flèche

mise en oeuvre

géométraux / perspectives



04 notice descriptive

généralités

unités

abside

flèche

mise en oeuvre

géométraux / perspectives



05 conclusion

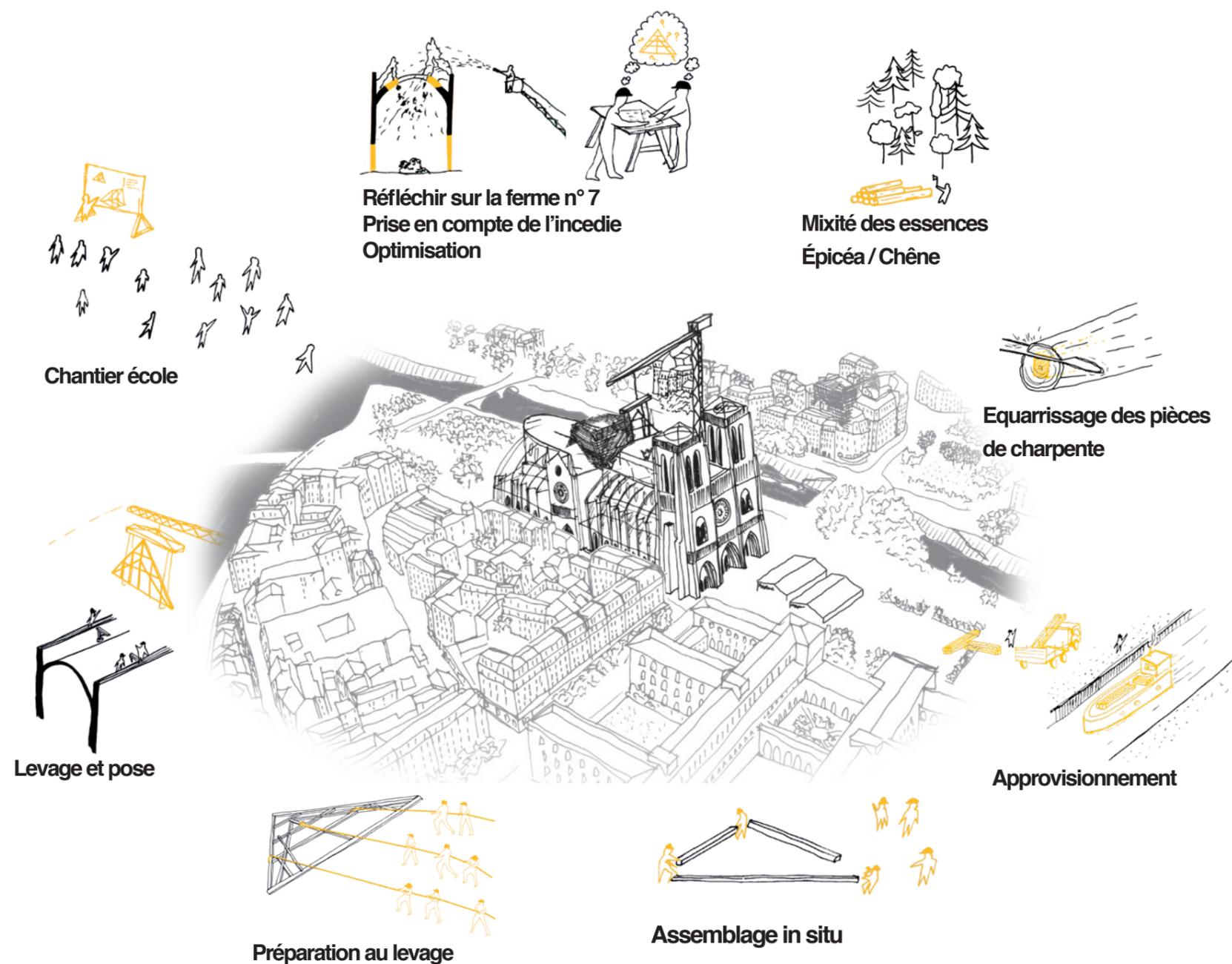
La reconstruction d'une Cathédrale est un évènement rare et marquant dans la vie de la population. Il se doit donc de devenir à notre sens un véritable moment de partage, de transmission de savoir et de connaissance du savoir-faire français et de l'histoire de la Cathédrale Notre-Dame autour d'un chantier école.

Nos réflexions autour de la ferme 7 se veulent comme le prolongement de l'histoire de « la forêt » si singulière à Notre-Dame. En prenant en compte le drame passé, les faiblesses induites sur les maçonneries, nous réécrivons par cette recherche d'optimisation et d'adaptabilité le futur de ce lieu. La ferme 7 s'articule autour de la notion d'histoire, du savoir-faire français, de son artisanat et de ses ressources locales.

Ce projet se veut porteur d'histoire mais également d'une certaine éthique constructive, celle de promouvoir des bois français tels que le chêne, l'épicéa ou encore le douglas et de les utiliser à juste mesure, au bon endroit.

L'ancrage du projet dans le XXI^e siècle se traduit également par l'utilisation de techniques d'équarrissage moderne et industriel en scierie. Une fois acheminé sur site par voie fluviale ou routière, les ouvriers sont libre de tailler l'ensemble des assemblages in situ et ainsi mettre en avant le travail de l'homme aux yeux de tous.

Une fois ces fermes assemblés encore une fois l'utilisation d'outil de levage moderne permettront à Notre-Dame de retrouver une nouvelle vie, une nouvelle toiture.

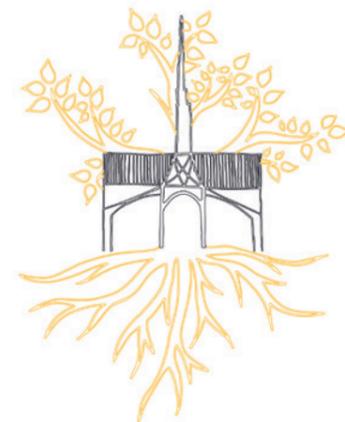


Schémas conceptuel du projet

racines

restauration modulaire
de Notre-Dame de Paris

Master 2 « Architecture Bois Construction »



Maureen **FALVY**

Séverine **FUCHS**

Fabien **LAMY**

Félix **PERROT**

Paul-Emile **RINAUDO**