

DRAC CRMH BOURGOGNE-FRANCHE-COMTÉ
Cathédrale Saint Bénigne

21 - DIJON



Restauration de la flèche
PRO DCE
JUILLET 2025

TABLE DES MATIÈRES

Objet de l'étude	7
Résumé de l'étude	9
I. PRÉSENTATION.....	11
1. Fiche récapitulative	13
2. Plan de situation.....	14
3. Dossier photographique	16
I. Vues extérieures	16
A/ Couvertures en tuiles	18
B/ Couvertures en cuivre	19
C/ Couvertures en plomb	20
D/ Couvertures en ardoises	21
E/ Moyens d'accès et paratonnerre	22
F/ Ornaments en cuivre.....	23
G/ Statues en cuivre	25
II. Vues intérieures.....	27
A/ Tabouret	29
B/ Fermes diagonales	31
C/ Fermes périphériques.....	32
D/ Faîtages pans de bois	33
E/ Noues et lucarnes.....	34
F/ Fût octogonal	35
G/ Aiguille	36
H/ Moyens d'accès menuisés.....	38
I/ L'escalier de la souche	39
II. ÉTAT DES LIEUX	41
1. Documents graphiques.....	42
2. Synthèse historique, analyse patrimoniale, descriptif architectural et technique.....	43
III. DIAGNOSTIC	45
1. Documents graphiques.....	46
2. Diagnostic sanitaire et structurel de la charpente et des couvertures	46

IV. PROJET	47
1. Documents graphiques.....	48
A/ Plans projet	48
B/ Plans de charpente	49
C/ Plans de chantier	50
2. Parti d'interventio	53
I. Restaurer la structure.....	53
A/ Conserver et rétablir les dispositions originelles de Charles Suisse	53
B/ Un renforcement nécessaire de la structure du tabouret	53
C/ Renforcer les points faibles par méthodes traditionnelles de charpente	55
D/ Rendre plus résilient le schéma statique principal	55
E/ Prendre en compte les changements climatiques (reprise des efforts au vent).....	79
F/ Classification des assemblages et de leurs Interventions	80
G/ Restauration courante de charpente	83
H/ Mise au calcul et identification des interventions	83
II. Restaurer les couvertures	86
A/ Les couvertures en cuivre	86
B/ Les couvertures en ardoises	87
III. Améliorer les conditions d'entretien et de sécurité	90
A/ Sécurité incendie	90
B/ Conditions d'entretien.....	90
3. Structure générale de l'opération.....	94
I. Fourniture de bois de charpente exceptionnels	94
II. Travaux de sécurisation incendie préalables à la restauration de la flèche	95
III. Levages par grue fixe.....	97
A/ Nécessité d'une grue fixe à bras relevable.....	97
B/ Positionnement de la grue fixe.....	97
C/ Immobilisation de la grue pendant les restaurations en atelier	97
D/ Aires de travail et de colisage	97
E/ Montage de la grue fixe : encombrement et contraintes.....	99
F/ Ordre de levage de la charpente	100
IV. Installations de chantier dans le square des Bénédictins	102
A/ Sensibilité archéologique	102
B/ Accès au musée archéologique	102
C/ Chantiers concomitants et voisins	103
D/ Protection des arbres classés	105
E/ Accès au chantier	109
F/ Base-vie	111
G/ Contrôle d'accès et surveillance anti-intrusion H24	113
V. Échafaudages et parapluies	115
A/ Échafaudages et plateformes de travail.....	115
B/ Tabouret métallique	117
C/ Bâchages et parapluies.....	122
VI. Conditions de chantier	131
A/ Déplombage : zonage et méthodes.....	131
B/ Sécurité incendie de chantier.....	133
C/ Incidences chantier sur le fonctionnement de la cathédrale	134

VII. Structure administrative du chantier.....	135
A/ Allotissement.....	135
B/ Phasage	135
4. Programme de travaux.....	136
I. LOT 1 : Installation de chantier / échafaudages / parapluies / charpente métallique	136
A/ Base-vie	136
B/ Clôtures et protections	137
C/ Voies de circulation et protection des sols	137
D/ Échafaudages	138
E/ Parapluies.....	141
II. LOT 2 : Grue / conducteur de grue.....	142
III. LOT 3 : Maçonnerie / pierre de taille / colonnes sèches	143
A/ Travaux préparatoires	143
B/ Travaux de sécurisation incendie (TF).....	143
C/ Travaux d'accompagnement à la restauration de la flèche	144
IV. LOT 4 : Charpente	146
A/ Fourniture des bois neufs	146
B/ Accès de chantier	146
C/ Sécurisation des combles.....	146
D/ Déplombage	147
E/ Démontage complet de la charpente.....	148
F/ Restauration en atelier.....	149
G/ Repose de la charpente	151
H/ Platelages et échelles.....	152
V. LOT 5 : Couvertures cuivre, plomb, ardoises, tuiles.....	153
A/ Accès provisoires de chantier	153
B/ Travaux de sécurisation incendie	153
C/ Paratonnerre	153
D/ Étanchéité provisoire de chantier	154
E/ Dépose des couvertures	155
F/ Restauration des cuivres.....	156
G/ Repose des couvertures.....	156
H/ Restauration et repose des moyens d'accès.....	158
VI. LOT 6 : Sculptures en cuivre et ornements métalliques	159
A/ Dépose des décors en cuivre et des ornements et éléments en fer.....	159
B/ Restauration et repose des décors en cuivre	159
C/ Restauration et repose des autres ornements métalliques	160
VII. LOT 7 : Menuiserie	161
VIII. LOT 8 : Détection incendie de chantier / suivi sécurité incendie de chantier / sûreté de chantier / électricité.....	162
A/ Éclairages et réseaux électriques	162
B/ Électricité de chantier	162
C/ Sécurité incendie	162
D/ Sûreté de chantier.....	163
E/ Communication sur chantier et avec les secours.....	163
F/ Présence humaine pour surveillance incendie et intrusion.....	163
G/ Protection contre la foudre.....	163

V. ANNEXES.....	165
Tableau des pièces de charpente et des assemblages de la flèche	archipat , François AUGER 165
Cahier des charges de fourniture des bois	archipat , François AUGER 165
Diagnostic de la flèche et ses annexes, novembre 2022	archipat 165
Notice structure de l'ouvrage et du tabouret métallique	LeBE 165
Note de stabilité au vent de l'ouvrage	LeBE 165
Note de tenue au feu de l'ouvrage.....	LeBE 165
Rapport des tests de nettoyage et de patine des cuivres de l'ouvrage	Gaëlle GIRALT 165
Rapport d'étude géotechnique G2	Géotec 165
Rapport d'analyse des aciers de la flèche	A-Corros 165
Diagnostic des arbres du square des Bénédictins	ACER 165

Cette étude a été réalisée par

archipat

Martin BACOT, architecte en chef des Monuments Historiques

Maud DUPHIL, architecte-ingénieure

Yasmine PENNETIER, architecte

Côme BAUDRY, architecte

Anouck PICARD, architecte

Intervenants extérieurs

François AUGER, architecte du patrimoine, charpentier compagnon

Eric MERLIN, ingénieur associé, Salomé RICHARD et Renaud MANZI, ingénieurs structure, LeBE

Nicolas DAVID, ingénieur fluides, ALTO

Sylvain FOURNIÉ, expert sécurité incendie, CSD

Olivier LE PELTIER, économiste de la construction, Cabinet PILTE

En collaboration avec

Jean-Albert GONNARD et Laurène GANDET, OPC de l'opération

Jean-Luc PINEAU, CSPS de l'opération

Gaëlle GIRALT, restauratrice de métaux, missionnée pour les essais sur les cuivres de la flèche

OBJET DE L'ÉTUDE

La flèche de Charles Suisse, élevée en 1894, est l'une des grandes flèches de cathédrales léguée par le XIX^e siècle. Elle culmine à 91 m du sol (62m au-dessus des arases) pour un poids total de 186 tonnes. Sa composition néogothique flamboyante, inspirée par la typologie bourguignonne, et la couleur vert-de-gris de ses couvertures et ornements en cuivre, en font un des ouvrages majeurs de l'ensemble cathédral et un élément emblématique du paysage dijonnais.

Suite au repérage de désordres majeurs dans le tabouret, une mise en sécurité d'urgence fut réalisée en septembre-octobre 2020. Nous renvoyons à notre étude de diagnostic livrée en 2022 pour la synthèse historique, le relevé graphique, photographique, descriptif et diagnostic structurel et sanitaire de l'ouvrage. La flèche est affaissée et déverse de plus de 70cm vers le nord-est. Des infiltrations passées expliquent les pourrissements et la rupture des appuis. La mise au calcul de la charpente a mis en évidence des faiblesses de dimensionnement originels et des fragilisations ultérieures lors d'une intervention en 1913, expliquant les déformations graves qui affectent la plupart des pièces de la souche. Sur les couvertures, on observe une couche d'oxydation noire des cuivres. Le parti de restauration proposé à l'issue du diagnostic vise le rétablissement de la stabilité dans le respect de la conception structurelle d'origine, en ayant recours aux renforcements nécessaires et suffisants des pièces et des assemblages pour justifier l'ouvrage par le calcul.

Le présent dossier précise le projet et la structure de l'opération pour servir de base à la consultation des entreprises qui se déroulera de décembre 2025 à janvier 2026.

: mise en sécurité des combles préalablement à la restauration de la flèche ; intervention par dépose / repose complète de l'ouvrage. Le projet de restauration de la charpente (amélioration d'assemblages et augmentation de sections) est détaillé grâce à sa mise au calcul avec les pièces exceptionnelles neuves en bois vert. Le tableau des débits, joint en annexe, renseigne toutes les pièces de charpente et tous les assemblages. L'obligation de démonter la charpente pièce par pièce nécessite l'usage d'une grue fixe et d'aires de colisage. Pour cela, les installations de chantier ont été projetées dans le square des Bénédictins, au nord de la cathédrale. Le chantier se décompose en 6 tranches de travaux.

Sont joints en annexe du présent dossier les documents graphiques et les études scientifiques et techniques :

- le tableau des débits des pièces de charpente et des assemblages (**archipat**, François AUGER)
- le cahier des charges de fourniture des bois exceptionnels et courant (**archipat**, François AUGER)
- le diagnostic de la flèche (**archipat**, 2022) et ses annexes
- les notes de calcul de structure, de stabilité au vent et de tenue au feu de l'ouvrage (LeBE)
- le rapport des essais de nettoyage et de patine des cuivres de couverture (Gaëlle GIRALT)
- l'étude géotechnique G2 (Géotec)
- le rapport d'analyse des aciers de la flèche (A-Corros)
- le diagnostic des arbres du square des Bénédictins et son complément (ACER)

RÉSUMÉ DE L'ÉTUDE

L'étude de diagnostic réalisée en 2022 a donné une connaissance approfondie de l'ouvrage de charpente et de couverture, sur les plans historique, sanitaire et structurel. Elle a permis de déterminer les interventions nécessaires à sa restauration : le remplacement des pièces de charpente hors d'usage (119 pièces, soit 23% du volume total des bois), le renforcement des pièces et assemblages sous-dimensionnés (110 assemblages améliorés sur les 1498 de la flèche), et le nettoyage en conservation des couvertures et des décors en cuivre. La dépose/repose complète de l'ouvrage avait été préconisée par l'ACMH et retenue par la CRMH. En étude d'avant-projet sommaire, les aspects opérationnels du chantier ont été détaillés en ce sens et l'identification des bois à changer, en vue des commandes anticipées, a été arrêtée. En étude d'avant-projet définitif, le parti de restauration – rétablir la stabilité structurelle de l'ouvrage dans le respect de la conception structurelle d'origine – a fait l'objet d'une argumentation développée. Le présent dossier de consultation reprend l'ensemble des études telles que arrêtées dans la demande d'autorisation de travaux déposée en juillet 2025.

Pour justifier la charpente par le calcul, il s'agit principalement d'améliorer les assemblages les plus sollicités, ceux qui se situent sur les cheminements principaux des efforts. Ces améliorations se feront par méthodes traditionnelles de charpente afin de rester fidèle à l'esprit de conception d'origine, de garder une unité de matériau et de limiter l'impact visuel des renforcements. C'est en outre la méthode la plus efficiente sur le plan structurel (contact bois/bois). Les interventions resteront pour la plupart invisibles (assemblages modifiés couverts par arasement, liaisons entre brins par prisonniers, platines métalliques de support en pied de tabouret dissimulées). Les sections des décharges et des arbalétriers seront légèrement augmentées pour permettre ces améliorations et une reprise suffisante des efforts. La zone de faiblesse la plus critique - appui au vide des arbalétriers sur les entrails diagonaux dans les angles ouest - sera renforcée par l'ajout de deux pièces en bois formant poteaux obliques. Ce dispositif, le plus évident sur le plan statique, permet d'éviter le renforcement métallique des pièces et constituera la seule modification, mineure, de la forme structurelle. Les pièces rapportées seront traitées distinctement de la charpente, rétablie dans sa peinture ton rouge de 1894, ainsi que le décor à chevrons rouges et blancs du poinçon.

Le parti de restauration des couvertures en cuivre est arrêté, sur la base des résultats peu probants des derniers essais de nettoyage et de patine artificielle réalisés en 2025. Pour offrir à terme une flèche uniformément patinée en vert-de-gris naturel, l'ensemble des cuivres anciens sera décapé. La première patine brune se reformera rapidement, avant la livraison du chantier. Puis, dans 10 à 50 ans, les cuivres de la flèche seront à nouveau verts, mais sans les oxydations noires sulfatées.

Les travaux de sécurisation incendie de l'édifice - objet de la tranche ferme avant la restauration de la flèche dans les tranches optionnelles - permettent de relever le niveau de sécurité de manière passive : mise aux normes et protection des réseaux électriques, doublage des voûtes, recoupement des combles, facilitation du déplacement des secours en parties hautes, extension des colonnes sèches existantes, création d'une colonne sèche le long du bras nord du transept, de zones de manœuvre sécurisées et de gargouilles sèches. Ces travaux devront être accompagnés des interventions suivantes, hors opération : purge des réseaux électriques de la Ville et création d'un poteau incendie supplémentaire, à moins de 60m de la nouvelle colonne sèche créée au nord de la cathédrale.

Les installations de chantier, situées dans le Square des Bénédictins au nord de la cathédrale, sont détaillées. Les prescriptions de protection des arbres classés sont décrites. Le montage de la grue fixe devra se faire par grue mobile ; les encombrements du montage sont représentés en plan et les installations de chantier sont dimensionnées en conséquence. Le tabouret métallique est décrit ; il recevra le parapluie ouvrant ; il est accompagné de passerelles de circulation des secours et de plateformes de travail en angle de la croisée. Le SSI provisoire de chantier est décrit, avec une détection conventionnelle doublée de caméras optiques et thermiques. Enfin, les protocoles plomb sont détaillés (emplacement des bungalows de décontamination et méthodologie de déplombage des pièces de charpente) et la surveillance anti-intrusion est localisée en plans. Le contour de la mission de contrôle du suivi des instructions de sécurité incendie est esquissé pour être confié à un AMO compétent. L'innocuité de la concomitance du chantier sur le site voisin du CROUS, au nord du square, a été vérifiée.

I. PRÉSENTATION

1. FICHE RÉCAPITULATIVE

Édifice

Appellation : Cathédrale (ancienne abbatale) Saint-Bénigne
Époques : XI^e siècle (rotonde) ; XIII^e et XIV^e siècles (abbatale) ; 1865 (sacristie) ; 1895 (flèche de Charles Suisse).

Localisation

Département : Côte-d'Or - 21
Commune : 21 000 Dijon
Adresse : Place Saint-Bénigne

Statut

Propriété : Etat / Ministère de la culture
Utilisation actuelle : Lieu de culte catholique
Utilisation future : Inchangée

Protection

Classement : Cathédrale Saint-Bénigne classée par liste de 1862 et JO du 18 04 1914

2. PLAN DE SITUATION



Extrait de la carte IGN
www.geoportail.gouv



Vue satellite
geoportail.gouv.fr

Plan de cadastre



Extrait du cadastre - 1/1000°
www.cadastre.gouv.fr

3. DOSSIER PHOTOGRAPHIQUE

I. VUES EXTÉRIEURES



Vue lointaine de la cathédrale et sa flèche depuis l'est, état actuel
Source : Marie-Dominique TRAPET, 2021.



Vue rapprochée de l'extrémité de l'aiguille, état actuel
Source : Archipat. Par défaut, toutes les photos suivantes sont des clichés Archipat.



Vue de la flèche en contre-plongée, état actuel



Vue rapprochée du départ de l'aiguille, état actuel



Angle sud-est des couvertures à la naissance de la flèche, fausse lucarne.

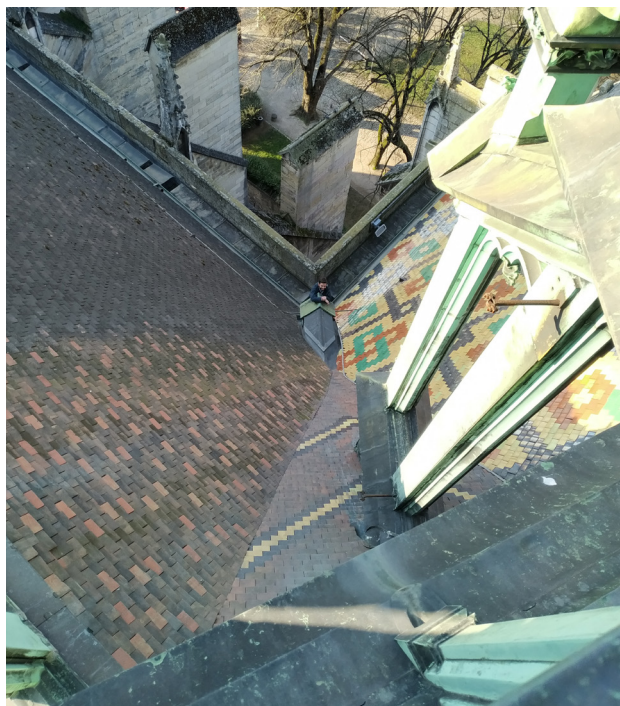


Vue rapprochée du tabouret et ses statues, état actuel

A/ COUVERTURES EN TUILES



Pan sud-ouest : détail du motif en chevron et des bandes de recouvrement en zinc sous les parties en cuivre. Feuillard sur noue sud.



Vue plongeante de la toiture tuile nord-ouest de la souche, lucarne au pied au niveau des chéneaux



Lucarne nord-ouest : devanture en cuivre, toiture en zinc, noues en plomb. Passage du feuillard à l'avant. Évacuations EP en pied.



Détail du démarrage de la noue en plomb au-dessus de la lucarne sud-ouest.



Détail de la couverture en zinc de la lucarne sud-est.

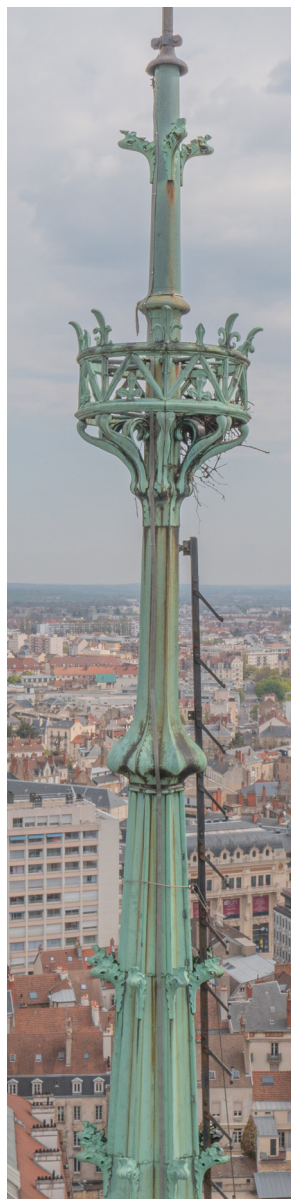
B/ COUVERTURES EN CUIVRE



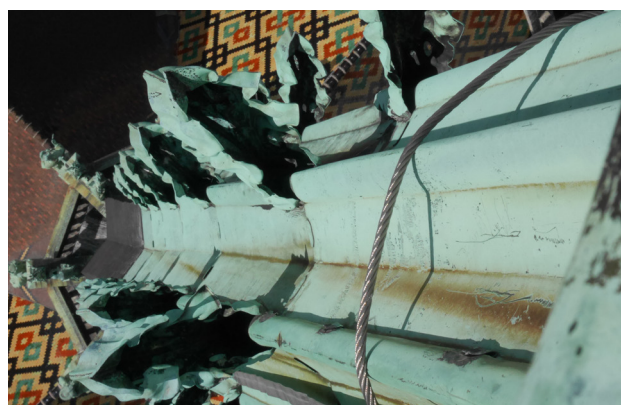
Vue générale du fût couvert de cuivre, côté oriental. Cliché pris par drone.



Vues des parties couvertes en cuivre de l'aiguille, côté sud. Cliché pris par drone.



Recouvrement en cuivre sur trois faces des écharpes et jambes de force à l'air libre dans l'étage à claire-voie.



Vue rapprochée des feuilles de cuivre de la point de l'aiguille. Boudin sur arêtes, crochets à chaque recouvrement.

c/ COUVERTURES EN PLOMB



Édicule de sortie de l'escalier couvert de cuivre.



Terrasse en plomb de l'étage à claire-voie. Remontée d'étanchéité sur le poinçon central de la flèche.



Porte d'accès à la galerie supérieure depuis la charpente de l'aiguille. Couverte de plomb.

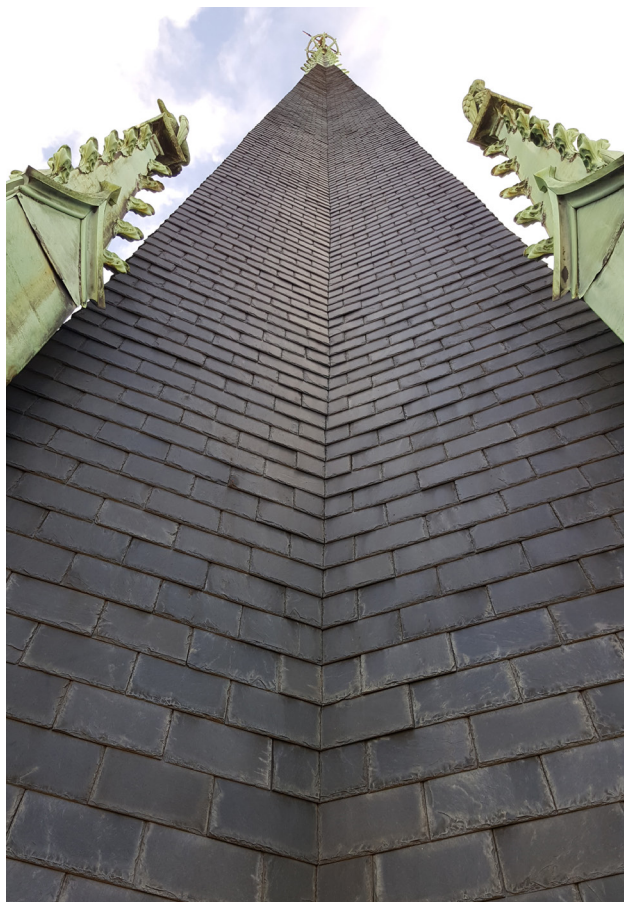


Détail du recouvrement en plomb d'un poteau de contrefort et du chéneau.



Garde-corps sur une des faces octogonales du sommet du réchaud : exutoire du chéneau de la galerie supérieure au pied du montant central. Cliché drone.

D/ COUVERTURES EN ARDOISES



Vue en contre-plongée de la couverture en ardoise de l'aiguille.



Couverture ardoise, partie basse, côté est. Démarrage de l'échelle de perroquet avec trappe d'accès. Cliché pris par drone.



Couverture ardoise, partie basse, côté nord. Cliché pris par drone.



Bandes d'arêtier en cuivre



Bandes de recouvrement en plomb

E/ MOYENS D'ACCÈS ET PARATONNERRE



Échelle d'accès à l'aiguille



Échelle à perroquet d'accès au sommet de l'aiguille



Trappe d'accès à l'échelle extérieure de l'aiguille



Repérage du cheminement du paratonnerre côté nord-ouest.



Repérage du cheminement du paratonnerre côté sud-ouest.

F/ ORNEMENTS EN CUIVRE



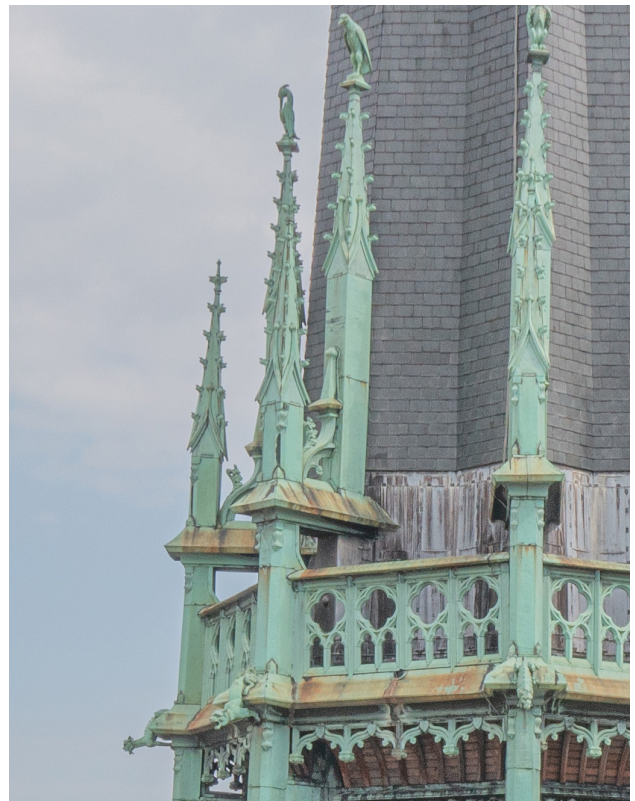
Pinacles à oiseaux. Du nord-est au sud-ouest : chouette, aigle, cygne, pélican, corbeau. Cliché pris par drone. Noter le socle de la chouette repris récemment (cuivre brun non patiné).



Pinacles à oiseaux. Du sud-ouest au nord : corbeau, coq, héron, canard. Cliché pris par drone.



Décors sur les poteaux de contreforts diagonaux et d'axe : pinacles en partie basse, pinacles alternant avec des gâbles sous les socles à feuilles de vigne des statues, redents entre poteaux. Cliché pris par drone.



Décors sur les poteaux de contreforts diagonaux et d'axe : redent trilobé entre poteaux, moulures sur chanfrein des poteaux extérieurs, amortissement entre les pinacles sommet des poteaux. Cliché pris par drone.



Redents et pinacles sous statue d'un contrefort d'axe.



Détail des moulures rapportées sur le chanfrein des poteaux de contrefort.

I. Présentation



Vue de quatre chimères, de la frise en accolade pendante sous la galerie supérieure et du garde-corps de la galerie supérieure. Cliché pris par drone.



Détail de fixation des chimères boulonnées en partie haute.



Garde-corps et baie nord-nord-est de l'étage à claire-voie. Cliché pris par drone.



Nef, vue du faîçage et liens de sous-faîçage sous les niveaux de faux-entraits.



Détail des bases et chapiteaux des colonnettes.

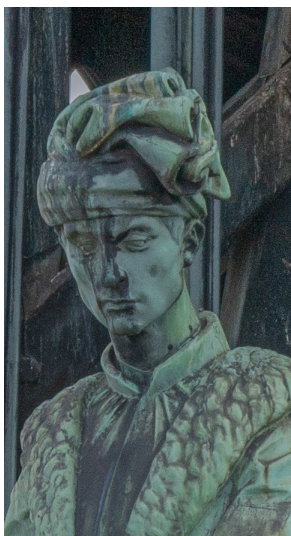


Détail de la couronne ducale. Cliché pris par drone.



Détail des crochets de la partie supérieure de l'aiguille.

G/ STATUES EN CUIVRE



Statue d'Etienne de Berbisey : tête dévissable à la base du cou.



Statue de Sainte Chantal : capot en cours de dévissage pour endoscopie.



Statue SO d'Alix de Vergy : Anneau inférieur. Cliché pris par endoscopie du 05/09/2022, ent. Trav'haut.



Statue NE de Jeanne de Chantal : Enfourchement sur le poteau. Cliché pris par endoscopie du 05/09/2022, ent. Trav'haut.



Sommet de l'aiguille : croix surmontée du coq. Cliché pris par drone.



Détail des chimères. Cliché pris par drone.



Statues en cuivre, de gauche à droite : Étienne de Berbissey, Eugène III, Hugues d'Arc, Alix de Vergy. Cliché pris par drone.

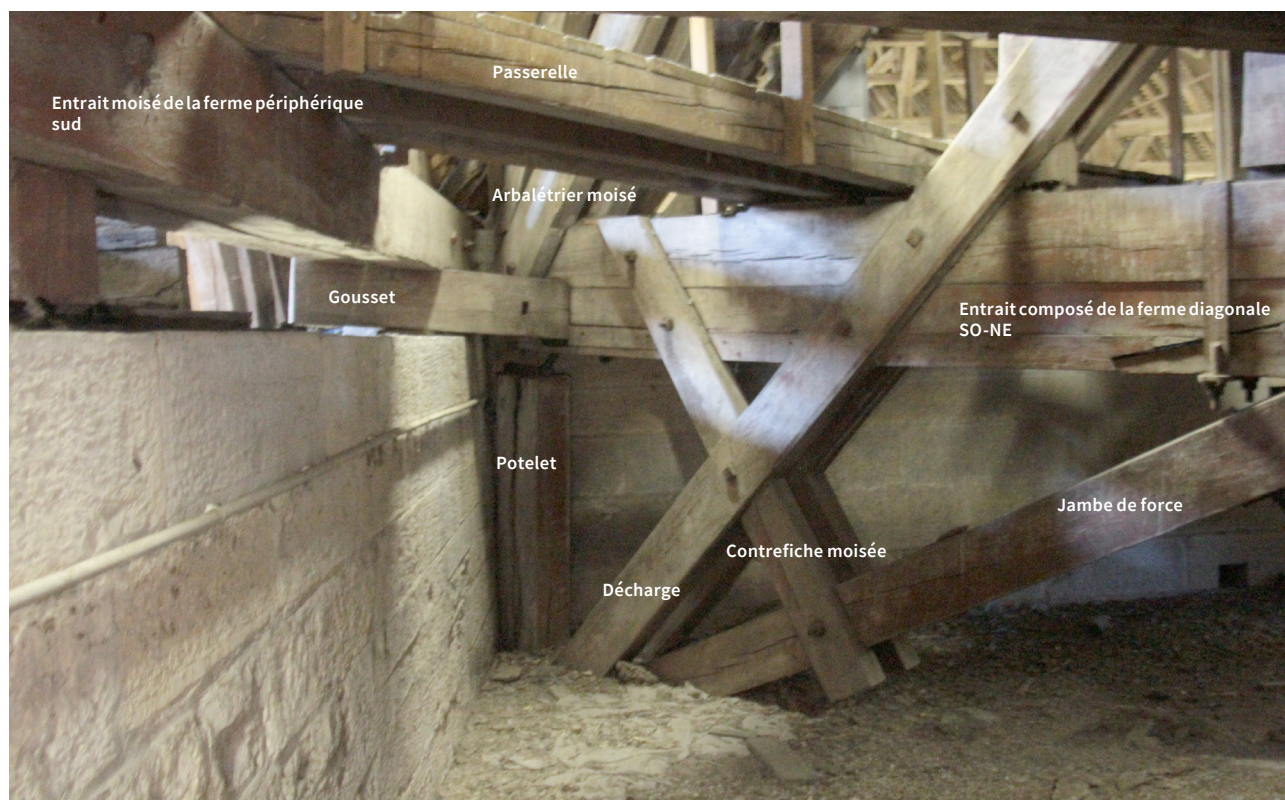


Statues en cuivre, de gauche à droite : Philippe le Bon, Sainte Paschasie, Grégoire de Langres, Sainte Chantal. Cliché pris par drone.

II. VUES INTÉRIEURES



Vue générale du tabouret et de la souche.



Vue générale du tabouret à l'angle SE (avant renforcements et nettoyage de l'extrados).

I. Présentation



Vue générale du fût, en contre-plongée depuis l'angle NO.



Charpente de l'aiguille vue depuis l'enrayure 6.



Vue de la ferme périphérique sud, côté est. Au premier plan, première ferme du bras sud.



Vue de l'enrayure 1 en-bas et de l'enrayure 2 en-haut, poinçon en arrière-plan, doubles-poteaux de fût en premier plan. L'ensemble des pièces est recouverte de peinture rouge au minium de plomb. Les assemblages sont boulonnés.

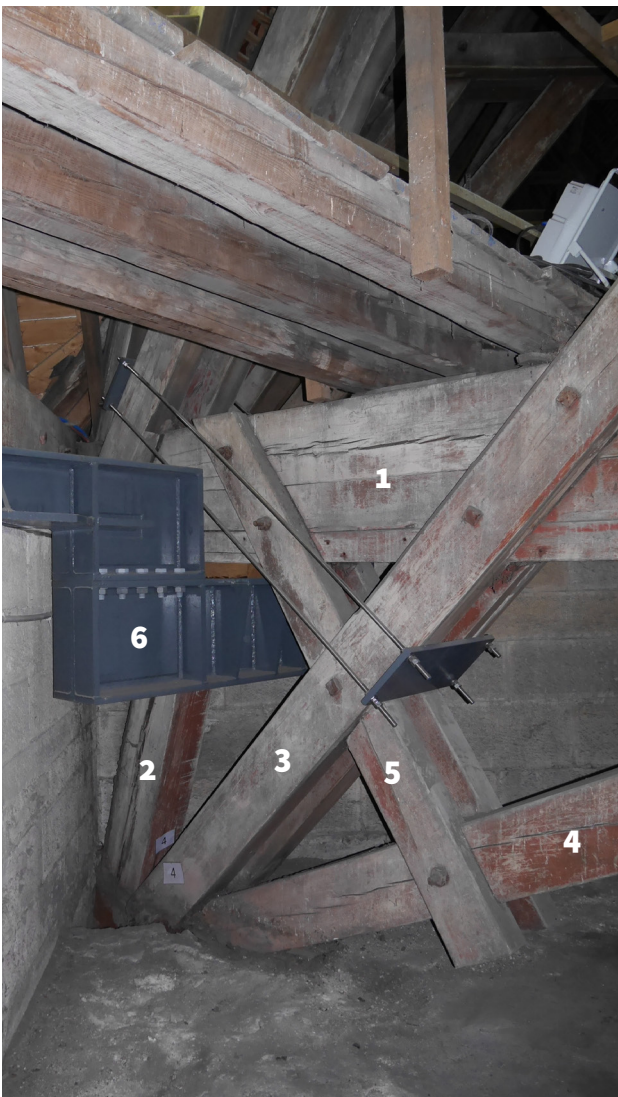
A/ TABOURET



Mur bahut en pierre de taille, avec lumière d'accès aux clés de serrage des tirants périphériques.



Lumière dans le mur bahut sur une clé de serrage du chaînage de la maçonnerie.



Pied de tabouret sud-ouest : 1/entrait diagonal, 2/poteau cornier, 3/décharge moisée, 4/jambe de force, 5/bride moisée, 6/gousset métallique de renfort.



A/ Gousset d'angle entre les entrails des fermes périphériques assemblé au brin supérieur de la poutre-entrait diagonale.



B/ Corbeau nord-ouest dégagé en octobre 2022, initialement appui du tabouret.

I. Présentation



Assemblage des entrails et naissance du fût octogonal de la souche, depuis le sud. A gauche, moise en bois autour des demi-pan de bois d'axe rapportée en 1913. A droite, moise métallique de renforcement de l'entrait SE-NO, également rapportée en 1913.



Jonction des entrails diagonaux : brin supérieur NO-SE continu, tenon boulonné sur NE-SO, et inversement sur le brin inférieur.



Poutre-entrait diagonale nord-ouest, composée de quatre brins bridés, de haut en bas : brin métallique de réparation, brin supérieur en bois, brin inférieur en bois, brin de butée des jambes de force.



A/ Gousset ouest entre les poutres-entrails diagonales.

B/ FERMES DIAGONALES



Poinçon au niveau de l'enrayure 2.



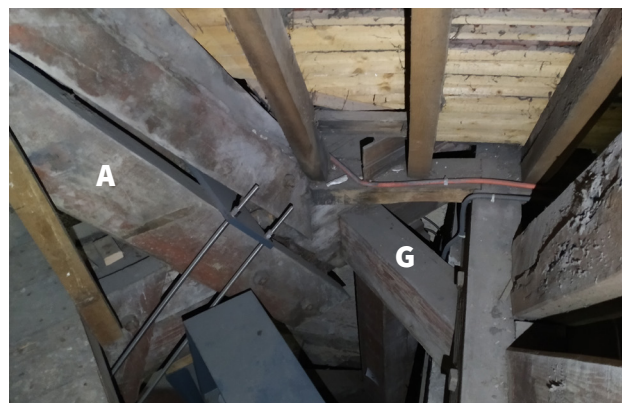
Enture en croix du poinçon entre les enrayures 3 et 4.



Ferme diagonale nord-ouest entre les enrayures 1 et 2. O/ Double-poteau de fût, poteaux de contrefort 1 et 2. A/ Poutre-entrait - B/ Entrait moisé



A/ Arbalétrier nord-ouest appuyé sur la poutre-entrait diagonale, DERRIÈRE le gousset G.



A/ Arbalétrier nord-est appuyé sur la poutre-entrait diagonale, DEVANT le gousset G.

C/ FERMES PÉRIPHÉRIQUES



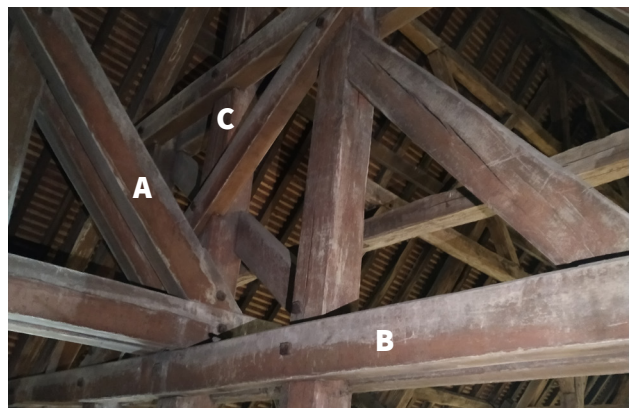
Ferme périphérique nord : liaison avec le demi-pan-de-bois d'axe.



Appui de l'entrait de la ferme périphérique nord sur les goussets d'angle. Le métallique est celui installé en 2020 en renfort d'urgence.



Ferme périphérique est, derrière la première ferme de la nef en premier plan.



Ferme périphérique ouest : A/ écharpe moisée venant se poser sur B/ le premier entrait retroussé de la ferme périphérique. C/ Poinçon de la ferme périphérique appartenant aussi au pan-de-bois d'axe.



E/ Entrait de la ferme périphérique nord reposant sur un dé en pierre et sur le gousset de l'entrait diagonal nord-est.
Arrière-plan : 1/ chevron de noue - 2/ arbalétrier moisé diagonal

D/ FAÎTAGES PANS DE BOIS



Demi-pan de bois nord, entre enrayures 2 et 3.



Demi-pan de bois nord : liaison avec la ferme périphérique nord, partie haute.



Demi-pan de bois nord, entre enrayures 1 et 2. De gauche à droite : double-poteau de fût, 1er poteau de contrefort, 2ème poteau de contrefort.



Demi-pan de bois nord : liaison avec la ferme périphérique nord, partie basse.

E/ NOUES ET LUCARNES



A/ Noe NNE, B/ contrefiche de noe, C/ coyer de noe.
D/ Arbalétrier



A/ Chevron de noe SSO contrebuté par une contrefiche de noe B et un coyer de noe C.
D/ Arbalétrier SO



Pan de la noe SSO en liaison avec le demi-pan-de-bois d'axe sud.

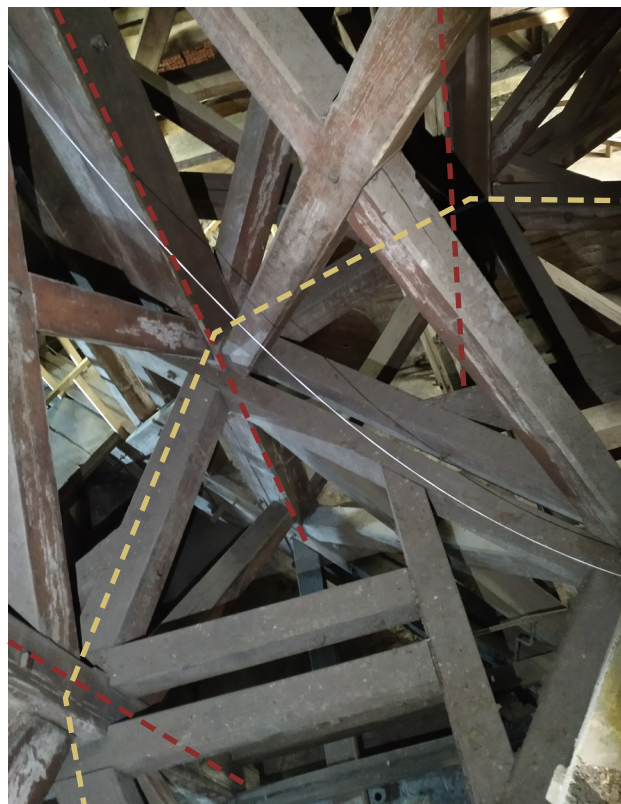


Vue intérieure de la lucarne nord-ouest. About d'entrait diagonal en-bas.

F/ FÛT OCTOGONAL



Vue de la face sud-sud-ouest du fût, entre les enrayures 1 et 2.
Repérage des doubles-poteaux formant le fût.



Poteaux de fût et croix de St-André formant le fût entre les enrayures 2 et 3.
Repérage de l'octogone en jaune et des poteaux en rouge.



Poteau de fût nord-ouest encadré de croix de St-André formant le fût entre les enrayures 3 et 4.



Poteaux de fût et croix de St-André formant le fût entre les enrayures 3 et 4.
Repérage de l'octogone en jaune et des poteaux en rouge.

G/ AIGUILLE



Assemblage des écharpes et des jambes de force sur le poinçon, sous l'enrayure 5, dans le réchaud. Traces de peinture en chevron sur le poinçon.



Nœud d'assemblage autour du poinçon, au niveau de l'enrayure 5.



Litteauage périphérique de l'aiguille au niveau de l'enrayure 5, en forme d'étoile.



Contreventement des facettes de l'aiguille, au niveau de l'enrayure 6



Vue de la charpente de l'aiguille depuis l'enrayure 6. Au premier plan, les jambes de force et contrefiches assemblées au poinçon.



Superposition des enrayures du niveau 7, avec traversée des contrefiches et du poinçon.



Contreventement des facettes de l'aiguille, au niveau de l'enrayure 8. En arrière-plan, l'enture d'un arêtier.



Assemblage des jambes de force et contrefiches sur le poinçon central, au-dessus de l'enrayure 9.

H/ MOYENS D'ACCÈS MENUISÉS



Passerelles d'accès au niveau de l'enrayure 1 : sur l'angle sud-ouest et accès à l'escalier.



Trappe d'accès à l'aiguille depuis l'étage ajouré : un treillis soudé levable.



Échelle de meunier entre les enrayures 6 et 7.



Échelle de meunier entre les enrayures 6 et 7. En arrière-plan, l'échelle entre les enrayures 8 et 9.



Porte d'accès à la galerie supérieure au niveau de l'enrayure 5.



Échelle de meunier entre les enrayures 5 et 6.

I/ L'ESCALIER DE LA SOUCHE



Escalier : boule de rampe sculptée en feuille de chou



Assemblage du limon à crochet. Nœud dans la coupe à crochet, fente à l'axe.



Démarrage de l'escalier en bois



Assemblage du limon à crochet, serré par tige filetée.



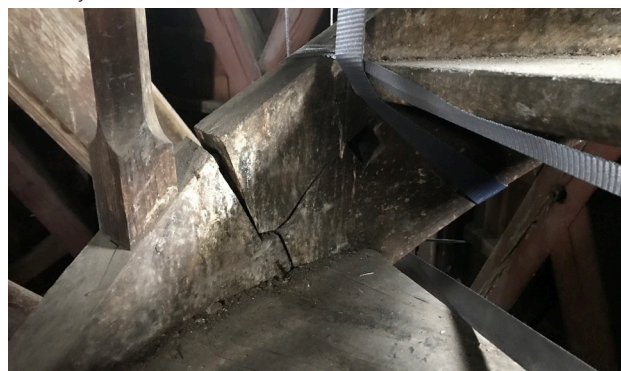
Interruption du limon au niveau du passage d'une enrayure



Assemblage du limon au droit d'une marche. Interruption du limon au niveau de l'enrayure.



Main courante en tilleul, sur fer plat



Assemblage du limon ouvert, avec nœud dans une coupe.

II. ÉTAT DES LIEUX

1. DOCUMENTS GRAPHIQUES

Liste des documents présents dans le dossier de plans état des lieux séparé.

Plans généraux - zones d'intervention

A000EL	Plan de masse du site	Ech : 1/500
A300EL	Coupe transversale sur le site	Ech : 1/500
A120EL	Plan de RDC	Ech : 1/350
A130EL	Plan de triforium	Ech : 1/350
A140EL	Plan de la galerie haute	Ech : 1/350
A150EL	Plan de comble	Ech : 1/350
A160EL	Plan de toiture	Ech : 1/350
A210EL	Façade ouest	Ech : 1/250
A220EL	Façade sud	Ech : 1/250
A230EL	Façade nord	Ech : 1/250
A310EL	Coupe longitudinale	Ech : 1/250
A320EL	Coupe transversale sur la nef	Ech : 1/250
A330EL	Coupe transversale sur le transept	Ech : 1/250
A340EL	Coupe transversale sur le chœur	Ech : 1/250

Plans de la flèche

A151EL	Plan du tabouret	Ech : 1/100
A152EL	Plan de la croisée	Ech : 1/100
A153EL	Plan des galeries	Ech : 1/100
A201EL	Élévation sud	Ech : 1/100
A202EL	Élévation est	Ech : 1/100
A203EL	Élévation nord	Ech : 1/100
A204EL	Élévation ouest	Ech : 1/100
A301EL	Coupe diagonale NO-SE	Ech : 1/100
A302EL	Coupe diagonale NE-SO	Ech : 1/100
A303EL	Coupe d'axe nord-sud	Ech : 1/100
A304EL	Coupe d'axe ouest-est	Ech : 1/100
A401EL	Lucarne	Ech : 1/20
A402EL	Contrefort de faîtage ouest	Ech : 1/50
A403EL	Contrefort diagonal sud-ouest	Ech : 1/50
A411EL	Armature statue	Ech : 1/10
A420EL	Escalier	Ech : 1/50

2. SYNTHÈSE HISTORIQUE, ANALYSE PATRIMONIALE, DESCRIPTIF ARCHITECTURAL ET TECHNIQUE

Se référer à l'étude de diagnostic, parties I et II.

III. DIAGNOSTIC

1. DOCUMENTS GRAPHIQUES

Liste des documents présents dans le dossier de plans diagnostic séparé.

A152DIA	Plan du tabouret	Ech : 1/100
A161DIA	Plan enrayure 1	Ech : 1/100
A162DIA	Plan enrayure 2	Ech : 1/100
A163DIA	Plan enrayure 3	Ech : 1/100
A164DIA	Plan enrayures 4 et 5	Ech : 1/100
A301DIA	Coupe d'axe ouest-est	Ech : 1/100
A302DIA	Coupe d'axe nord-sud	Ech : 1/100
A303DIA	Coupe diagonale SO-NE	Ech : 1/100
A304DIA	Coupe diagonale NO-SE	Ech : 1/100
A305DIA	Élévation sud	Ech : 1/100
A306DIA	Élévation est	Ech : 1/100
A307DIA	Élévation nord	Ech : 1/100
A308DIA	Élévation ouest	Ech : 1/100
A309DIA	Facettes du fût côté sud	Ech : 1/100
A310DIA	Facettes du fût côté nord	Ech : 1/100
A402DIA	Escalier de la souche	Ech : 1/50

2. DIAGNOSTICSANITAIREETSTRUCTURELDELACHARPENTE ET DES COUVERTURES

Se référer à l'étude de diagnostic, partie III.

IV. PROJET

1. DOCUMENTS GRAPHIQUES

Liste des documents présents dans les dossiers de plans projet, charpente et chantier séparés.

A/ PLANS PROJET

Plans généraux

A120PR	Plan de RDC	Ech : 1/350
A130PR	Plan de triforium	Ech : 1/350
A140PR	Plan de la galerie haute	Ech : 1/350
A150PR	Plan de comble	Ech : 1/350
A160PR	Plan de toiture	Ech : 1/350
A210PR	Façade ouest	Ech : 1/250
A220PR	Façade sud	Ech : 1/250
A230PR	Façade nord	Ech : 1/250
A310PR	Coupe longitudinale	Ech : 1/250
A320PR	Coupe transversale sur la nef	Ech : 1/250
A330PR	Coupe transversale sur le transept	Ech : 1/250
A340PR	Coupe transversale sur le chœur	Ech : 1/250

Plans de sécurisation incendie

A401PR	Cloison CF comble	Ech : 1/100
A402PR	Exutoire de la nef	Ech : 1/50
A403PR	Main courante tours d'escalier	Ech : 1/20
A404PR	Passerelles grands combles	Ech : 1/25
A405PR	Passerelles croisée	Ech : 1/25
A406PR	Passerelles combles bas-côtés	Ech : 1/25
A407PR	Portes à déverrouiller en parties hautes	Ech : 1/500
A408PR	Paratonnerre	Ech : 1/350
A409PR	Descente du feuillard à travers le chéneau	Ech : 1/20
A410PR	Colonnes sèches du transept	Ech : 1/50
A411PR	Pares-gravois en pied des toitures des tours	Ech : 1/100

Plans de la flèche

A151PR	Plan du tabouret	Ech : 1/100
A152PR	Plan de la croisée	Ech : 1/100
A153PR	Plan des galeries	Ech : 1/100
A201PR	Élévation sud	Ech : 1/100
A202PR	Élévation est	Ech : 1/100
A203PR	Élévation nord	Ech : 1/100
A204PR	Élévation ouest	Ech : 1/100
A301PR	Coupe diagonale NO-SE	Ech : 1/100
A302PR	Coupe diagonale NE-SO	Ech : 1/100
A303PR	Coupe d'axe nord-sud	Ech : 1/100
A304PR	Coupe d'axe ouest-est	Ech : 1/100

A412PR	Recouplement CF enrayure 4	Ech : 1/50
A413PR	Recouplement CF enrayure 5	Ech : 1/50
A414PR	Amélioration des assemblages en cuivre - Principes	sans échelle
A415PR	Raccord cuivre-tuiles autour des poteaux de contrefort	sans échelle
A416PR	Pieds de colonnettes des baies de l'étage à claire-voie	sans échelle
A417PR	Lucarne	Ech : 1/20
A418PR	Armature statue	Ech : 1/10

Vues d'insertion

A450PR	Étapes de travaux	sans échelle
A451PR	Évolution des cuivres	sans échelle

B/ PLANS DE CHARPENTE**Inventaire des pièces de charpente**

A500EL	Plan de repérage des coupes	Ech : 1/100
A501EL	Ferme diagonale NO-SE	Ech : 1/100
A502EL	Ferme diagonale NE-SO	Ech : 1/100
A503EL	Ferme d'axe nord-sud	Ech : 1/100
A504EL	Ferme d'axe ouest-est	Ech : 1/100
A505EL	Ferme périphériques sud et est	Ech : 1/100
A506EL	Ferme périphériques nord et ouest	Ech : 1/100
A507EL	Herse de fût - repérage	Ech : 1/100
A508EL	Herses de fût	Ech : 1/100
A509EL	Élévation de noue - repérage	Ech : 1/100
A510EL	Élévations des noues	Ech : 1/100
A511EL	Ferme diagonale NO-SE - Aiguille	Ech : 1/100
A512EL	Ferme diagonale NE-SO - Aiguille	Ech : 1/100
A513EL	Ferme d'axe nord-sud - Aiguille	Ech : 1/100
A514EL	Ferme d'axe ouest-est - Aiguille	Ech : 1/100
A515EL	Facettes de l'aiguille - côté sud	Ech : 1/100
A601EL	Enrayure 1	Ech : 1/100
A602EL	Enrayure 2	Ech : 1/100
A603EL	Enrayure 3	Ech : 1/100
A604EL	Enrayure 4	Ech : 1/100
A605EL	Enrayures 5 à 12 de l'aiguille	Ech : 1/100

Typologie des assemblages

A000AS	Niveaux de complexité des assemblages	sans échelle
A001AS	Types d'assemblages	sans échelle
A002AS	Types d'assemblages	sans échelle
A003AS	Types d'assemblages	sans échelle

Inventaire des assemblages

A501AS	Ferme diagonale	Ech : 1/100
A503AS	Faîtage	Ech : 1/100
A505AS	Ferme périphérique, herse et noue	Ech : 1/100
A511AS	Ferme diagonale - Aiguille	Ech : 1/100
A513AS	Ferme d'axe - Aiguille	Ech : 1/100
A601AS	Enrayure 1	Ech : 1/100
A602AS	Enrayure 2	Ech : 1/100

A603AS	Enrayure 3	Ech : 1/100
A604AS	Enrayure 4	Ech : 1/100
A605AS	Enrayures 5 à 12 de l'aiguille	Ech : 1/100

Détails des assemblages améliorés

A701AS	Nœud d'assemblages n°1 : tête d'arbalétriers	sans échelle
A702AS	Nœuds d'assemblages n°2 et 4 : pieds d'arbalétriers et décharges	sans échelle
A703AS	Nœud d'assemblages n°3 : tête des décharges	sans échelle
A705AS	Nœud d'assemblages n°5 : pied de tabouret	sans échelle
A706AS	Nœud d'assemblages n°6 : tête des décharges des faîtages	sans échelle
A707AS	Nœud d'assemblages n°7 : pied des décharges des faîtages	sans échelle
A708AS	Nœud d'assemblages sur corbeau	sans échelle

Épures d'origine / épures de projet

A801EP	Fermes diagonales	Ech : 1/200
A803EP	Faîtages	Ech : 1/200
A805EP	Fermes périphériques	Ech : 1/200
A811EP	Fermes diagonales : comparaison épures / état des lieux	Ech : 1/200
A813EP	Faîtages : comparaison épures / état des lieux	Ech : 1/200
A815EP	Fermes périphériques : comparaison épures / état des lieux	Ech : 1/200

C/ PLANS DE CHANTIER**Plans d'installation de chantier**

A000CH	Zones de chantier	Ech : 1/1000
A100CH	Plan d'installation de chantier - sécurisation incendie	Ech : 1/500
A101CH	Plan de montage de la grue	Ech : 1/500
A102CH	Plan d'installation de chantier - restauration de la flèche	Ech : 1/500
A300CH	Coupe d'installation de chantier - sécurisation incendie	Ech : 1/500
A301CH	Coupe d'installation de chantier - restauration de la flèche	Ech : 1/500
A103CH	Plan d'installation de chantier dans le square	Ech : 1/200

Plans d'échafaudages

A200CH	Échafaudages : élévations et plans	Ech : 1/500
A120CH	Plan de RDC de chantier	Ech : 1/350
A121CH	Plan de RDJ de chantier	Ech : 1/350
A150CH	Plan de comble de chantier	Ech : 1/350
A160CH	Plan de toiture de chantier	Ech : 1/350

Plans du tabouret

A151CH	Plan de la croisée - niveau chéneaux	Ech : 1/150
A152CH	Plan de la croisée - niveau mains courantes	Ech : 1/150
A153CH	Plan de la croisée - niveau plateformes d'angle	Ech : 1/150
A161CH	Plan de la croisée - niveau tabouret	Ech : 1/150
A400CH	Détails du tabouret	Ech : 1/20
A401CH	Face sud du tabouret	Ech : 1/150
A402CH	Face est du tabouret	Ech : 1/150
A403CH	Face nord du tabouret	Ech : 1/150

A404CH Face ouest du tabouret Ech : 1/150

Plans du parapluie

A162CH Plan de parapluie fermé Ech : 1/150

A163CH Plan de parapluie ouvert Ech : 1/150

A312CH Face nord du parapluie fermé Ech : 1/150

A313CH Face nord du parapluie ouvert Ech : 1/150

A314CH Face est du parapluie Ech : 1/150

A103CH Plan de comble sous parapluie - T03 Ech : 1/150

Zones à risque incendie durant le chantier

A000CH Zones à risques - TF Ech : 1/350

A000CH Zones à risques - TF - Plans des combles Ech : 1/350

A001CH Zones à risques - T01 Ech : 1/350

A002CH Zones à risques - T02 Ech : 1/350

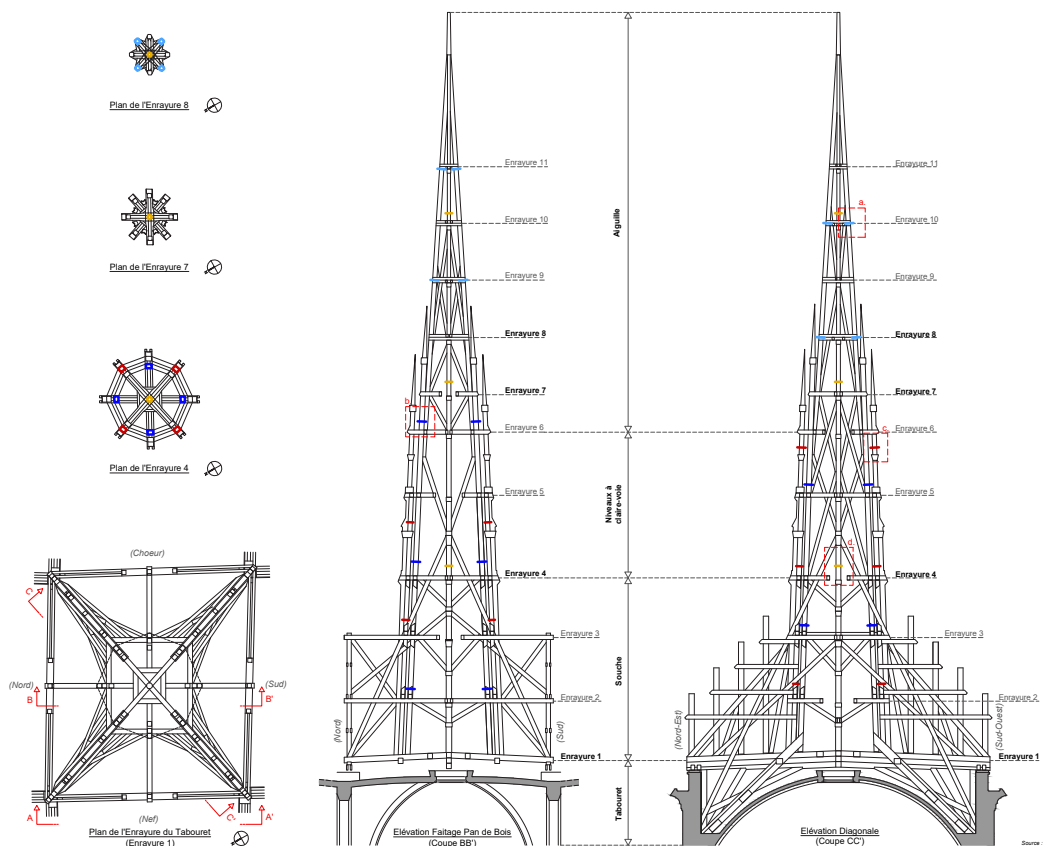
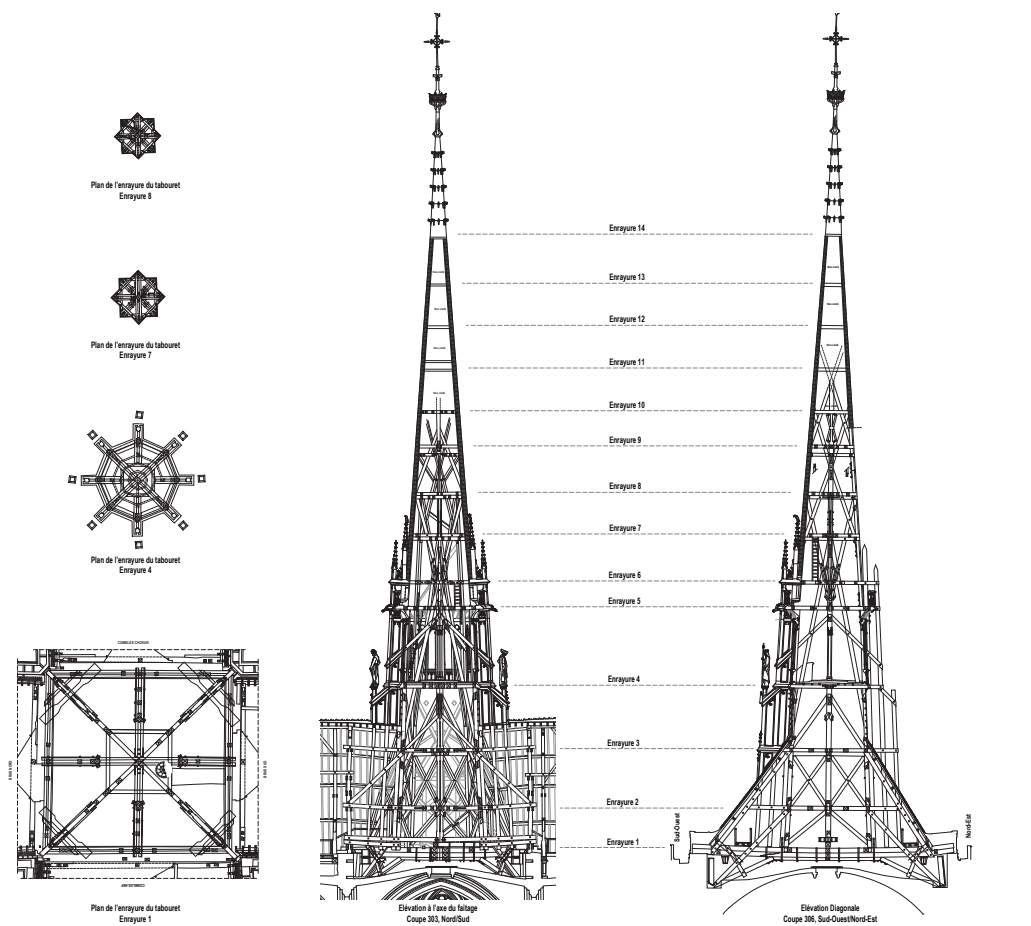
A003CH Zones à risques - T03 Ech : 1/350

A004CH Zones à risques - T04 Ech : 1/350

A005CH Zones à risques - T05 Ech : 1/350

Ordre de montage de la charpente

A550PR Ordre de montage de la charpente Ech : 1/200



Plans généraux de la flèche de Dijon (en-haut, dessins Martin Bacot ACMH)
et de Paris (en-bas, dessin Philippe Villeneuve, Pascal Prunet, Rémi Fromont, ACMH, diagnostic décembre 2020)

2. PARTI D'INTERVENTION

Le parti d'intervention en restauration fondamentale d'une structure en bois aussi exceptionnelle par sa typologie, sa taille et sa valeur technique et historique, a été mûri à l'aune des principaux textes doctrinaux (charte de Venise, document de Nara) et notamment les *Principes à suivre pour la conservation des structures historiques en bois* adoptés par l'ICOMOS en 1999.

I. RESTAURER LA STRUCTURE

A/ CONSERVER ET RÉTABLIR LES DISPOSITIONS ORIGINELLES DE CHARLES SUISSE

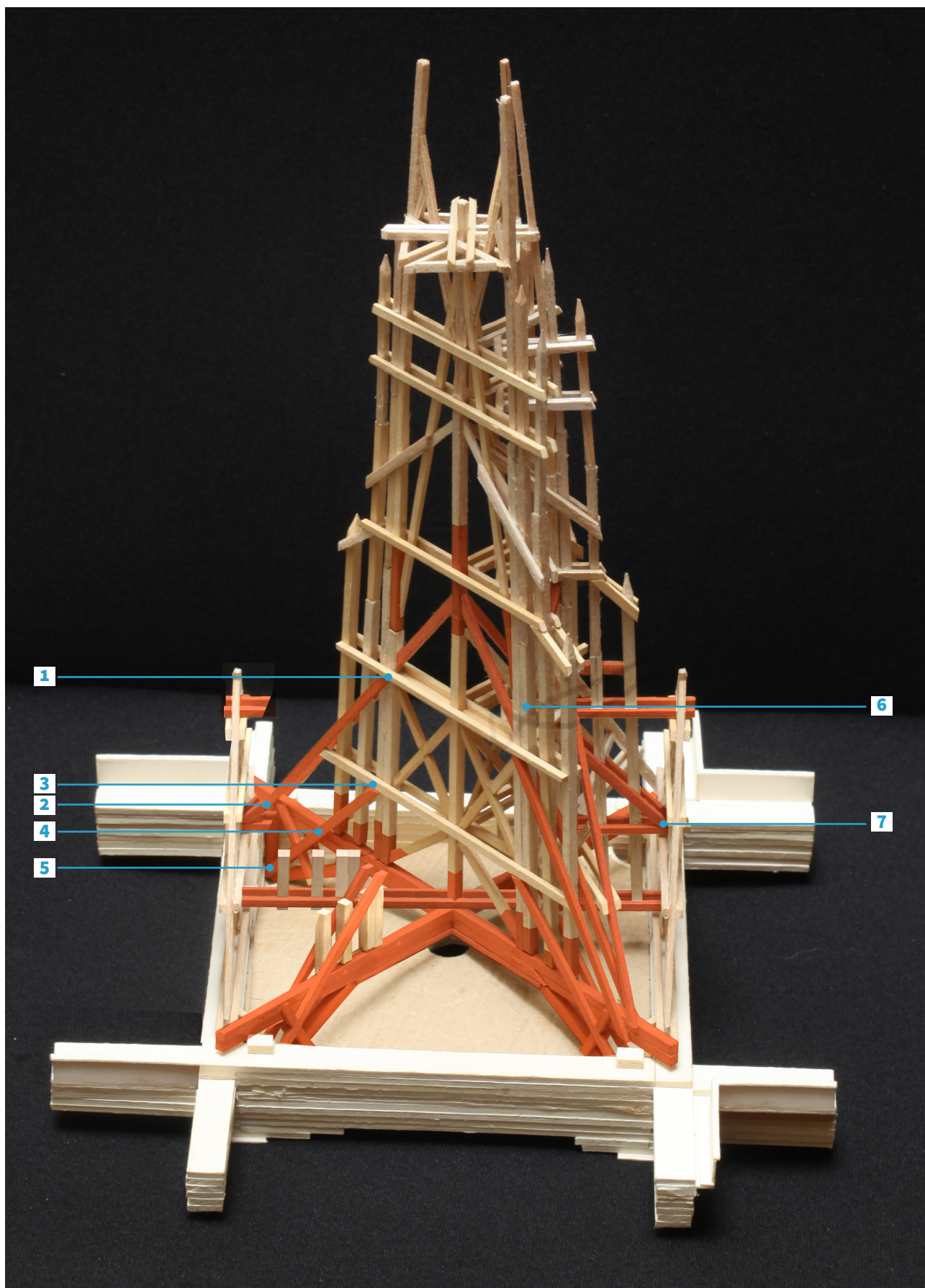
La restauration de la flèche de Saint-Bénigne de Dijon visera au rétablissement des conditions de stabilité de l'ouvrage en respectant le plus possible sa conception structurelle, c'est-à-dire sa forme, ses caractéristiques techniques de débit et d'assemblage, et un schéma statique (répartition des efforts dans la structure) adapté à ces caractéristiques.

La flèche de Dijon appartient au corpus très restreint de grandes flèches de charpente de comble, avec les cathédrales de Paris et d'Orléans. La singularité de la flèche de Charles Suisse se révèle par comparaison avec celle de Paris conçue par Viollet-le-Duc, qui la précède de trente ans, et qui a constitué un archétype incontournable, tant par sa réussite technique et esthétique que par l'influence de son auteur. Les deux flèches présentent des dimensions similaires et un schéma statique général identique, où prévalent les fermes diagonales conduisant les principales descentes de charges vers les angles. En revanche, Notre-Dame présente une masse de bois de 247T, soit plus de deux fois celle de Saint-Bénigne - 115T. Notre-Dame de Paris est une charpente lourde offrant de multiples contreventements, qui s'inscrit dans une conception empirique et hyperstatiques proche de l'esprit médiéval, là où celle de Charles Suisse est particulièrement légère et cherche l'optimisation de la matière et des cheminements des efforts. Conçue trente ans plus tard, la flèche de Dijon témoigne d'un contexte scientifique et technologique qui a vu le triomphe des sciences de l'ingénieur appliquées à la charpente en fer de conception isostatique, où la structure tend vers une épure légère. Ainsi le caractère léger de la flèche de Charles Suisse fait-il partie intégrante de sa valeur technique et architecturale, quand bien même cette conception, par sa hardiesse, accroît la gravité de toute défaillance en permettant mal le cheminement alternatif des efforts, ce que l'histoire a malheureusement démontré.

En dépit du renouvellement important et nécessaire des bois dégradés de la totalité du tabouret (soit 25% des bois de la flèche), le maintien ou le rétablissement des principes structurels d'origine s'impose pour respecter la valeur patrimoniale de l'ouvrage, à portée historique et technique. De ce point de vue, les ajouts et les modifications de la réparation de 1913, défectueuses, doivent être déposés au profit du rétablissement des dispositions d'origine (entrants diagonaux et axiaux).

B/ UN RENFORCEMENT NÉCESSAIRE DE LA STRUCTURE DU TABOURET

La valeur patrimoniale de la structure d'origine ne présume pas toutefois de défauts structurels de conception. En effet la mise au calcul de l'ouvrage dans son état d'origine restitué ne permet pas de justifier la stabilité de cette conception d'origine, en raison de la faiblesse de plusieurs assemblages majeurs et de sections insuffisantes des entrants diagonaux sollicités excessivement à la flexion. L'ouvrage a connu très tôt des désordres graves qui ne permettent pas non plus de démontrer empiriquement sa stabilité dans le temps long. Le rétablissement strict de l'état d'origine n'est donc pas possible, **faute de pouvoir le justifier par le calcul ou par l'expérience. La structure nécessite d'être renforcée au niveau du tabouret et de la souche.** Le respect de la conception structurelle initiale conduit à éviter d'intervenir par addition de nouvelles pièces en bois - ce qui conduirait à modifier la structure de la flèche. Elle conduit également à éviter le recours à des appoints structurels rapportés (renforts ou exosquelette en métal) qui ne pourraient qu'altérer la lisibilité de la structure initiale. Le renforcement se concentrera donc sur certains assemblages, liaisons de pièces jumelées, et surfaces d'appui entre la charpente et la maçonnerie, qui travaillent aujourd'hui au-delà des taux admissibles mais sans modifier l'apparence de la structure. La stratégie d'intervention pour ces renforcements sera présentée en premier lieu. Ces renforcements ciblés auront pour conséquence une redistribution plus favorable des efforts dans la structure, c'est-à-dire une meilleure adaptation du schéma statique à la structure d'origine, qui sera développée ensuite.



Maquette écorchée de la flèche : en orange, les pièces à changer ; en bleu, les assemblages à améliorer.

C/ RENFORCER LES POINTS FAIBLES PAR MÉTHODES TRADITIONNELLES DE CHARPENTE

Intervention sur les assemblages

L'intervention sur les assemblages défaillants se fera par **modification des formes de contact bois/bois à l'intérieur des assemblages**, afin d'augmenter les surfaces de contact et donc d'augmenter les transferts de charges d'une pièce à l'autre, dans des directions privilégiées choisies qui permettent à chaque pièce de jouer pleinement son rôle. Cette méthode nécessite l'**augmentation des sections des pièces** dont les assemblages sont modifiés (**arbalétriers et décharges**), ces pièces étant prévues changées par ailleurs en raison de leur déformation.

Par ce parti d'intervention, la **conception d'origine défaillante** aux points identifiés est **modifiée**, avec toutefois un **impact limité sur l'aspect extérieur des pièces de charpente** : légère augmentation des sections de seulement deux types de pièces, et modifications d'assemblages imperceptibles à la surface des pièces. Par contre, le **savoir-faire charpentier traditionnel est respecté** ; en cela, cette méthode est fidèle à l'esprit de conception d'origine, suivant du reste les préconisations de l'ICOMOS.

Les assemblages concernés par ces améliorations sont les suivants :

- Assemblages des arbalétriers moisés (fermes diagonales), en tête (1), en pied (2)
- Assemblages des décharges moisées (fermes diagonales), en tête(3), au milieu (4), en pied (5)
- Assemblages en pied de tabouret (5)
- Assemblages des écharpes moisées (fermes d'axe), en tête (6) et en pied (7)

Les modifications d'assemblage seront couvertes pour rester invisibles extérieurement : les pénétrations d'une pièce dans l'autre sont dissimulées par des arasements.

Une approche alternative de consolidation consistant à ne pas modifier les assemblages mais à la renforcer par des appoints métalliques (platines et broches boulonnées), aurait présenté l'intérêt de respecter la typologie d'assemblage d'origine. Toutefois, ce type de renforcement aurait eu des impacts visuels très importants, et surtout, elle n'est ici pas praticable en raison de l'ordre de grandeur des efforts (un boulon reprend jusqu'à 2T, quand les efforts dans les assemblages les plus sollicités de la flèche peuvent atteindre 30 à 50T sur des surfaces très réduites, que l'on ne peut équiper de la densité de métal nécessaire). C'est ainsi que pour la restitution de la flèche de Notre-Dame de Paris, les assemblages faibles qui ne passaient pas au calcul n'ont pas été restitués à l'identique mais améliorés, comme proposé ici, par la méthode charpentière.

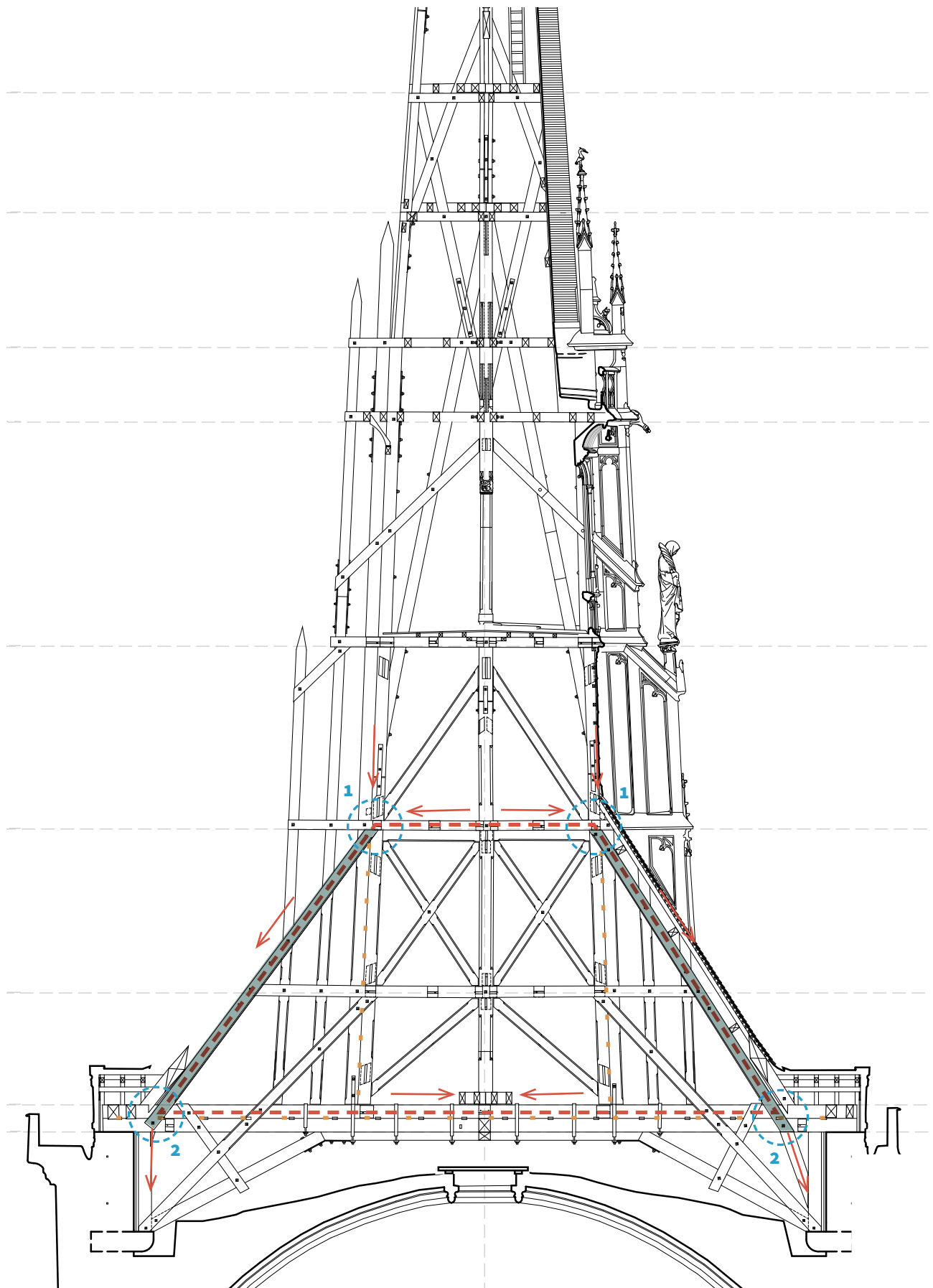
Intervention sur les pièces jumellées

L'amélioration du transfert des efforts, limité par les pièces amaigries par les assemblages, nécessite également de constituer des liaisons mécaniques entre des pièces jumelées qui sont aujourd'hui liaisonnées par boulonnage (doubles poteaux corniers) ou par cerces (brins d'entrants diagonaux), d'effet insuffisant.

La création à intervalle réguliers d'entailles rectangulaires occupées par des prisonniers (couples de coins en chêne contrariés) permettra de faire travailler intimement ces pièces jumelés. Ce type de renforcement traditionnel présente l'avantage d'être visitable et peut être resserré en tant que de besoin, contrairement à d'autres techniques de liaisonnement (anneaux dissimulés).

D/ RENDRE PLUS RÉSILIENT LE SCHÉMA STATIQUE PRINCIPAL

La mise au calcul de la flèche dans son état d'origine a montré que la faiblesse de certains assemblages et de certaines pièces a conduit à un schéma statique (c'est à dire la répartition des efforts dans les différents cheminements possibles offerts par la structure) défectueux, qui surcharge les structures secondaires au détriment des principales. Le renforcement des assemblages et les liaisonnements de pièces jumelés proposés **rétablira un schéma statique de la structure plus cohérent**. L'intervention visera à privilégier la descente des charge à travers les arbalétriers au détriment des décharges qui sont moins pentues, afin de limiter les poussées transmises en pied de flèche aux maçonneries de la cathédrale. Cela est permis par la modification des assemblages des arbalétriers et des décharges et par l'ajout de pièces en pied des arbalétriers pour pallier l'incapacité des entrants à reprendre les considérables efforts transmis par les arbalétrier du fait du porte-à-faux de l'assemblage entrant/arbalétrier.

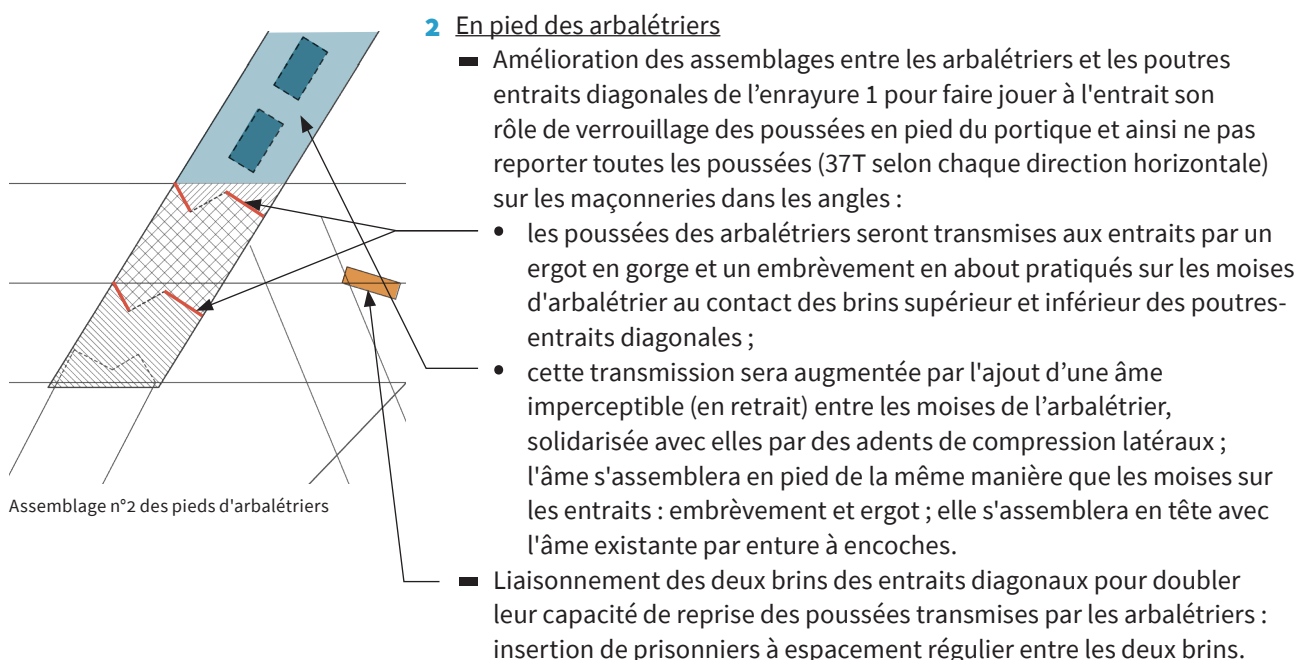
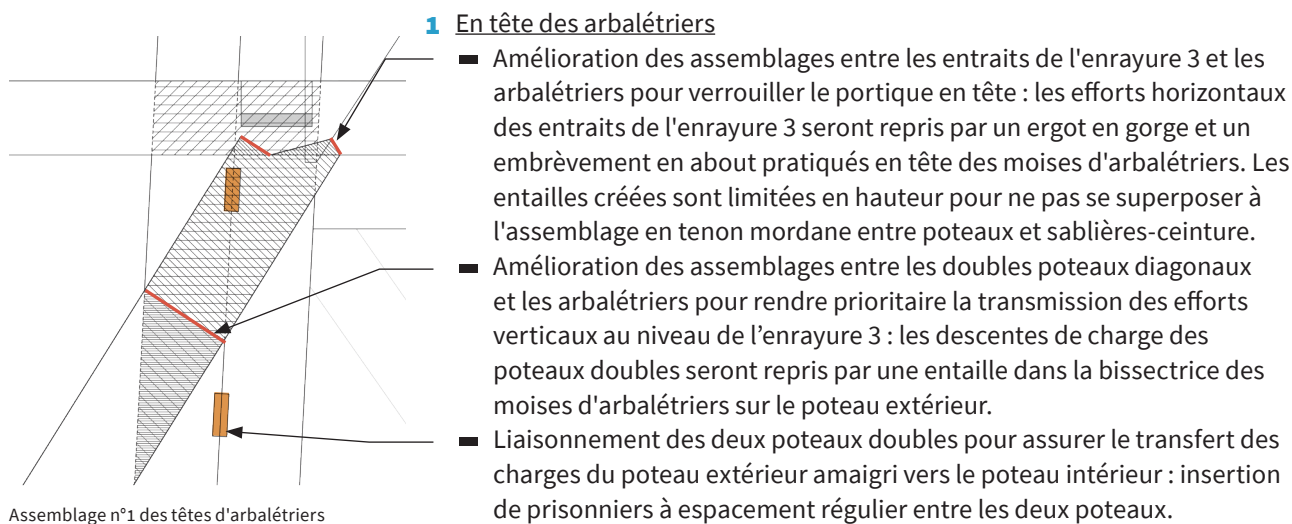


Coupe diagonale de la souche - 1/150° : améliorations apportées pour la transmission des efforts à travers les arbalétriers.
En rouge : le portique diagonal principal. En bleu : les assemblages à améliorer. En vert : les sections à grossir. En orange : les coins contrariés à insérer.

RENFORCEMENT DU CHEMINEMENT PRINCIPAL DES EFFORTS PAR LES ARBALÉTRIERS

Les améliorations des assemblages des arbalétriers visent à :

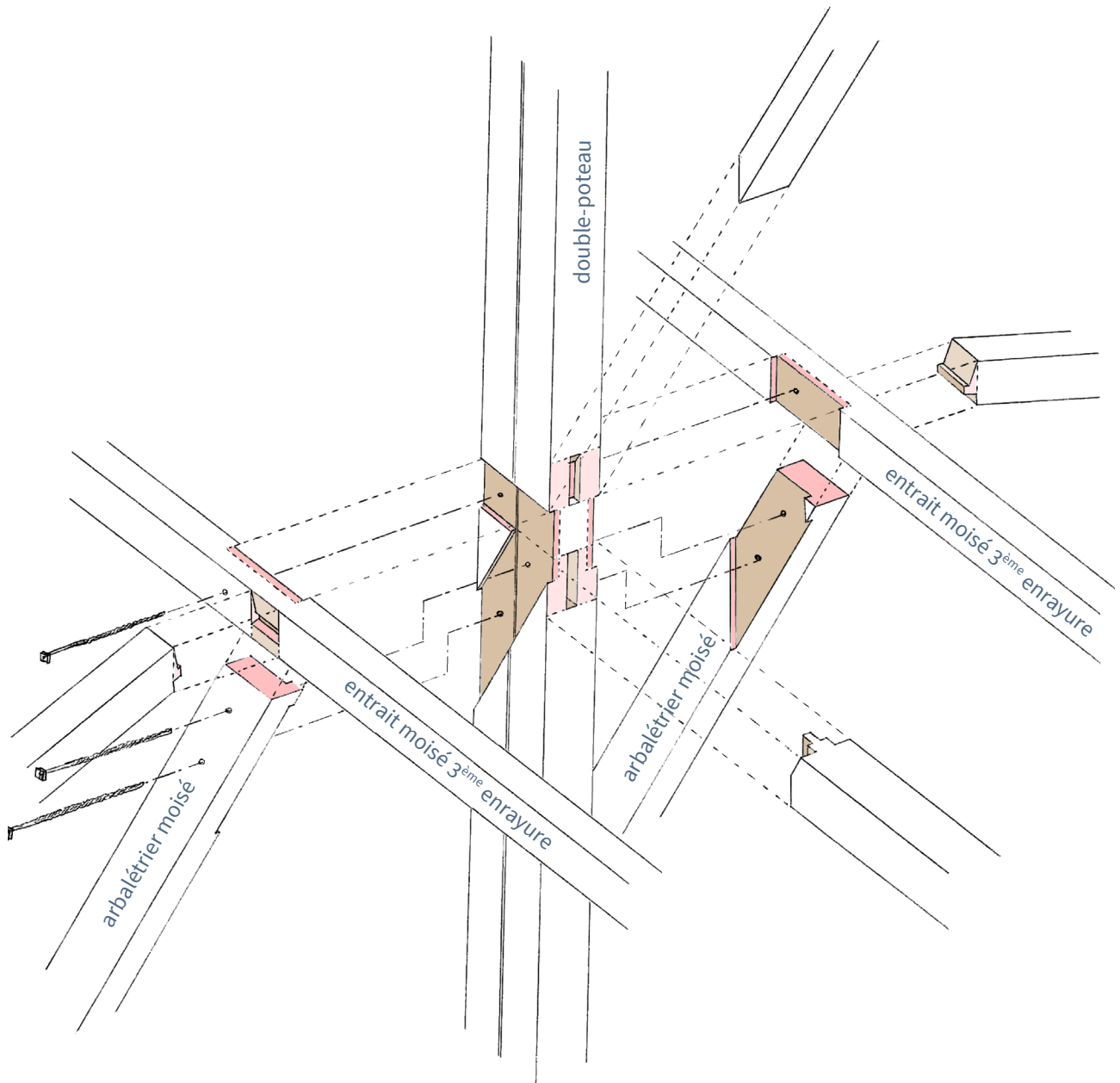
- recharger les arbalétriers par rapport aux décharges ;
- verrouiller les portiques diagonaux qui sont les organes de stabilité principaux de la flèche - les portiques diagonaux sont composés des entrails de l'enrayure 3, des arbalétriers et des poutres-entrails diagonales de l'enrayure 1.



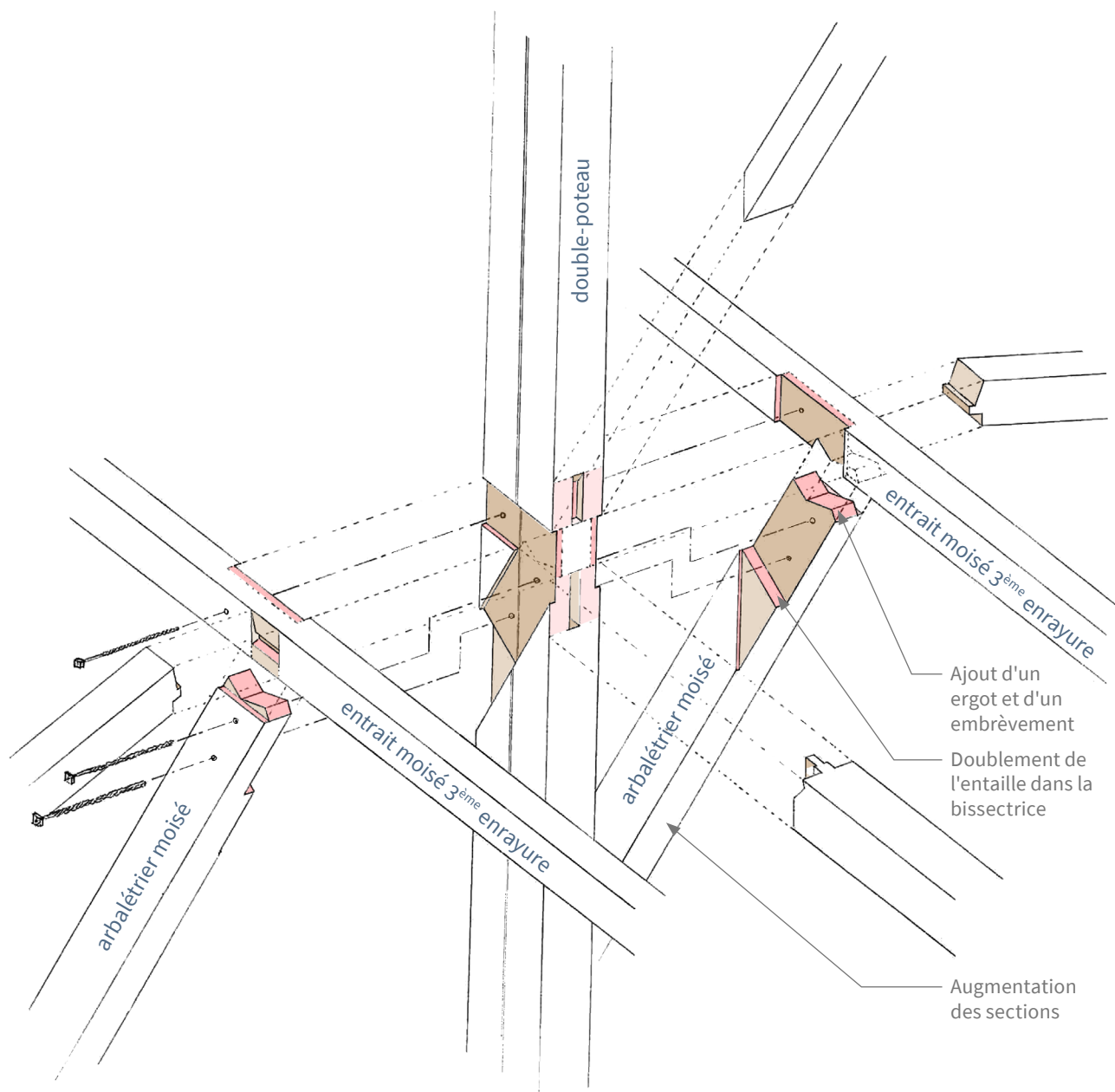
Section des arbalétriers

Pour assurer des surfaces suffisantes des plans de contact des assemblages, les moises des arbalétriers devront être augmentées en section : les sections de 18x30cm actuelles passeront en 23x33cm en bois vert neuf. À l'échelle de l'ouvrage, cette augmentation de section apparaît visuellement acceptable.

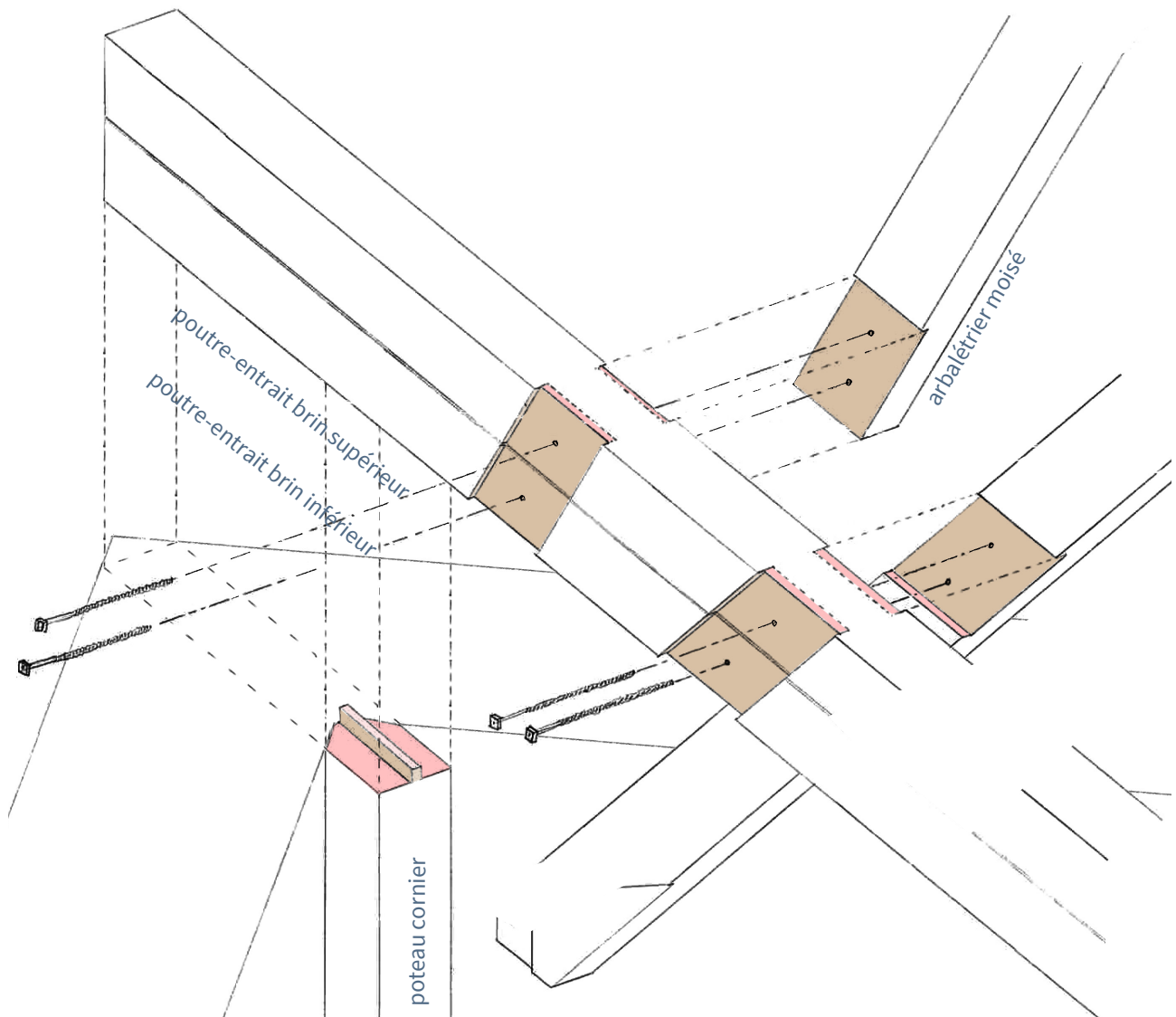
1 - ASSEMBLAGE EN TÊTE DES ARBALÉTRIERS - ÉTAT DES LIEUX



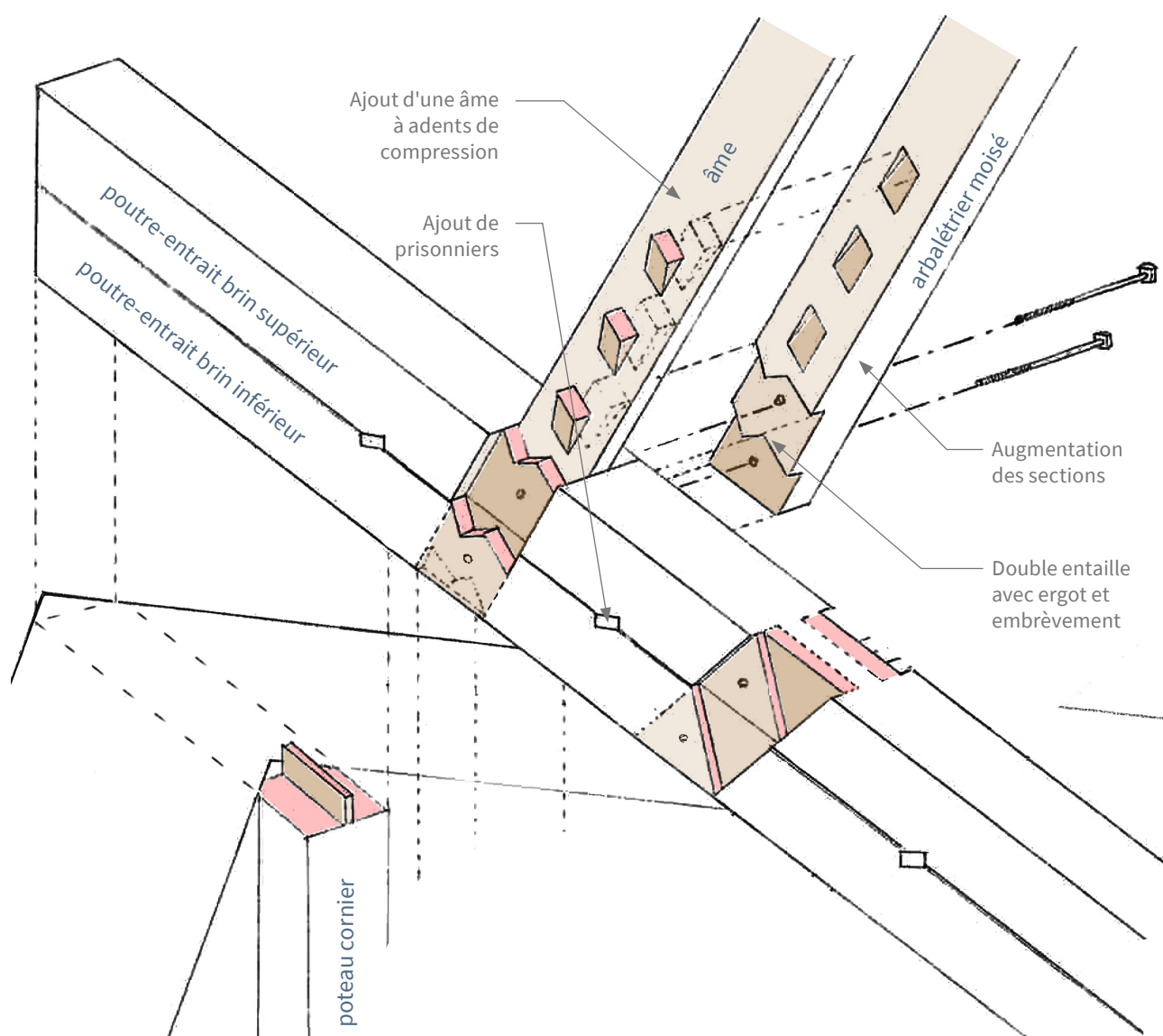
1 - ASSEMBLAGE EN TÊTE DES ARBALÉTRIERS - PROJET

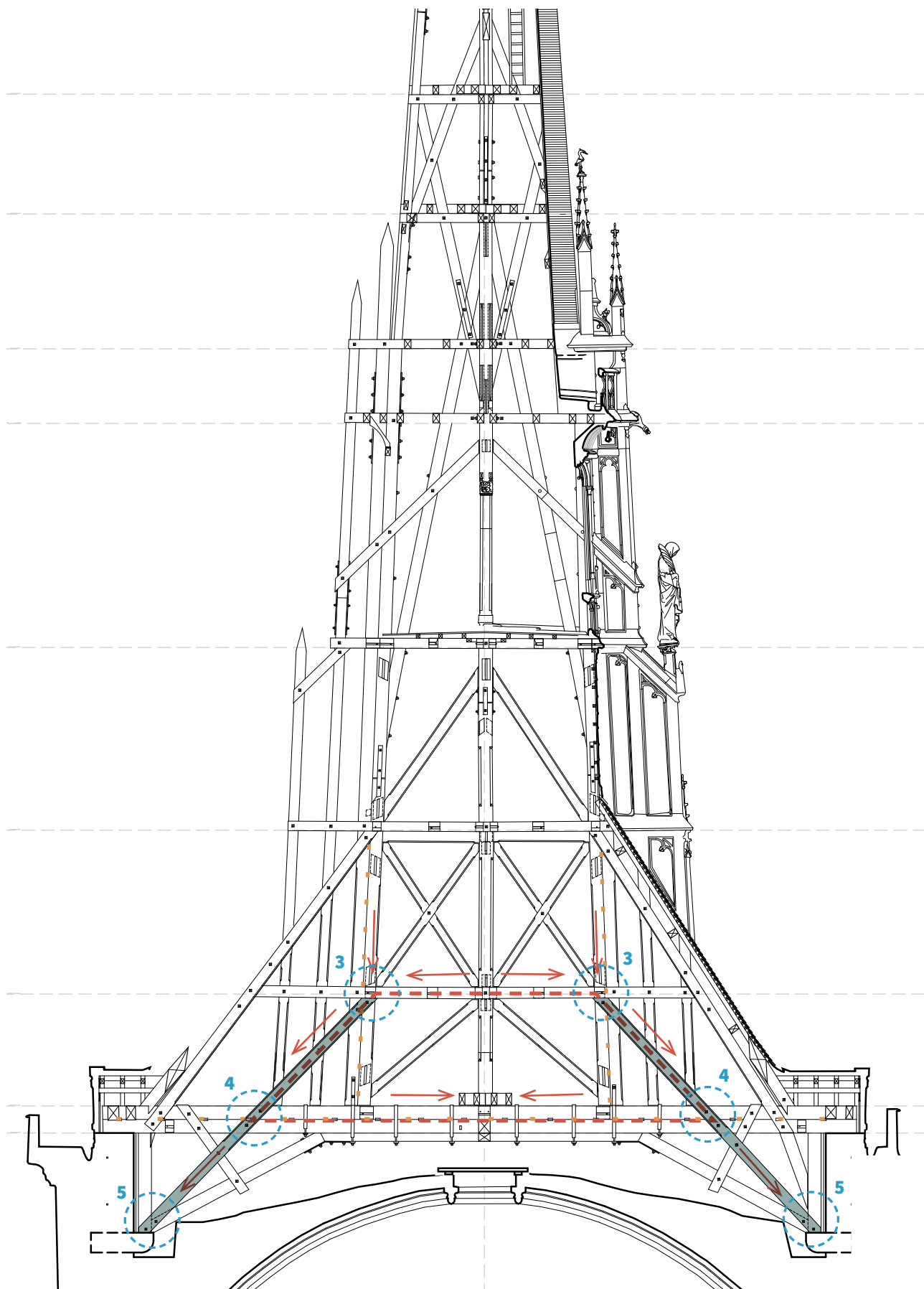


2 - ASSEMBLAGE EN PIED DES ARBALÉTRIERS - ÉTAT DE LIEUX



2 - ASSEMBLAGE EN PIED DES ARBALÉTRIERS - PROJET





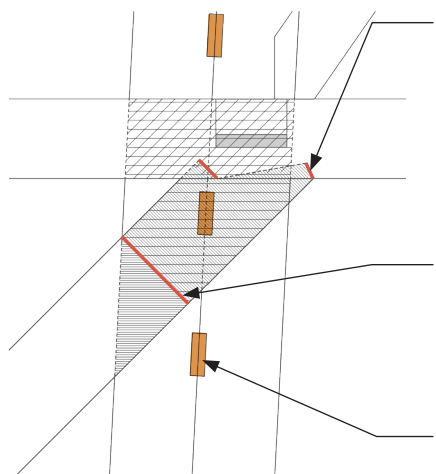
Coupe diagonale de la souche - 1/150° : améliorations apportées pour la transmission des efforts à travers les décharges.

En rouge : le portique diagonal secondaire. En bleu : les assemblages à améliorer. En vert : les sections à grossir. En orange : les coins contrariés à insérer.

RENFORCEMENT DU CHEMINEMENT SECONDAIRE DES EFFORTS PAR LES DÉCHARGES

Le cheminement des efforts dans les fermes diagonales se fait en second lieu par les décharges. Sur les mêmes principes que précédemment, les améliorations des assemblages visent à verrouiller un portique, organe de stabilité secondaire des axes diagonaux de la flèche - portique composé des entrails de l'enrayure 2, des décharges et des poutres-entrails diagonales de l'enrayure 1.

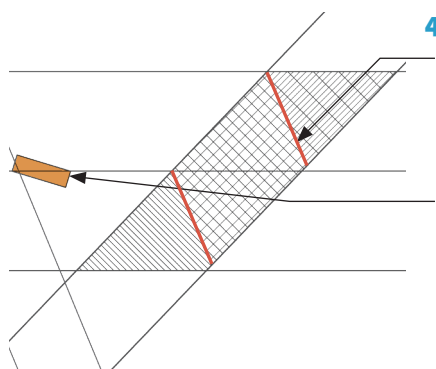
3 En tête des décharges



Assemblage n°3 des têtes de décharges

- Amélioration des assemblages entre les entrails de l'enrayure 2 et les décharges pour verrouiller le portique en tête, selon les mêmes dispositions que précédemment : les efforts horizontaux des entrails de l'enrayure 2 seront repris par un ergot en gorge et un embrèvement pratiqués en tête des moises de décharges. Les entailles créées sont limitées en taille pour ne pas se superposer à l'assemblage en tenon mordane entre poteaux et goussets de l'enrayure 2.
- Amélioration des assemblages entre les doubles poteaux diagonaux et les arbalétriers pour rendre prioritaire la transmission des efforts verticaux au niveau de l'enrayure 2 : les descentes de charge des poteaux doubles seront reprises par entaille dans la bissectrice des moises d'arbalétriers sur le poteau extérieur.
- Le liaisonnement des deux poteaux doubles par prisonniers assurera le transfert des charges du poteau extérieur amaigri vers le poteau intérieur.

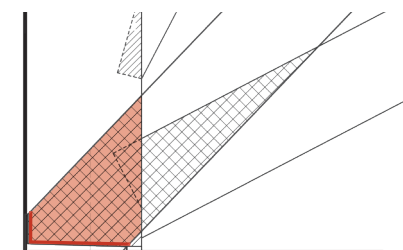
4 En liaison des décharges avec les entrails diagonaux



Assemblage n°4 des pieds de décharges

- Amélioration des assemblages entre les décharges et les poutres entrails diagonales de l'enrayure 1 pour verrouiller les poussées en pied du portique : les poussées des décharges seront transmises aux entrails par double moisement à double entaille dans la bissectrice.
- Le liaisonnement des deux brins des entrails diagonaux déjà décrit doublera la capacité de reprise des poussées transmises.

5 En pied des décharges



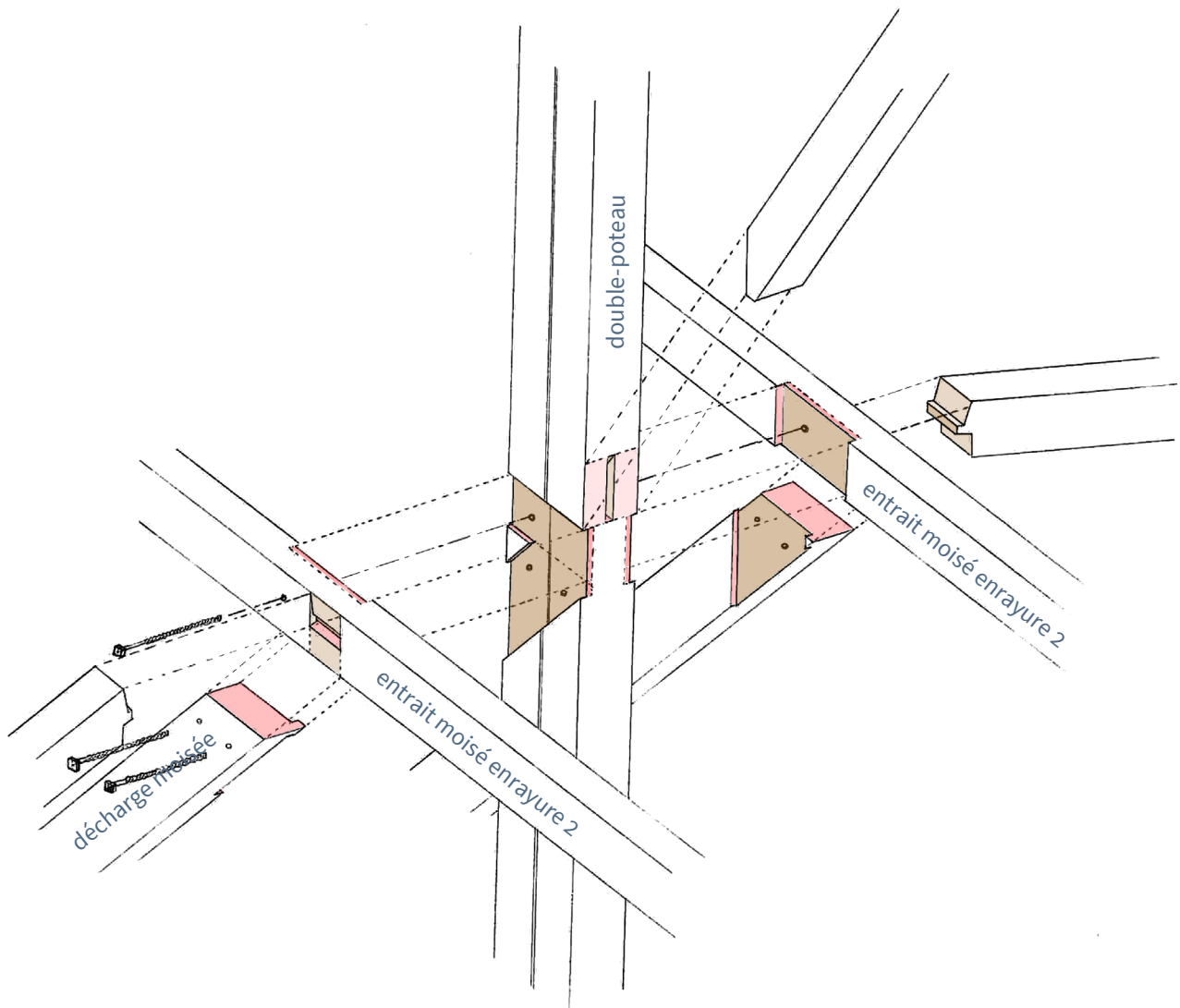
Assemblage n°5 des pieds des décharges

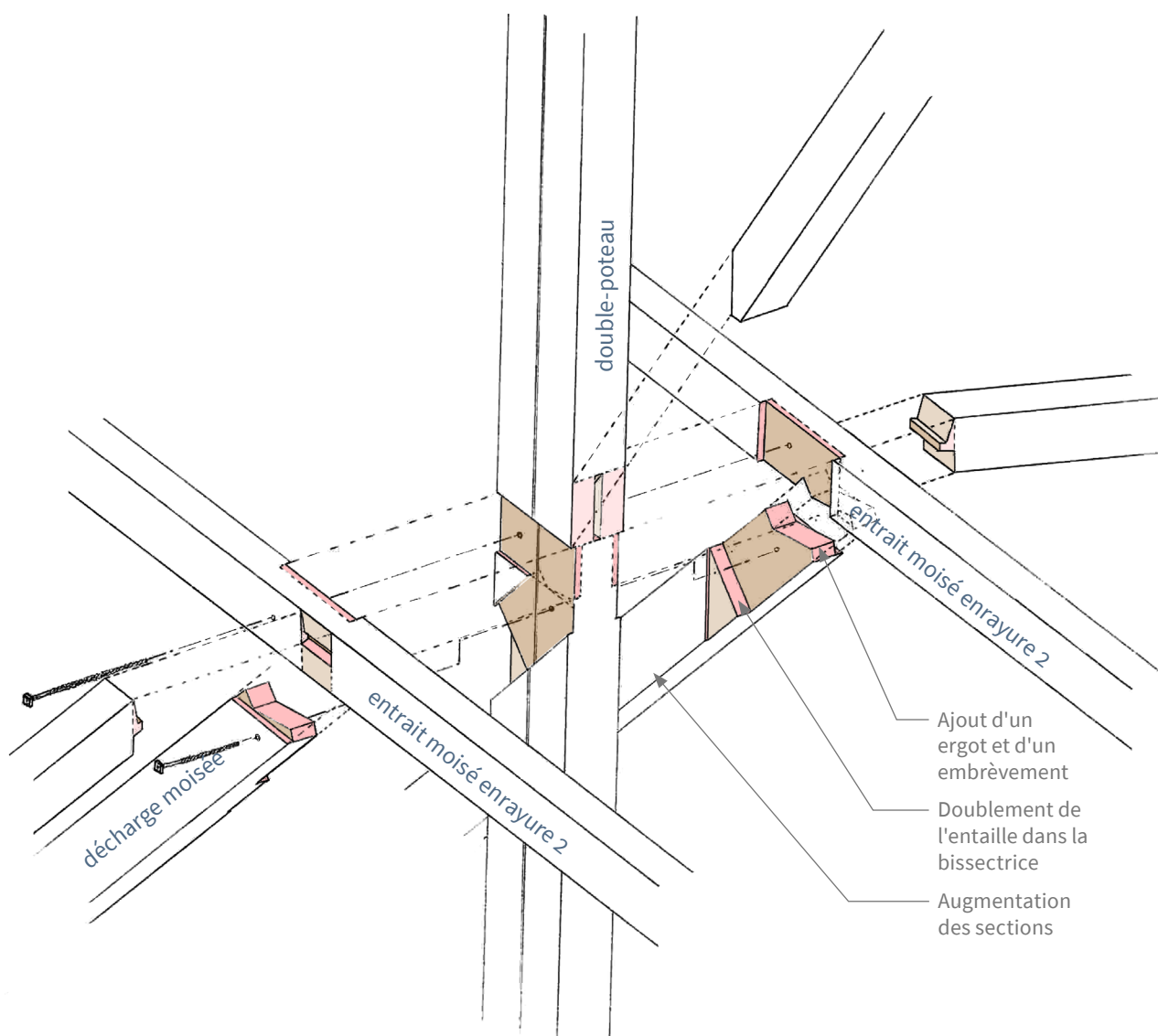
- Amélioration des assemblages entre les décharges et les poteaux corniers : les efforts seront transmis par double moisement approfondi.
- Ajout de platines métalliques sur les corbeaux en pierre pour reprise de la totalité des efforts en pied des décharges. Voir détails point suivant.

Section des décharges

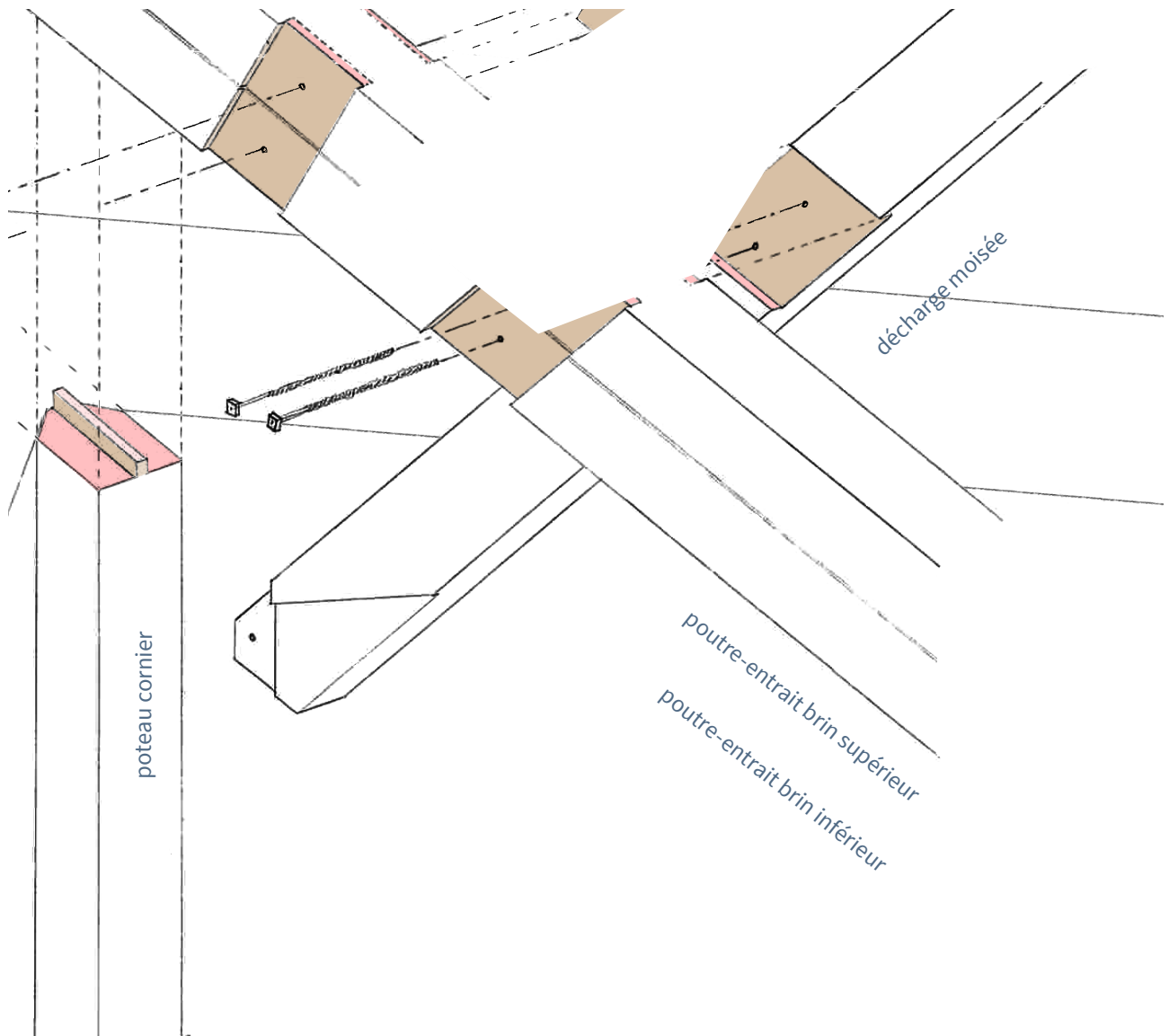
Pour assurer des surfaces suffisantes des plans de contact des assemblages, les moises des décharges devront être augmentées en section : les sections de 18x30cm actuelles passeront en 23x33cm en bois vert neuf. À l'échelle de l'ouvrage, cette augmentation de section apparaît visuellement acceptable.

3 - ASSEMBLAGE EN TÊTE DES DÉCHARGES - ÉTAT DE LIEUX

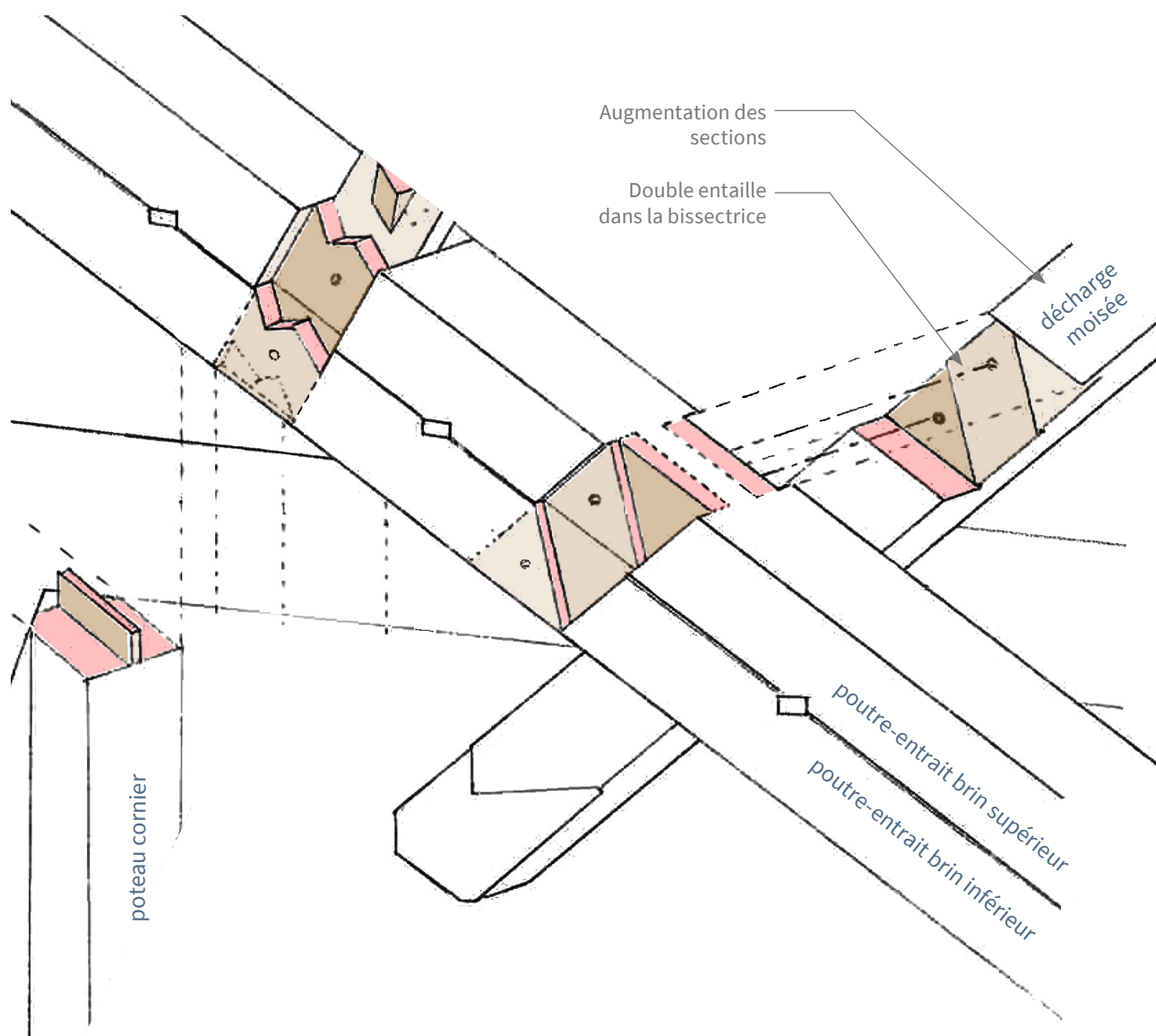


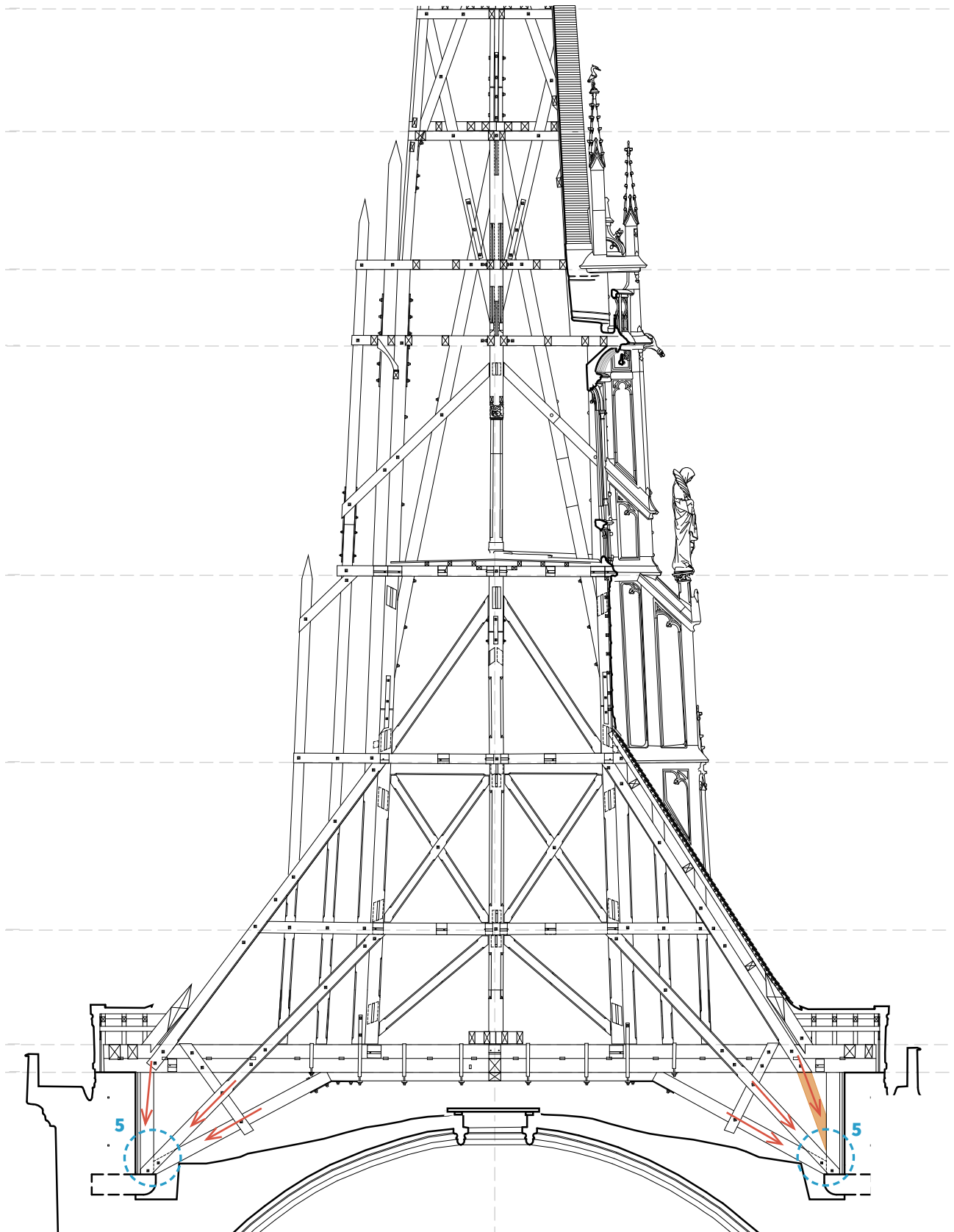
3 - ASSEMBLAGE EN TÊTE DES DÉCHARGES - PROJET

4 - ASSEMBLAGE ENTRE DÉCHARGES ET POUTRES-ENTRAITS - ÉTAT DE LIEUX



4 - ASSEMBLAGE ENTRE DÉCHARGES ET POUTRES-ENTRAITS - PROJET





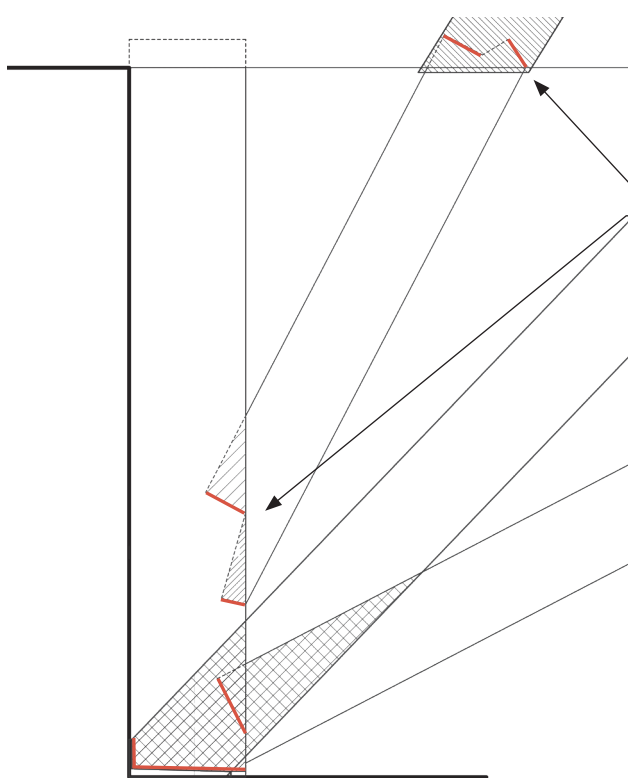
Coupe diagonale de la souche - 1/150° : améliorations apportées pour la transmission des efforts dans les pieds de flèche en angle.
En rouge : les efforts. En bleu : les assemblages à améliorer. En orange : les pièces neuves à ajouter.

RENFORCEMENT DES REPRISES DES EFFORTS EN PIED DU TABOURET

Transmission des efforts des arbalétriers

La zone de faiblesse la plus critique située à l'articulation entre les entrails diagonaux et les arbalétriers doit être impérativement renforcée pour reprendre les efforts de cisaillement causés par les arbalétriers sur les entrails. En phase APS, il a été acté l'ajout de pièces en bois transmettant les charges de l'arbalétrier jusqu'au poteau cornier. Ce dispositif, vertueux sur le plan statique, permet d'éviter le renforcement métallique des pièces et de garder une unité de matériau. Réalisé dans les angles ouest uniquement, cet ajout de deux pièces constitue la seule entorse au principe de respect de la forme structurelle.

Les pièces rapportées seront traitées distinctement, par la teinte de leur peinture. Leurs sections ne dépasseront pas celles des pièces originelles. Leurs assemblages avec les pièces originelles seront couverts (c'est-à-dire que les pénétrations d'une pièce dans l'autre sont dissimulées) pour ne pas en modifier l'aspect extérieur.



Dans les angles ouest seuls, où la jonction entrail/arbalétrier est très fortement déportée, les pièces rapportées seront des contre-poteaux de section 31x31cm, pour ne pas déborder contre les poteaux corniers de 31cm de large.

- En tête, ils seront fixés par ergot et embrèvement.
- En pied, ils se fixeront sur les poteaux corniers par ergot et embrèvement, avec un épaulement sur le poteau cornier pour couvrir l'assemblage.

Les contre-poteaux et poteaux corniers devront être fournis en bois sec par l'entreprise pour éviter les déformations au séchage et garantir une meilleure résistance. Si l'entreprise n'est pas en capacité de les fournir (sections exceptionnelles plus difficiles à se procurer), on utilisera les pièces du marché de fourniture exceptionnelle où elles ont été commandées en double.

L'ensemble du pied de tabouret (poteau + contre-poteau + décharge + jambe de force + bride) devra être pré-assemblé à pied d'œuvre, avec moises de maintien et entrails provisoires en sapin. Il sera gruté et posé en place assemblé. Pour installer ensuite les poutres-entrails, on écartera les moises des décharges pour leur laisser place.

Assemblage n°5 des pieds de tabouret

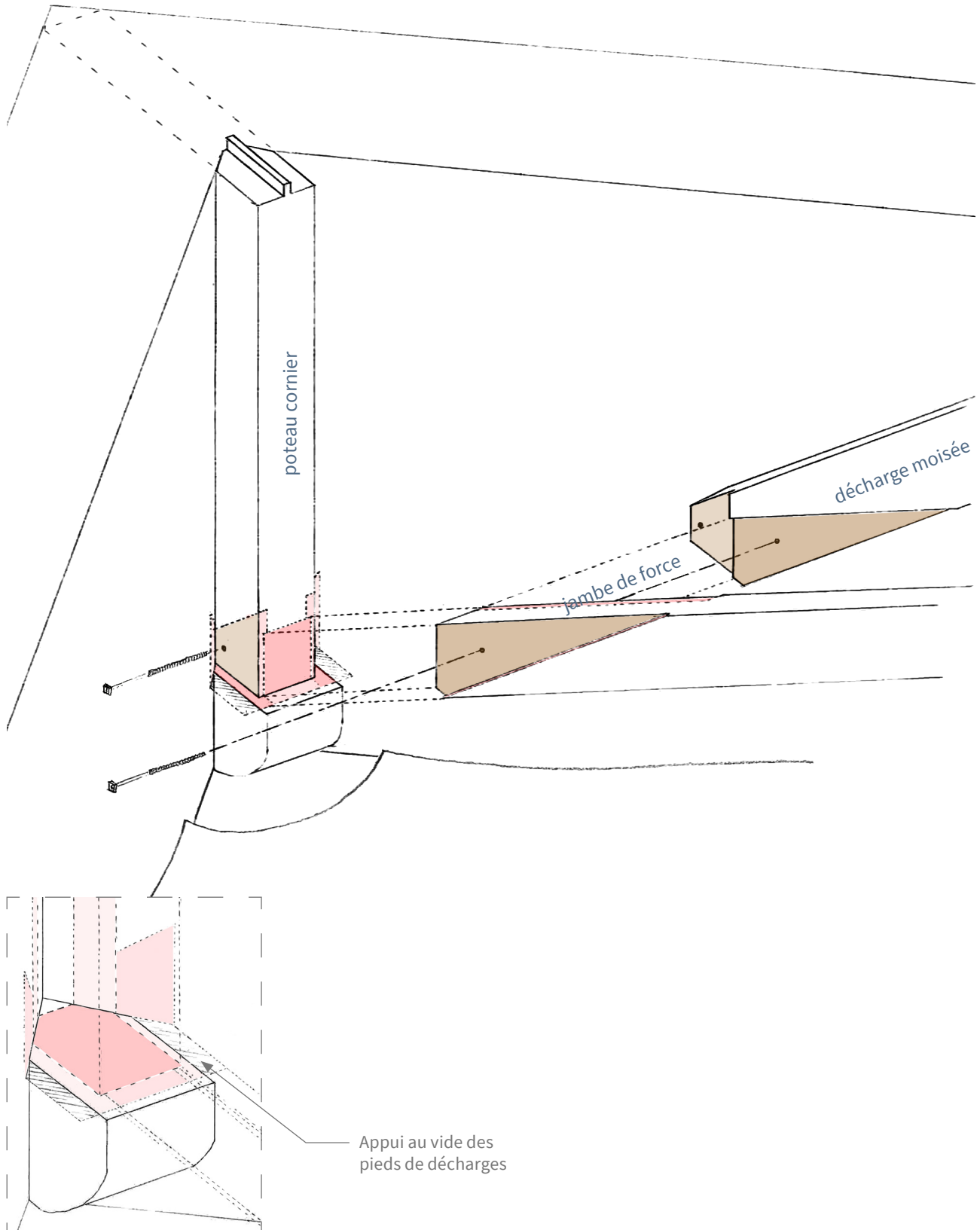
Appui du pied de charpente sur les corbeaux en pierre

Chaque pied de tabouret est plus large (54cm) que le corbeau en pierre sur lequel il repose (40cm). Dans son état d'origine (la dégradation sanitaire l'a pratiquement fait disparaître), le nœud d'assemblage des pieds de décharge était donc en partie en porte-à-faux et établi directement sur le corbeau en pierre.

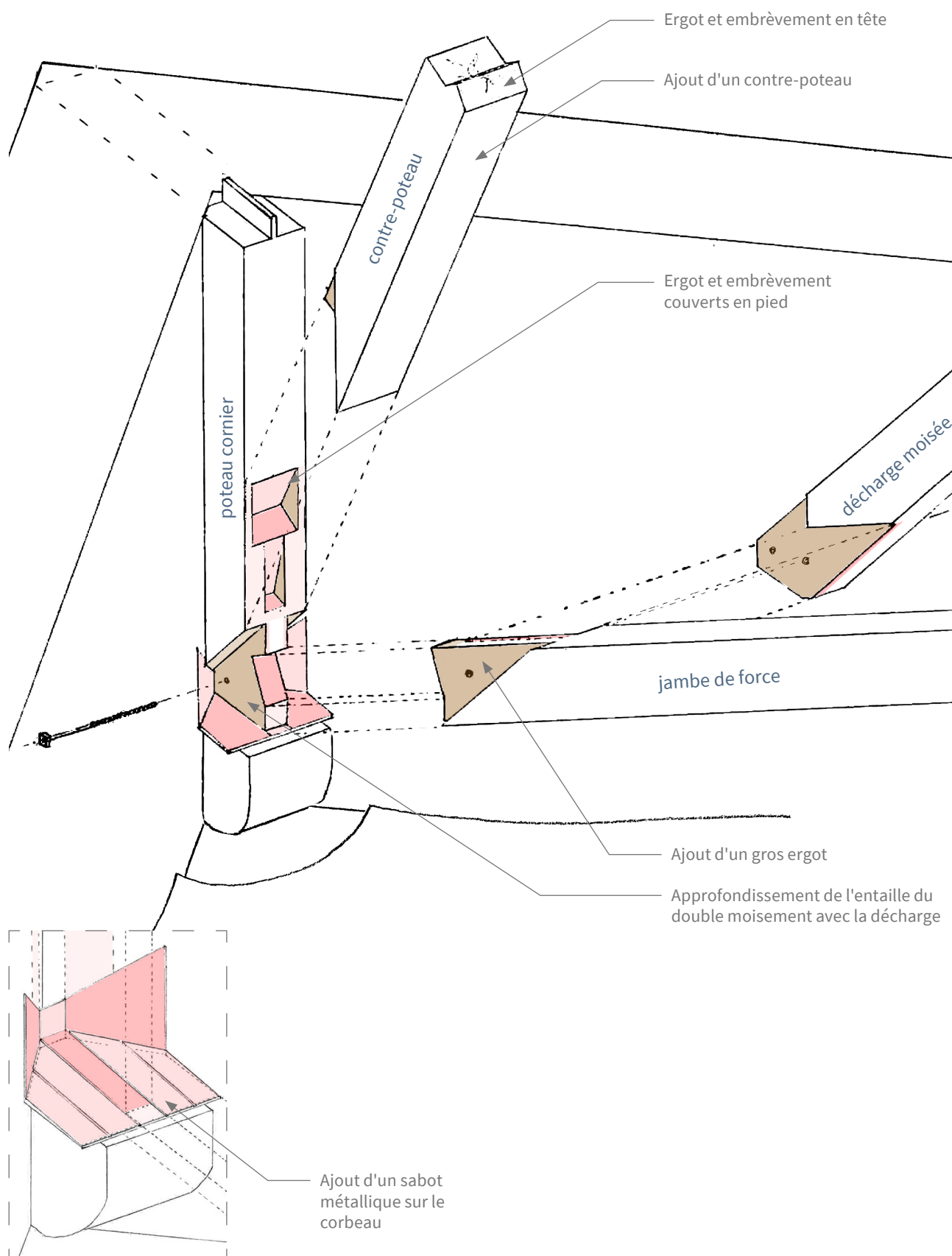
Pour assurer une surface de répartition suffisante et donc une reprise complète des charges par les maçonneries, il est proposé d'installer une platine métallique, de 54cm de large, sur le corbeau, avec feuille de plomb en interposition. Cette platine devra être suffisamment épaisse pour être indéformable (2 à 3cm). Elle sera rainurée, avec une légère pente pour empêcher la stagnation d'éventuelles eaux d'infiltration.

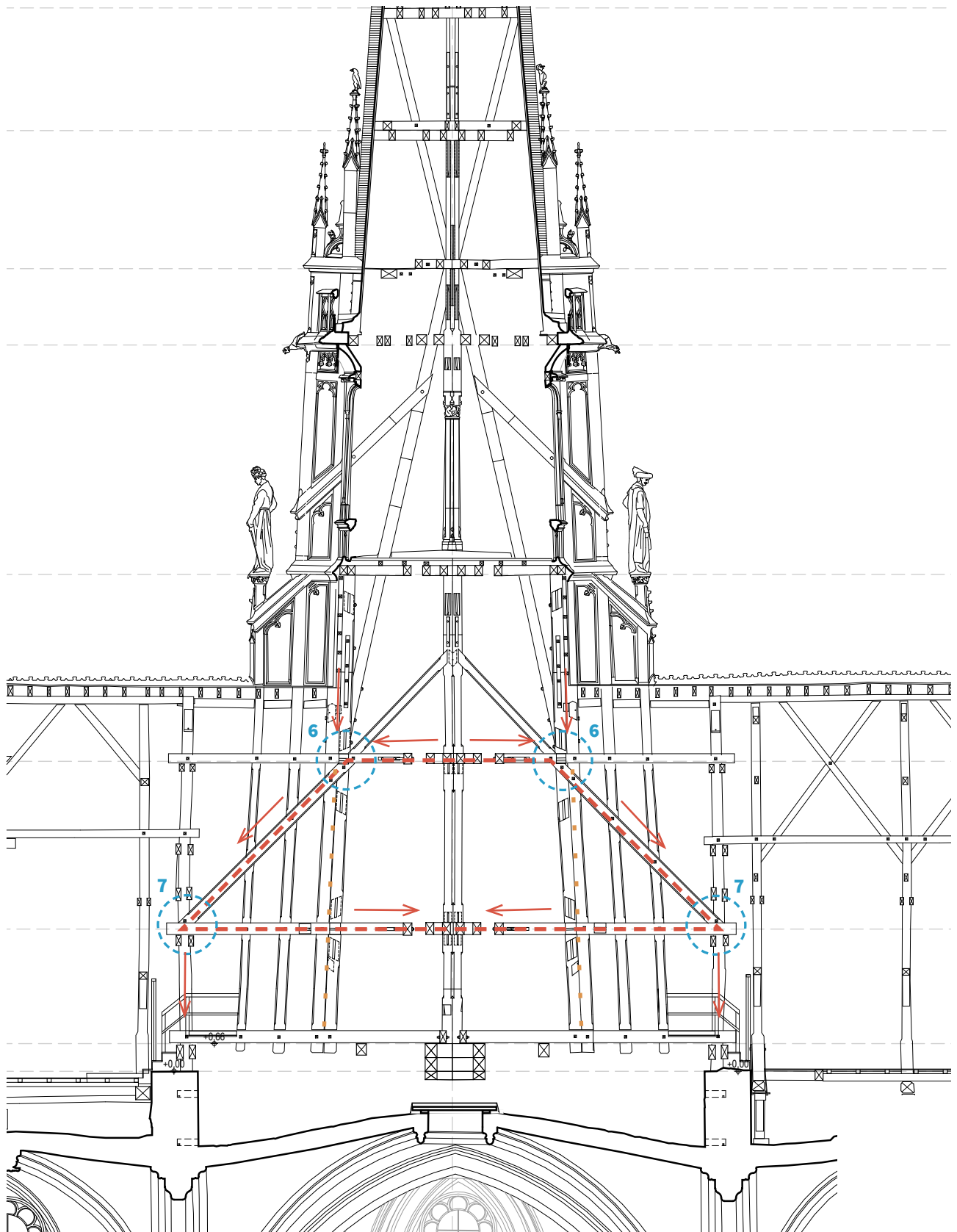
Cette méthode est déjà usitée à Notre-Dame de Paris, où il a été retrouvé une feuille de plomb et une semelle métallique au pied de chaque angle témoignant de la disposition d'origine.

5 - ASSEMBLAGES EN PIED DE TABOURET - ÉTAT DE LIEUX



5 - ASSEMBLAGES EN PIED DE TABOURET - PROJET



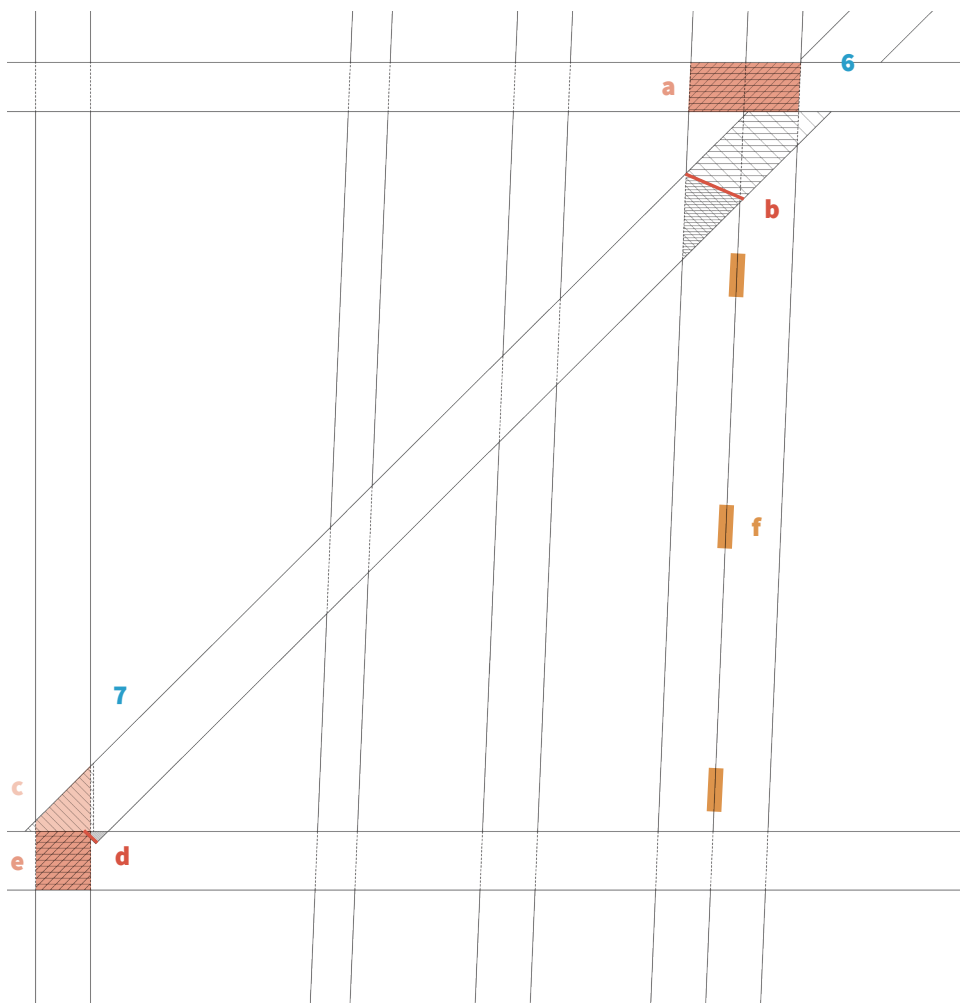


Coupe d'axe de la souche - 1/150° : améliorations apportées pour la transmission des efforts dans les pans de bois.
En rouge : le portique de transmission des efforts. En bleu : les assemblages à améliorer. En orange : les coins contrariés à insérer.

RENFORCEMENT DU CHEMINEMENT DES EFFORTS DANS LES PANS DE BOIS À TRAVERS LES ÉCHARPES

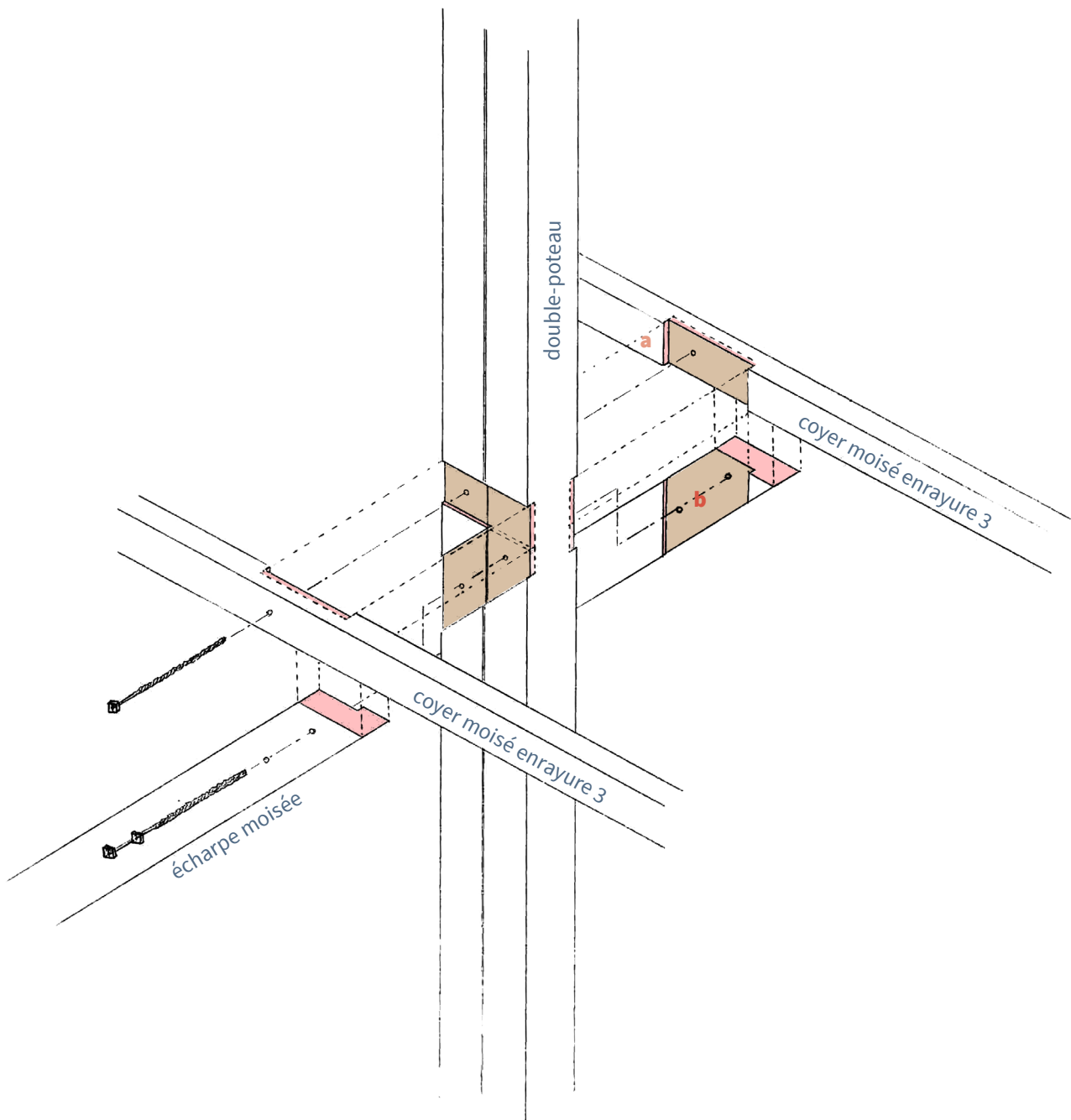
Dans les fermes à pans de bois, quelques assemblages devront être légèrement modifiés pour renforcer leurs capacités à transmettre les efforts :

- a/ entre les coyers de l'enrayure 3 et les doubles poteaux : approfondissement du double moisement
- b/ entre les écharpes et les doubles poteaux : entaille des moises d'arbalétriers sur le poteau extérieur, à la bissectrice.
- c/ entre les écharpes et les poinçons des fermes périphériques : moisement simple des écharpes
- d/ entre les écharpes et les coyers de l'enrayure 2 : ajout d'un ergot en gorge
- e/ entre les coyers de l'enrayure 2 et les poinçons des fermes périphériques : approfondissement du double moisement
- f/ insertion de coins contrariés entre les deux poteaux doubles pour transmettre les efforts de l'un vers l'autre

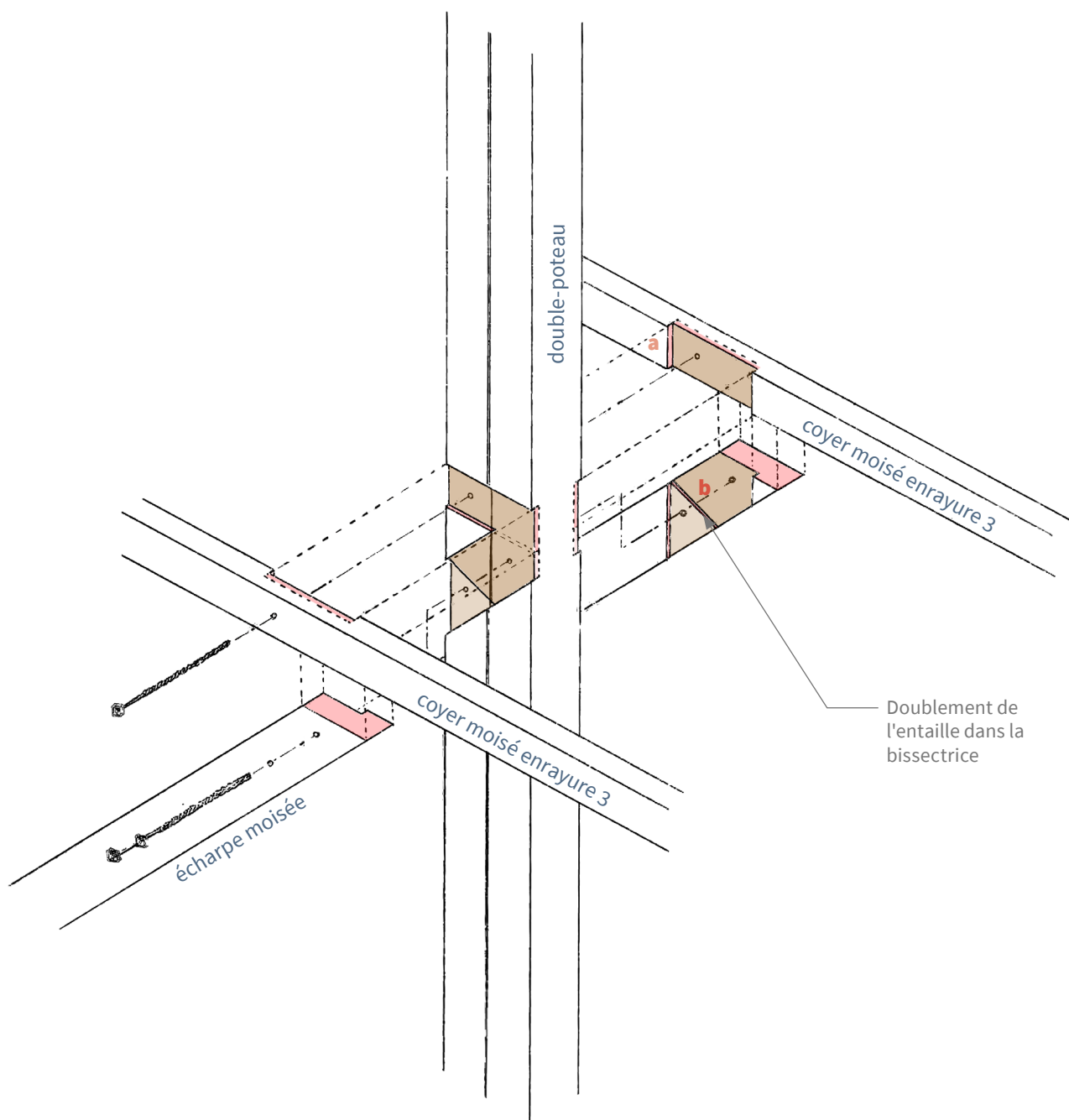


Assemblages n°6 et 7 des fermes à pans de bois

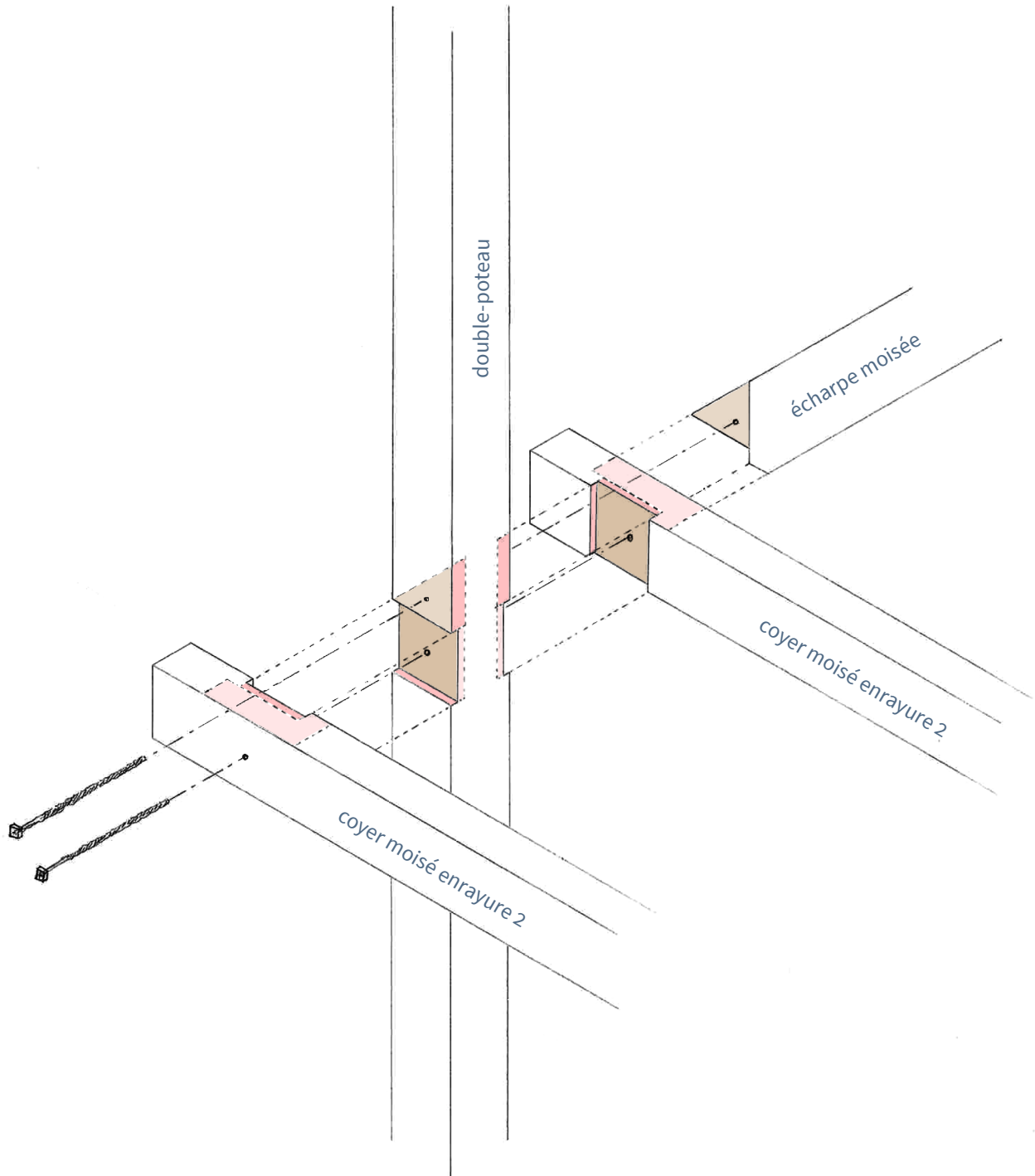
6 - ASSEMBLAGE EN TÊTE DES ÉCHARPES DES FAÎTAGES - ÉTAT DE LIEUX



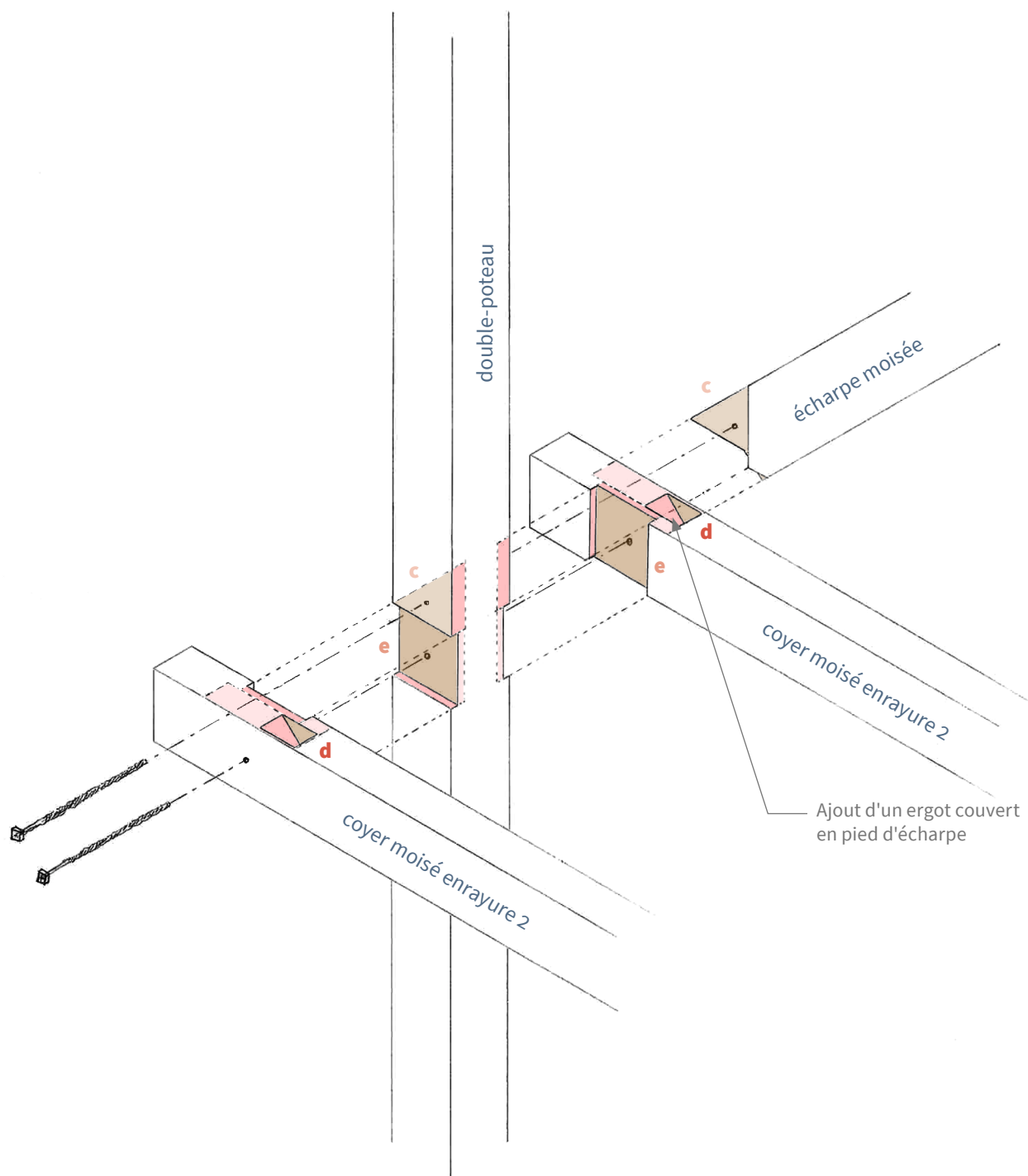
6 - ASSEMBLAGE EN TÊTE DES ÉCHARPES DES FAÎTAGES - PROJET



7 - ASSEMBLAGE EN PIED DES ÉCHARPES DES FAÎTAGES - ÉTAT DE LIEUX



7 - ASSEMBLAGE EN PIED DES ÉCHARPES DES FAÎTAGES - PROJET



CONSERVER LA DÉFORMABILITÉ DES ACIERS D'ORIGINE

Les pièces métalliques d'origine de la flèche de Charles Suisse sont caractéristiques des fers de la fin du XIX^e siècle. Des analyses en laboratoire réalisées sur deux des boulons du tabouret ont montré leur très forte teneur en fer et leur faible teneur en carbone qui les définissent comme des fers doux à extra-doux. Leur composition chimique et leur microstructure sont typiques des fers puddlés¹. Leur taux élevé en fer les rendent plus ductiles que les aciers actuels. Leur déformabilité leur permet d'accompagner l'évolution des assemblages lors du retrait des bois au séchage : en bois vert, les contacts bois-bois entre les pièces sont assurés ; au cours du séchage, les pièces de bois se rétractent. Les boulons ductiles fléchissent pour suivre la déformation des assemblages, tout en maintenant le contact bois-bois dans la direction des transmissions des efforts.

Les aciers actuels, moins chargés en fer, sont plus résistants mais plus fragiles et moins déformables. La plupart des boulons et écrous d'origine ne sera sans doute pas réutilisable car ils sont grippés (10% de perte de matière sur les boulons analysés) et déformés. Si on les remplaçait par des aciers actuels standards plus rigides, ils ne pourraient pas se déformer suffisamment pour accompagner la déformation des assemblages lors du séchage qui risque alors de s'ouvrir. L'effort passant par la plus grande raideur disponible, si le boulon n'est pas assez souple, il se mettra rapidement en charge. Mais il ne pourra pas reprendre autant d'efforts qu'un contact d'assemblage en bois (la capacité de reprise d'un boulon est en moyenne 20 fois inférieure à celle d'une surface de contact d'un assemblage ordinaire sur la flèche). Le boulon atteindra un des modes de rupture tels que décrit par l'Eurocode : rupture du boulon ou rupture par rapport à la portance locale du bois (écrasement du bois sur la surface métal/bois). Ce dernier mode de rupture entraîne des désordres sur la pièce bois.

Les pièces métalliques à changer seront donc remplacées par des fers doux de mêmes caractéristiques que les aciers en place : aciers ductiles avec un très faible taux de carbone.

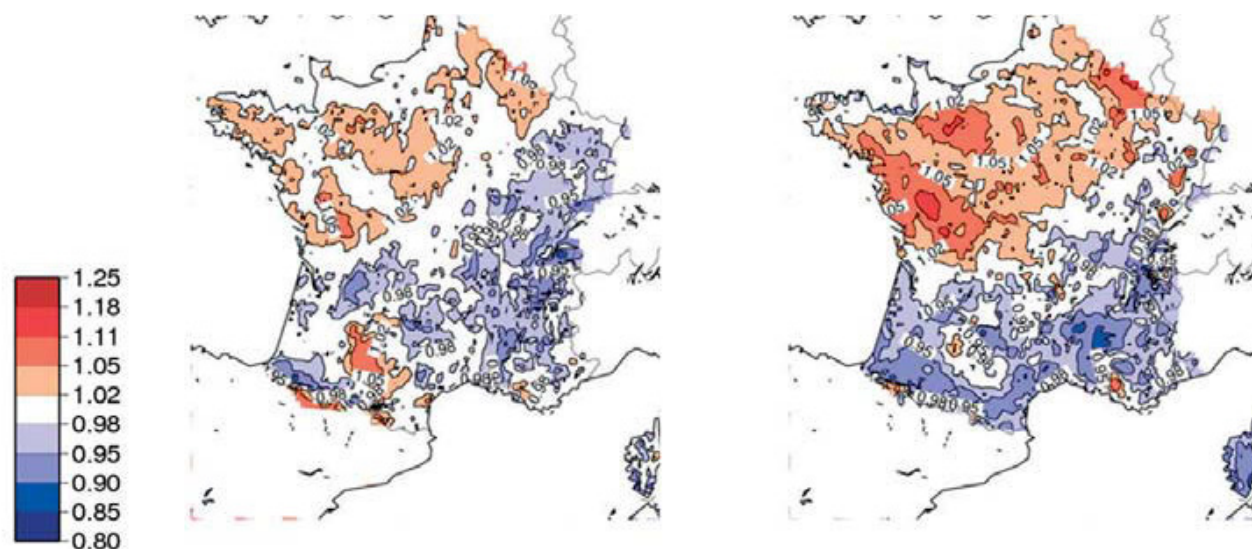
1 Le puddlage est un procédé d'affinage de la fonte consistant à la décarburer pour obtenir un fer plus résistant. Ce procédé a été usité à la fin du XIX^e siècle. La Tour Eiffel est par exemple construite en fer puddlé.



Exemples de boulons déformés. À noter l'état de grippage de la visserie.

E/ PRENDRE EN COMPTE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (REPRISE DES EFFORTS AU VENT)

Le dérèglement climatique touche tous les facteurs météorologiques. Pour un ouvrage comme la flèche qui culmine à 90m de haut, la question de son adaptabilité aux nouvelles conditions climatiques concerne essentiellement l'évolution des conditions de vent. Pourtant, contrairement à ce que l'on pourrait penser, les prévisions n'annoncent qu'une légère augmentation des vitesses de vent et de la fréquence des épisodes tempétueux en France métropolitaine², et ce selon une confiance moyenne. Afin d'illustrer l'absence de signal notable de changement concernant les vents forts, le rapport de l'ONERC présente les cartes suivantes³ :



Rapport entre l'intensité moyenne du vent maximal hivernal pour les périodes 2021-2050 (à gauche) et 2071-2100 (à droite) et l'intensité moyenne du vent maximal hivernal de la période. Source : SCAMPEI.

Ces cartes montrent que l'augmentation future du risque de vent fort au nord reste modérée (de l'ordre de 5 %) tout comme la diminution au sud (aussi de l'ordre de 5 %). **Dans la région bourguignonne, le risque de vent fort resterait constant.**

D'autre part, la résistance au vent de la flèche sera supérieure après restauration qu'en l'état actuel. En effet, aujourd'hui, selon les normes européennes de calcul (Eurocodes), les assemblages de la flèche sont sollicités au-delà de leurs capacités, jusqu'à 180% pour certains, et la flèche a montré qu'elle a tenu face aux vents depuis 120 ans. Les améliorations des assemblages limitants ont été calculés de façon à ce qu'ils soient sollicités à 100%, pour répondre aux contraintes des Eurocodes. Avec des **taux de sollicitations moindres dans les assemblages**, la flèche résistera mieux aux efforts aux vents après sa restauration par rapport à aujourd'hui.

De plus, la résistance de la flèche après restauration va encore augmenter au fur et à mesure du séchage. À la livraison de l'ouvrage restauré, la charpente sera mixte, entre bois sec et bois vert. 20-30 années plus tard, lorsque les bois auront séché, la structure sera uniquement en bois sec et donc plus résistante :

- Les capacités du bois sec sont meilleures que celles du bois vert. Cela se traduit dans les Eurocodes : l'ELU (état limite ultime) est plus favorable en sec. En séchant, les capacités augmenteront, d'abord en périphérie des pièces (et donc d'abord dans les assemblages) puis en cœur des pièces.
- Les charges à reprendre diminueront : le poids propre de la structure baissera avec l'évaporation de l'eau.

Ainsi, après le séchage, la flèche aura une **capacité de reprise des efforts au vent de +15%** par rapport au moment de sa livraison.

² Cf. chapitre 12 du 6ème rapport d'évaluation, GIEC, août 2021 et Rapport au Premier Ministre et au Parlement : Les événements météorologiques extrêmes dans un contexte de changement climatique, ONERC (Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique), la Documentation Française, 2018. Résumé sur <https://meteofrance.com/changement-climatique/observer/tempetes-et-changement-climatique>, page consultée le 2/01/2025.

³ Projection climatique réalisée avec le modèle climatique régional Aladin-Climat de Météo-France, suivant le scénario d'émissions A1B (proche du scénario RCP6.0), dans le cadre du projet national SCAMPEI (2008-2011). L'analyse d'autres simulations réalisées avec deux autres modèles climatiques régionaux montre par ailleurs que la variabilité spatiale du signal de changement dépend du modèle.

F/ CLASSIFICATION DES ASSEMBLAGES ET DE LEURS INTERVENTIONS

Les assemblages ont été classés selon différentes catégories :

- par type d'assemblage
- par niveau de complexité
- par type d'intervention

Typologie des assemblages

On répertorie 27 types d'assemblages dans la flèche actuelle. Avec l'amélioration des assemblages, on en dénombrera 39 dans la flèche restaurée.

Les types d'assemblages se répartissent en famille d'assemblage :

- Assemblages par empilement : 8 types - 64 occurrences dans la flèche (4%)
- Assemblages par entaille : 9 types - 572 occurrences (38%) - le plus fréquent étant le double moisement boulonné (495 - 33%) puis le mi-bois boulonné (36 - 2%)
- Assemblages par tenon mortaise : 11 types - 767 occurrences (51%) - le plus fréquent étant le tenon mortaise oblique à mordane boulonné (304 - 20%) puis le tenon mortaise oblique à arasement biais boulonné (144 - 9%) puis le tenon mortaise oblique à embrèvement (88 - 6%) puis le tenon mortaise d'équerre à mordane avec boulon plate-bande (76 - 5%) puis le tenon mortaise d'équerre (55 - 4%)
- Assemblages par embrèvements et ergots : 6 types - 32 occurrences (2%)
- Entures : 5 types - 50 occurrences (3%) et 13 greffes - la plus fréquente étant l'enture à tenons mortaises croisés tête bêche avec plates-bandes boulonnées (39)

EPURE	nomenclature d'assemblage							
	pièce 1			pièce 2			pièce 3	
	num	nom	num	nom	num	nom	num	nom
VALE	33	8. Arbalétrier moisé ferme	8A.a	Âme arbalétriers				
	34	8A.a Âme arbalétriers	8A.b	Âme arbalétriers				
	35	8. Arbalétrier moisé ferme	17.	Entrait-moisé - ferme diagonale - enrayure 2				
	36	8A.b Âme arbalétriers	17.	Entrait-moisé - ferme diagonale - enrayure 2				
	37	12. Poteau arétrier double	16.	Branche de croix de St	17.	Entrait-moisé - ferme		
	38	11.a Poinçon central - [1-3]	16.	Branche de croix de St	17.	Entrait-moisé - ferme		
	39	8. Arbalétrier moisé ferme	8A.b	Âme arbalétriers				
	40	8. Arbalétrier moisé ferme	15.	2e poteau contrefort - ferme diagonale [1-4]				
	41	8A.b Âme arbalétriers	15.	2e poteau contrefort - ferme diagonale [1-4]				
	42	8. Arbalétrier moisé ferme	14.	1er poteau contrefort - ferme diagonale [1-4]				
	43	16. Branche de croix de St	16.	Branche de croix de St André - ferme diagonale [2-3]				

Extrait du tableau des assemblages, donné en annexe. Numérotation des assemblages, indication des nomenclatures des pièces impliquées, du type et du nom de l'assemblage, du type d'intervention et du niveau de complexité.

Niveaux de complexité

Les assemblages sont classés selon trois niveaux de complexité : simple, complexe, très complexe.

Le niveau de complexité est défini selon la complexité intrinsèque de l'assemblage (en termes d'entaille) et selon la configuration du nœud dans lequel l'assemblage s'inscrit.

- Niveau simple : assemblage intrinsèquement simple entre deux pièces seulement
- Niveau complexe : assemblage intrinsèquement simple ou complexe dans un nœud de 3 pièces OU assemblage intrinsèquement complexe entre deux pièces seulement
- Niveau très complexe : assemblage intrinsèquement simple ou complexe ou très complexe dans un nœud de plus de 4 pièces OU assemblage intrinsèquement très complexe entre deux pièces seulement

Les assemblages sont dénombrés par niveau de complexité et par type sur les planches typologiques des assemblages (A001AS, A002AS, A003AS).

Types d'intervention

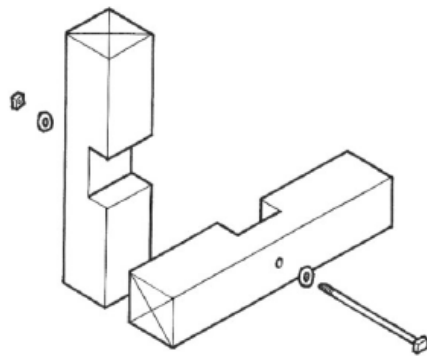
Certains assemblages appartenant aux portiques principaux de descente de charge seront améliorés, comme il a été expliqué plus haut. Ils sont améliorés par méthodes traditionnelles de charpente : entailles à l'intérieur des assemblages, ajout de prisonniers et d'adents, insertion d'âmes, augmentation de sections de certaines pièces.

à noter qu'en plus de ceux décrits précédemment, l'assemblage des noues sur les poutres-entrants diagonales sera légèrement amélioré par embrèvement des noues sur les entrants.

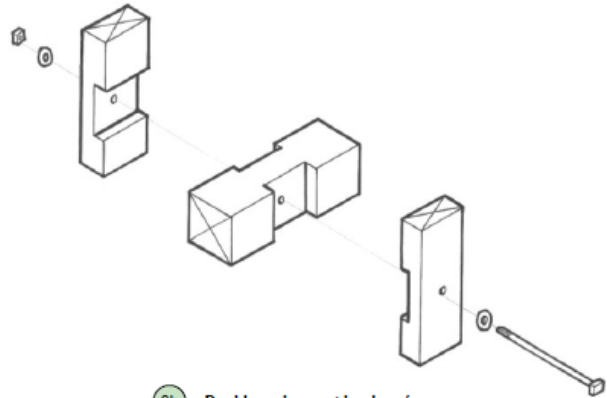
Mis à part ceux-ci, les assemblages seront soit restitués à l'identique de l'existant lorsque tout ou partie des pièces sont changées, soit simplement révisés lorsque les pièces sont conservées.

Le type d'intervention pour chacun des 1498 assemblages de la flèche a été précisé dans le tableau excel annexe des débits et des assemblages.

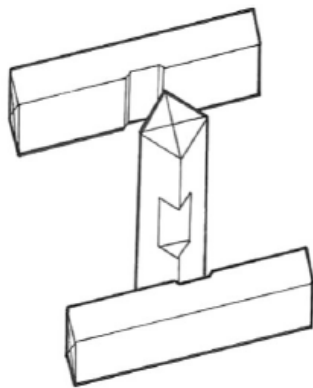
typologie d'assemblage	dénomination assemblage	niveau de complexité	Type d'intervention								
			A - assemblages neufs améliorés	B - assemblages neufs restitués à l'identique	C - assemblages en partie neufs restitués à l'identique avec	D - assemblages conservés révisés	E - entures	F - âme ou prisonniers ajoutés	G - greffes	H - assemblages non accessibles, conservés, provision 10%	TOTAL
			110	76	231	393	45	18	13	675	1498
3	Âme à adents de compression couverts	complexe	4					4			
33	Enture droite à encoches	complexe	4								
8b	Double moisement boulonné	simple	4								
6b	Moisement simple boulonné	complexe				4					
18	Tenon mortaise oblique à gros désabot	très complexe				4					
18	Tenon mortaise oblique à gros désabot	très complexe				4					
1b	Empilement boulonné	simple			4						
8b	Double moisement boulonné	simple	4								
4b	Cul-nu boulonné	simple								4	
8b	Double moisement boulonné	simple			4						
7b	Mi-bois boulonné	simple				4					



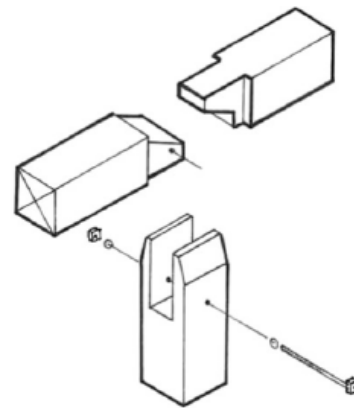
7b Mi-bois boulonné
Simple : 20 / 12
Complexe : 4



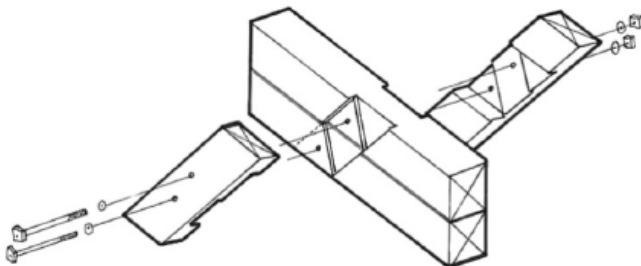
8b Double moisement boulonné
Simple : 244 / 44
Complexe : 77 / 50
Très complexe : 26 / 54



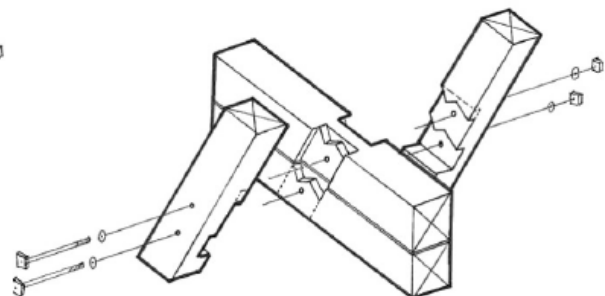
10 Double moisement en diagonale
Complexe : 1



11b Coupe en sifflet désabotée dans enfourchement boulonné en double entaille
Très complexe : 4



13b Double moisement boulonné à double entaille à la bissectrice
Très complexe : 4



14b Double moisement boulonné à double entaille étagée à embrèvement et ergot
Très complexe : 4

Exemples de types d'assemblages à entaille (extrait des planches typologiques A001AS, A002AS et A003AS). Pour chaque type d'assemblage sont dénombrés les occurrences par niveau de complexité. En bleu, les assemblages améliorés par rapport à l'existant.

G/ RESTAURATION COURANTE DE CHARPENTE

Les pièces localement dégradées seront réparées par greffes. On aura recours autant que possible à du bois sec issu du déclassement des pièces devant être déposées. À titre d'exemple : poinçon au niveau de la galerie, poteaux, aiguille (provisions pour les parties non diagnostiquées).

Pour les pièces non accessibles en cours d'études, dans la partie haute de l'aiguille et dans les zones entièrement couvertes de cuivre, une provision de 10% de remplacement a été appliquée.

Toutes les pièces de bois de la charpente seront repeintes en atelier, après décapage des peintures anciennes plombées : selon les dispositions existantes, les trois faces supérieures de chaque pièce de bois seront peintes à l'huile de lin aux pigments naturels rouges, d'après la teinte ancienne de la peinture rouge au minium de plomb, contretypée en début de chantier. Un primaire d'accroche, naturel et respirant, sera appliqué pour assurer la bonne adhérence de la peinture à l'huile de lin sur les bois décapés. Ce primaire, de teinte identique au bois, pourra être appliqué sur la quatrième face si besoin d'encapsuler le plomb résiduel en profondeur, encore détecté par test fluorescence X après décapage.

H/ MISE AU CALCUL ET IDENTIFICATION DES INTERVENTIONS

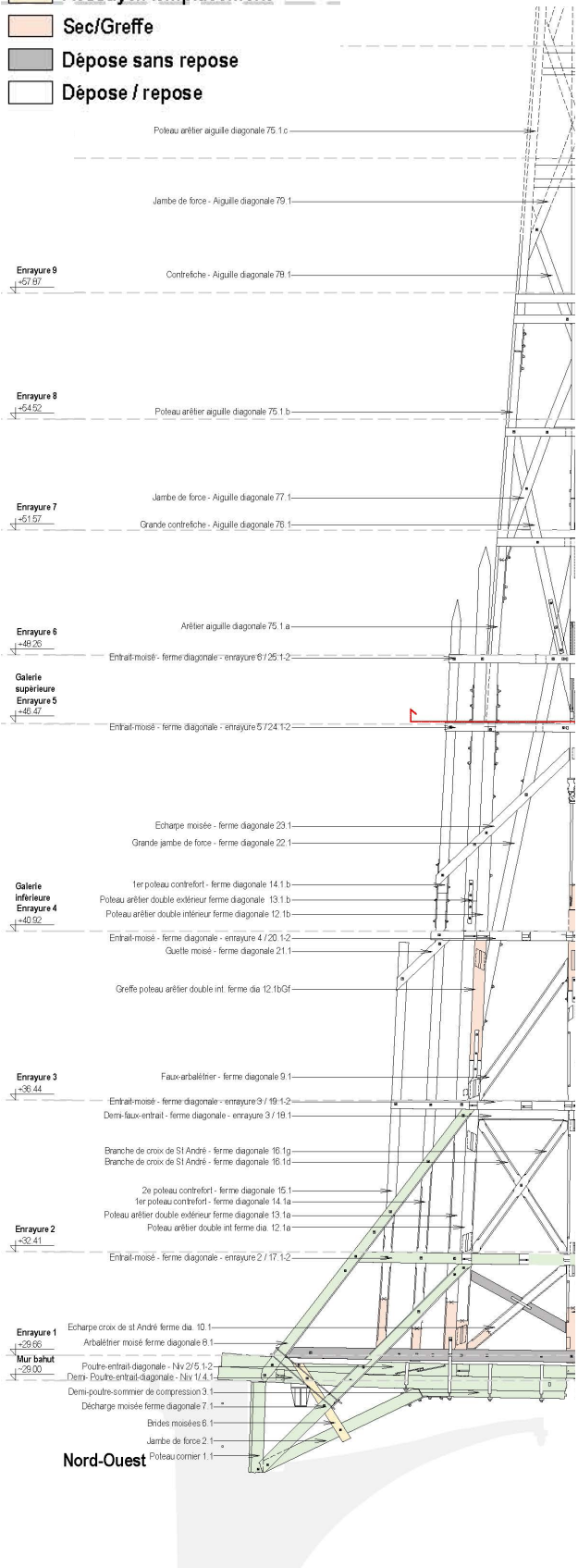
Les hypothèses de calcul de la structure restaurée suivent les Eurocodes. Le modèle numérique de la flèche restaurée a été recalculé en prenant en compte les caractéristiques structurales des différents types de bois neufs : vert pour les pièces exceptionnelles / ressuyé pour les pièces courantes / sec pour les greffes et les pièces conservées en dépose/repose. Les caractéristiques mécaniques ont été différenciées selon le taux d'humidité. À retenir que plus les bois sècheront dans le temps, plus leurs caractéristiques mécaniques s'amélioreront. L'affinement du modèle a permis de déterminer quelles pièces pouvaient avoir des caractéristiques mécaniques moins fortes (classe de résistance D24 au lieu de D30) pour pouvoir élargir le spectre de choix des bois.

Les planches graphiques indiquent l'origine des pièces à remplacer : bois exceptionnel vert / bois courant ressuyé / bois sec en greffes sur les pièces anciennes. Le tableau des débits de l'ensemble des pièces, fourni en annexe du présent rapport, indique la classe mécanique des bois neufs et leurs dimensions. Le code couleur du tableau reprend celui des planches graphiques.

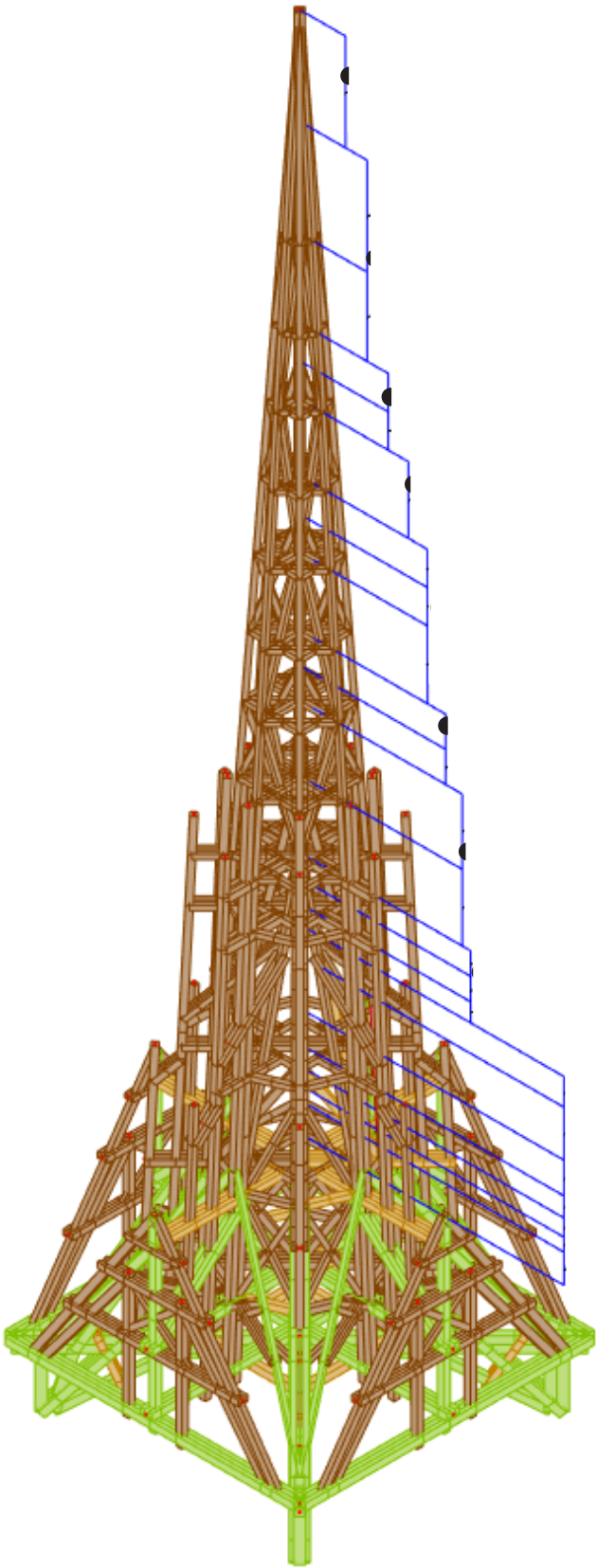
Nota : sur les 620 pièces de la flèche, qui représentent environ 180m³ de bois, 119 pièces - 42m³, soit 23% du volume total - sont à changer. Avec prise en compte des surépaisseurs en prévision des retraits de séchage, ce sont 64m³ de bois neufs, vert/ressuyé/sec tout confondus, qui sont à commander.

ETAT PROJETE - Provenance des bois

- Exceptionnel-Vert
- Ressuyé/Remplacement
- Sec/Greffe
- Dépose sans repose
- Dépose / repose



Demi-coupe diagonale de la flèche - 1/200° - repérage des pièces à changer selon leur origine : bois vert exceptionnel / bois ressuyé neuf / bois sec greffes.



Modèle numérique de la flèche avec différenciation des pièces à changer selon leur origine : bois vert exceptionnel / bois ressuyé neuf / bois sec greffes.

N°	Désignation des pièces					Nombre - Dimensions - Volume										Type de Bois				
						Marques	Nombres	Epaisseur relevée	Epaisseur avec 5% de retrait	Epaisseur à commander	Largeur relevée / déduite ou mesurée sur orthotrages	Largeur avec 5% de retrait	Largeur à commander	Longueur réelle utile sans tenons/entures	Longueur réelle utile avec tenons/entures supposés	Longueur à commander	Cubage existant	Cubage à commander	Exceptionnel/Vert	Ressuyé / Remplacement
Etablissage des plans d'épure																				
1.1	Poteau cornier	DC	1	0,29	0,30	0,31	0,39	0,40	0,40	2,4	2,5	3	0,27	0,37	1	1				D30
1.2	Poteau cornier	AB	1	0,28	0,29	0,31	0,39	0,40	0,40	2,4	2,5	3	0,26	0,37	1	1				D30
1.3	Poteau cornier	CB	1	0,30	0,31	0,31	0,39	0,40	0,40	2,4	2,5	3	0,28	0,37	1	1				D30
1.4	Poteau cornier	DA	1	0,29	0,30	0,31	0,38	0,39	0,40	2,4	2,5	3	0,27	0,37	1	1				D30
0.1	Contre-poteau	DC	1			0,31			0,40			3	0,37	1	1				D30	
0.4	Contre-poteau	DA	1			0,31			0,40			3	0,37	1	1				D30	
2.1	Jambe de force	DC	1	0,30	0,31	0,31	0,30	0,31	0,31	4,8	5,2	6	0,42	0,58	1	1				D30
2.2	Jambe de force	AB	1	0,30	0,32	0,31	0,30	0,31	0,31	4,7	5,2	6	0,42	0,58	1	1				D30
2.3	Jambe de force	CB	1	0,29	0,30	0,31	0,29	0,30	0,31	4,8	5,2	6	0,41	0,58	1	1				D30
2.4	Jambe de force	DA	1	0,31	0,32	0,31	0,30	0,31	0,31	4,9	5,2	6	0,44	0,58	1	1				D30
3.1	Demi-poutre-sommier de compression	CD	1	0,29	0,30	0,20	0,19	0,20	0,31	3,8	4	5	0,20	0,31	1	1				D24
3.2	Demi-poutre-sommier de compression	AB	1	0,29	0,30	0,20	0,20	0,20	0,31	3,9	4	5	0,22	0,31	1	1				D24
3.3-4	Poutre-sommier de compression	CB/DA	1	0,30	0,32	0,20	0,19	0,20	0,31	7,7		8,5	0,44	0,53	1	1				D24
4.1	demi- Poutre-entrait-diagonale - Niv 1	DC	1	0,29	0,30	0,31	0,34	0,35	0,35	9,2	9,4	10	0,90	1,09	1	1				D30
4.2	demi- Poutre-entrait-diagonale - Niv 1	AB	1	0,29	0,30	0,31	0,34	0,35	0,35	9	9,2	10	0,86	1,09	1	1				D30
4.3-4	Poutre-entrait-diagonale - Niv 1	DA/CB	1	0,29	0,30	0,31	0,34	0,36	0,35	19		20	1,80	2,17	1	1				D30
5.1-2	Poutre-entrait-diagonale - Niv 2	DC	1	0,29	0,30	0,31	0,35	0,36	0,35	19		20	1,82	2,17	1	1				D30
5.3	Demi-poutre-entrait-diagonale - Niv 2	CB	1	0,29	0,30	0,31	0,35	0,36	0,35	8,7	8,9	11	0,86	1,19	1	1				D30
5.4	Demi-poutre-entrait-diagonale - Niv 2	DA	1	0,29	0,30	0,31	0,34	0,36	0,35	9,4	9,6	11	0,93	1,19	1	1				D30
6.1	Brides moisées	DC	2	0,14	0,15	0,15	0,25	0,26	0,27	2,7		3,5	0,19	0,28		1				D24
6.2	Brides moisées	AB	2	0,16	0,16	0,15	0,25	0,26	0,27	2,4		3,5	0,19	0,28		1				D24
6.3	Brides moisées	CB	2	0,14	0,15	0,15	0,25	0,26	0,27	2,4		3,5	0,17	0,28		1				D24
6.4	Brides moisées	DA	2	0,14	0,14	0,15	0,25	0,26	0,27	2,6		3,5	0,17	0,28		1				D24
7.1	Décharge moisée ferme diagonale	DC	2	0,18	0,19	0,23	0,29	0,30	0,33	8,3	8,5	10	0,85	1,52	1	1				D30
7.2	Décharge moisée ferme diagonale	AB	2	0,17	0,18	0,23	0,29	0,30	0,33	8	8,3	10	0,79	1,52	1	1				D30
7.3	Décharge moisée ferme diagonale	CB	2	0,18	0,19	0,23	0,30	0,32	0,33	9	8	10	0,97	1,52	1	1				D30
7.4	Décharge moisée ferme diagonale	DA	2	0,18	0,18	0,23	0,31	0,32	0,33	9,3	8,8	10	0,99	1,52	1	1				D30
8.1	Arbalétrier moisé ferme diagonale	DC	2	0,18	0,18	0,23	0,28	0,29	0,33	9,2	9,5	10	0,90	1,52	1	1				D30
8.2	Arbalétrier moisé ferme diagonale	AB	2	0,17	0,18	0,23	0,29	0,30	0,33	9	9,2	10	0,88	1,52	1	1				D30
8.3	Arbalétrier moisé ferme diagonale	CB	2	0,18	0,18	0,23	0,30	0,31	0,33	9	9,2	10	0,93	1,52	1	1				D30
8.4	Arbalétrier moisé ferme diagonale	DA	2	0,18	0,18	0,23	0,29	0,30	0,33	9,3	9,5	10	0,94	1,52	1	1				D30
9.1	Faux-arbalétrier - ferme diagonale	DC	1	0,20	0,20		0,29	0,30		4,4			0,25	0,00			1			
9.2	Faux-arbalétrier - ferme diagonale	AB	1	0,20	0,20		0,29	0,30		4,4			0,25	0,00			1			
9.3	Faux-arbalétrier - ferme diagonale	CB	1	0,20	0,20		0,29	0,30		4,4			0,25	0,00			1			
9.4	Faux-arbalétrier - ferme diagonale	DA	1	0,20	0,20	0,20	0,29	0,30	0,31	4,4	5	5,5	0,25	0,34	1	1				D30
10.1	écharpe croix de st André ferme diagonale [1-2]	DC	1	0,24	0,25		0,24	0,25		3,5			0,20	0,00			1			
10.1.Gf	écharpe croix de st André ferme diagonale [1-2]	DC	1	0,24	0,25	0,26	0,24	0,25	0,26		0,8	1,5	0,00	0,10			1			D30
10.2	écharpe croix de st André ferme diagonale [1-2]	AB	1	0,24	0,25		0,24	0,25		3,5			0,20	0,00			1			
10.2.Gf	écharpe croix de st André ferme diagonale [1-2]	AB	1	0,24	0,25	0,26	0,24	0,25	0,26		0,8	1,5	0,00	0,10			1			D30
10.3	écharpe croix de st André ferme diagonale [1-2]	CB	1	0,24	0,25		0,24	0,25		3,5			0,20	0,00			1			
10.4	écharpe croix de st André ferme diagonale [1-2]	DA	1	0,24	0,25		0,24	0,25		3,5			0,20	0,00			1			
11.a.Gf	Grefe poinçon central [1]	ABCD	1	0,36	0,38	0,38	0,34	0,36	0,38			2	0,00	0,29			1			D30
11.a	Poinçon central - [1-3]	ABCD	1	0,36	0,38		0,36	0,38		9,9	9,9		1,28	0,00			1			
11.b.Gf	Grefe poinçon central [4]	ABCD	1	0,36	0,38	0,38	0,36	0,38	0,38			4,5	0,00	0,00			1			D30
11.b	Poinçon central - [4-7]	ABCD	1	0,34	0,36		0,34	0,36		13			1,53	0,00			1			
11.c	Poinçon central - [7-11]	ABCD	1	0,28	0,29		0,28	0,29		12			0,96	0,00			1			
11.d	Poinçon central - [11-Tête]	ABCD	1	0,28	0,29		0,28	0,29		15			1,21	0,00						
12.1.a.Gf	Poteau arêtier double intérieur ferme diagonale - [1-3]	DC	1		0,00	0,32		0,00	0,32			2	0,00	0,20			1			D30
12.1.a	Poteau arêtier double intérieur ferme diagonale - [1-3]	DC	1	0,28	0,31		0,28	0,32		7,9			0,62	0,00			1			
12.1.b.Gf	Grefe Poteau arêtier double intérieur ferme diagonale [3-4]	DC	1	0,30	0,32	0,32		0,00	0,32			5,5	0,00	0,56			1			D30
12.1.b	Poteau arêtier double intérieur ferme diagonale - [4-5]	DC	1	0,28	0,29		0,28	0,29		9			0,71	0,00			1			
12.2.a.Gf	Poteau arêtier double intérieur ferme diagonale - [1-3]	AB	1		0,00	0,32		0,00	0,32			2	0,00	0,20			1			D30
12.2.a	Poteau arêtier double intérieur ferme diagonale - [1-3]	AB	1	0,30	0,32		0,30	0,32		7,9			0,71	0,00			1			
12.2.b	Poteau arêtier double intérieur ferme diagonale - [3-5]	AB	1	0,30	0,32		0,30	0,32		9			0,81	0,00			1			
12.3.a	Poteau arêtier double intérieur ferme diagonale - [1-3]	CB	1	0,30	0,32		0,30	0,32		7,9			0,71	0,00			1			
12.3.b	Poteau arêtier double intérieur ferme diagonale - [3-5]	CB	1	0,30	0,32		0,30	0,32		9			0,81	0,00			1			
12.4.a	Poteau arêtier double intérieur ferme diagonale - [1-3]	DA	1	0,30	0,32		0,30	0,32		7,9			0,71	0,00			1			
12.4.b.Gf	Grefe Poteau arêtier double intérieur ferme diagonale - [3-4]	DA	1			0,32			0,32			5,5	0,00	0,56			1			D30
12.4.b	Poteau arêtier double intérieur ferme diagonale - [4-5]	DA	1	0,30	0,32		0,30	0,32		9			0,81	0,00			1			
13.1.a.Gf	Poteau arêtier double extérieur ferme diagonale - [1-4]	DC	1		0,00	0,32		0,00	0,32			1,5	0,00	0,15			1			D30
13.1.a	Poteau arêtier double extérieur ferme diagonale - [1-4]	DC	1	0,30	0,32		0,30	0,32		12			1,11	0,00						
13.1.b	Poteau arêtier double extérieur ferme diagonale - [5-tête]	DC	1	0,30	0,32		0,30	0,32		9,4			0,85	0,00						

Extrait du tableau des débits des 600 pièces de la flèche, donné en annexe. Code couleur identique aux pièces graphiques. Indication des nomenclatures, dimensions réelles / dimensions à commander (prise en compte des 5% de retrait au séchage des bois verts), classe de résistance.

II. RESTAURER LES COUVERTURES

A/ LES COUVERTURES EN CUIVRE

Le démontage complet de la flèche permettra de mener la restauration des pièces de cuivre en atelier, dans une démarche pensée dans le temps long. Le parti d'intervention sur les cuivres vise à rétablir les couvertures dans leur intégrité de forme et de teinte. Il s'agit notamment de remédier à la principale altération visuelle provenant de l'oxydation différentielle noire, qui brise l'unité chromatique du cuivre dans sa couleur naturelle vert-de-gris.

Intégrité de forme : démontage / remontage des pièces et amélioration des assemblages

Les rares éléments défectueux ou manquants du décor seront restaurés ou rétablis en complément des lacunes. De plus, l'intervention visera à améliorer les défauts de pérennité des soudures de pièces très exposées.

On dénombre trois types d'assemblages, à démonter de manière différente :

- Pattes en cuivre fixées par brasure sur la feuille portante et repliée sur la feuille portée
 - > déboîtement feuille par feuille, en conservant les pattes fixées aux feuilles
- Brasure tendre en plomb-étain, noirs et/ou argentés, aux bourrelets plus ou moins débordants
 - > démontage par échauffement ponctuel et dégagement soigné des feuilles à la lame de cutter
- Rivets ou clous en fer
 - > découpe fine des têtes de clous, décrochage des rivets

Ces types d'assemblages seront reproduits à la repose des couvertures. Cependant, certains de ces assemblages présentent des défauts d'étanchéité (ouvertures de soudure), notamment pour les ouvrages soudés à géométrie complexe et exposés (base des colonnettes des baies de l'étage à claire-voie, corniches en saillie). L'entreprise devra repérer ces défauts et proposer des solutions alternatives en recouvrement : interposition d'abergements ou de noquets, soudures rivetées.

L'entreprise privilégiera les solutions permettant de limiter les soudures sur place. Néanmoins, le démontage / remontage des cuivres nécessitera dans tous les cas des travaux par points chauds, inhérents à la nature de la couverture. Le respect des consignes de sécurité incendie sera particulièrement surveillé durant les périodes à risque de démontage et de remontage des couvertures en cuivre.

Intégrité de teinte : nettoyage des cuivres et patines naturelles dans l'avenir

La teinte vert-de-gris des cuivres de la flèche en constitue une des caractéristiques les plus marquantes dans le temps long de l'ouvrage. Celui-ci a été livré "à nu", il a très rapidement pris le ton brun de l'oxydation première du cuivre, avant de virer progressivement au vert-de-gris dans les premières décennies du XX^e siècle. Mais s'étant développée dans une atmosphère polluée au soufre, la teinte uniforme vert-de-gris est altérée par des corrosions noires sur 60% des surfaces. L'objectif de la restauration est d'offrir une flèche verte la plus uniforme possible.

Les traitements en conservation des patines vertes actuelles s'avèrent inefficaces, au vu des récents essais réalisés par Gaëlle Giralt⁴ (restauratrice de métaux missionnée pour réaliser des essais de nettoyage et de patine sur les cuivres de la flèche).

- Le dégagement des zones noires seules, en conservation des patines vertes sous-jacentes, ne permettrait de révéler que 15% de surfaces vertes supplémentaires ; les cuivres resteraient dans leur ensemble encore pour moitié noirs.
- Le traitement par patine artificielle des corrosions noires restantes donne des résultats décevants : il ne parvient pas à masquer les couches noires sous une nouvelle couche verte ; sans compter les retours d'expérience montrant une durabilité limitée des patines artificielles, de 5 à 10 ans⁵. Ces résultats amènent à exclure le recours aux patines artificielles.
- Le dégagement des patines noires seules, jusqu'à mise à nu du cuivre pour le laisser se patiner naturellement en vert, concomitant avec la conservation des patines vertes, apparaît difficile à mettre en œuvre à cause de la limite indistincte entre patines noires et vertes et laisserait la flèche dans une présentation hétérogène à sa livraison, état insatisfaisant, notamment au regard du délai avant de retrouver une teinte uniforme (quelques dizaines d'années).

⁴ Gaëlle GIRALT, *Rapport des tests de nettoyage et patine - Résultats - Cathédrale Saint-Bénigne DIJON (21) - Couverture en cuivre de la flèche*, CRMH, mai 2025.

⁵ Selon le retour d'expérience St-Martin à Metz : entre 1999 et 2009, le cuivre patiné artificiellement avait disparu, laissant ressortir une teinte brune. Cf. LE CROLLER Lola, *L'utilisation de la fonte de fer et des alliages cuivreux dans les décors extérieurs du palais Garnier, à Paris*, sous la direction d'Isabelle PALLOT-FROSSARD, Mémoire, École du Louvre, 2013, pp. 62-78. D'après Gaëlle GIRALT, la durée de tenue des patines artificielles serait même de 5 ans environ.

Dès lors, seules deux options peuvent convenir :

- une conservation des patines vertes ET noires (avec réduction de 15% des corrosions noires pouvant être dégagées sans altérer le vert-de-gris), patines conservées comme traces du temps, des intempéries et d'une époque industrielle dominée par le transport automobile ;
- un dégagement complet des patines pour permettre aux cuivres de se corroder naturellement et uniformément jusqu'à obtenir la belle couche vert-de-gris sur toutes les faces. La prévalence de l'unité de la teinte garantit ainsi une présentation satisfaisante de l'ouvrage après restauration, l'action naturelle du temps rétablissant progressivement et durablement l'état de présentation définitif vert-de-gris, au profit des générations futures.

C'est cette deuxième proposition qui est proposée par l'ACMH et retenue par la CRMH comme la plus satisfaisante pour la cohérence de la présentation.

L'ensemble des feuilles de cuivre sera donc décapé par aérogommage aux projectiles végétaux et micro-billes de verre pour éliminer les produits de corrosion (patines vertes et noires). Le cuivre mis à nu retrouvera rapidement (en 1 mois) une patine brune (selon les essais réalisés par Gaëlle Giralt en 2025). Puis la patine verte se reformera dans les décennies à venir, entre 10 et 50 ans, d'après les retours d'expérience. L'atmosphère dijonnaise étant aujourd'hui moins polluée en soufre qu'au XX^e siècle, la patine devrait se reformer de façon plus homogène que l'actuelle, sans couches noires.

Les cuivres neufs, qui sont estimés à moins de 5% des surfaces, ne recevront aucune patine artificielle à leur livraison. Après façonnage, ils seront dépolis par aérogommage (identique à celui des cuivres anciens) pour améliorer l'accroche de la nouvelle patine naturelle. Puis ils seront laissés en conditions extérieures proches de celles de Dijon, dans une position identique à celle qu'ils auront définitivement sur la flèche, afin d'anticiper leur vieillissement. La patine brune devrait apparaître sur les cuivres neufs au bout d'un an environ, avant même qu'ils ne soient reposés. Leur teinte devrait donc se rapprocher des cuivres anciens qui se patinent en brun un mois seulement après leur décapage. Sur les décennies suivantes, on ne peut prévoir à ce stade l'évolution des cuivres neufs comparativement aux cuivres anciens qui pourraient se repatiner plus vite en vert. Les travaux d'entretien pourraient prévoir des retouches ponctuelles et régulières des cuivres neufs à la patine artificielle pour les uniformiser avec les cuivres anciens.

B/ LES COUVERTURES EN ARDOISES

Au regard de l'âge des ardoises actuelles (75 ans), il est proposé de les remplacer entièrement. La couverture neuve présentera alors une durée de vie d'environ 100 ans, moyennant des repiquages réguliers.

Les ardoises actuelles sont de Trélazé, type MH, épaisseur 5mm. Il s'avère que cette épaisseur d'ardoise constitue l'optimum entre épaisseur et qualité / longévité. Pour s'assurer d'une bonne longévité, l'attention sera portée davantage sur la qualité exigée, la couleur du matériau et le suivi en carrière que sur l'épaisseur elle-même des ardoises. En outre, les ardoises plus épaisses sont plus difficiles à mettre en œuvre (recoupes plus dures), risquant d'augmenter la durée et le coût de pose.

La teinte des ardoises sera finement contrôlée : au démarrage de la découverture, l'entreprise présentera au sol des échantillons d'ardoises neuves en comparaison avec des ardoises actuelles déposées. Après validation d'un premier échantillon d'un type d'ardoise, plusieurs ardoises de ce type seront présentées pour définir les échantillons limites acceptables et un présentoir d'1m² sera réalisé pour valider les façons d'épaufrures. Échantillons et présentoir seront mis à demeure dans la base-vie avec fixation scellée. Dès validation du type d'ardoise, l'entreprise devra réserver ses palettes auprès du fabricant. Les arrivages seront régulièrement contrôlés par comparaison d'ardoises prélevées sur palette avec les échantillons limites en base-vie. Les palettes non conformes seront refusées.



Vue actuelle du fût de la flèche recouvert de cuivre, depuis le sud-est



Vue projet du fût de la flèche recouvert de cuivre, depuis le sud-est - état après le chantier de restauration : cuivres décapés, patinés brun



Vue projet du fût de la flèche recouvert de cuivre, depuis le sud-est - état dans 20-50 ans : cuivres patinés uniformément verts-de-gris

III. AMÉLIORER LES CONDITIONS D'ENTRETIEN ET DE SÉCURITÉ

A/ SÉCURITÉ INCENDIE

La restauration de la flèche est prévue après mise en sécurité de la cathédrale (en tranche ferme), comprenant les prestations suivantes :

- Mise aux normes et protection des réseaux électriques et consignation provisoire du grand lustre du chœur
 - Localisation : tous les combles
- Doublage des voûtes par une chape ignifuge
 - Localisation : voûtes de la croisée, des bras du transept et du chœur. La voûte de la nef sera seulement nettoyée (fissures en cours d'évolution dans les voûtes de la nef).
- Recoupement des combles par cloisons coupe-feu REI 120
 - Localisation : 1 cloison au milieu de la nef, 1 cloison dans chaque vaisseau autour de la croisée, à une travée de la croisée
- Pose de mailles métalliques pare-projectiles sur les tours pour éviter toute pénétration d'éléments volatiles incandescents transportés par le vent : sur les baies, derrière les abat-son et en pied de toiture.
- Facilitation du déplacement des secours en parties hautes : boîte à clé en façade sud, installation de mains courantes dans chacune des tours d'escaliers, déverrouillage des portes intérieures en parties hautes
 - Localisation : façade sud, tours d'escaliers, tous les combles
- Passerelles : compléments de mains courantes, élargissement des passerelles au droit des portes...
 - Localisation : tous les combles
- Mise aux normes (NF S61-759-1) et extension des colonnes sèches : rajout d'une prise dans la salle sous le carillon, rajout d'une prise dans le chéneau des bas-côtés, prolongement de la colonne sèche du bras sud du transept pour ajouter une prise à l'intérieur du comble, et création d'une colonne sèche le long du bras nord du transept selon les mêmes dispositions qu'au sud. Des volumes anti-bélier seront créés en tête de chaque colonne. À noter que la nouvelle CS au nord devra être alimentée par un poteau incendie situé à moins de 60m de sa prise d'alimentation ; ce poteau sera installé par la Ville, dans la rue Dr Maret, sur demande de la CRMH.
 - Localisation : salle sous le carillon dans la tour sud, comble bras sud du transept, comble bras nord du transept et façade nord
- Déplacement des descentes de paratonnerre pour les éloigner des colonnes sèches (selon la norme NF C17-102) : distance minimale de 60 à 120cm à respecter à 35m de hauteur (distance proportionnelle à la hauteur).
 - Localisation : chéneaux versants nord et sud de la nef et chéneau chevet
- Création de gargouilles sèches pour évacuation des eaux d'extinction et d'infiltration éventuelle.
 - Localisation : dans tous les grands combles

Lors du remontage de la flèche, des recoupement coupe-feu verticaux seront créés entre la souche et l'étage ajouré, et entre l'étage ajouré et l'aiguille.

Un certain nombre de mesures sont mises en œuvre pour la sécurité en cours de chantier (SSI de chantier, accès des secours...) : voir description plus loin, dans le chapitre sur les conditions de chantier.

B/ CONDITIONS D'ENTRETIEN

L'opération visera à établir de meilleures conditions d'entretien, dont la difficulté a été une cause extrinsèque majeure des désordres :

- permettre l'évacuation d'éventuelles infiltrations et des eaux d'extinction en créant une chape ignifuge sur l'extrados de la voûte de la croisée et des exutoires vers l'extérieur dans les angles de la croisée, qui favoriseront également la ventilation naturelle des pieds de tabouret ;
- isoler les bois des appuis maçonnés pour éviter les stagnation d'eau ou d'humidité par interposition d'une couche de plomb et rainurage des arases ;
- favoriser l'accès au tabouret : échelles, modification des lucarnes pour les rendre ouvrantes, éclairage. Cet éclairage nécessite un réseau neuf ; les luminaires seront à poser de façon à éviter le contact direct avec les charpentes : en applique sur le mur bahut et sur un chemin de câble vertical à capotage peint ton neutre installé à proximité immédiate de l'escalier pour entretien. Un tableau des commandes de tout l'éclairage des combles est prévu dans la tour sud, permettant de mettre hors tension l'éclairage en dehors des visites techniques.

Ces principes sont détaillés au programme des travaux.

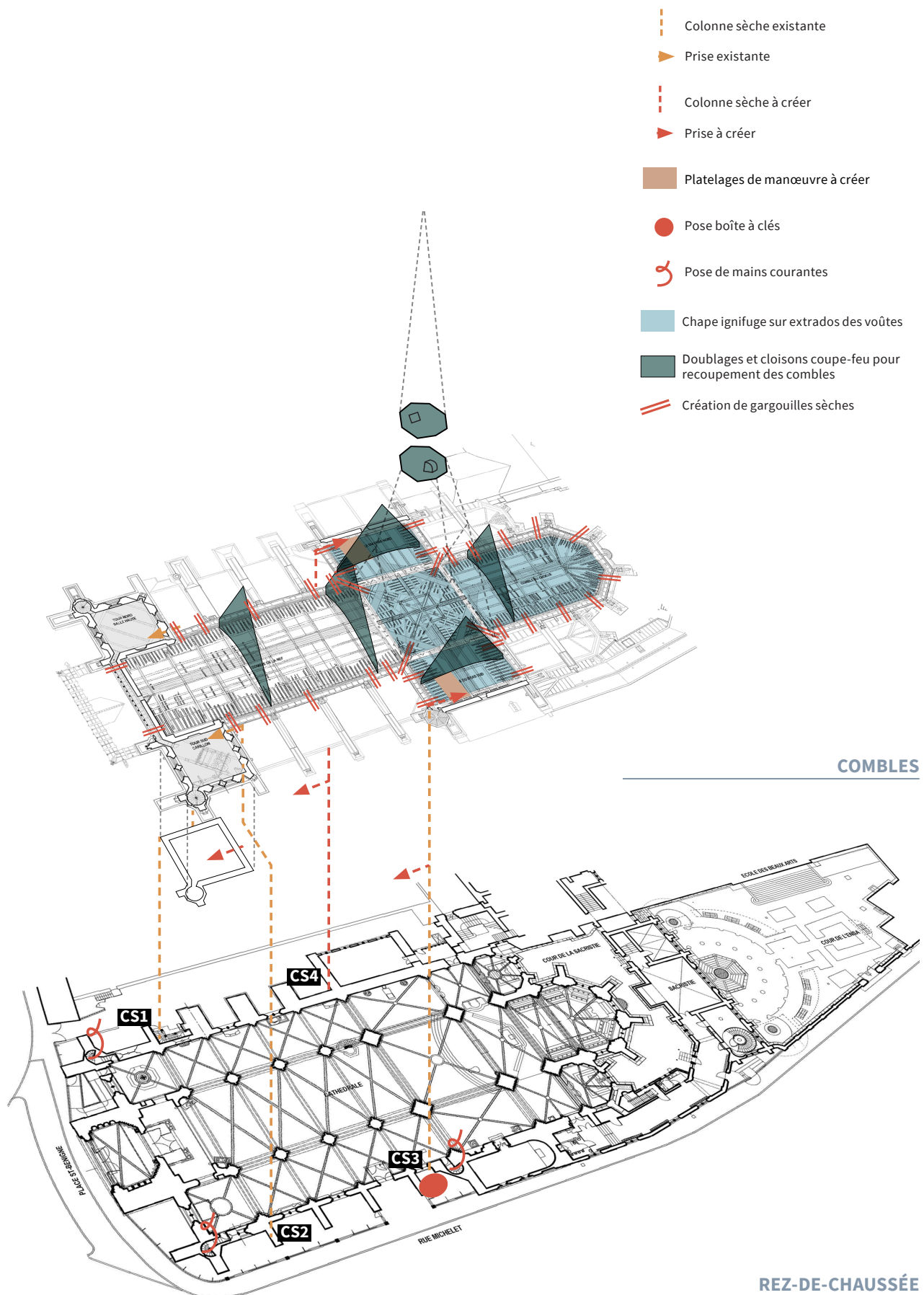
La préservation vis-à-vis des infestations par les volatiles et les rongeurs sera assurée par la pose d'un filet sur les baies de la lanterne et la pose de mailles à l'entrée des exutoires.
 À noter que l'ensemble de ces interventions sera quasi invisible depuis l'espace public.



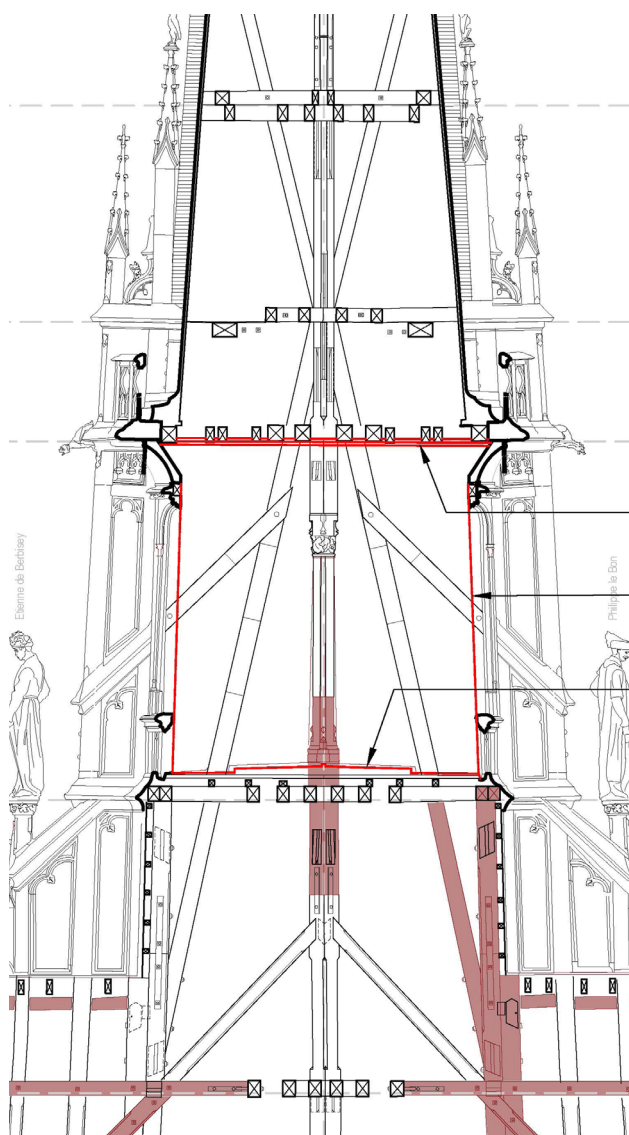
Vue projet de la façade sud de la cathédrale avec interventions extérieures de mise en sécurité quasi imperceptibles : exutoires, descentes feuillard, boîte à clé, mailles derrière abats-son des tours et sur étage ajouré de la flèche, pare-gravois en pied de toiture des tours. Seule la teinte des cuivres de la flèche sera modifiée.



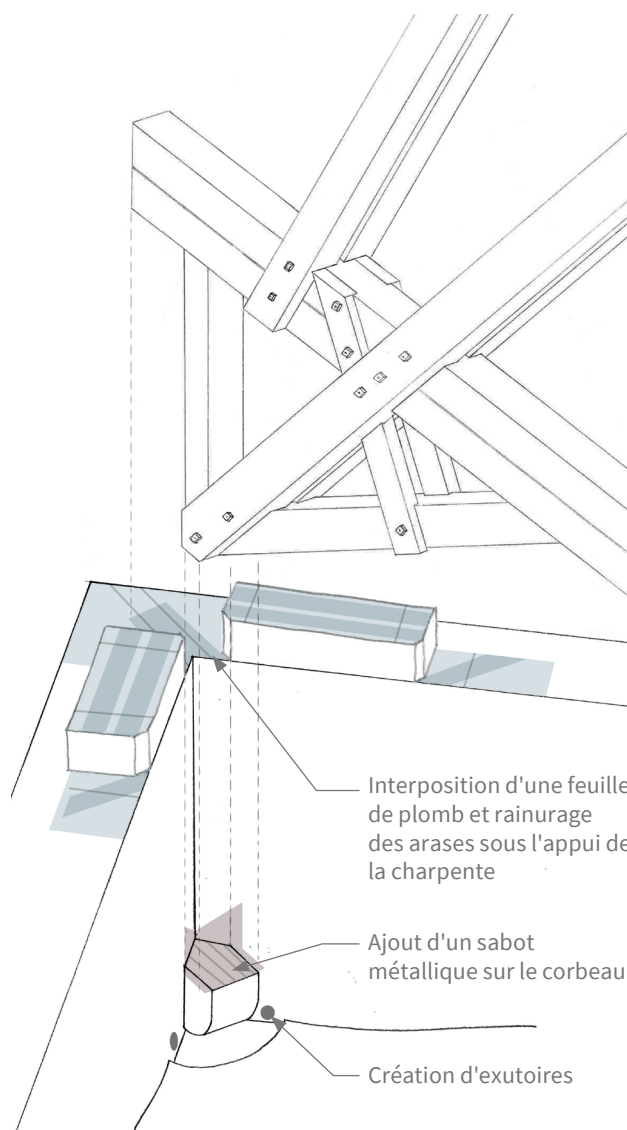
Vue projet du pied de versant sud de la nef : cheminement de la descente du paratonnerre au travers du chéneau



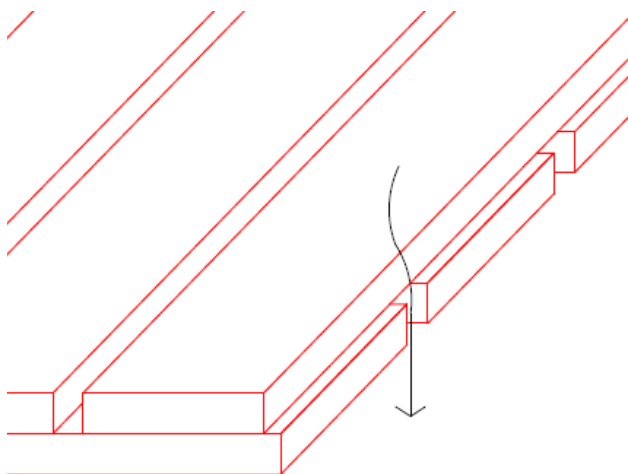
Repérage des mesures de mise en sécurité préalables à la restauration de la flèche



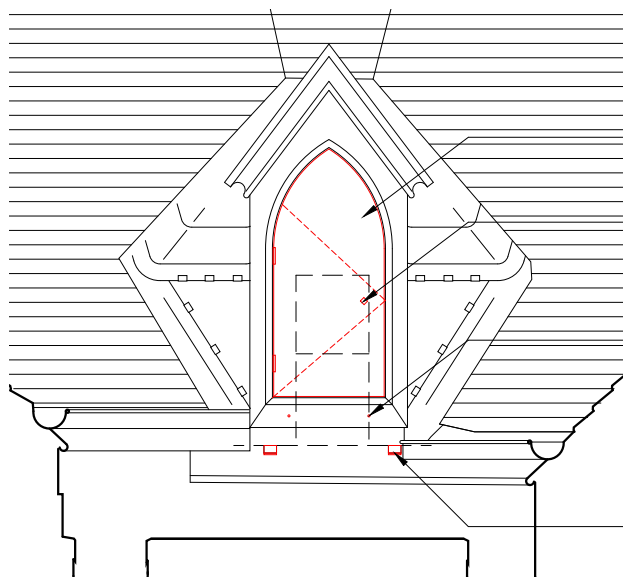
Recoupements CF verticaux amélioré entre lanterne et souche et entre lanterne et aiguille.



Ventilation et évacuation en pied de tabouret.



Principe de recoupement CF vertical au niveau de l'enrayure 5 : double cours de lames de bois, non étanche pour évacuation des éventuelles eaux d'extinction



Lucarnes d'angle rendue ouvrantes pour accès aux bouts des poutres-entrants

3. STRUCTURE GÉNÉRALE DE L'OPÉRATION

I. FOURNITURE DE BOIS DE CHARPENTE EXCEPTIONNELS

Les bois de charpente d'un ouvrage tel que la flèche de Dijon doivent répondre à une double exigence :

- Qualité de bois assurant des caractéristiques mécaniques suffisantes pour les charges à reprendre : classe structurelle D30 correspondant au classement visuel QPA, pour la plupart des pièces.
- Taux d'humidité maîtrisé pour pouvoir anticiper l'effet du retrait des bois dans le comportement de la charpente et présenter les meilleures caractéristiques structurales qui s'améliorent avec le séchage du bois. Pour mémoire, on parle de bois vert pour un taux d'humidité supérieur à 30% ; de bois ressuyé pour un taux d'humidité compris entre 20 et 30%.

Plus les pièces de bois sont grandes, plus il est difficile de s'approvisionner en respectant cette double exigence qui a été établie pour la construction courante, c'est-à-dire des pièces inférieures à 8m de long :

- L'absence de défauts exigée par le classement D30 / QPA est moins probable sur de grandes longueurs.
- Le temps de séchage du bois, de 1cm/an, est plus important pour les grosses sections.

D'après les scieries, les maîtres d'œuvre et les différents experts bois consultés, la fourniture de bois de telles qualités pour des pièces supérieures à 8m de long et de section supérieure à 30x30cm est très difficile. Les entreprises de charpente classiques ne pourront que difficilement l'assumer dans le cadre d'un marché de travaux avec fourniture.

De ce fait, une prospection spécifique et la passation d'un marché de fourniture auprès des acteurs ad hoc de la filière bois, notamment l'Office national des forêts (ONF), ont été mises en place par la Maîtrise d'Ouvrage : trois années avant le remontage de la charpente, pour permettre un séchage relatif des bois, et sous la direction de Steven LE BER, charpentier AMO.

On distinguera donc les pièces de bois :

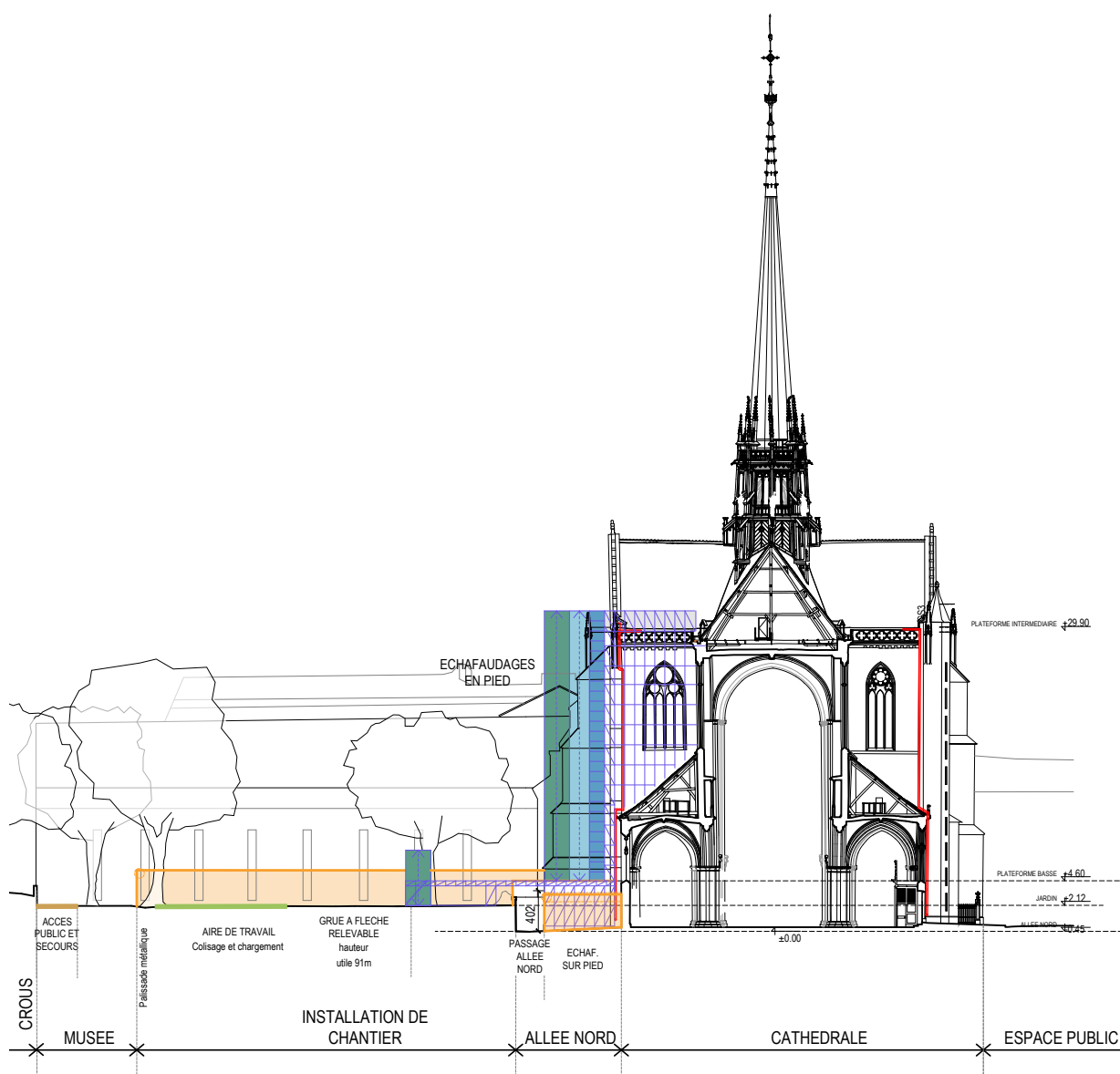
- "Exceptionnelles" : de longueur supérieure ou égale à 8m et/ou de section d'un côté supérieur ou égal à 30cm. Elles feront l'objet du marché de fourniture séparé anticipé. Les critères de sélection et de stockage des grumes et les conditions de ressuyage des bois sciés sont détaillés dans un cahier des charges séparé, dont Steven LE BER veillera au bon respect. Le taux d'humidité attendu au bout des trois années de séchage qui sépareront le sciage des bois (hivers 2024-2025 et 2025-2026) et leur mise en œuvre dans la flèche (2028) est de 30%.
- "Courantes" : toutes les autres pièces qui seront fournies de façon classique par le charpentier. Ces pièces devront être a minima ressuyées (taux d'humidité inférieur à 30%).
- Pour les greffes sur pièces anciennes, elles devront, dans la mesure du possible, être réalisées en bois sec, fourni par le charpentier. Certaines greffes de section exceptionnelle (poinçon et poteaux de contreforts) seront commandées en provision sur le marché de fourniture séparé, au cas où le charpentier n'aura pas réussi à les fournir en bois sec.

On dénombre :

- Pièces exceptionnelles à changer en bois vert : 57 pièces - 31,8m³ (47,7m³ avec les surcôtes comptées pour les retraits)
- Pièces courantes à changer en bois ressuyé : 60 pièces - 11,5m³ (17,3m³ avec les surcôtes)
- Greffes en bois sec : 15 greffes - 4,01m³
- Pièces existantes conservées : 283 pièces - 73,4m³
- Pièces non diagnostiquées (non accessibles) : 193 pièces - 56,9m³ - provision 10% à changer : 8,5m³ (avec les surcôtes)

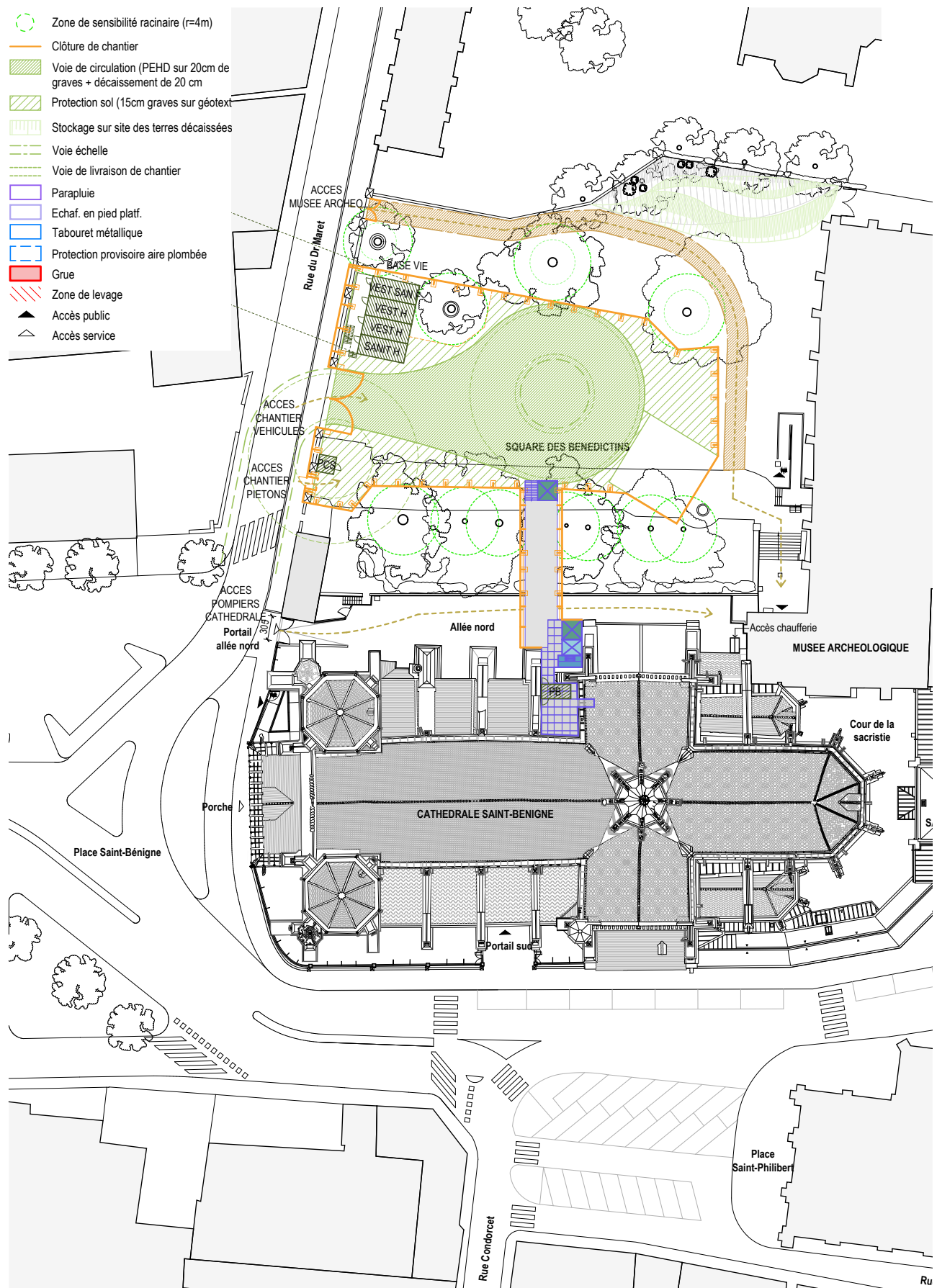
II. TRAVAUX DE SÉCURISATION INCENDIE PRÉALABLES À LA RESTAURATION DE LA FLÈCHE

Avant d'entamer la restauration de la flèche à proprement parler, le niveau de sécurité incendie sera augmenté par les interventions décrites plus haut. Ces travaux constitueront la tranche ferme de l'opération. Ils nécessiteront des installations de chantier moins importantes que pour les travaux sur la flèche, décrites sur les plans suivants.



Coupe d'installation de chantier

IV. Projet



Plan d'installation de chantier

III. LEVAGES PAR GRUE FIXE

A/ NÉCESSITÉ D'UNE GRUE FIXE À BRAS RELEVABLE

Pour changer l'intégralité de la charpente du tabouret à la base de l'ouvrage, la stratégie d'intervention retenue consiste dans le démontage et remontage complet de l'ouvrage, avec restauration de la charpente en atelier. À cause de l'enchevêtrement des pièces et des assemblages à mi-bois, la flèche devra être démontée puis remontée pièce par pièce. Seules les fermes périphériques pourront être déposées d'un seul tenant.

L'opération par démontage / remontage pièce par pièce nécessitera des levages à toutes les étapes du chantier, sur des durées continues : pour le levage des pièces de charpente, mais également pour le levage des éléments d'échafaudages à monter / remonter au fur et à mesure de la dépose / repose de la charpente ; pour les levages fréquents d'évacuation et d'approvisionnement des matériaux de couvertures. Une grue fixe est donc prévue.

La hauteur utile de la grue nécessaire pour la restauration de la flèche est de 91m. Le seul modèle permettant d'atteindre cette hauteur est une grue à bras relevable (les grues à bras horizontales les plus grandes n'atteignent que 70m de hauteur utile). Pour l'ancrage de la grue, un radier de 10x10m sur micro-pieux sera coulé.

B/ POSITIONNEMENT DE LA GRUE FIXE

La grue devant être montée dans une zone dégagée de la ramure des arbres et à distance suffisante des murs de soutènement et des racines, au plus près de la cathédrale pour avoir une portée suffisante. Son seul emplacement possible est dans l'angle sud-est du square des Bénédictins, à proximité de l'entrée du musée archéologique, sans en empêcher l'accès. La portée de la grue est de 4T à l'aplomb de la flèche (42m de distance), ce qui correspond au poids maximal à lever pour la charpente.

C/ IMMOBILISATION DE LA GRUE PENDANT LES RESTAURATIONS EN ATELIER

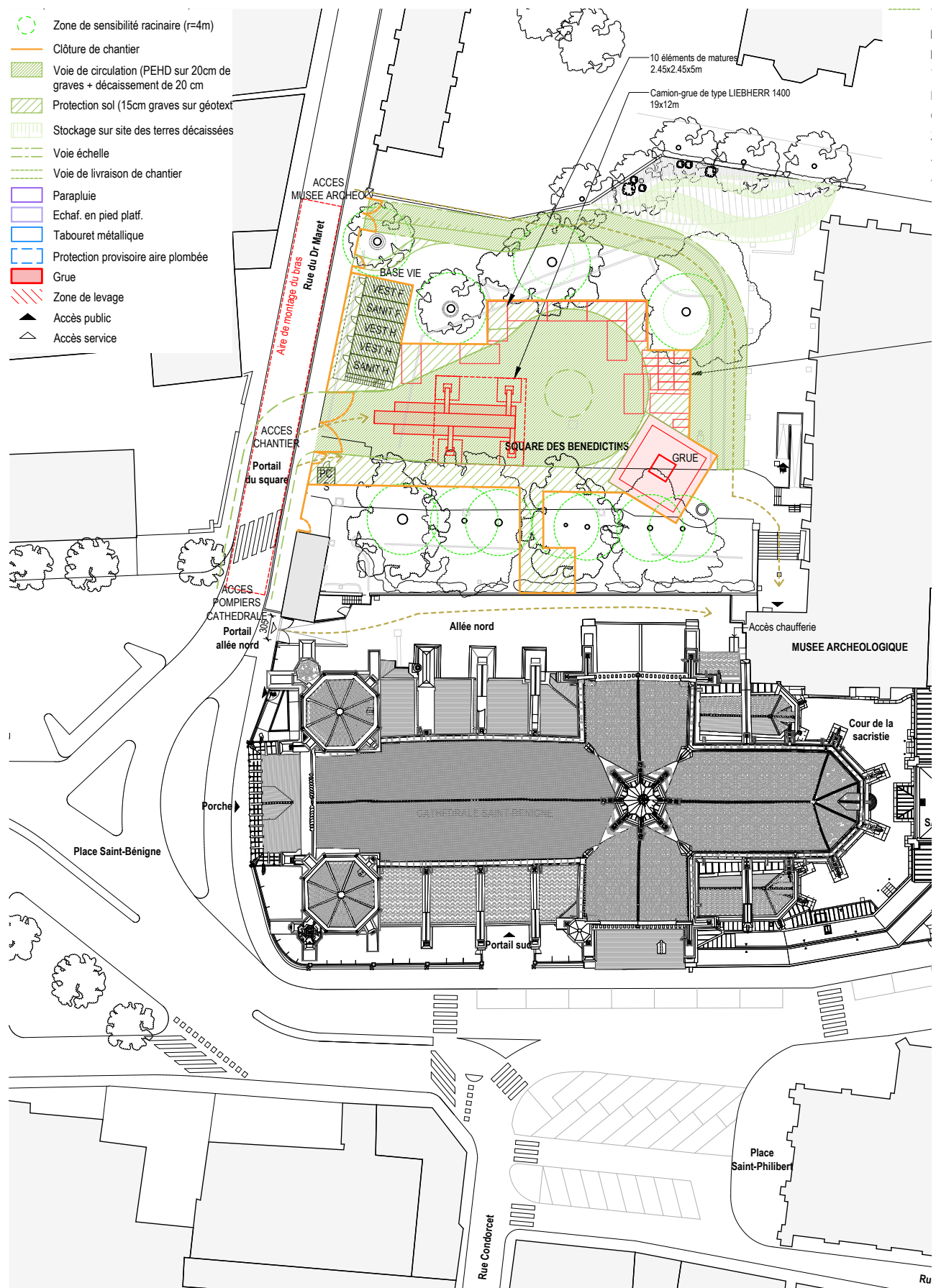
Pendant les 8 mois de la TO3 - Restauration en atelier, la grue sera au repos. Le lot 2 - grue devra proposer dans son offre la solution la moins onéreuse :

- Maintien en place de la grue > coût de location d'une grue en sous-activité mais sans frais d'immobilisation.
- Dépose / repose de la grue, compris frais d'immobilisation pour parer le risque d'indisponibilité de la grue en cas de démontage (très faible nombre en France).

Dans les bordereaux de prix, c'est la première solution qui est décrite car évaluée comme la moins coûteuse. Mais l'entreprise pourra partir sur la seconde hypothèse ou toute autre proposition dès lors qu'elle permettra une économie.

D/ AIRES DE TRAVAIL ET DE COLISAGE

Les fermes périphériques, pouvant être déposées d'un seul tenant, seront enlevées à la grue, déposées sur une aire de travail aménagée entre les arbres, dans le square des Bénédictins et démontées à pied d'œuvre avant transport. Cette aire de travail servira également d'aire de dépose et de pré-stockage de toutes les autres pièces de charpente démontée par la grue. En phase de montage, elle permettra également le pré-assemblage de certaines pièces (pieds du tabouret, par exemple), facilitant le montage et offrant un gain de temps. Elle devra avoir une surface minimale de 10x16m, dégagée en hauteur, pour permettre le dépôt des plus grandes pièces (poutres-entrants diagonales de 18m de long posées dans la diagonale de l'aire de travail) et des fermes périphériques (10 x 13m). Une aire de colisage attenante sera aménagée pour l'allotissement des pièces de charpente avant chargement sur camion, éventuellement à la grue.



Plan d'installation de la grue

E/ MONTAGE DE LA GRUE FIXE : ENCOMBREMENT ET CONTRAINTES

La grue fixe se décompose en plusieurs parties :

- le radier de fondation
- le châssis posé sur le radier
- le mât de 50m de haut, composé de 10 portions de 2,45 x 2,45 x h 5m
- les contrepoids en béton armé de 200T au total
- le pivot
- le bras de 50m de long

La grue fixe devra être montée elle-même par un camion grue. Le bras de la grue fixe devra être monté au sol et levé d'un seul tenant pour se fixer au pivot. Cette opération nécessite une aire de montage du bras de 50x5m, dégagée en hauteur et rapprochée du camion grue. La seule zone possible est la rue du Dr Maret, le camion grue prenant place au centre du square, à mi-distance entre la rue et l'emplacement de la grue fixe.

L'encombrement conséquent du camion grue (19m de long et 12m d'empattement) et des pièces détachées de la grue implique un enchaînement des tâches maîtrisé, dans l'ordre suivant :

- Coulage du radier
- Pose du châssis sur le radier
- Livraison de la mâture en pièces détachées sur des aires de stockage prévues à cet effet (repérées sur le plan ci-contre) : les 10 portions de mât (pas de superposition possible des portions qui en seraient fragilisées), les 40 blocs de béton armé (2m³ chacun, superposables)
- Mise en place d'une grue PPM sur l'aire repérée en plan
- Levage et montage des éléments de mâture par grue PPM sur le châssis de la grue fixe. Rotation de la flèche de la grue PPM par le nord pour éviter la ramure des tilleuls au sud.
- Livraison des éléments sommitaux de la grue fixe : pivot de la grue sur zone de stockage prévue et éléments du bras de la grue fixe dans la rue du Dr Maret. Condamnation de la rue sur 1 journée entière.
- Montage du pivot par grue PPM sur la grue fixe
- En une journée : montage du bras de la grue fixe dans la rue du Dr Maret et installation sur la grue fixe par grue PPM.
- Mise en route de la grue fixe. Essais et réception.
- Évacuation de la grue PPM.

Le montage de la grue nécessite donc 2 jours d'immobilisation non consécutifs de la rue du Dr Maret.

F/ ORDRE DE LEVAGE DE LA CHARPENTE

L'ordre de montage de la charpente est précisé sur les plans ci-contre et dans le programme de travaux.

ETAPES DU LEVAGE DE LA FLECHE

SOUS PARAPLUIE OUVRANT

1. Tabouret

- Pieds pré-assemblés (poteaux cornier, contre poteaux, jambe de force, décharge, brides)
- Poutre sommiers (NE-SO puis NO et SE)
- 1er niveau poutres entrails (NE-SE puis NO et SE)
- 2eme niveau poutres entrails (NO-SE puis NE et SO)
- Goussets
- Poutre-entrails f.périph. moises intérieures

2. Fermes périphériques

- Montées pré-assemblées à pied d'oeuvre

3. Souche - Fermes diagonales (NO-SE puis NE et SO)

- Poinçon
- Contreventements
- Poteaux
- Entrails moisés enr. 2 et 3, Goussets
- Arbalétriers, Guettes

4. Souche - Faîtage pans de bois (N-S puis OE)

- Poteaux arêtiers, Echarpes du fût
- Poteaux de contrefort
- Poutres-Coyers enr.1,2,3, Ceintures enr. 2,3, Goussets de noue
- Echarpes, Faux-arbalétriers, Etrésillons de faitage

5. Noues

- Noue, Contrefiche et Coyers de noue

POSE COUVERTURE TUILES ET
DEPOSE PARAPLUIE OUVRANT

6. Lanterne - Fermes diagonales

- Prolongement poinçon et poteaux
- Faux arbalétrier, grande jambe de force
- Echarpes
- Entrails moisés enr. 4 et 5 et Goussets

7. Lanterne - Faîtages

- Prolongement poteaux
- Jambe de force
- Echarpes
- Coyers et sablières-ceinture enr. 4 et 5

COUVERTURE TERRASSE PLOMB

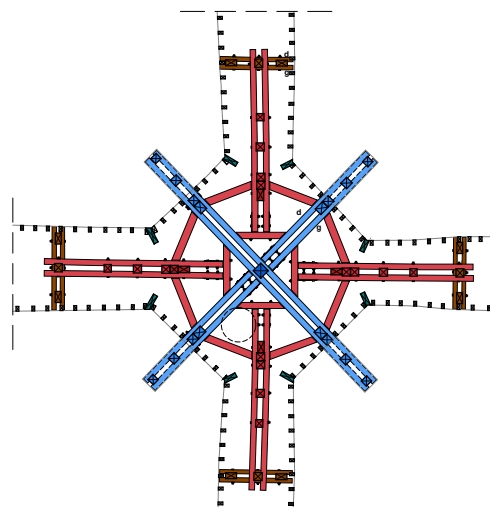
8. Aiguille - Fermes diagonales

- Prolongement poteaux, poinçon
- Contrefiches et jambe de force
- Entrails moisés et goussets enr. 6 à 12

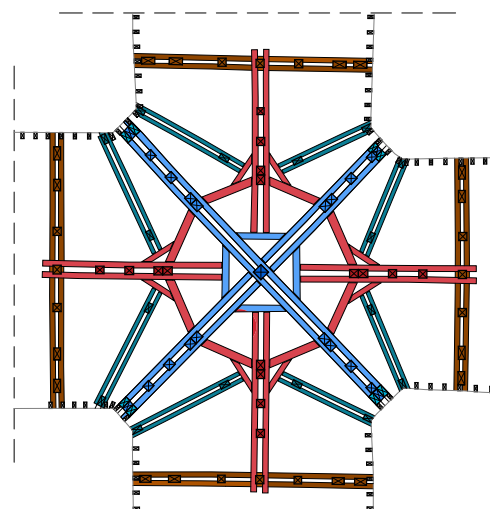
9. Aiguille - Faîtages

- Prolongement poteaux
- Contrefiches et jambe de force
- Coyers et sablières-ceinture enr. 6 à 12

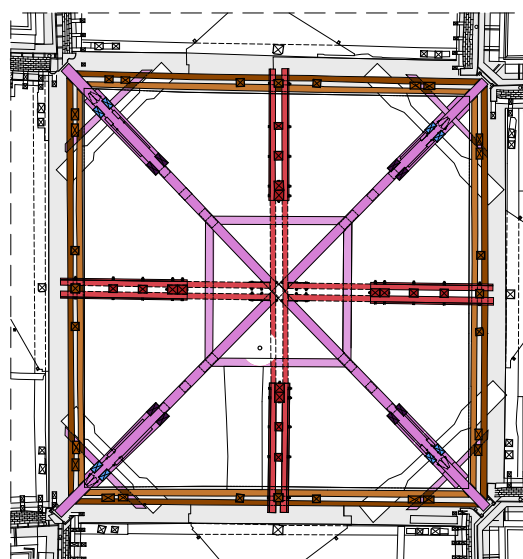
10. Facettes aiguille : contreventements



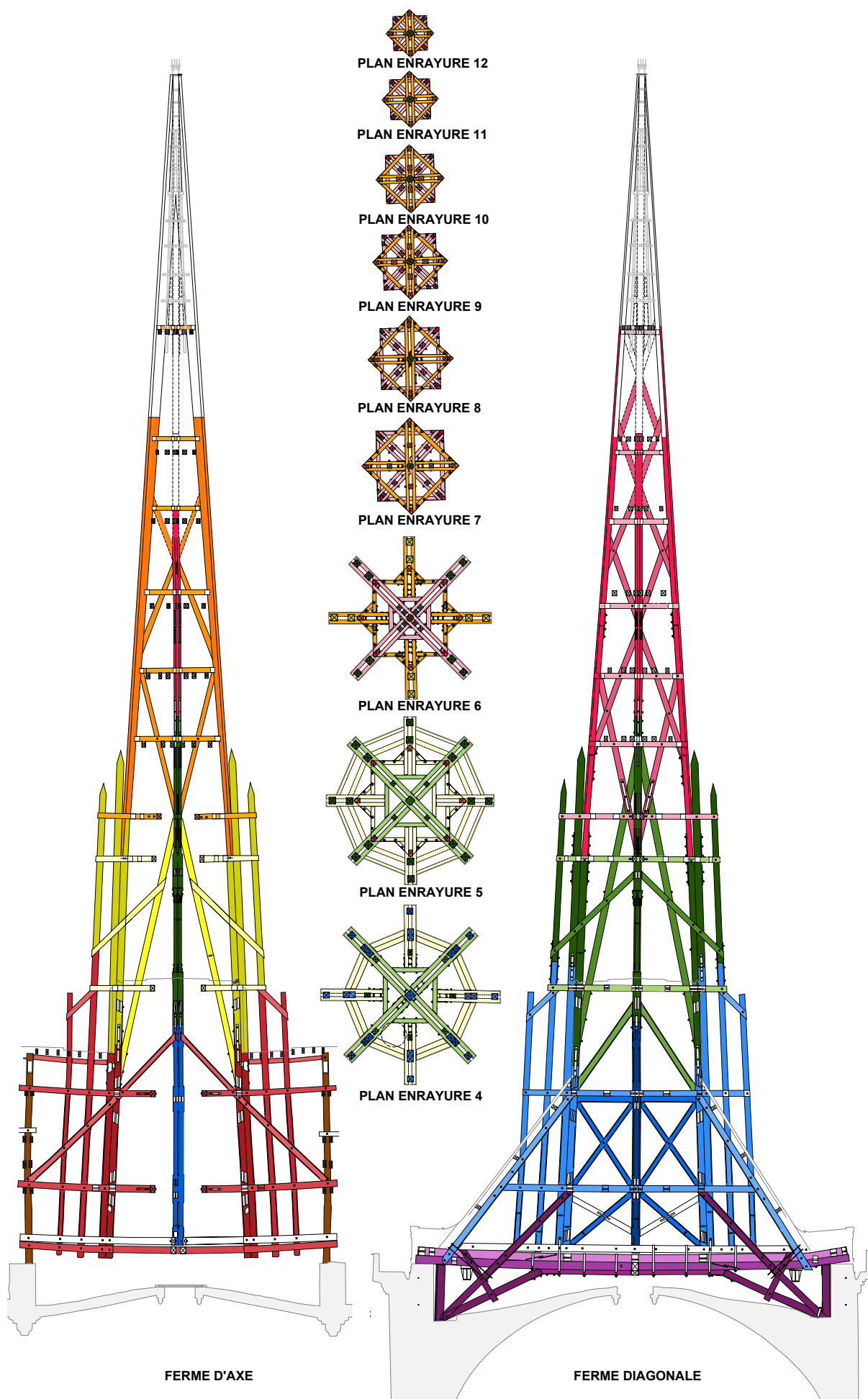
PLAN ENRAYURE 3



PLAN ENRAYURE 2



PLAN ENRAYURE TABOURET



IV. INSTALLATIONS DE CHANTIER DANS LE SQUARE DES BÉNÉDICTINS

La nécessité d'une grue à demeure pour la restauration de la flèche, ses contraintes d'emprise au sol pour son montage, la nécessité d'une aire de travail suffisante, l'ampleur de la base-vie nécessaire à l'opération (pour environ 20 travailleurs) et les nombreuses livraisons sont autant d'impératifs auxquels doit répondre l'installation de chantier, dans un environnement urbain déjà très contraint. Pour limiter l'incidence voirie, l'installation de chantier se fera au nord de la cathédrale, dans le square des Bénédictins, propriété de l'État. Cette aire présente un certain nombre de contraintes :

A/ SENSIBILITÉ ARCHÉOLOGIQUE

D'après le SRA⁶, dans le square des Bénédictins, il y a une présomption forte d'une épaisseur de remblais recouvrant les vestiges du grand cloître, du cellier, du grenier et du réfectoire, tel qu'ils sont connus sur les représentations des Mauristes du milieu du 17^e siècle et qu'ils figurent sur les plans du 18^e siècle (Beaurain, Mikel).

Il n'y a jamais eu de sondages archéologiques dans ce secteur de l'abbaye, juste quelques observations ponctuelles peu documentées. Une surveillance a notamment été effectuée pour l'installation de la chaufferie et de la canalisation de gaz en 2010-2011, le long du bas-côté nord de la cathédrale. Des vestiges sont alors apparus juste sous les pavés, notamment un dallage et un massif de fondation pour lesquels l'interprétation est un peu obscure : peut-être une maçonnerie de confortement du cloître ou du cellier ? Quoiqu'il en soit, il ressort aussi de ces observations que ces niveaux sont assez tardifs, avec du mobilier principalement daté du 18^e siècle.

On peut donc en conclure que l'épaisseur de terrain formant le square, contenu par le mur bahut bordant le bas-côté nord est récente, liée à la reconfiguration du quartier au 19^e siècle, avec la démolition des bâtiments claustraux (à l'exception du dortoir et de l'abbatiale), le percement de la rue du Dr Maret puis la construction du grand séminaire (actuellement le CROUS).

En conclusion et en restant très prudent vu l'absence de sondage de reconnaissance, il n'y aurait donc pas de risque archéologique pour un terrassement de l'ordre de 80 cm de profondeur, surtout s'il est ponctuel.

Pour lever tout doute, il pourrait être engagé un sondage archéologique et ensuite, le cas échéant, une possible fouille. Il peut s'agir d'un diagnostic préventif classique prescrit par le SRA, sur saisine du MOA, réalisé par l'INRAP ou bien d'un sondage commandé directement par le MOA à un opérateur, dans le cadre de l'étude de faisabilité du projet du MOE.

Les installations de chantier ont été étudiées pour minimiser les impacts au sol : fondation de la grue par micro-pieux tubés sur les premiers mètres, fondation de la base-vie par technopieux, protection des sols par décaissement sur 20cm maximum de profondeur et par remblaiement en graves.

B/ ACCÈS AU MUSÉE ARCHÉOLOGIQUE

Ce square sert d'accès au musée archéologique, propriété de l'État, affecté à la Ville de Dijon. Pour la durée du chantier, il sera départagé en deux parties inégales en surface :

- l'accès au musée archéologique (public et secours) qui cheminera par le nord du square et le long du musée ;
- le reste que square dévolu aux installations de chantier.

Pour la protection du musée, le SDIS demande la réalisation d'une voie échelle pendant le chantier (inexistante dans les dispositions actuelles). Elle doit répondre aux contraintes du paragraphe 2 de l'article CO2 - Arrêté du 23 janvier 2004 :

- longueur minimale de 10m ;
- largeur libre minimale de la chaussée de 4m ; de 7m lorsque cette section est en impasse, ou création d'une aire de retournement ;
- pente maximale de 10 % ;
- la disposition par rapport à la façade desservie permet aux échelles aériennes d'atteindre un point d'accès (balcons, coursives, etc.) à partir duquel les sapeurs-pompiers doivent pouvoir atteindre toutes les baies de cette façade, la distance maximale entre deux points d'accès ne devant jamais excéder 20m.

L'aménagement provisoire du square des Bénédictins a été étudié de manière à créer une voie se rapprochant au maximum des caractéristiques d'une voie échelle. La voie sera élargie à 7m sur sa dernière section d'environ 20m de

⁶ Mail de Marie-Christine LACROIX, daté du 15/07/2024

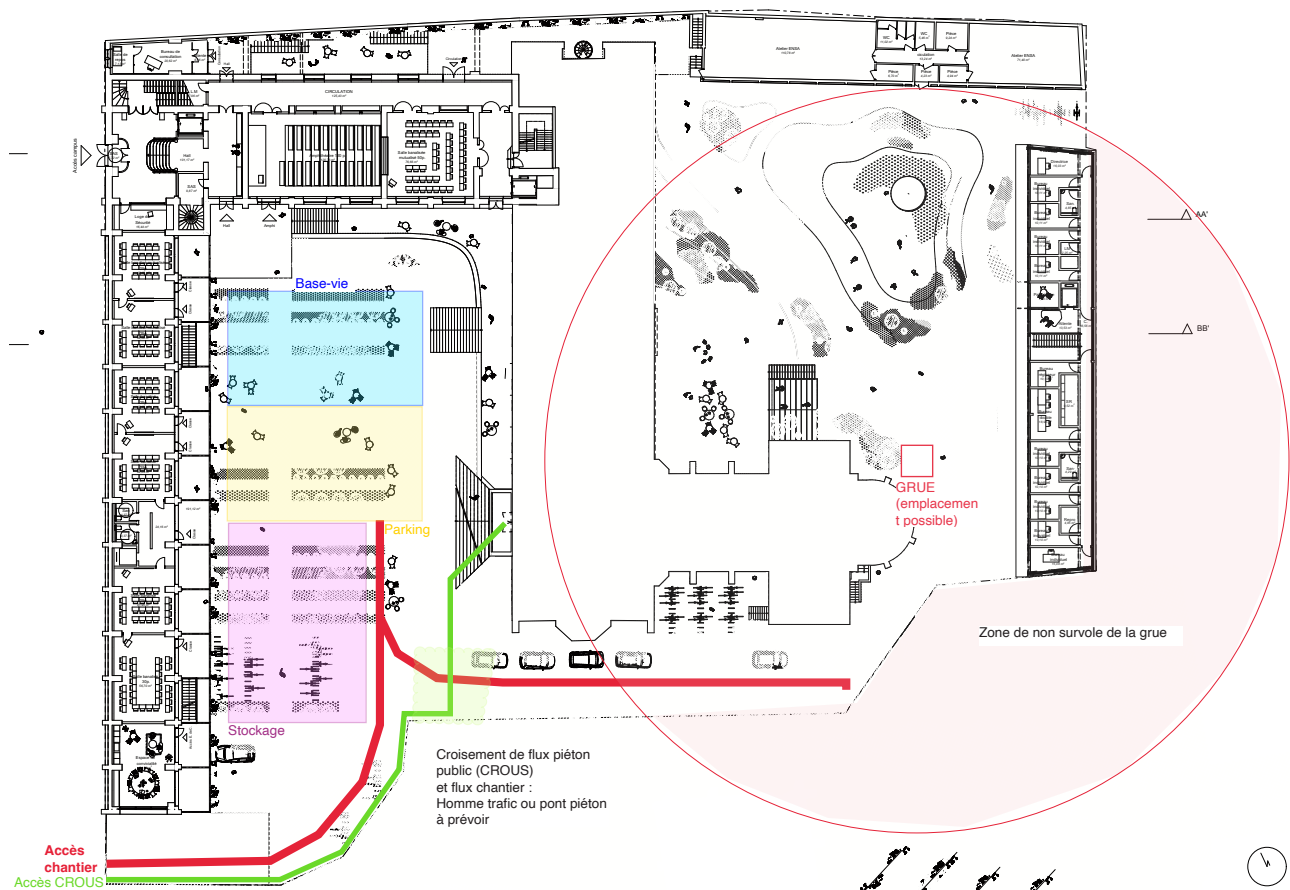
long, parallèle à la façade du musée. Elle sera équipée d'une couche de roulement en plaques en plastique recyclé haute densité pour reprendre les efforts de poinçonnement du camion-échelle stationné. Elle permettra donc à un camion-échelle d'intervenir et d'accéder à tous les étages du bâtiment. Cependant, les contraintes du site et des installations de chantier ne permettent pas de répondre totalement aux contraintes d'une voie échelle. Les arbres limitent sa largeur courante à 4m. Un talus dans l'angle nord-est empêche de créer une aire de retournement. Elle aura un impact non négligeable sur la santé des arbres en passant dans leur zone d'hyper-sensibilité.

c/ CHANTIERS CONCOMITANTS ET VOISINS

De septembre 2025 à septembre 2027, la résidence étudiante Maret située au nord du square des Bénédictins sera en travaux. Les chantiers du CROUS et de la flèche seront en co-activité de l'été 2026 à fin 2027.

L'accès du chantier du CROUS se fera par la rue du Dr Maret. Les flux véhicules et retournements seront gérés à l'intérieur du site. Une grue est prévue pour la construction du bâtiment neuf, a priori, sans interface avec la grue de l'opération de restauration de la flèche. Pour information, l'accueil des résidents sera maintenu pendant le chantier. Les échanges entamés avec l'Académie de Bourgogne-Franche-Comté (avec son AMO, son OPC et son MOE) se poursuivront en phase PRO pour la bonne coordination (calendriers, livraisons, grue).

Un chantier connexe pour le RCU serait programmé à partir de 2028 sur la rue Dr Maret, date à confirmer avec la Ville.



Plan d'installation de chantier du CROUS
Ingex BTP

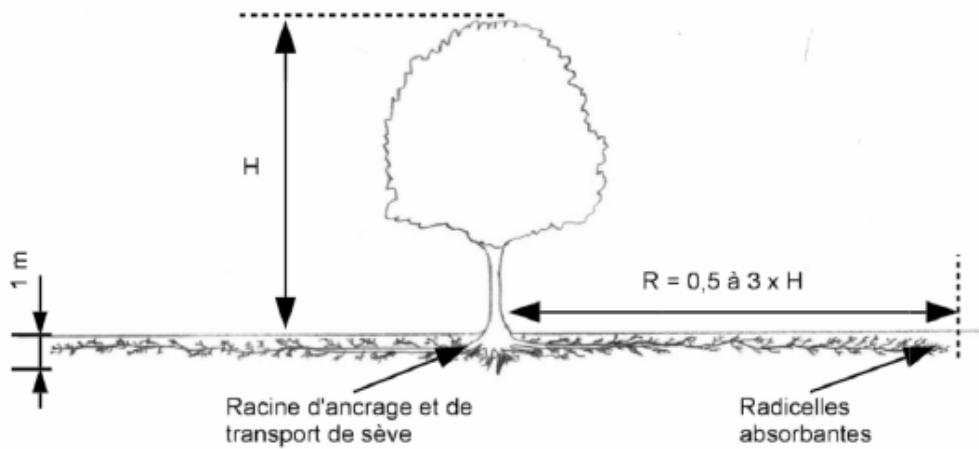


Schéma de principe du développement racinaire d'un arbre
CAUE 77, Augustin BONNARDOT, tiré du rapport de ACER - Arboristes Conseils



Érable au centre du square, en fin de vie : houpier réitéré, sénescence, avec forte production de bois morts et rameaux appauvris. Tiré du rapport de ACER - Arboristes Conseils



Érable à l'ouest du square nécessitant une tomographie : cavité ouverte au collet, remontant dans le tronc. Tiré du rapport de ACER - Arboristes Conseils

D/ PROTECTION DES ARBRES CLASSÉS

Obligations réglementaires des Espaces boisés classés

Le square des Bénédictins est protégé par le PLU sous le zonage "espace boisé classé". Ce classement entraîne les obligations réglementaires suivantes :

- Interdiction de tout changement d'affectation ou d'occupation du sol de nature à compromettre la conservation, la protection ou la création des boisements.
- Défrichements interdits.
- Coupes et abattages d'arbres soumis à déclaration préalable.
- Les constructions légères de type sanitaires ou locaux techniques de dimensions restreintes (emprise au sol inférieure à 10m²), les accès, les réseaux et les aménagements légers de type liaisons douces, agrès sportifs, bancs, panneaux de signalisation ou d'information, etc., sont autorisés au sein de l'espace boisé classé à condition de ne pas compromettre la conservation et la protection de la végétation arborée existante.

Le chantier changera provisoirement l'occupation des sols du square. Les installations devront être compatibles avec une bonne conservation des arbres.

État sanitaire des arbres

Le square compte 11 sujets : 6 tilleuls formant allée au sud du square, 3 érables au centre du jardin et 2 marronniers situés les plus au nord. D'après le diagnostic réalisé par ACER, arboriste mandaté par la DRAC⁷, l'érable le plus central est en fin de vie ; il est préconisé de le purger de ses bois morts ou de l'abattre. L'érable le plus à l'ouest présente une cavité interne qui doit faire l'objet d'une expertise complémentaire (tomographie du collet et du tronc) pour statuer sur son état structurel.

Pour les installations de chantier, l'hypothèse est prise que l'érable central en fin de vie sera abattu en amont du chantier, selon les recommandations de l'arboriste expert, et sous réserve d'autorisation.

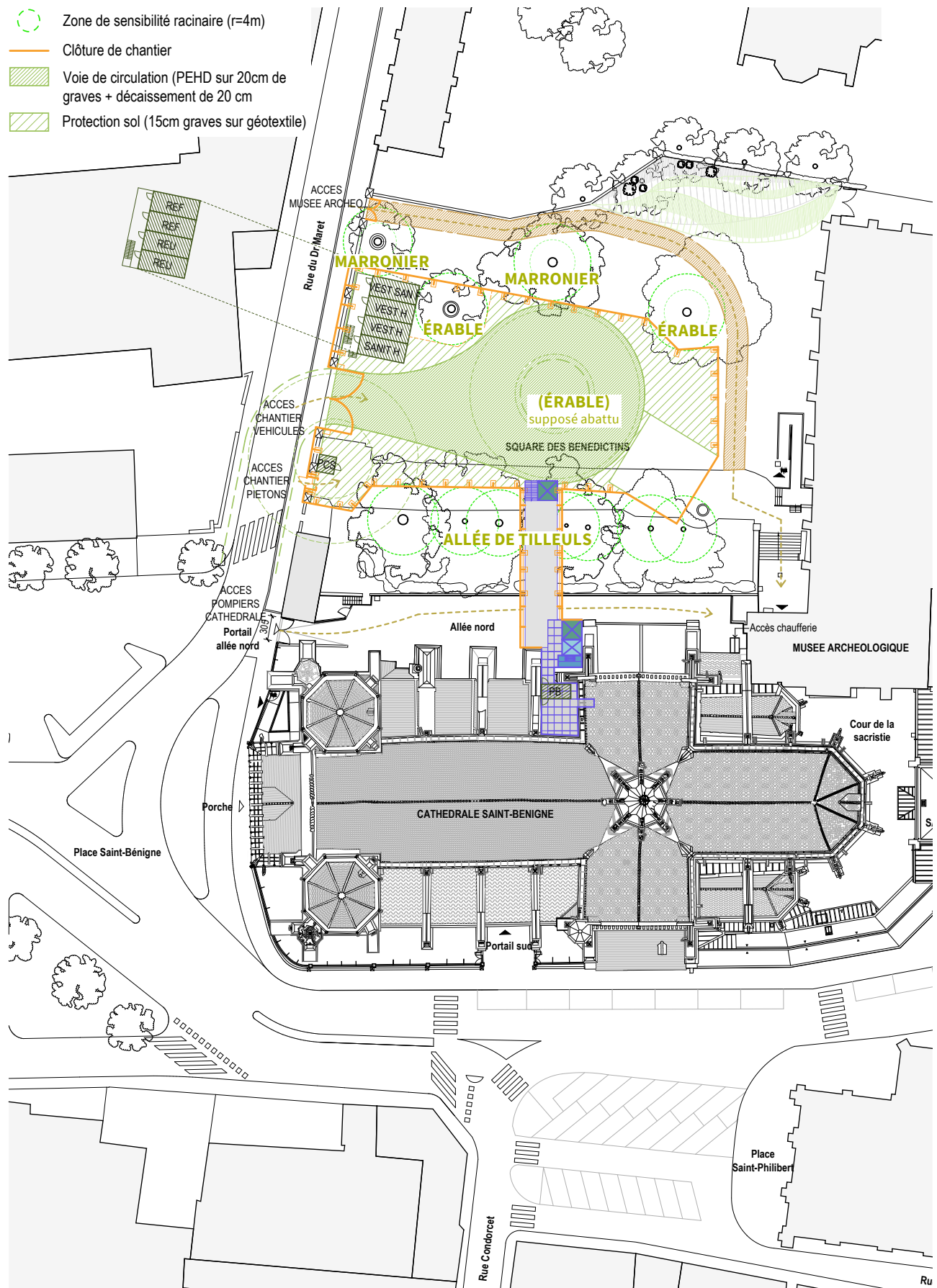
Préconisations de protection des arbres

L'arboriste définit deux zones de sensibilité autour de chaque arbre, avec des prescriptions pour chacune :

- Zone très sensible : disque de 4m autour de chaque tronc.
 - Fouille et circulation interdites.
 - Si l'arbre se situe dans la zone chantier, barriérage de protection à poser en périphérie.
- Zone sensible : surface projetée au sol du houppier = disque de 15,50m à 16m autour de chaque tronc.
 - Circulation possible avec plaques de répartition des charges
 - Décaissement de sol interdit à la pelle mécanique, même à faible profondeur (20cm) car altère la partie vitale du chevelu racinaire de surface
 - Terrassement manuel à l'aspiratrice à embout caoutchouc autorisés pour ne pas sectionner les racines de diamètre supérieur à 4cm
 - Protection des racines charpentières mises à jour par aquanappe (géotextile renforcé)
 - Tranchées à reboucher avec terre naturelle du terrain, sans compactage.
 - Remblaiement à limiter à 15cm en épaisseur si possible, car asphyxie les racines. Proscrire les fines pour éviter le phénomène de colmatage qui imperméabilise les remblais.

Les zones très sensibles seront exclues de la zone de chantier. Par contre, l'ensemble de la zone de chantier est en zone sensible : les racines sont présentes sur toute l'étendue du square, proches de la surface.

⁷ Rapport d'expertise du patrimoine arboré Square des Bénédictins de Dijon, Tristan KRAFT, ACER - Arboristes Conseils, Décembre 2024.



Plan des protections de sol dans le square des Bénédictins. Repérage des arbres.

Respect des prescriptions dans la zone de chantier

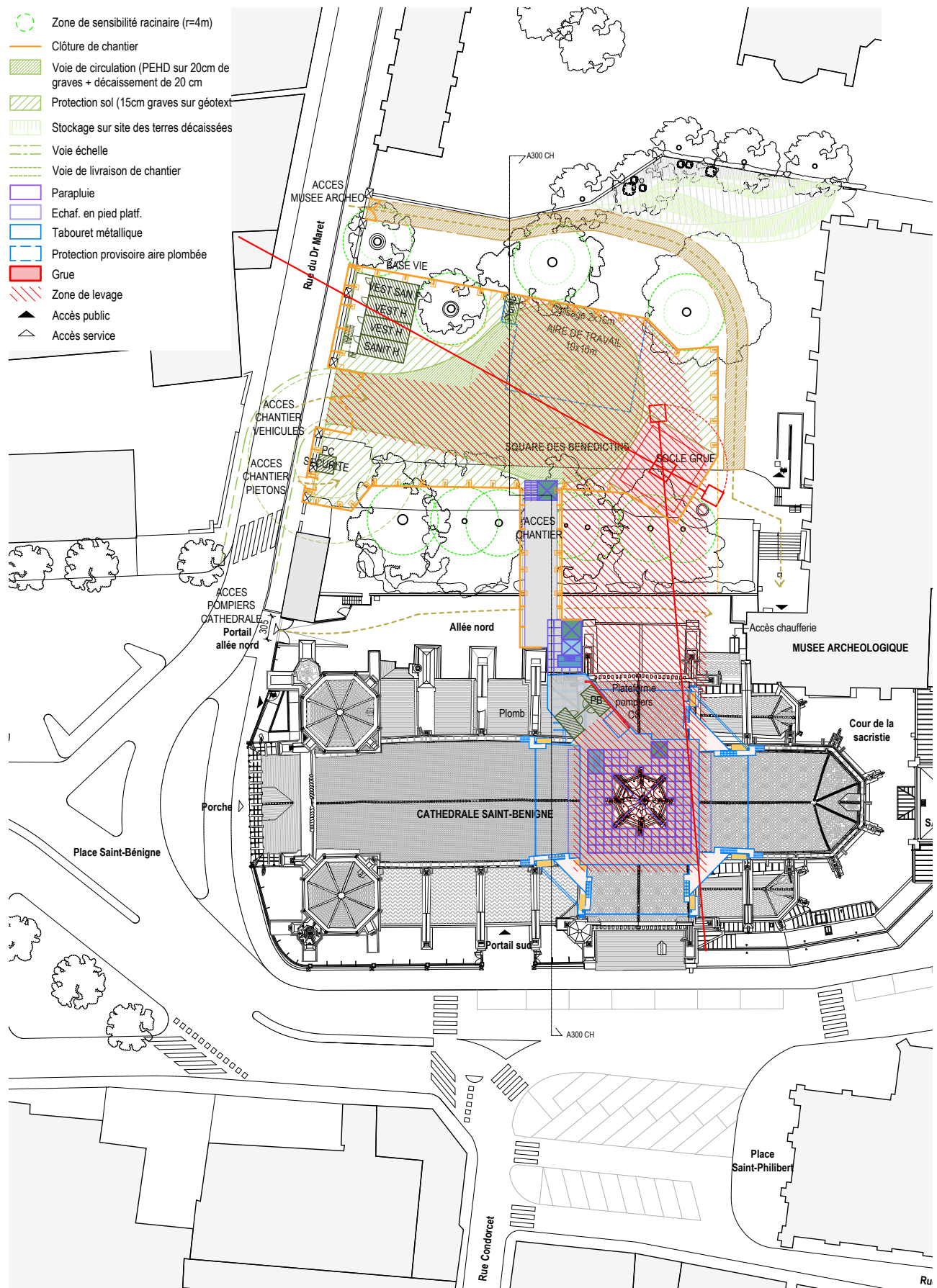
Les prescriptions de l'arboriste et du PLU sont prises en compte dans les installations de chantier pour la bonne conservation des arbres :

- Exclusion de tous les arbres et de leurs zones très sensibles de la zone de chantier, clôturée, interdisant l'accès aux zones très sensibles.
- La circulation de véhicules lourds se fera sur une voie aménagée avec plaque de répartition en PEHD (polyéthylène haute densité) perméable, sur couche de forme de 26cm d'épaisseur en graves, les fines étant proscrites. Un géotextile délimitera le sol naturel du remblai.
- À l'emplacement de la voie de circulation, pour éviter d'asphyxier les racines et de le compacter, le sol sera décaissé sur une profondeur de 15cm.
- Les décaissements de sol seront réalisés à l'aspiratrice à embout caoutchouc et les racines charpentières mises à jour seront protégées par un géotextile renforcé.
- Le sol décaissé sera conservé sur place (dans l'angle nord-est du square) pour pouvoir remettre en place la terre naturelle du site après travaux.
- Dans le reste de la zone de chantier, les sols seront protégés par un remblai de 15cm d'épaisseur de graves, fines proscrites, sur géotextile.
- La base-vie étagée sera fondée sur technopieux. Cette technique de fondation permet de réaliser des pieux au diamètre réduit, sans injection. Les technopieux émergeront de la surface du sol pour que les bungalows ne soient pas posés à même le sol. La couche d'air ainsi créée entre bungalows et sol permettra d'éviter l'imperméabilisation et l'étouffement des racines.
- Le radier de la grue sera fondé sur micro-pieux. Comme la base-vie, il sera flottant, pour permettre l'écoulement des eaux pluviales sous le radier et pour ne pas charger le sol : il sera coulé sur coffrage posé au sol retiré après prise.
- Avant de couler les micro-pieux et les technopieux, on réalisera des sondages racinaires manuels. En cas de racine charpentière au droit de l'emplacement prévu, les pieux seront déportés avec des pontages entre pieux. Le radier et ses armatures seront adaptées le cas échéant.
- Certaines zones de chantier doivent être dégagées en hauteur : aire de travail, de colisage et aire de montage de la grue. Ces zones sont dessinées hors des ramures des arbres. Des élagages ponctuels en bordure d'houpier devront toutefois être réalisés, notamment pour le montage de la grue fixe.

Application limitée pour la voie d'accès au musée archéologique

La voie VL d'accès au musée archéologique sera réalisée plus sommairement en béton armé de treillis, d'épaisseur 15cm, sur géotextile, sans décaissement préalable. L'imperméabilisation de cette voie est compensée par sa faible emprise au sol. À noter également qu'elle devra déroger aux prescriptions de protection des arbres : elle devra passer dans des zones de grande sensibilité, à 2m de distance des trois arbres les plus au nord.

IV. Projet



Plan d'installation de chantier

E/ ACCÈS AU CHANTIER

L'accès au chantier de la flèche se fera aussi par la rue du Dr Maret. Le square est clôturé par un mur en pierre, surmonté d'une grille, percé d'un portail de 2,5m de large et de 4m de haut environ, trop petit pour l'accès aux véhicules de livraison et les engins de secours. Ce mur présente aujourd'hui des pathologies localement importantes (pierres fracturées sous l'effet des scellements). Deux portions du mur de clôture seront déposées pour créer plusieurs accès :

- l'accès au chantier composé de :
 - un portail de 7m de large (largeur utile pour les camions)
 - un portillon pour les piétons
- l'accès séparé au musée archéologique, pour le public et les secours : un portail de 4m de large laissé ouvert en horaires d'ouverture du square et du musée.

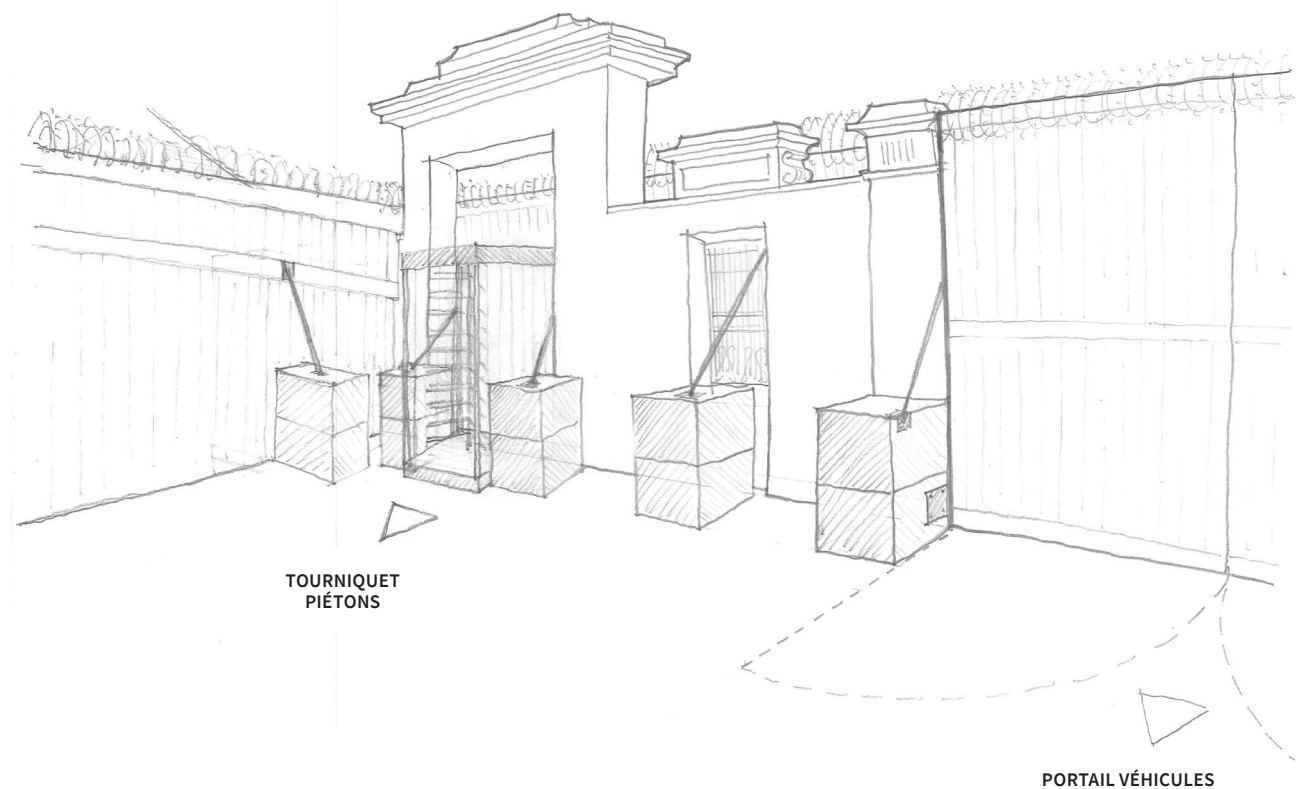
Les portions de mur déposé (pierres et grilles) seront conservés en atelier de l'entreprise et remonté à l'identique à la fin de l'opération, avec remplacement des pierres fissurées. Un tableau électrique existant contre le mur à l'emplacement du portillon d'accès au musée devra être déplacé pour la durée du chantier.

Les voies de circulation de chantier devront reprendre les charges des engins de livraison. Pour éviter le tassement de la terre végétale, le sol sera décaissé de 20cm au droit des voies, recouvert d'un géotextile et remblayé de 20cm de graves. Des plaques en plastique recyclé haute densité assureront la couche de roulement tout en maintenant la perméabilité du sol.

Le décaissement des voies de circulation génère 150m³ (compris foisonnement) de déblais en terre végétale. Afin d'éviter les coûts de transport et stockage, ou de rachat de terre, il est prévu de stocker la terre sur site, en constituant un talus provisoire enherbé, au nord du terrain sur la zone présentant déjà une forme talutée. Le talus sera décapé lors de la remise en état du site au profit du rebouchement des zones de roulement.



Vue de l'entrée du chantier - côté rue du Dr Maret

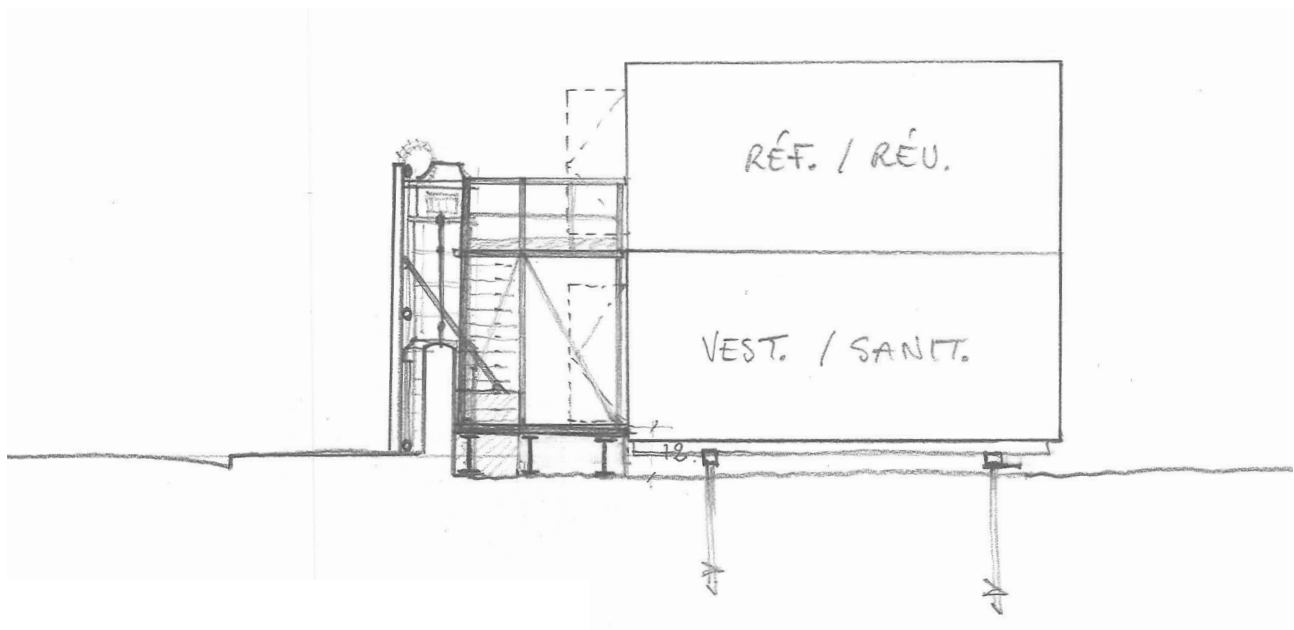


Vue de l'entrée du chantier - côté square

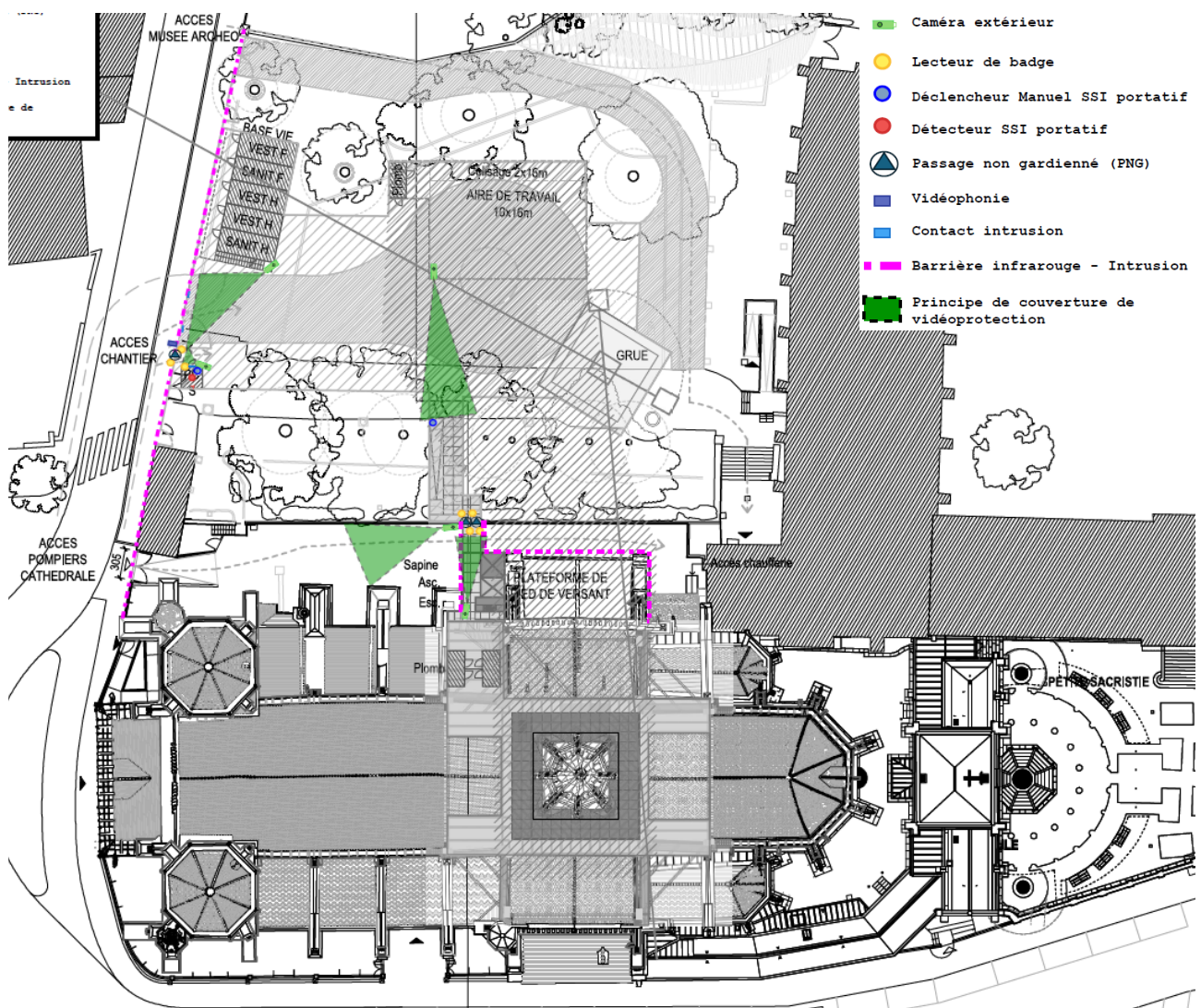
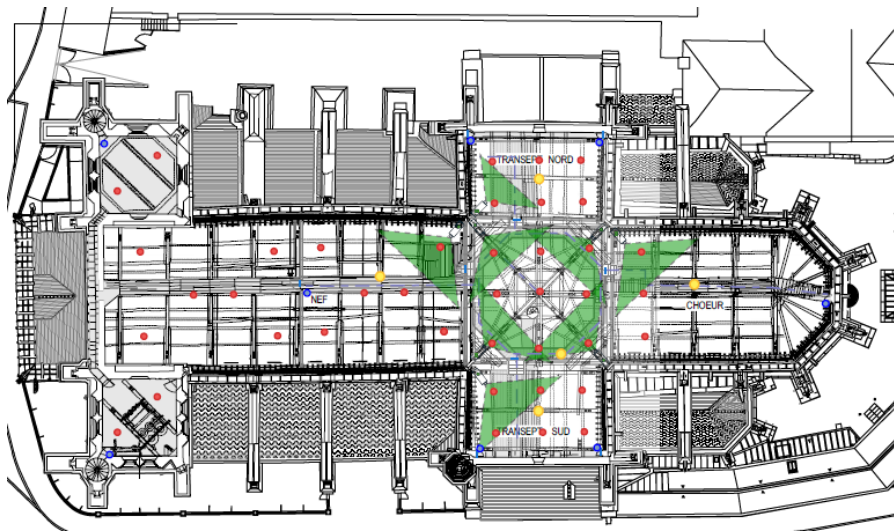
F/ BASE-VIE

Le chantier accueillera jusqu'à 20 personnes en périodes de pic d'activité. 8 bungalows sont donc nécessaires. La base-vie se situera dans l'angle nord-ouest du square. Les bungalows de chantier seront éloignés de 4m minimum des arbres, superposés et posés sur fondation au technopieux.

Une guérite faisant office de poste de sécurité sera installée à l'entrée de la base-vie pour contrôler l'accès au chantier et y rassembler les reports d'alarme du SSI de chantier et les écrans de surveillance du chantier.



Coupe sur la base-vie et le mur de clôture



Plans d'installation de chantier avec repérage des caméras et des tourniquets
ALTO ingénierie

G/ CONTRÔLE D'ACCÈS ET SURVEILLANCE ANTI-INTRUSION H24

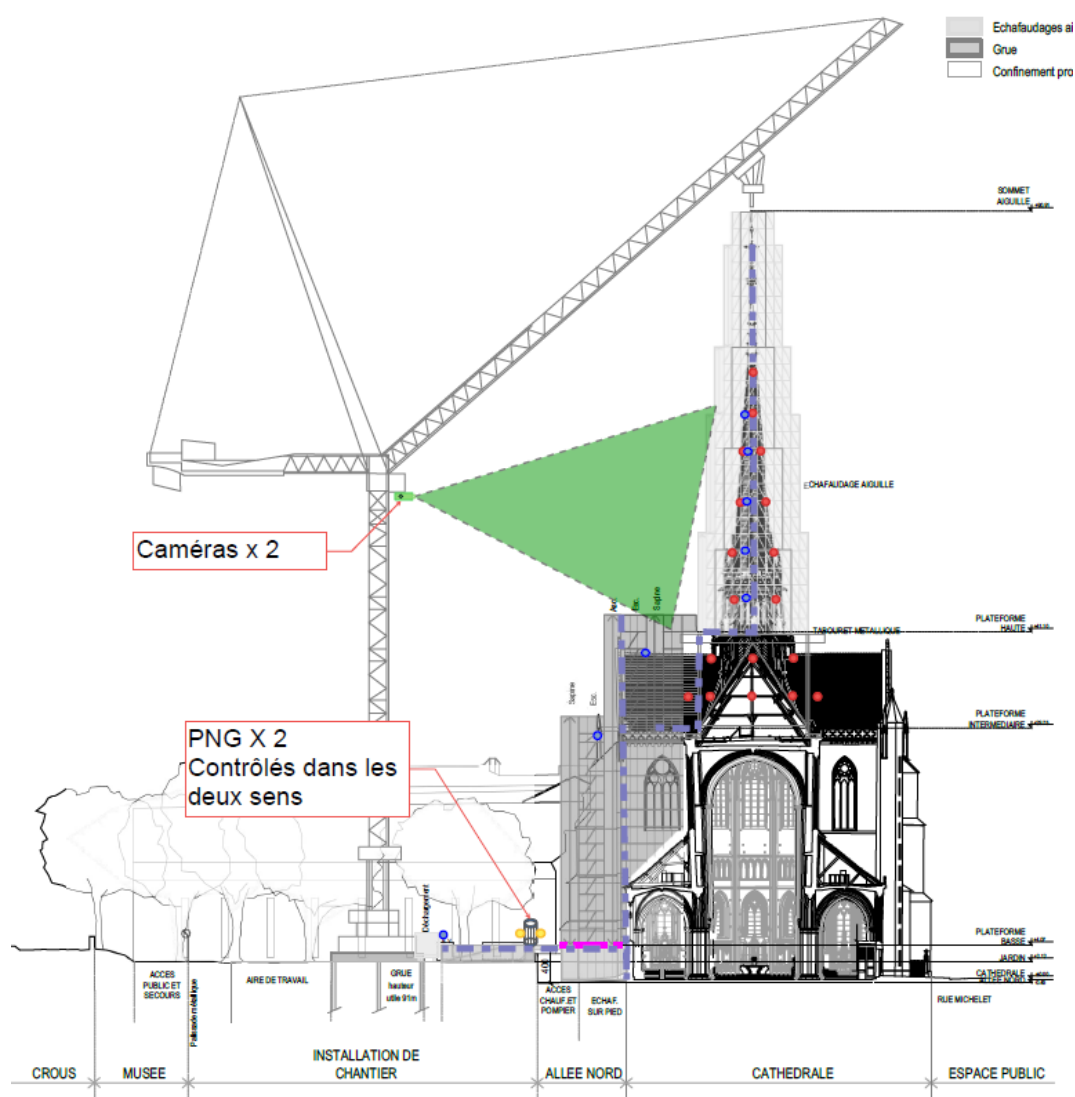
Un tourniquet avec contrôle d'accès par badge nominatif sera positionné à chaque entrée du chantier :

- rue du Dr Maret, à l'entrée de la base-vie ;
- à l'entrée de la plateforme basse qui relie le jardin archéologique aux échafaudages.

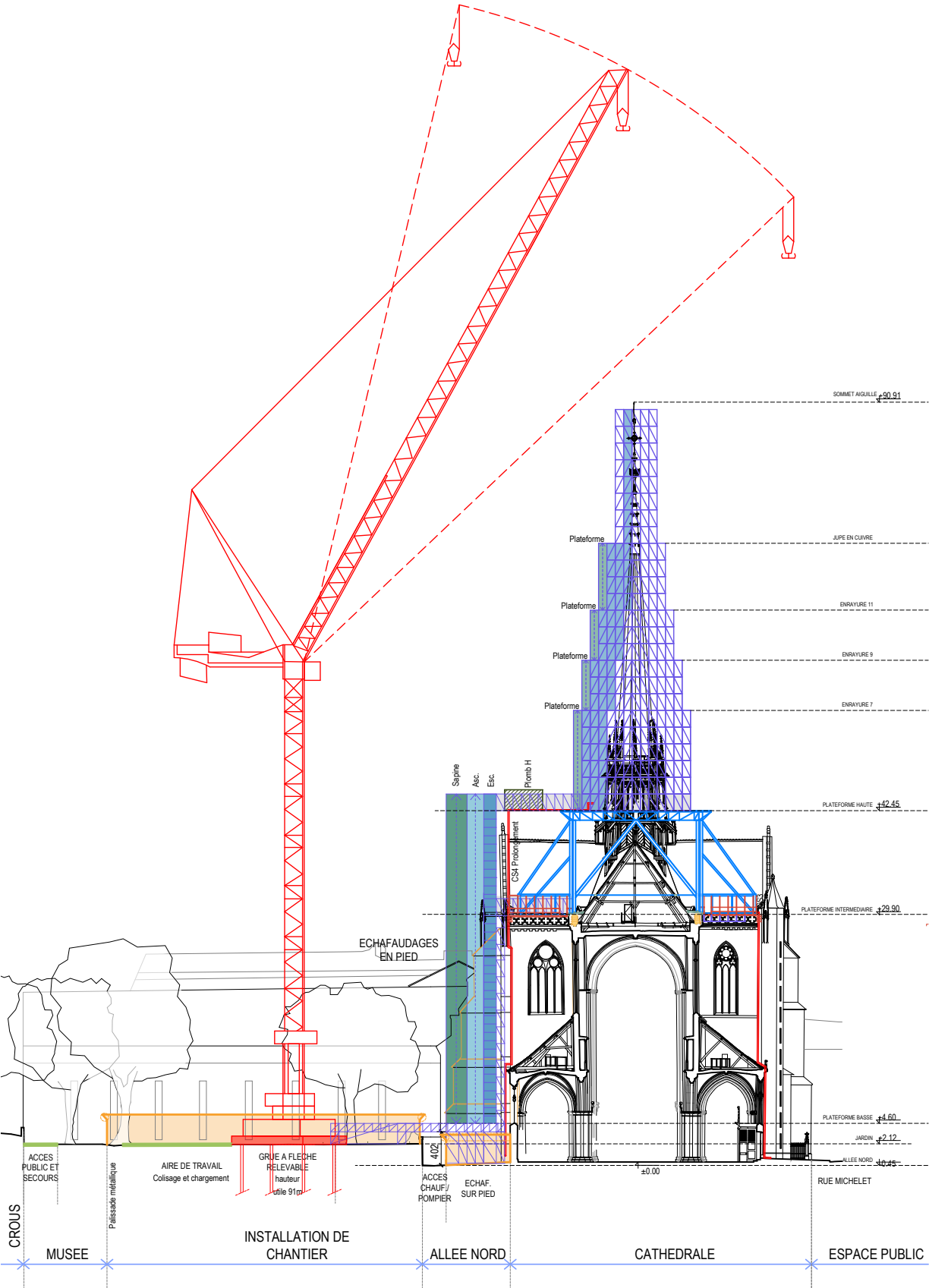
Les zones de chantier seront sous surveillance vidéo, avec reports au poste de sécurité (à l'entrée de la base-vie) et report H24 à une société extérieure.

La sûreté de chantier sera confiée au lot de travaux chargé des installations électriques et du SSI. Il devra :

- l'installation du matériel de surveillance (caméras, tourniquets),
- l'édition des badges d'accès au chantier, sur demande des intervenants sur le chantier 1 semaine minimum avant leur intervention
- la surveillance humaine H24 :
 - pendant les horaires d'ouverture du chantier, présence humaine permanente dans le poste de sécurité à l'entrée de la base-vie pour : contrôle d'accès au chantier, visionnage des écrans de télésurveillance, levée de doute en cas d'alerte incendie
 - H24 : report des vidéos de surveillance et des alarmes incendie vers une société extérieure de télésurveillance et levée de doute par cette même société.



Coupe d'installation de chantier avec repérage des caméras et des tourniquets
ALTO ingénierie



Coupe d'installation de chantier

V. ÉCHAFAUDAGES ET PARAPLUIES

A/ ÉCHAFAUDAGES ET PLATEFORMES DE TRAVAIL

Les échafaudages se décomposent en deux parties : les échafaudages de pied et les échafaudages de toiture.

Les échafaudages de pied

Installés dans l'angle nord-ouest du transept nord, du niveau du sol jusqu'au niveau de l'étage ajouré de la flèche, ils permettent au personnel et au petit matériel d'accéder au chantier. Ils sont dotés d'une sapine de levage, d'une sapine d'échafaudage, d'un ascenseur de chantier. Trois niveaux de travail sont différenciés :

- la plateforme basse, à rez-de-jardin sert de déchargement courant du petit matériel. Elle se situe à 4m au-dessus de la voie de l'allée nord bordant la cathédrale, laissant passer dessous les véhicules de secours (chaufferie et sortie de secours au bout de l'allée nord). Elle est desservie depuis le square par un escalier et une sapine.
- la plateforme intermédiaire, en pied de versant, au-dessus des garde-corps des gouttereaux. Cette plateforme permet le pré-stockage et l'évacuation des matériaux de la souche en dépose/repose. Un chevêtre provisoire de chantier pratiqué dans le versant ouest du transept nord sert d'accès à la zone chantier à l'intérieur des combles. Il sera fermé par un sas étanche avec porte verrouillable. La plateforme repose en TF sur les échafaudages de toiture posés sur le bas-côté nord puis en tranches optionnelles, elle sera supportée par le tabouret relié à la tour d'échafaudage de pied.
- des plateformes d'angle, aux 3 autres angles de la croisée, reposant sur les goussets du tabouret. Accessibles par la grue, elles servent au stockage provisoire du matériel en dépose/repose de la souche, les tuiles notamment. Elles sont reliées aux chéneaux par des escaliers pour permettre la continuité des cheminements en pied de toiture de la cathédrale, pour les secours notamment.
- la plateforme supérieure, au niveau de l'étage ajouré, reliée au plancher du tabouret métallique. Elle accueille un bungalow de décontamination et des sanitaires d'appoint.

Les échafaudages de toiture

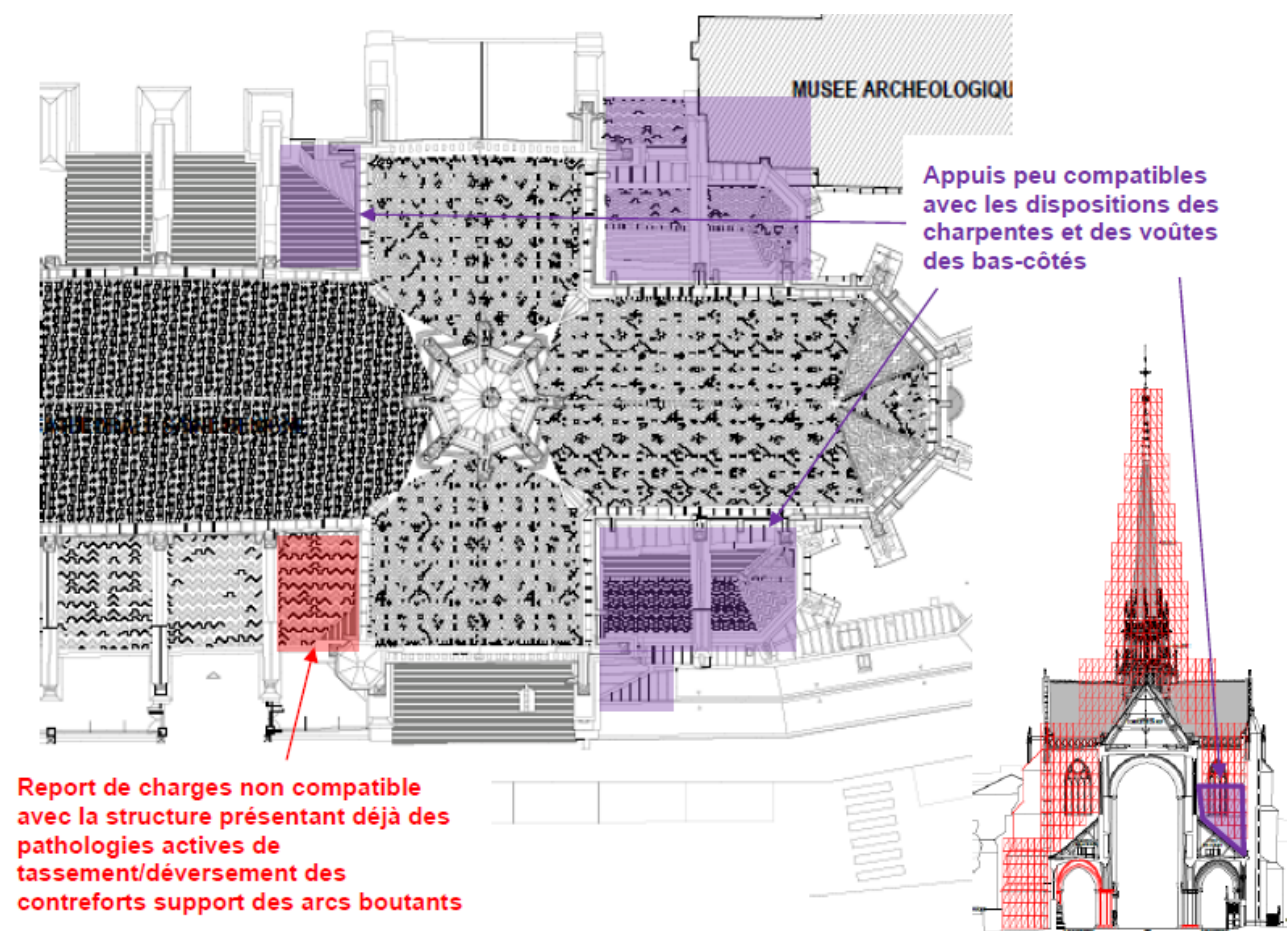
En TF (travaux de sécurisation incendie), les échafaudages de pied seront flanqués d'échafaudages de toiture reposant sur le bas-côté nord. Ceux-ci supporteront la plateforme intermédiaire, en attente d'être reliée au tabouret métallique installé en TO1. Les échafaudages de toiture sur bas-côté nord seront alors déposés.

Les échafaudages de la flèche permettent de travailler sur l'ouvrage lui-même. Ils se décomposent en deux parties :

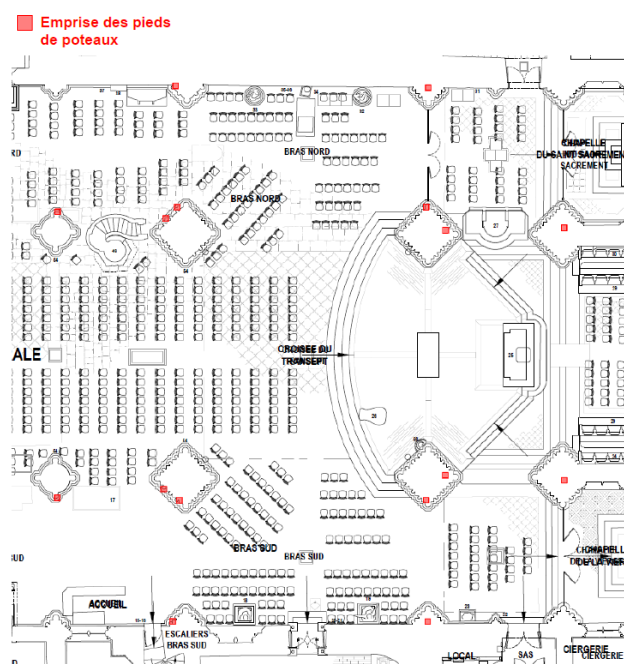
- un tabouret métallique, structure porteuse de l'échafaudage de l'aiguille, qui prend appui sur les maçonneries de la cathédrale, à chaque angle de la croisée. Le tabouret supporte un plancher de travail, relié à la plateforme supérieure. Le poids du tabouret et du plancher est estimé à 95T.
- les échafaudages de l'aiguille. Ils seront posés sur le tabouret métallique et l'ensemble sera auto-stable (poids estimé : 38T). La volumétrie générale diminue avec la hauteur, ménageant des planchers de travail d'au moins 1m de large tout autour de l'ouvrage, à chaque niveau. Les échafaudages ne reçoivent pas de bâchage général pour éviter une prise au vent excessive. La conception a fait l'objet d'une vérification aux charges de vent et d'une vérification des surcharges admissibles appliquées à la cathédrale. Un escalier et une sapine desservent tous les niveaux.
- les plateformes de l'aiguille sont aménagées à chaque retraite des échafaudages. De 2x2m, elles sont à moitié en surplomb pour offrir des surfaces suffisantes pour le chargement/déchargement à la grue. Elles sont reliées verticalement entre elles par des sapines de levages superposées qui se décalent d'une travée à chaque retraite et qui sont pour moitié en débord.

Montage / démontage échafaudages

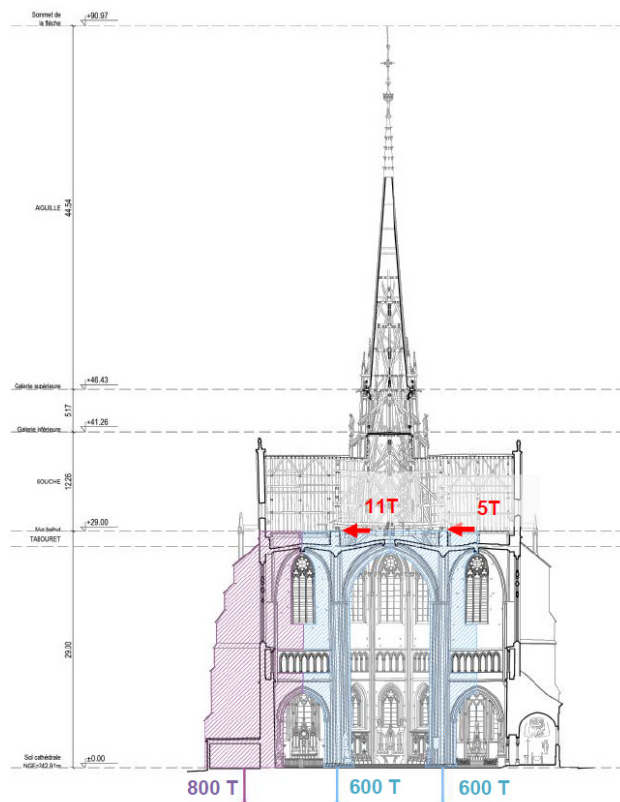
Au fur et à mesure de la dépose de la charpente de l'aiguille, les échafaudages seront démontés progressivement pour donner accès aux parties inférieures : les échafaudages d'un niveau sont démontés après dépose de la charpente à laquelle ils donnaient accès. Puis au fur et à mesure de la repose de la charpente de l'aiguille, les échafaudages seront remontés pour permettre l'assemblage des parties en cours de repose.



Appui des échafaudages sur les bas-côtés peu compatible avec les dispositions de la cathédrale
Extrait du rapport de LeBE.



Emplacement des pieds du tabouret projeté à RDC
Extrait du rapport de LeBE.



Maçonneries mobilisées pour reprendre les efforts horizontaux générés par les échafaudages. Extrait du rapport de LeBE.

B/ TABOURET MÉTALLIQUE

Conception générale des échafaudages de toiture

- La conception de la descente de charge des échafaudages répond aux contraintes particulières de la cathédrale de Dijon, tout-à-fait différentes d'autres échafaudages de flèche ou coupoles de croisées (celles de Notre-Dame ou encore celles du Panthéon de Paris). Au Panthéon, la dimension colossale de la coupole et la relative fragilité de l'édifice justifiait un report direct au sol des charges du tabouret. A Notre-Dame, l'échafaudage de la flèche avant incendie n'était pas établi sur les gouttereaux de la nef, mais sur ceux des bas-côtés, dont la disposition en terrasse et l'étagement en tribune favorisaient une certaine stabilité (alors que les gouttereaux, particulièrement élancés et non reliés à la croisée, constituaient des appuis trop précaires).
- À Saint-Bénigne, comme à Notre-Dame de Paris, l'appui directs au sol sur le principe du Panthéon doit être écarté : il nécessiterait la mise en place d'un tabouret disproportionné, aux pieds très fortement déportés à cause de la présence de bâtiments annexes accolés à la cathédrale, obligeant à rapporter des échafaudages suspendus pour accéder à la souche, et impacterait lourdement les abords de la cathédrale, y compris dans l'espace public.
- L'appui sur les bas-côtés et non sur les gouttereaux de nef, comme à Notre-Dame de Paris, n'apparaît pas non plus pertinent à Saint-Bénigne, en raison de la présence de charpentes qu'il aurait fallu déposer ou traverser, de la faible descente de charge existante des gouttereaux des bas-côtés, limitant leur capacité de reprise d'une charge supplémentaire, enfin de l'existence de désordres actifs impliquant les bas-côté et culées de la nef côté sud.
- Les opportunités d'appui de Saint-Bénigne se trouvent au niveau de la croisée, qui présente les descentes de charges les plus fortes à travers les piles de la croisée, d'une grande qualité constructive. Elle permet donc l'appui de plus grandes charges rapportées. Elles sont favorisées par la présence de murs-bahut armés qui verrouillent entre eux les gouttereaux et les têtes des piles de croisées, contrairement à Notre-Dame de Paris où les têtes de murs sont libres. Enfin l'absence de désordre sur la croisée à Saint-Bénigne est vérifiée par l'instrumentation de l'édifice depuis 2020. L'appui sur les murs gouttereau de la nef au droit des piles de croisée paraît donc la meilleure solution. Elle implique la conception d'un tabouret pour reporter les charges sur les quatre points d'appui de surface limitée. Une instrumentation complémentaire de chantier sera mise en place sur les piles de la croisée et le mur gouttereau nord pour vérifier l'impact du tabouret sur les maçonneries de la cathédrale.

Justification de la structure métallique

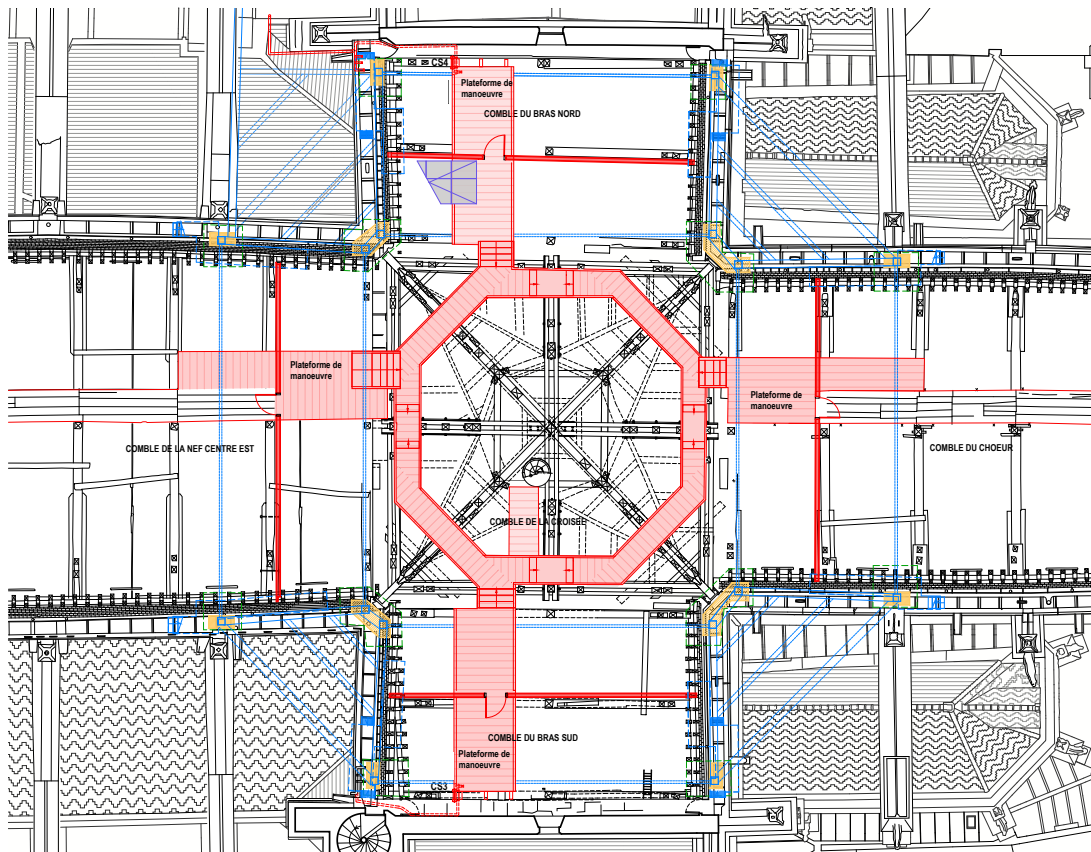
- Le tabouret métallique répond à la contrainte des très faible surfaces d'appui sur les murs gouttereaux de la cathédrale pour transmettre les charges considérables de l'échafaudage de l'aiguille aux quatre angles (40T à chaque angle à reporter sur des largeurs utiles de 40cm) : une structure d'échafaudage à faible capacité de charge ponctuelle ne pourrait convenir pour une si faible surface d'appui.

Vérification des réactions d'appuis

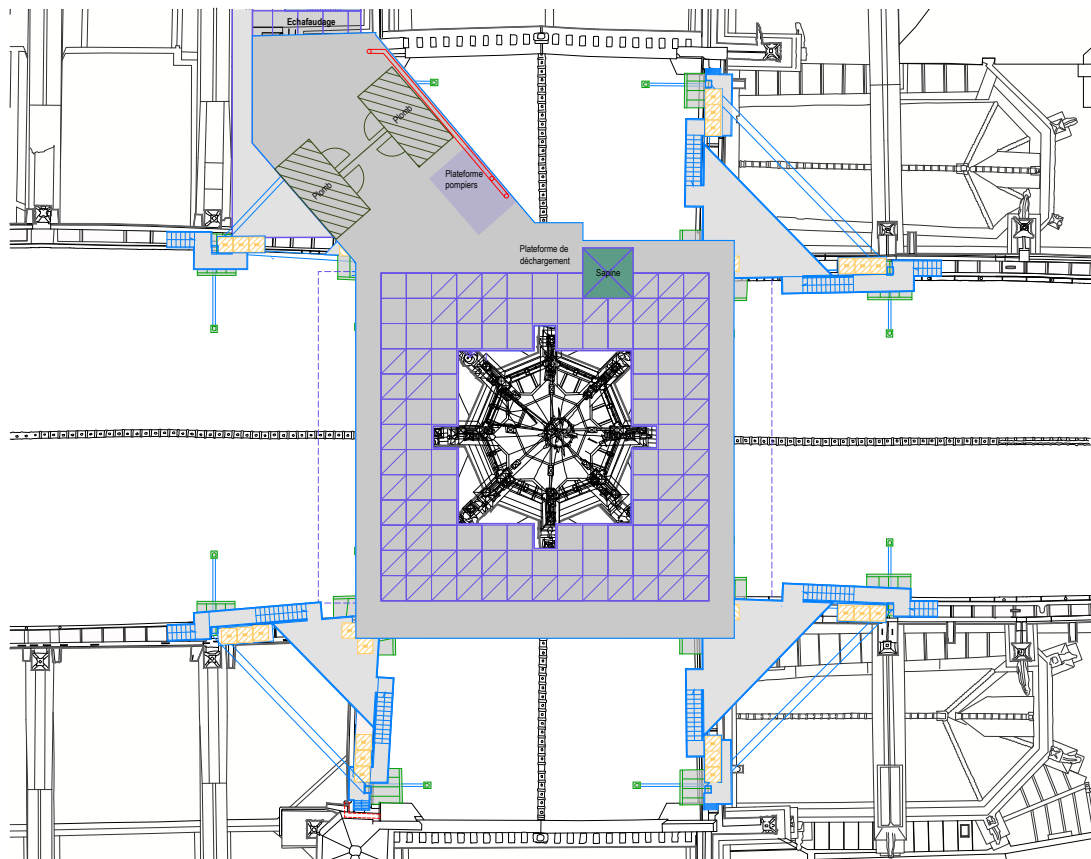
- Le poids total pour le tabouret et l'échafaudage associé est de 160 tonnes. Soit une descente de charge permanente supplémentaire par pilier de 40 tonnes pour une descente de charges existante de 650 tonnes. Le surcroît de charges statiques est donc de 6%, inférieur au seuil de 10% qui permet d'éviter le renforcement des fondations existantes.
- La prise au vent du tabouret et de l'échafaudage de la flèche amène une augmentation de 10 tonnes des efforts horizontaux en tête des piles de la croisée, pour une sollicitation totale de 16 tonnes réparties sur deux piles, le mur bahut armé et le mur du transept associé. La géométrie des piles leur permet de reprendre chacune 10 tonnes en tête qui peuvent donc reprendre entièrement les efforts au vent des échafaudages. Le prolongement des structures par les murs et les contreforts amène une sécurité supplémentaire dans la reprise des charges.

Appuis du tabouret métallique par des semelles en béton armé sur les murs gouttereaux de la cathédrale

- La structure d'échafaudage de l'aiguille est reportée par les pieds et les contreventements du tabouret sur des semelles en béton armé, coulés au niveau des arases, après dépose localisée des chéneaux et des toitures en pied de versant. Ces appuis agissent sur la maçonnerie exclusivement au droit des piles de la croisée et des piles des travées adjacentes. De dimension variable selon leur emplacement, ils ont une emprise moyenne de



Plan du tabouret posé sur plots béton (en jaune) coulés dans les chéneaux autour de la croisée



Plans des échafaudages de l'aiguille sur le tabouret métallique

80x50cm et de 100cm de haut. Ils sont coffrés par coffrage autostable butonné qui prend place entre les garde-corps en pierre et le chevron dégagé en pied de versant.

- Pour assurer la continuité des évacuations d'eaux pluviales, des tuyaux en PVC sont insérés en fond de coffrage. Lorsque la semelle en béton repose sur un départ de descente EP, un tuyau PVC en T permet d'assurer l'évacuation des eaux vers la descente. Pour assurer la continuité de l'étanchéité, des remontées en plomb sont réalisées autour des coffrages des semelles en béton et des couvertures provisoires en zinc couvrent les semelles, en raccord avec les versants de tuiles.

Emprise du tabouret

Le tabouret métallique doit supporter :

- les échafaudages de l'aiguille, d'une emprise carrée de 13m de côté à la base > pour le recevoir, le tabouret doit couvrir toute la croisée, elle-même de 14m de côté
- un parapluie ouvrant qui sera installé pendant la durée des restaurations en atelier, entre les phases de démontage de la flèche et de remontage > le tabouret doit pouvoir recevoir le parapluie (emprise de la croisée) les rails de glissement du parapluie seront posés en porte-à-faux.

Pour laisser le passage des pièces de la souche à travers le tabouret métallique et le parapluie ouvrant, une trémie carrée de 9m de côté est aménagée dans le tabouret.

Protection de la structure au feu

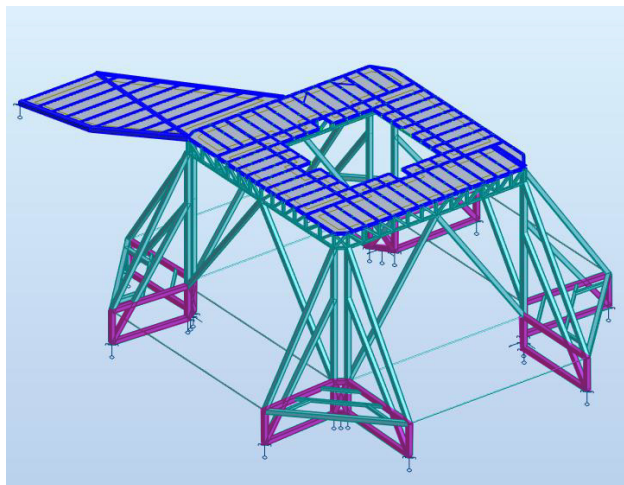
En cas d'incendie sur le chantier, la structure métallique du tabouret ne serait pas stable au feu plus d'une demi-heure. Il est donc prévu la mise en peinture par peinture intumescente des pièces du tabouret métallique les plus proches des charpentes. Les tirants qui traversent les combles seront quant à eux floqués.

Lestage du tabouret

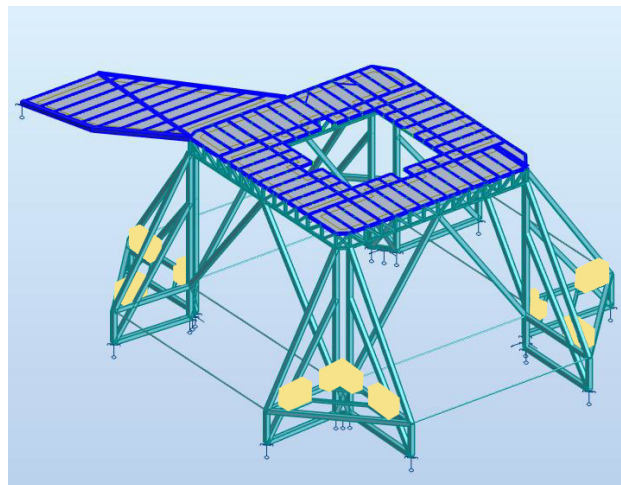
La structure du tabouret a été optimisée pour en réduire le coût. Des lests en béton seront nécessaires pour éviter le soulèvement de la structure sous l'effet des charges de vent appliquées sur les échafaudages de l'aiguille.

Montage du tabouret

Le tabouret métallique sera levé à la grue et assemblé par travail encordé. Chaque élément devra être auto-portant et d'un poids maximal de 4T correspondant à la limite de portance de la grue à l'aplomb des angles de la croisée. Les éléments seront posés à la grue. Ils seront assemblés entre eux par cordiste.

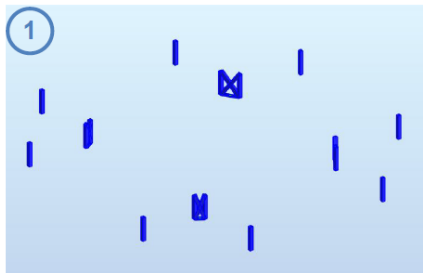


Vue générale du tabouret. Repérage en violet des parties à protéger par peinture intumescente.
LeBE.

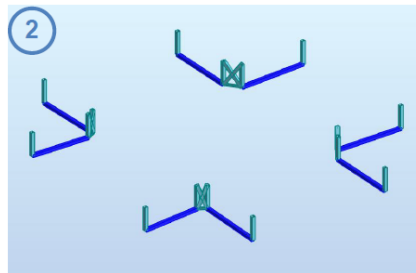


Vue générale du tabouret. Repérage en jaune des lests béton.
LeBE.

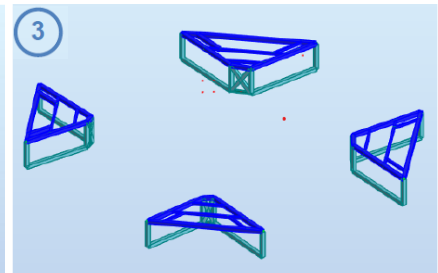
Ordre de levage du tabouret métallique



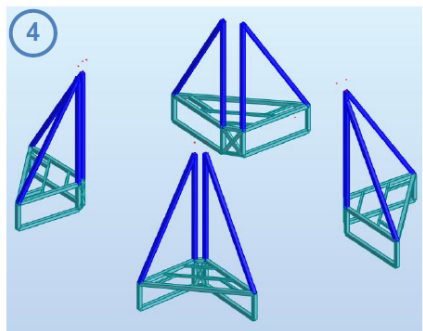
Installation des pieds de poteaux sur les plots BA
Sections : Tubes carrés 300x300x8mm
Poids max des pieds centraux : 1 T



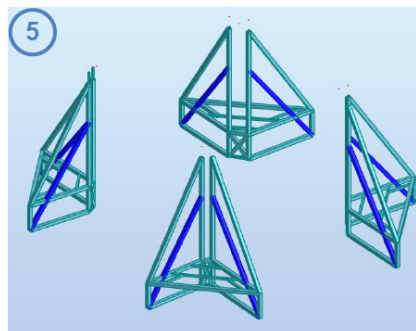
Ajout des traverses basses
Sections : Tubes carrés 300x300x8mm
Poids d'une poutre : 0,9 T



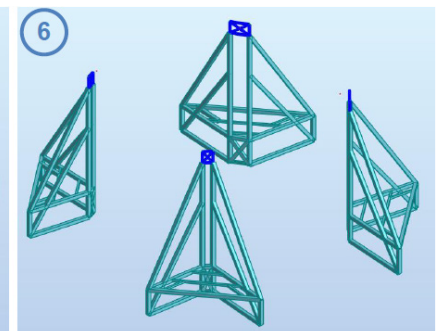
Installation de la structure des plateformes de travail
Sections : Tubes carrés 300x300x8mm et tubes carrés 180x180x8mm
Poids d'une plateforme : 2,1 T



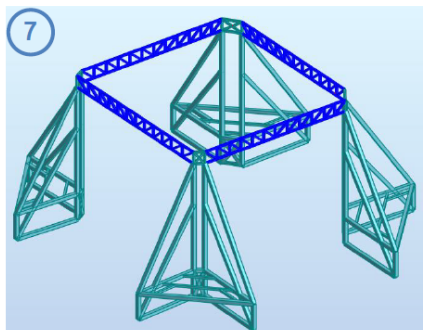
Ajout des poteaux et grandes contrefiches
Sections : Tubes carrés 300x300x8mm
Poids par structure : 2,9 T



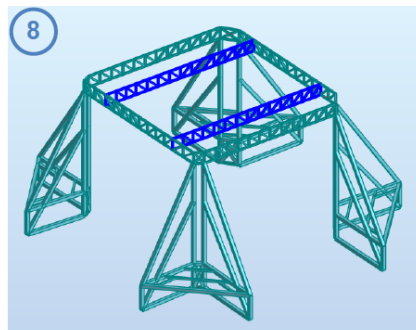
Ajout des petites contrefiches
Sections : Tubes carrés 300x300x8mm
Poids par paire : 1,4 T



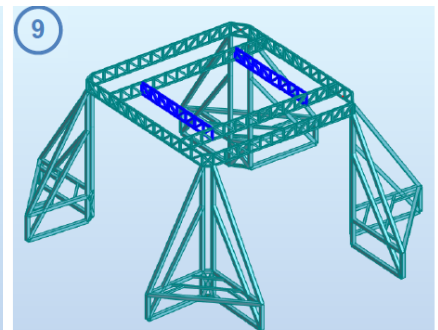
Installation des poutres treillis en tête de poteaux
Sections : Tubes carrés 150x150x10mm
Poids par poutre treillis : 0,4 T



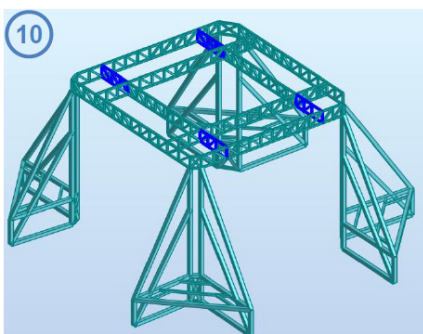
Installation des poutres treillis extérieures
Sections : Tubes carrés 150x150x10mm
Poids par poutre treillis : 2,6 T



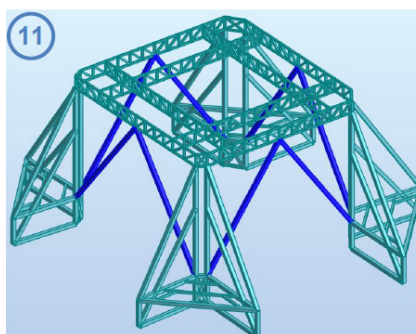
Mise en place des poutres treillis intérieures longitudinales
Sections : Tubes carrés 150x150x10mm
Poids par poutre treillis : 2,7 T



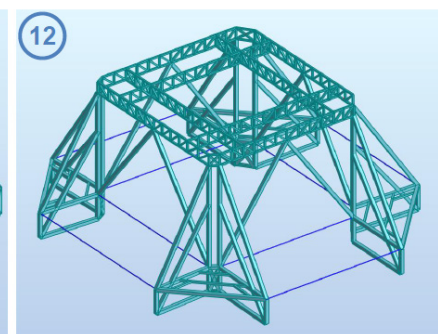
Assemblages des poutres treillis intérieures transverses
Sections : Tubes carrés 150x150x10mm
Poids par poutre treillis : 1,6 T



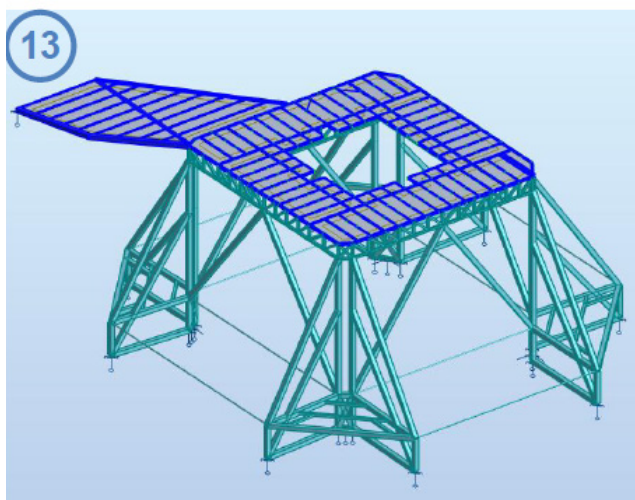
Assemblages des poutres treillis intérieures transverses
Sections : Tubes carrés 150x150x10mm
Poids par poutre treillis : 0,6 T



Mise en place des diagonales de contreventement
Sections : Tubes carrés 300x300x8mm
Poids par diagonale : 0,8 T



Mise en place des tirants de contreventement
Sections : Tige ronde 50 mm de diamètre
Poids par tirant : 0,2 T



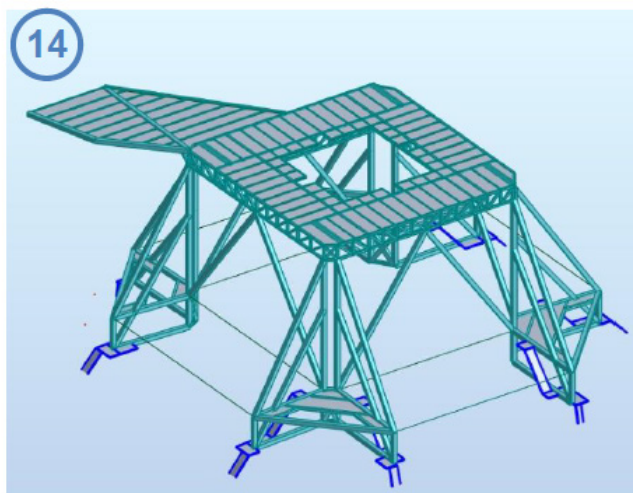
Installation du plancher métallique et platelage

Sections : HEA 300 ; HEA 140

et ponctuellement HEA 240

Poids d'une poutre HEA 300 : 1 T

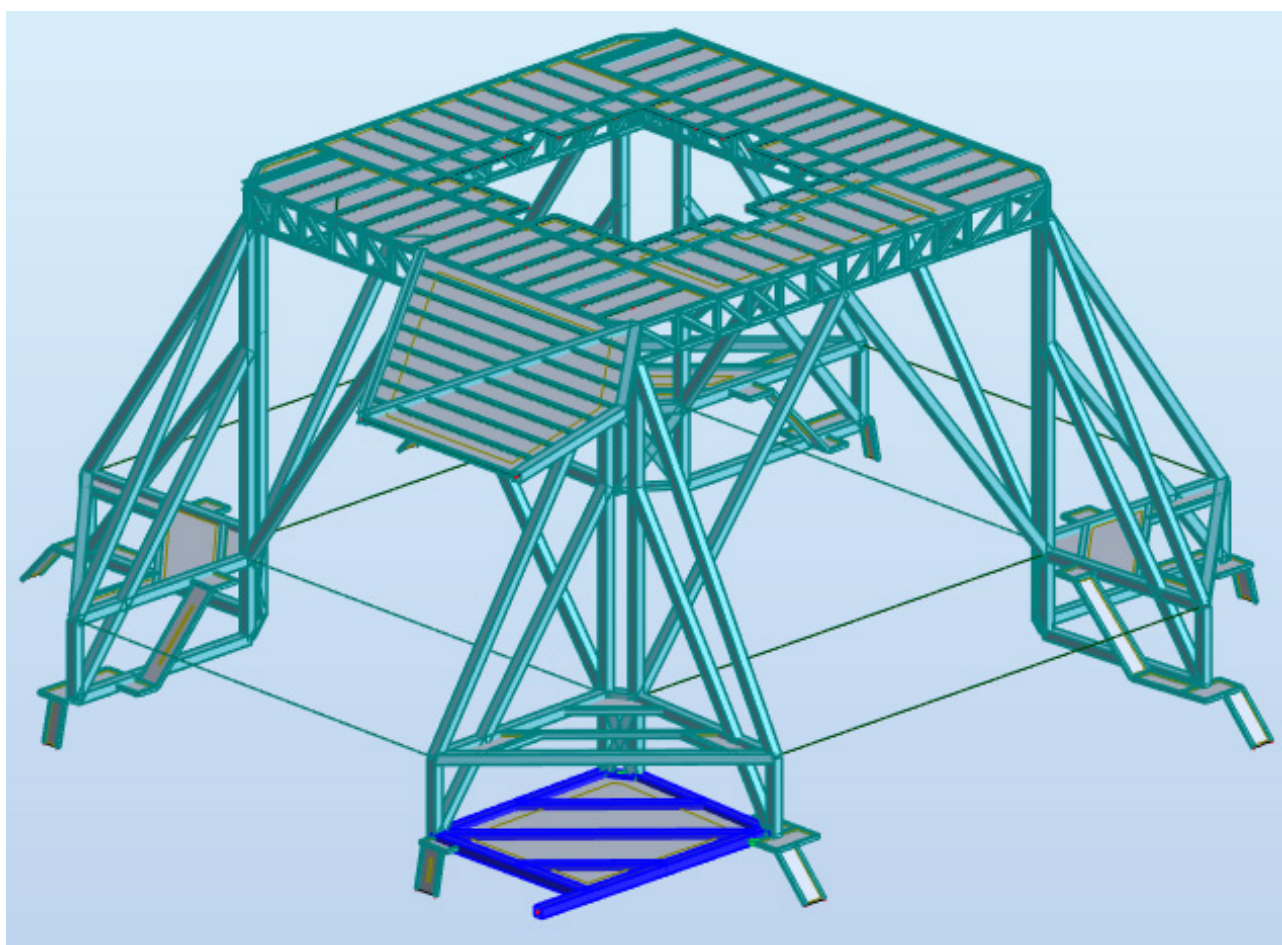
Poids d'une poutre HEA 140 : 0,025 T



Installation des passerelles pompiers

Sections : Tubes carrés 100x100x8mm

Poids d'une passerelle : 0,3 T



Vue générale du tabouret achevé depuis l'angle nord-ouest. Plateforme intermédiaire en surbrillance : reliée à l'échafaudage de pied.
LeBE.

C/ BÂCHAGES ET PARAPLUIES

Continuité de l'étanchéité aux différentes étapes du chantier

Une attention particulière sera portée à l'étanchéité de chantier pour éviter toute infiltration dans la cathédrale. Les parapluies et bâchages devront s'adapter aux étapes du chantier :

- Lors de la dépose de l'aiguille, les couvertures de la souche seront conservées pour assurer l'étanchéité de la croisée telle qu'avant travaux : couvertures des versants de noues à la jonction entre les 4 bras de la cathédrale, couvertures en cuivre du fût de la flèche, couverture en plomb de la terrasse de la lanterne.
- À partir de la dépose de l'enrayure 4 et des pièces verticales qui y sont assemblées, il sera nécessaire de déposer la terrasse en plomb de la lanterne et les couvertures en cuivre de la souche. Avant cela :
 - Le lot 1 installera un bâchage provisoire sur l'enrayure 3, avec exutoires d'évacuation sur les couvertures en tuile des versants de noue traversant la couverture du fût. Les pièces de charpente traversant la bâche seront manchonnées de remontées d'étanchéité fixées par sangles à cliquet. Cependant, l'écoulement des eaux le long des pièces de charpentes traversantes sera inévitable.
 - En complément, le lot 3 - maçonnerie mettra en œuvre une étanchéité sur l'extrados de la voûte de la croisée s'évacuant vers les exutoires créés précédemment (opération sécurisation incendie).
- Quand les couvertures plomb et cuivre et l'ensemble de la charpente de la lanterne située au-dessus du tabouret métallique auront été déposées, enrayure 4 comprise, le tabouret sera protégé contre les intempéries, permettant de continuer les déposes en partie basse à l'abri : il sera bâché sur ses faces verticales et un parapluie sera posé dessus.
 - Ce parapluie sera ouvrant : il sera ouvert ponctuellement pour permettre l'évacuation des pièces de charpente de la souche. Son ouverture sera de section carrée de 9m de côté minimum.
 - Les bâches verticales devront pouvoir être ouvertes ponctuellement en partie basse pour l'évacuation / l'approvisionnement des tuiles vers/ depuis les plateformes d'angles.
- Pendant toute la durée des restaurations en atelier, le parapluie et les bâches, seront maintenus en position fermée et le lot échafaudage assurera leur entretien.

Les mêmes dispositions seront prises en sens inverse lors du remontage de la flèche.

Parapluie ouvrant

Le parapluie ouvrant est composé de deux bâtières autonomes de même dimension. Les versants sont orientés vers le sud et vers le nord. Les bâtières sont fixées en bas de versant sur des rails qui leur permettent de coulisser dans le sens est-ouest. Les rails sont fixés en porte-à-faux sur le tabouret. À l'ouverture, les deux bâtières s'écartent l'une de l'autre d'est en ouest pour dégager la trémie du tabouret au-dessus de la croisée, par laquelle passeront les pièces de charpente. La bâtière ouest présente un couvre-joint qui vient en recouvrement sur la bâtière est, en position fermée, pour se protéger des vents dominants venant de l'ouest.



Vue actuelle de la flèche depuis la rue Michelet



Vue des échafaudages de la flèche depuis la rue Michelet en début et en fin de chantier : échafaudages toute hauteur.



Vue des échafaudages de la flèche depuis la rue Michelet en cours de dépose ou de repose de la flèche : échafaudages mi-hauteur.



Vue des échafaudages pendant la dépose / repose de la souche : parapluie ouvert au-dessus de la trémie du tabouret pour laisser passer les pièces.



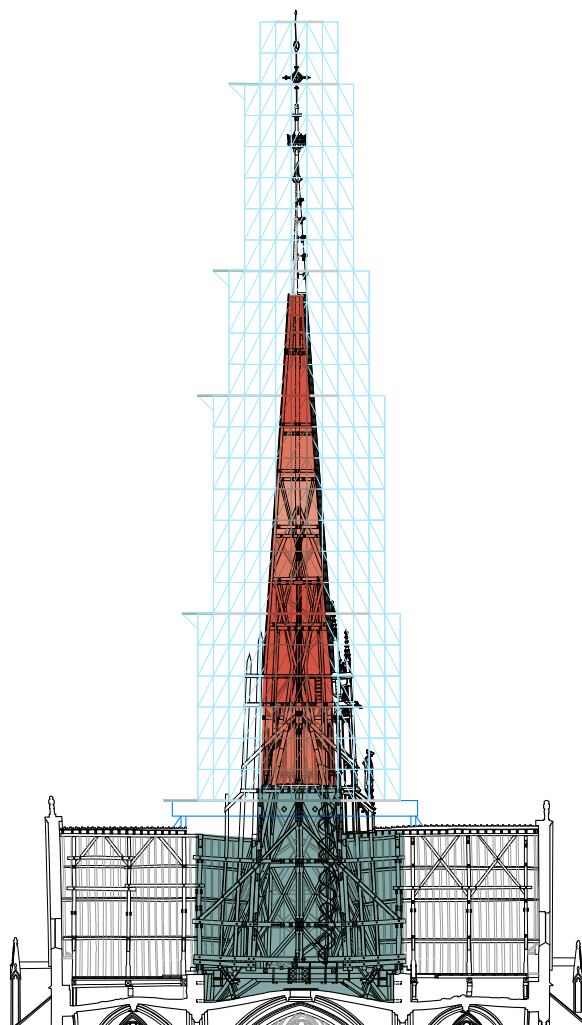
Vue des échafaudages pendant la tranche optionnelle 2 - Restauration de la flèche en atelier. La croisée sera couverte d'un parapluie et le tabouret métallique bâché.



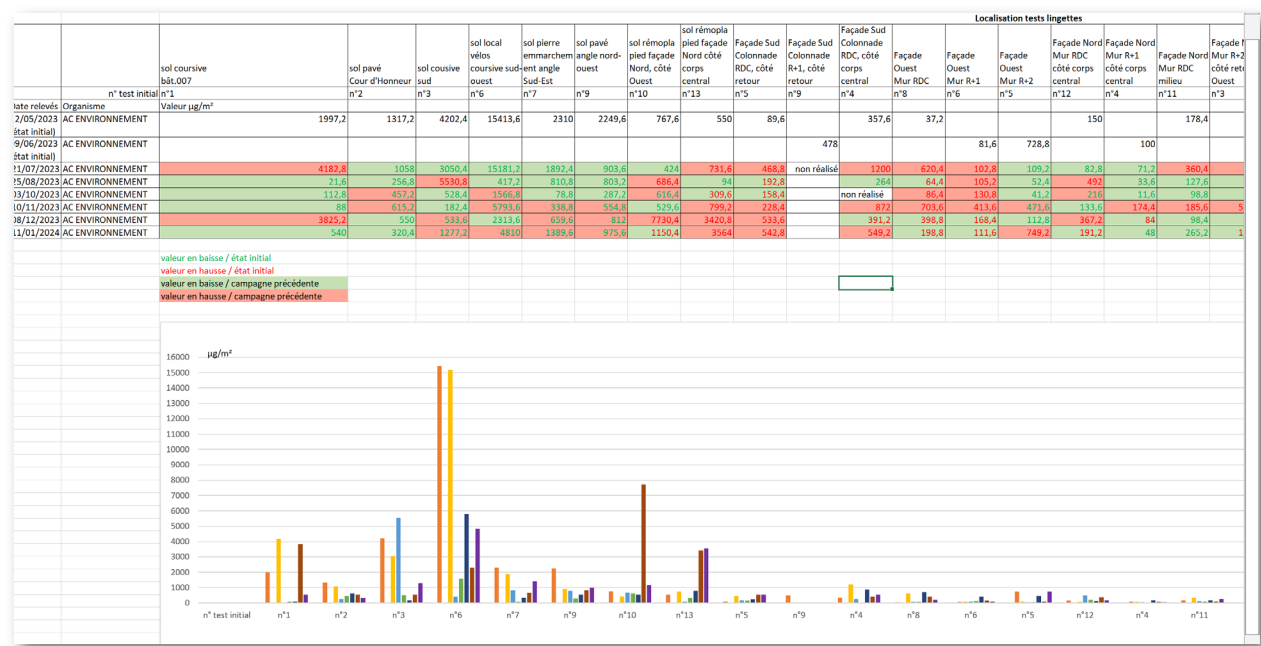
Vue de la flèche après travaux : cuivres patinés bruns.



Vue de la flèche après quelques décennies : patine vert-de-gris uniforme sur les cuivres.



Zones de déplombage : en vert, la souche déplombée lors de l'opération préalable de mise en sécurité de la cathédrale ; en rouge, les zones successives à déplomber au début du chantier de la flèche.



Exemple d'un tableau de relevé du taux de plomb sur un chantier parisien. Valeur initiale, valeurs relevées régulièrement, écart avec valeur initiale et écart avec valeur précédente.

VI. CONDITIONS DE CHANTIER

A/ DÉPLOMBAGE : ZONAGE ET MÉTHODES

Niveau de risque du chantier de Dijon

Le chantier devra assurer la sécurité d'une intervention sur un ouvrage entièrement plombé par la peinture de minium et probablement au plomb atmosphérique.

À titre de comparaison avec les derniers grands chantiers de flèche, la situation de Dijon s'apparente à des conditions usuelles de combles à poussière plombée, contrairement à Notre-Dame de Paris et Rouen :

- À Paris, le plomb incendié avait pollué l'ensemble des combles et des échafaudages ; ce sont environ 400T de plomb qui ont été dispersées, là où à Dijon, nous avons moins de 10T de plomb en œuvre sous forme solide et non dispersée (environ 5200kg de couvertures plomb plus la peinture plombée sur charpente).
- À Rouen, où la charpente en fonte est recouverte de peinture plombée et restaurée in situ, le déplombage a été réalisé sur place par grenailage (méthode dispersive). À Dijon, le nettoyage préalable sur place se fera par méthode non dispersive (aspiration à la source) ; le déplombage complet (par décapage) se fera en atelier, dans des conditions de travail maîtrisées.

Protocole de décontamination du plomb

Après installation des échafaudages et avant tous travaux sur la flèche, les charpentes seront déplombées selon le protocole suivant :

- Nettoyage par aspiration THE de toutes les pièces de charpente de l'aiguille et de la lanterne, préalable à la dépose. Intervention de haut en bas, par des agents encordés, équipés d'un aspirateur portatif. Pénétration dans la charpente par détoiture localisée, autant que de besoin. Phasage : charpente de la souche déplombée en TF ; charpente de l'aiguille déplombée en TO2.
- Aspiration complémentaire à chaque dépose de volige et ouverture d'assemblage de charpente pour capter les particules qui se libéreraient à la dépose.
- Dépollution complémentaire après dépose, en atelier, en préalable des interventions de restauration : décapage de la peinture de minium de plomb et aspiration de toutes les autres surfaces non peintes.

Le plomb pouvant avoir migré dans la profondeur du bois, les manipulations des pièces anciennes se feront avec des précautions usuelles vis-à-vis du plomb solide. Tout travail d'entaille devra être réalisé sous protocole renforcé. Un test à fluorescence X sera réalisé sur les pièces de bois avant et après décapage en atelier pour analyser la profondeur de contamination. Si des particules de plomb demeurent en profondeur, un encapsulage pourra être pratiqué selon les recommandations des instances de santé compétentes. Celui-ci est prévu au programme des travaux, avant la remise en peinture : primaire de peinture à l'huile de lin figeant les résidus de plomb à l'intérieur des pièces, tout en laissant respirer le bois.

Suivi du taux de contamination au plomb

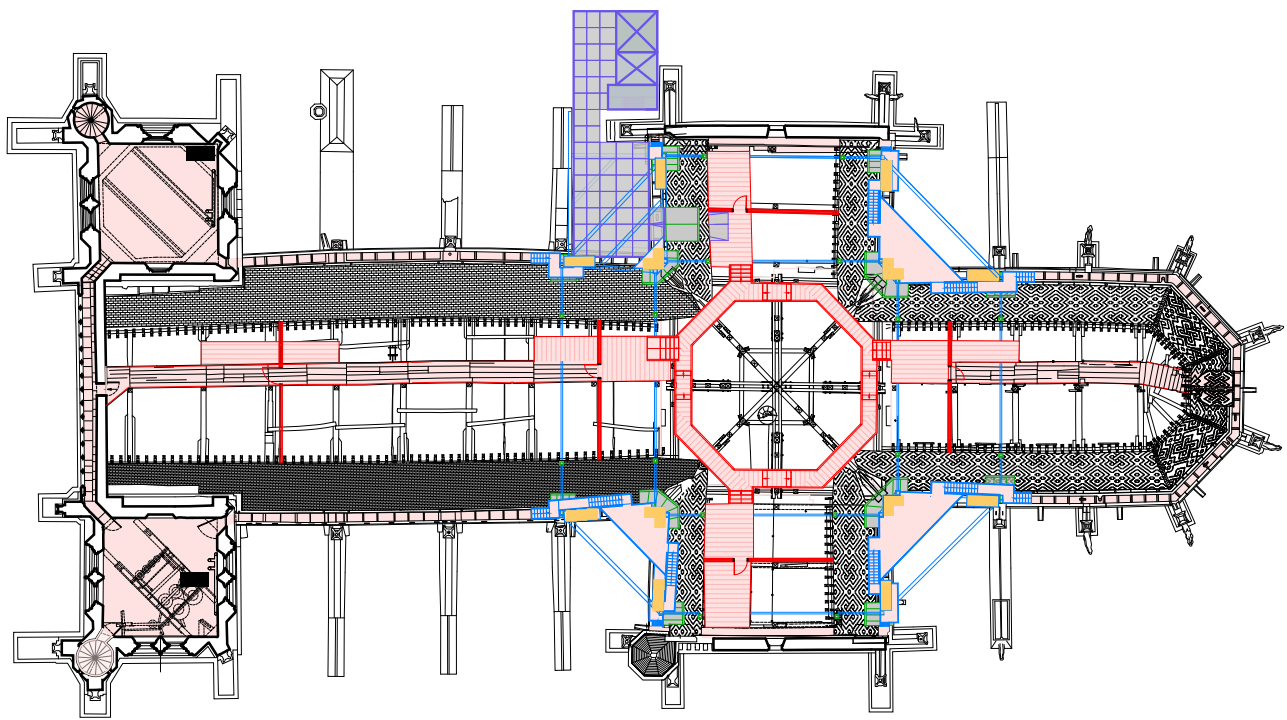
Un diagnostic préalable avec mesures d'empoussièrement est en cours, missionné par le MOA.

Au démarrage du chantier, des mesures initiales seront prises à différents points stratégiques de la flèche et des installations de chantier : base-vie, sur les 3 plateformes d'échafaudages et à mi-hauteur des échafaudages de l'aiguille, au pied de la flèche, sur l'extrados de la croisée, à différents niveaux d'enrayure. Jusqu'à la fin du démontage de la flèche, les mesures seront relevées aux mêmes points à intervalles réguliers pour suivre l'évolution du taux de plomb pendant le chantier et réajuster les mesures de protection et de déplombage en fonction du niveau d'exposition. Ce suivi sera confié au lot charpente chargé du déplombage des pièces de bois.

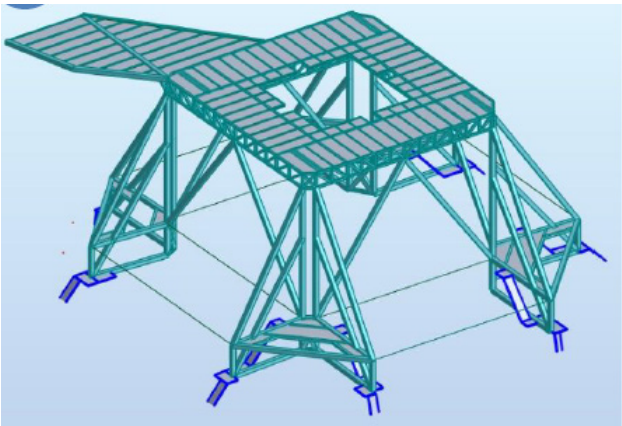
Protection contre le plomb

La protection des travailleurs contre le risque au plomb est à la charge des entreprises. Dans l'organisation des installations de chantier, il est prévu deux cabines de décontamination en pied de flèche, sur la plateforme haute, pour le travail de démontage.

Pendant le travail de désassemblage et de chargement des pièces à pied d'œuvre, l'aire de travail prévue dans le square des Bénédictins devra être balisée et équipée d'une cabine de décontamination.



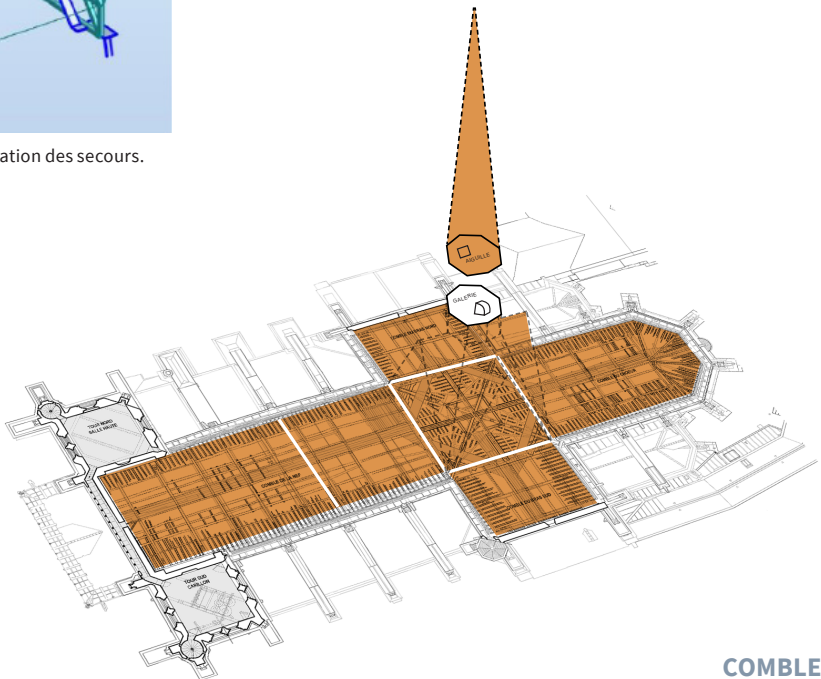
Plan des combles en phase chantier : en rose, continuité des cheminements pompiers



Vue des passerelles et plateformes d'angle pour la circulation des secours.

Détection incendie

- Détection de chantier
- Aiguille et souche : zones évolutives selon l'avancement du chantier
- + couplage caméras optiques et éclairage
- + caméras thermiques pour levée de doute dans les zones les plus à risque



COMBLES

Repérage des zones à détecter pendant le chantier

B/ SÉCURITÉ INCENDIE DE CHANTIER

Respect des consignes de sécurité incendie

Une attention particulière sera portée au respect des consignes de sécurité incendie :

- Interdiction de fumer sur tout le chantier (base-vie, aires de travail à pied d'œuvre, échafaudages, zone chantier en combles et sur toitures...). Des pénalités seront prévues au CCAP en cas de transgression (flagrant-délit, présence de mégot).
- Points chauds autorisés par permis feu signé pour un type de travaux sur une durée limitée.
- Interruption des travaux par points chauds 2h avant le départ des équipes.
- Vérification des ouvrages à la caméra thermique en fin de journée en auto-contrôle.

Contrôle de la sécurité incendie sur chantier

Le risque incendie est identifié comme le risque majeur du chantier de la flèche. Pour maîtriser au mieux ce risque, une surveillance humaine devra être mise en place. Un agent de sécurité, de niveau SSIAP 2, habilité à circuler sur les installations en hauteur (échafaudages, passerelles...), sera chargé de :

- contrôler et signer les permis feu, par délégation de la MOA ;
- à chaque fin de journée de travail, 2h après la fin des travaux par points chauds, réaliser une ronde à la caméra thermique sur les lieux de travaux ou constater sa bonne réalisation par les entreprises ;
- effectuer des contrôles inopinés en journée pour s'assurer du bon respect des consignes de sécurité par les entreprises. Provision 1 visite par semaine en moyenne. Visites plus resserrées lors des étapes à risque important ; visites plus espacées sur les périodes à risque faible.
- remettre un rapport hebdomadaire de ses visites régulières et inopinées.

Cette mission de surveillance devra être séparée des marchés de travaux pour lui assurer toute son autorité. Ne relevant pas d'une entreprise du chantier, la société de personnel de sécurité mandatée en direct par la MOA pourra agir en délégation d'autorité sur les entreprises et les différents intervenants du chantier (MOE, OPC, visiteurs...). Le choix de la société sera déterminant pour la bonne conduite de cette mission. Le critère financier devra être mis en balance avec des critères de qualité, sur présentation de références de missions similaires et des CVs du personnel qui interviendra réellement sur site, de garanties de limitation du renouvellement des agents et de formation des personnels aux spécificités du site.

Moyens d'alerte : SSI de chantier, télésurveillance infrarouge, téléphones rouges

Durant le chantier, un système de sécurité incendie avec détection dans chaque volume fermé sera installé. Il s'adaptera à l'évolution du chantier, notamment à l'avancement de dépose et repose de la charpente de la flèche. Le SSI, de catégorie A et d'alarme de type 1, se situera dans un abri sur la plateforme intermédiaire des échafaudages. Le SSI sera doublé d'un système de surveillance par caméras optiques avec éclairage commandable depuis le comble. Des caméras thermiques seront disposées dans les zones les plus à risque du chantier pour une première levée de doute rapide à distance. Un téléphone GSM relié aux services de secours sera placé sur la plateforme intermédiaire et dans le poste de sécurité.

Le lot 8 est responsable des installations de détection et de surveillance (pose et maintenance) et de leur exploitation. Pour le bon fonctionnement des moyens techniques, une présence humaine est indispensable. Le lot 8 devra la surveillance et la levée de doute par un agent présent en permanence sur le chantier pendant les horaires d'ouverture+ 2h après la fin des travaux, chaque soir. Cet agent se tiendra dans le poste de sécurité, à l'entrée de la base-vie, où seront reportés les alarmes du SSI et les écrans de surveillance des caméras thermiques. L'agent pourra vérifier en permanence sur les écrans de télésurveillance infrarouge le départ d'un feu et alerter directement les secours par téléphone. En cas d'alerte, il devra monter éteindre l'alarme au coffret SSI situé sur la plateforme intermédiaire des échafaudages et réaliser la levée de doute. Si le départ de feu est avéré, il pourra contacter les secours avec le téléphone rouge de la plateforme intermédiaire.

Accès des pompiers durant le chantier

Les sommiers de répartition du tabouret métallique seront installés sur les chéneaux en pied de versant, entravant la circulation sur les chéneaux en pied de versant. Des passerelles de circulation seront aménagées à chaque angle de la croisée pour rétablir la continuité de la circulation durant toute la durée du chantier.

C/ INCIDENCES CHANTIER SUR LE FONCTIONNEMENT DE LA CATHÉDRALE

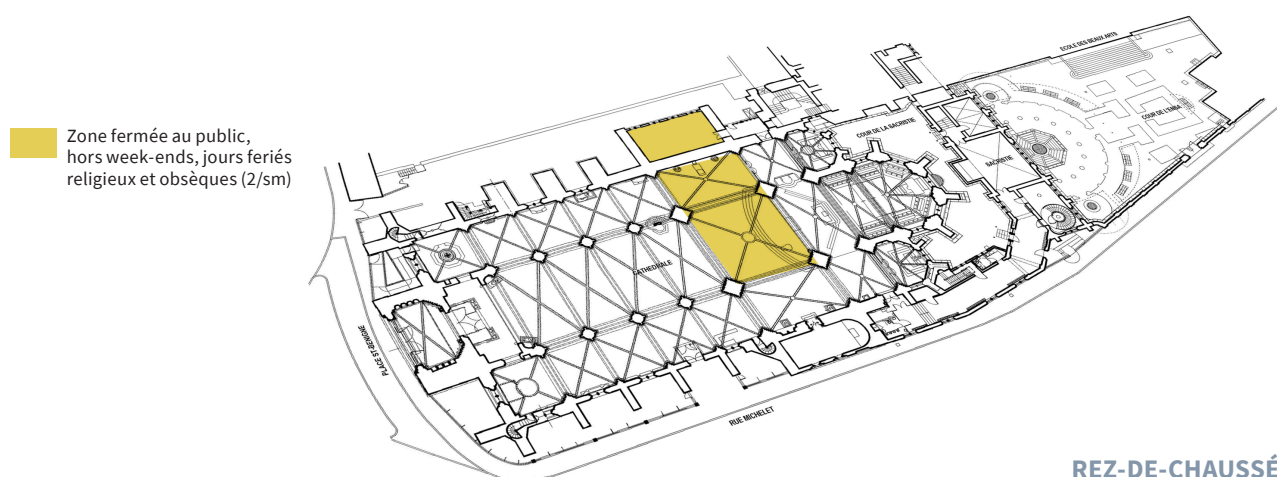
Consignation du lustre du chœur pendant toute la durée du chantier

Aucun réseau électrique ne devra transiter dans la croisée durant toute la durée du chantier pour minimiser le risque d'incendie. Le grand lustre du chœur est actuellement suspendu et alimenté sur le quart Est de la voûte de la croisée. Il est donc prévu de le consigner pour la durée du chantier.

Ouverture de la cathédrale / interruption de chantier

Le chantier se déroulera isolément de la cathédrale, qui pourra rester ouverte pendant les travaux. Par mesure de sécurité, au moment du levage par la grue, les parties de la cathédrale situées sous les zones de levage seront interdites aux visiteurs et au personnel. Une clôture basse devra être installée en semaine pour empêcher l'accès à la croisée, au bras nord du transept et à la salle de maîtrise, avec panneaux d'information et d'alerte. La clôture sera déposée avant chaque week-end et jours fériés des fêtes religieuses (Semaine Sainte, Ascension, Assomption, Toussaint, Noël) et reposée à la reprise du chantier le jour ouvré suivant. Ces mises en places et déposes de clôtures sont prévues au lot 1.

Pour permettre les célébrations de semaine dans le chœur (les obsèques), les levages seront interrompus les mardis et vendredis après-midis, sauf avis contraire de la Paroisse 24h auparavant. L'entreprise d'installation de chantier devra la dépose / repose des clôtures à l'intérieur de la cathédrale pour le temps de la célébration et aucun levage à la grue ne sera permis durant la célébration pour la sécurité des fidèles.



Repérage des zones à fermer au public pendant le chantier - Hypothèse Grue et installations de chantier au NORD

VII. STRUCTURE ADMINISTRATIVE DU CHANTIER

A/ ALLOTISSEMENT

- Lot 1 : Installation de chantier / échafaudages / parapluies / charpente métallique
- Lot 2 : Grue et conduite de grue
- Lot 3 : Maçonnerie / pierre de taille / Colonnes sèches
- Lot 4 : Charpente
- Lot 5 : Couvertures cuivre, plomb, ardoises, tuiles
- Lot 6 : Sculptures en cuivre et ornements métalliques
- Lot 7 : Menuiserie
- Lot 8 : Détection incendie de chantier / Sûreté de chantier / Surveillance / Électricité

Grutier au lot 2

Le conducteur de grue est pris en charge par le lot 2. Un installateur de grue seul n'aura pas les ressources en interne pour mettre à disposition un conducteur de grue sur toute la durée du chantier, car ce type de conducteur est rare. Seule une entreprise générale aura les moyens de répondre à ce lot, en sous-traitant l'installation de la grue à une entreprise locale.

Colonnes sèches au lot 3

Les travaux sur les colonnes sèches (création, prolongation, mise aux normes) ne sont pas suffisamment conséquents pour faire l'objet d'un lot séparé. Ces prestations sont comprises dans le lot 3 - Maçonnerie pour l'étoffer et parce que les fixations des colonnes sèches se feront principalement dans les maçonneries.

Limites de prestation du lot 8 et mission spécifique de contrôle de la sécurité incendie de chantier

Nous avons prévu un dispositif de sécurité incendie incluant un système anti-intrusion et un système de détection SSI provisoire de chantier, avec une présence sur site d'un prestataire en charge de la surveillance de l'installation sûreté/SSI, pendant les heures d'ouvertures du chantier, avec report vers télésurveilleur avec mission de levée de doute le reste du temps.

Le maître d'ouvrage missionnera directement de son côté un contrôleur SI qui vérifiera la bonne application des procédures de sécurité par les entreprises et délivrera les permis-feu par délégation du MOA. Il pourra assurer la coordination au nom de la MOA avec les services du SDIS, qui prévoient une importante implication dans la sécurité du chantier, et enfin étendre son contrôle à d'autres obligations relatives à la sécurité telles que le rangement quotidien du chantier, la désactivation quotidienne des circuits électriques hors heures de travail, etc...

B/ PHASAGE

Le chantier se découpera en 6 tranches :

- TRANCHE FERME : installation de chantier et sécurité incendie – 8 mois : juillet 2026-février 2027
- TRANCHE OPTIONNELLE 1 : installation de la grue et du tabouret – 5 mois : février-juillet 2027
- TRANCHE OPTIONNELLE 2 : dépose de la flèche – 7,7 mois : juillet 2027-mars 2028
- TRANCHE OPTIONNELLE 3 : restauration en atelier – 7 mois : mars-octobre 2028
- TRANCHE OPTIONNELLE 4 : repose de la souche – 8,2 mois : octobre 2028-juillet 2029
- TRANCHE OPTIONNELLE 5 : repose de l'aiguille et replis – 6,1 mois : juillet 2029-février 2030

Voir le calendrier de l'opération établi par l'OPC.

4. PROGRAMME DE TRAVAUX

I. LOT 1 : INSTALLATION DE CHANTIER / ÉCHAFAUDAGES / PARAPLUIES / CHARPENTE MÉTALLIQUE

Les installations de chantier se feront dans l'ordre suivant :

- Au début de la TF :
 - installation de la base-vie dans le square,
 - dépose des deux portions du mur de clôture du square de Bénédictins par le lot 3,
 - pose des clôtures périphériques de chantier, des portails, des protections,
 - réalisation des cheminements : voie d'accès au musée archéologique, voie de livraison de chantier avec aire de retournement
 - montage des échafaudages jusqu'au pied des toitures, de la passerelle entre square et échafaudages, des plateformes basse et intermédiaire sur échafaudages
- En TO1 :
 - montage de la grue à tour (livraison et montage à la grue PPM) par le lot 2,
 - montage du tabouret métallique et du plancher sur tabouret (plateforme supérieure)
- Au début de la TO2 : montage des échafaudages de l'aiguille
- Au cours de la TO2, les échafaudages de l'aiguille seront déposés progressivement en parallèle du démontage de la charpente.
- Au cours de la TO4, ils seront reposés progressivement en parallèle du remontage de la charpente.
- Puis les démontages définitifs se feront en dernière tranche TO5.

A/ BASE-VIE

Au démarrage du chantier :

- Sondages racinaires manuels à l'emplacement prévu des techno-pieux de fondation des bungalows, pour détermination de leur emplacement exact. Prévoir adaptation des longrines et de leurs armatures pour pontage entre pieux déportés de fondation en cas de racine charpentière au droit de l'emplacement prévu.
- Réalisation des fondations de la base-vie par techno-pieux. Réalisation des longrines de répartition sur technopieux, hors sol pour maintenir une couche d'air entre bungalows et sol.
- Installation des bungalows de chantier superposés, compris escalier d'accès et plateforme d'accès à l'étage :
 - à rez-de-chaussée :
 - Sanitaires douches H (1U)
 - Vestiaires H (2U)
 - Vestiaires + Sanitaires F (1U)
 - à l'étage :
 - Réfectoire (2U accolés)
 - Salle de réunion (2U accolés)
- Installation d'un poste de sécurité (1 guérite) à l'entrée du chantier

En TF pour les travaux de déplombage de la charpente de la souche :

- Mise en place d'une cabine de décontamination au plomb (douche, vestiaires) et d'une cabine sanitaire (WC, douche, lave-main, fontaine à eau), modulables. Levage par sapine, assemblage sur la plateforme intermédiaire (niveau pied de versant).

En TO1, après montage de la grue :

- Dépose à la grue des cabines, laissées en attente.

En début de TO2 :

- Pose à la grue de deux cabines plomb et de deux cabines sanitaires modulables assemblées sur la plateforme supérieure (niveau tabouret métallique). Fermeture du chevêtre d'accès au chantier dans la toiture du bras nord du transept, pour éviter que du personnel ne pénètre dans le comble sans être passé par les cabines plomb.

En cours de TO2, après dépose complète de l'aiguille et avant pose du parapluie sur le tabouret métallique :

- Désassemblage des deux cabines plomb et des deux cabines sanitaires, descente par sapine au niveau pied de versant, réassemblage sur la plateforme intermédiaire. Réouverture du chevêtre.

En fin de TO2 :

- Désassemblage des cabines plomb, descente à la sapine. Évacuation. Cabines sanitaires laissées en place durant tout le reste du chantier.

En TO5 pendant la repose des couvertures plomb en TO5 :

- Installation à la grue de deux cabines de décontamination au plomb en pied d'aiguille, sur la plateforme haute.

Pour toute la durée du chantier :

- Fourniture en eau.
 - Alimentation et évacuation à prévoir sur plateforme intermédiaire et sur plateforme haute des échafaudages.
- La fourniture en électricité de chantier sera assurée par le lot 8 - Électricité.

B/ CLÔTURES ET PROTECTIONS

Après démontage des deux portions du mur de clôture du square des Bénédictins par le lot 3 :

- Clôture périphérique de toute la zone de chantier par palissade de 3m de haut en bardage métallique, lestée par plots béton reliés au bardage par montants traversant la grille de la clôture sur la rue du Dr Maret. Moyens d'anti-franchissement continus (barbelés en partie haute). Localisation : sur la rue du Dr Maret, entre la zone chantier et le reste du square et en pied des échafaudages en façade nord de la cathédrale.
- Pose de portails dans la clôture de chantier, hauteur 3m dito clôture, avec moyens anti-franchissement :
 - Sur la rue du Dr Maret, accès au musée archéologique, au nord : portail à deux vantaux de 2,60m de large. PI : tableau électrique à cet emplacement, déplacé par le lot 8 - Électricité.
 - Sur la rue du Dr Maret, accès chantier : 1 portail de 7,70m de large à deux vantaux pour l'entrée et la sortie des véhicules de livraison du chantier + 1 portillon d'accès personnel de chantier, de 1m de large, à placer face au portail du mur de clôture, dont la grille aura été déposée par le lot 3. PI : Accès au chantier par portillon avec lecteur de badge nominatif, à la charge du lot 8 - Électricité.
- Fourniture et pose de 3 panneaux d'information 2x3m sur la clôture du square des Bénédictins.
- Dépose soignée en conservation de la fontaine, de la barrière automobile, des cerceaux vélos, des plots métalliques et béton, du mobilier (poubelles, bancs...) qui se situent dans la zone de chantier. Stockage soigné au pied de la façade nord de la cathédrale pour toute la durée du chantier. Repose en fin de chantier.
- Protection de la margelle du puits, dans l'angle sud-est du square.
- Protection de tous les ouvrages existants et de la végétation (spots au sols, haies...)

À l'intérieur de la cathédrale :

- Fourniture et pose de clôtures provisoires, pour fermer l'accès en RDC à la croisée, et au bras nord du transept. Dépose avant chaque week-end, avant chaque jours fériés religieux, avant chaque obsèques (en moyenne 2 par semaine), durant toute la durée des tranches optionnelles 1, 2, 4 et 5. Repose avant reprise des levages. Clôtures : barrière métallique basse (h 1m) avec panneaux d'indication.

C/ VOIES DE CIRCULATION ET PROTECTION DES SOLS

Mise en œuvre d'une voie d'accès au musée archéologique pour piétons et circulation de véhicules légers (surface env. 185m²) :

- Pose d'un géotextile anti-contaminant, porosité 30%.
- Coulage d'une chape béton armé par treillis, épaisseur 15cm. Compris pente de rattrapage entre le trottoir de la rue du Dr Maret et l'entrée de la voie échelle env. 70cm en contrebas de la rue.

Mise en œuvre d'une voie de circulation pour engins lourds (de classe 4 - surface env. 570m²) :

- Dépose en conservation des pavés au droit de la future voie d'accès des véhicules de livraison du chantier. Surface approximative : 7m².
- Décaissement de la terre végétale sur une profondeur de 15cm :
 - Décompression préalable de la terre actuelle très compactée au karsher à air comprimé

- Décaissement manuel à l'aspirateur, avec embout en caoutchouc. Décaissement à la pelle strictement interdit.
- Protection des racines charpentières découvertes par aquanappe (géotextile renforcé)
- Stockage de la terre végétale décaissée dans l'angle nord-est du square (env. 90m³ qui foisonne à 120m³ à répartir sur 200m² de surface > hauteur moyenne de 60cm) pour toute la durée du chantier.
- Sur toutes les surfaces décaissées, pose d'un géotextile anti-contaminant, porosité 30%.
- Mise en œuvre d'une couche de forme, épaisseur 26cm, en grave calcaire 10/31, fines interdites pour éviter les phénomènes de colmatage qui imperméabiliseraient le remblai. Graves non polluées analysées, contrôle des FTP, des analyses et de la conformité du matériau à l'arrivée de chaque camion de livraison. Compris pente de rattrapage entre le trottoir de la rue du Dr Maret et l'entrée de la voie de circulation.
- Pose de plaques en polyéthylène recyclé à haute densité pour former couche de roulement.

Mise en œuvre de protections de sol sur toute la surface restante de la zone de chantier, hors radier de la grue, pour reprise de charges <3,5T :

- Sur toutes les surfaces à protéger, pose d'un géotextile anti-contaminant, porosité 30%.
- Mise en œuvre d'une couche de protection, épaisseur 15cm, en grave calcaire 10/31, fines interdites pour éviter les phénomènes de colmatage qui imperméabiliseraient le remblai. Graves non polluées analysées, contrôle des FTP, des analyses et de la conformité du matériau à l'arrivée de chaque camion de livraison.

Au pied de la façade nord, à l'angle nord-ouest du transept nord, sous les échafaudages :

- Protection des pavés par plaques en polyéthylène recyclé à haute densité, sur la zone de pavés support des échafaudages de pied dans l'allée nord.

Remise en état du square en fin de chantier, après dépose des installations de chantier, des protections de sol et des clôtures :

- Étalage des terres végétales sur les zones décaissées,
- tassement léger pour uniformisation des surfaces,
- engazonnement, remplacement de végétaux arbustifs en mauvais état en recherche,
- repose des pavés.

D/ ÉCHAFAUDAGES

Traçage du trait de niveau de référence du chantier :

- un sur les murs bahuts de la croisée, en intérieur de la croisée
- un sur les garde-corps en pied de versant, sur toute la longueur des bras de transept et sur une travée de la nef et du chœur

Après installation de la grue par le lot 2 :

Accès aux échafaudages depuis le square

- Mise en œuvre d'une passerelle d'accès à la plateforme basse des échafaudages, avec escalier et sapine pour rattraper la différence de niveau entre square et plateforme basse. Passerelle reposant sur poutres treillis portant sur les lests béton des clôtures pour éviter le poinçonnement du sol à proximité des arbres. En chevauchement de l'allée nord, laissant 4m de hauteur libre dans l'allée nord pour le passage des véhicules pompiers.

Échafaudages de pied

- Montage des échafaudages de pied : du niveau du sol de l'allée nord jusqu'au niveau des pieds de toiture en TF puis jusqu'au niveau de l'étage ajouré de la flèche à 42m d'altitude à partir de la fin de la TO1. Emprise au sol : entre les contreforts de la travée 5 de la cathédrale, sur dalle de protection des pavés.
- En TF, complément d'échafaudages sur toiture du bas-côté nord pour support de la plateforme intermédiaire. À démonter en TO1 après assemblage de la plateforme intermédiaire au tabouret métallique.
- Mise en œuvre en TF d'une plateforme basse sur échafaudages, au même niveau que la passerelle d'accès ci-avant décrite.

- Mise en œuvre en TF d'une plateforme intermédiaire établie devant les façades, en pied de versant, au niveau des garde-corps des gouttereaux, d'une surface de 65m² environ, entre les contreforts de la cathédrale. Appui sur échafaudages de toiture du bas-côté nord. Poutres support du plancher montées par morceaux pour pouvoir être acheminées par sapine de levage, avec platine d'about en attente de fixation au tabouret métallique en TO1.
- Mise en œuvre d'une plateforme haute sur le dernier niveau d'échafaudage : plancher sur le tabouret métallique, selon plans de LeBE.
- Établissement d'une sapine de levage, d'un ascenseur et d'un escalier de secours pour accéder aux plateformes basse, intermédiaire et haute.

Tabouret métallique

- Dès le démarrage du chantier, en TF : étude structurelle et dimensionnement du tabouret métallique par un BET au choix de l'entreprise.

Après dépose localisée des pieds de toiture et des chéneaux plomb par le lot 5 - Couvertures, coulage des sommiers béton d'appui du tabouret métallique :

- Pose d'un feutre d'interposition entre la pierre et le plot béton à couler.
- Coffrage des plots béton par plaques OSB butonnées entre elles.
- PI : Pose de tuyaux PVC en fond de coffrage pour l'écoulement des eaux pluviales, raccords d'étanchéité avec les chéneaux plomb et les descentes EP cuivre, par le lot 5 - Couvertures.
- Ferrailage des plots selon plans de LeBE, avec insertion de platines de fixation des pieds du tabouret métallique.
- Coulage de sommiers en béton armé, supports des pieds du tabouret métallique, selon les plans de LeBE, volume environ 40x80cm x h100cm chacun : 4 plots par angle de la croisée.

Après prise des sommiers béton et après dépose des statues, mise en œuvre d'un tabouret métallique, support des échafaudages de l'aiguille, selon les plans de principe de LeBE :

- Fourniture du tabouret métallique, réalisé selon les plans de LeBE.
- Soudage en atelier de colerettes autour de chaque pied du tabouret (poteaux et jambes de force).
- Pose à la grue de chaque élément du tabouret, selon plan de montage de LeBE. Boulonnage des appuis sur les platines encastrées dans les sommiers béton. Assemblage sur place uniquement par boulonnage. Travail en hauteur par cordiste.
- Installation et serrage des tirants de pied de tabouret traversant les combles de la cathédrale. Compris toutes coordination avec le lot 5 - Couvertures pour le positionnement des châtières pour le passage des tirants dans les toitures.
- Pose à la grue et assemblage en place du plateau du tabouret. Dimensions : env. 15 x 15 m, trémie centrale de 9m de côté pour le passage des pièces de charpente, excroissance au nord-est pour former la plateforme haute.
- Mise en peinture de l'ensemble de la charpente métallique du tabouret, teinte au choix de l'architecte. NB : la mise en œuvre exige des conditions particulière (hors intempérie). Les structures seront traitées en atelier puis assemblées. Protections des peintures lors des levages par emploi obligatoire d'élingues textiles. Retouches en recherche. Compris entretien annuel par examen visuel en cordiste avec si besoin retouches par applications localisées.
- Application d'une peinture intumescente sur primaire anti-corrosion, degré REI 120, couche de finition pour protection aux intempéries et UV, teinte au choix de l'architecte. Localisation : pièces en partie basse, proches des toitures (pieds des poteaux, pieds des décharges, montants horizontaux).
- Flocage coupe-feu des tirants métalliques traversant les combles : manchonnage des tirants par gaine en tôle de diamètre 8cm à recouvrir de flocage REI 60 épaisseur 57mm.
- Réhausse métallique éventuelle pour liaisonnement des échafaudages de l'aiguille avec le tabouret (choix laissé à l'entreprise et à son BET sur la nécessité de liasonner ou non les échafaudages de l'aiguille avec le tabouret).
- Pose d'un plancher de travail sur le tabouret métallique, en raccord avec la plateforme haute des échafaudages, à 42m au-dessus du sol, approximativement au niveau de l'enrayure 4.
- Lestage du tabouret métallique par blocs de béton posés au pied des poteaux et des décharges, sur des plateaux reposant sur les goussets d'angle.

En fin de chantier :

- Démolition soignée des sommiers béton d'appui du tabouret.

Pour toute la durée du chantier :

- Instrumentation des maçonneries de la cathédrale au droit du tabouret métallique pour surveillance des déformations : pose de 5 pots de nivellement (un sur chaque pilier maître de la croisée du transept et un sur le mur nord intérieur).

Échafaudages de l'aiguille

Des échafaudages seront montés sur le tabouret métallique, jusqu'à la pointe de l'aiguille. Les échafaudages devront être parfaitement indépendants de la flèche dans leur stabilité.

- Pose des échafaudages de l'aiguille sur la plateforme du tabouret métallique : 25 niveaux d'échafaudages, de surface diminuant avec l'altitude, selon plans de LeBE. Dimensions à la base 13 x 13 m avec creux de 7 x 7 m ; hauteur 50m.
- Plateaux de circulation autour de l'aiguille laissant un espace de circulation de 1m de large minimum. Plateaux d'appoint pour se rapprocher de l'aiguille (qui penche vers le nord-est en l'état actuel), à 20cm de distance maximum.
- À chaque niveau de ressaut de la structure d'échafaudages, aménagement d'une plateforme de chargement / déchargement à la grue : 2x3m, pour moitié en encorbellement, selon les plans d'échafaudages.
- Sur la plateforme haute (niveau 0 de l'échafaudage de l'aiguille), aménagement d'un plateau réservé au matériel des sapeurs-pompiers : 2m² minimum.
- Pour accéder à tous les niveaux d'échafaudage de l'aiguille depuis la plateforme supérieure :
 - Entre chaque ressaut de la structure d'échafaudages, établissement d'une sapine de levage de 2x2m, à côté de la plateforme de chargement, pour moitié en encorbellement, et sur moitié commune avec la sapine sous-jacente, selon les plans d'échafaudages.
 - Entre chaque ressaut de la structure d'échafaudages, établissement d'une sapine d'escalier, selon les plans d'échafaudages.
- Échafaudages éventuellement solidarisés au tabouret métallique grâce à la réhausse interne du tabouret. (Choix laissé à l'entreprise et à son BET sur la nécessité de liaisonner ou non les échafaudages de l'aiguille avec le tabouret.)

Durant les travaux de démontage de la charpente de l'aiguille par le lot 4 - Charpente :

- Démontage progressif des échafaudages de l'aiguille, de l'escalier et de la sapine, au fur et à mesure de la dépose de la charpente.
- Le cas échéant, démontage / remontage de la réhausse du tabouret métallique liaisonnant les échafaudages de l'aiguille avec le tabouret, afin de laisser le passage libre aux pièces de charpente à évacuer / reposer.

Durant les travaux de remontage de la charpente de l'aiguille par le lot 4 - Charpente :

- Remontage progressif des échafaudages de l'aiguille, de l'escalier et de la sapine, au fur et à mesure de la repose de la charpente.
- Toutes coordinations avec le lot 4 pour adaptations aux besoins des charpentiers.

Échafaudages de toiture

- Pose / repose par deux fois d'échafaudages d'accès aux statues pour leur dépose et leur repose.
- Pose / repose par deux fois d'échafaudages d'accès aux couvertures dans l'emprise du tabouret métallique, suspendu à celui-ci, pour la dépose puis la repose des couvertures.
- Toutes protections de toiture et tous renforcements de charpente préalablement à la pose des échafaudages.
NB : aucune charge ne doit être transmise aux voûtes.

Plateformes d'angle et passerelles de circulation pompiers pendant toute la durée du chantier

- Pose de plateformes d'angle posées sur les goussets du tabouret métallique, dans les 3 angles nord-est, sud-est, sud-ouest : plateau en matériel d'échafaudage, garde-corps de 1m de haut, avec lisse intermédiaire et plinthe. Fixation par boulonnage.
- Pose d'escaliers en matériel d'échafaudage pour accéder aux plateformes d'angle, depuis les chéneaux en pied de toiture. 2 escaliers par plateforme d'angle. Avec palier au-dessus des plots béton. Aux extrémités des bras de transept, la première volée de l'escalier sera remplacée par une échelle à cause de l'étroitesse du passage.
- Pose d'escaliers en matériel d'échafaudage pour accéder à la plateforme intermédiaire, à l'angle nord-ouest, depuis les chéneaux en pied de toiture. 2 escaliers.

- Pose d'échelles sur toitures pour relier les paliers des escaliers sus-cités et les portions de chéneaux entre plots.

Passerelles de circulation pompiers dans la croisée pendant la TO3

- Pose de passerelles en matériel d'échafaudages sur le pourtour des murs bahuts de la croisée pour continuité des circulations pendant la TO3 (restauration de la flèche en atelier) : largeur de passage de 80cm minimum, plateau en matériel d'échafaudage, garde-corps de 1m de haut, avec lisse intermédiaire et plinthe.
- Fourniture d'une échelle d'accès à l'extrados de la voûte de la croisée.

Protection foudre

- Mise à la terre de l'échafaudage.
- Installation de tapis isolants aux points de transition entre l'échafaudage et le sol.

E/ PARAPLUIES

Le présent lot veillera à la bonne étanchéité de ses parapluies et bâchages qui s'adapteront aux étapes du chantier, en coordination avec le lot 4 - Charpente qui devra manipuler les installations d'étanchéité pour le bon déroulement de son travail. Il en assurera la vérification et l'entretien pendant toute la durée du chantier, et notamment pendant la TO3 (travaux de restauration en atelier).

En tranche optionnelle 2 :

- Après dépose de la charpente de la partie basse de l'aiguille par le lot 4 - Charpente et avant dépose de la terrasse en plomb sur l'enrayure 4 par le lot 5 - Couvertures, installation d'un bâchage provisoire sur l'enrayure 3, avec évacuations par exutoires sur les couvertures en tuile des versants de noue et avec remontées d'étanchéité fixées par sangles à cliquet autour des pièces de charpente traversant la bâche.
- Après dépose de la terrasse en plomb et des toitures en cuivre et en tuiles de la croisée par le lot 5 - Couvertures et après dépose de la charpente de la lanterne par le lot 4 - Charpente :
 - Pose de bâches verticales étanches sur les quatre faces du tabouret métallique. Compris ossature verticale rapportée sur le tabouret. Raccord étanche aux rives provisoires de toitures posées par le lot 5 - Couvertures.
 - Dépose partielle du platelage sur le tabouret métallique pour dégager une trémie carrée de 9m de côté pour l'évacuation / l'approvisionnement ultérieure des pièces de charpente du tabouret et de la souche. Éléments dimensionnants qui passeront penchés dans la diagonale de la trémie : poutre-entrait diagonale de 18,5m de long et ferme périphérique de forme triangulaire isocèle de base de 13,5m et de hauteur de 9,2m .
 - Pose d'un filet de protection entre les côtés de la trémie et les rives de toiture encore en place.
 - Pose d'un parapluie ouvrant sur le tabouret métallique. Passage utile de même dimension que la trémie du tabouret : carré de 9m de côté. Parapluie formé de deux bâtières bâchées s'écartant l'une de l'autre ou se superposant l'une sous l'autre. Translation des bâtières sur chariot : parapluie monté sur convoyeurs posés sur poutres triangulaires de rive ; reprise du soulèvement par étriers amovibles. Support de chevauchement à l'extrémité du segment de parapluie ouest pour recouvrir le segment est pour parfaite fermeture du parapluie en position close. Débords de rive et d'égoût pour assurer l'étanchéité avec les bâches verticales du tabouret.
 - Les parapluies en position fermée doivent permettre, avec les bâches verticales, la protection étanche de toute la croisée du transept pendant la dépose de sa couverture puis de la charpente de la souche de la flèche. Elle doit assurer cette protection pendant tout le temps de restauration en atelier puis pendant tout le temps de remontage de ces ouvrages.
- Après pose du parapluie ouvrant, dépose du bâchage sur enrayure 3.

En tranche optionnelle 3 :

- Parapluie ouvrant laissé en place, en position fermée, durant toute la durée de la TO2. Vérification périodique.

En fin de tranche optionnelle 4 :

- Après repose de la charpente de la souche par le lot 4 - Charpente, repose du bâchage sur enrayure 3, puis dépose du parapluie ouvrant.
- Après pose de la couverture en plomb sur la terrasse de l'enrayure 4 et après repose des couvertures en tuile par le lot 5 - Couvertures, dépose du bâchage sur enrayure 3.

II. LOT 2 : GRUE / CONDUCTEUR DE GRUE

Dans le square des Bénédictins, installation d'une grue fixe pour toute la durée du chantier (4 ans). Caractéristiques :

- à flèche relevable pour atteindre une hauteur utile de 91m
- charge utile : 4T à 42m de portée, pour montage des échafaudages et du tabouret métallique et pour levage des pièces de charpente (élément dimensionnant : ferme périphérique de 4,34T avec poinçon en bois vert).

En TO1, le montage de la grue se fera dans l'ordre suivant :

- Dépose en conservation des pavés au droit de l'emplacement prévu des micro-pieux.
- Sondages racinaires manuels à l'emplacement prévu des micro-pieux de fondation de la grue pour détermination de leur emplacement exact. Prévoir adaptation du radier et de ses armatures pour pontage entre pieux déportés de fondation en cas de racine charpentière au droit de l'emplacement prévu.
- Mise en œuvre des fondations par micro-pieux : 3 micro-pieux à chacun des 4 angles. Tubage des pieux sur les premiers mètres. Selon prescriptions du BET structure. Compris sondages pressiométriques de reconnaissance des sols à une profondeur égale à la longueur des micropieux augmentée de 5 m.
- Coulage du radier flottant en béton armé : sur coffrage posé au sol retiré après prise du radier pour permettre l'écoulement des eaux pluviales sous le radier et pour ne pas charger le sol. 10x10m xh90cm.
- Livraison et installation du châssis de la grue sur le radier.
- Livraison des éléments de mât de la grue fixe :
 - dépôt des 10 portions de mât (2,45 x 2,45 x l 5m) sur les aires de stockage repérées en plan (au nord et au sud des portails d'accès au chantier) ; pas de superposition des portions
 - dépôt des 40 blocs de béton armé (2m³ chacun) servant de lestage et de contrepoids à la grue sur le pied du radier, sur l'emplacement repéré en plan (au nord du radier)
- Mise en place d'une grue PPM (de type LIEBHERR 1400) sur l'aire repérée en plan : pied de flèche de la grue provisoire à mi-distance entre le futur mât de la grue fixe et la rue du Dr Maret.
- Levage et montage des éléments de mât par grue provisoire PPM sur le châssis de la grue. Rotation de la flèche de la grue provisoire par le nord pour éviter la ramure des arbres.
- Livraison des éléments sommitaux de la grue fixe : pivot de la grue sur la zone de stockage au nord des portails et éléments du bras de la grue fixe dans la rue du Dr Maret. Condamnation de la rue sur 1 journée entière.
- Montage du pivot par grue PPM sur la grue fixe
- En une journée : montage du bras de la grue fixe dans la rue du Dr Maret et installation sur la grue fixe par grue PPM.
- Mise en route de la grue fixe. Essais et réception.
- Évacuation de la grue PPM.

Durant toute la durée des TO1, TO2, TO4 et TO5, pour l'ensemble des travaux de tous les lots :

- Manipulation de la grue par un conducteur de grue, habilité à la manipulation des grues à bras relevable. Aire de survol délimitée en plan.

Durant la TO3 pendant laquelle la grue sera inutilisée :

- Entretien du matériel
- L'entreprise pourra proposer toute variante qui reviendrait moins chère qu'un maintien en place de la grue : démontage / remontage complet ou partiel. Compris tous frais d'immobilisation et de stockage.

En fin de chantier :

- Démontage de la grue, selon le protocole inverse au montage.
- Démolition et évacuation du radier et des fondations de la grue.

III. LOT 3 : MAÇONNERIE / PIERRE DE TAILLE / COLONNES SÈCHES

A/ TRAVAUX PRÉPARATOIRES

En tout début de chantier, pour permettre l'installation de chantier dans le square des Bénédictins :

- Dépose soignée en conservation de 2 portions du mur de clôture du square des Bénédictins, sur la rue du Dr Maret : 2 travées (de 7,75m et de 2,65m) constituées de muret en pierre de taille (hauteur 1,50m environ) et grille en serrurerie (hauteur 2m environ), 6 piles maçonnées chaperonnées (1,20x0,90m au sol et hauteur 4m environ), grille en serrurerie à deux vantaux (2x1,40m et hauteur 4m environ), 1 portillon d'un vantail en serrurerie (1m de large et hauteur 3m environ). Stockage de la grille et des pierres à l'abri des intempéries, dans l'atelier de l'entreprise, pour toute la durée du chantier.
- Provision pour purge et / ou mise sous filet de maçonneries menaçant de chute au droit des installations de chantier : chéneaux, garde-corps, corniches, pinacles, etc. Intervention par cordiste.

B/ TRAVAUX DE SÉCURISATION INCENDIE (TF)

Doublage des voûtes

Doublage par chape étanche de l'extrados des voûtes de la croisée, des bras nord et sud du transept et du chœur :

- PM : Décontamination des extrados des voûtes présumée réalisée au préalable dans le cadre des interventions d'entretien. Prestation en PSE si décontamination insuffisante.
- Extraction partielle des tas de charge lorsque nécessaire pour l'écoulement des eaux vers les exutoires à créer
- Nettoyage, compris purge des mortiers instables
- Resuivi des irrégularités au mortier de chaux
- Mise en œuvre d'une chape en silicate de calcium de 5cm d'épaisseur pour assurer un degré CF de 2h. Sous réserve brevet de cette chape déposé avant le présent chantier. Variante (en attente du brevet) : chape de chaux fibrée de chanvre, épaisseur 7cm. Amenée des produits par moyens de levage de chantier (sapine / ascenseur), circulation sur les platelages des combles.

Sur la voûte de la nef, en attente de couler la chape après confortation structurelle :

- Décontamination des extrados des voûtes (décontamination des extrados des voûtes présumée réalisée au préalable dans le cadre des interventions d'entretien)
- Extraction partielle des tas de charge lorsque nécessaire pour l'écoulement des eaux vers les exutoires à créer

Recoupements CF

Création de cloisons de recoupement CF dans le grand comble de la nef, entre les travées II et III, et autour de la croisée éloignées de celle-ci d'une travée, composées :

- D'une ferme métallique indépendante de la charpente en bois des combles :
 - structure métallique triangulée auto-portante, en profilés alu ; triangulation laissant le passage des pièces longitudinales de la charpente de la nef ; soudures en atelier ; assemblages boulonnés sur place ;
 - appuis par cornières scellées dans les murs gouttereaux ; cornières avec trous oblongs pour laisser indépendant le mouvement des maçonneries de celui des charpentes ;
 - contreventement transversal assuré par accroche sur les pannes de la charpente bois des combles (par chevrons bridés) et sur les entrails retroussés par 6 engueulements charpentés, serrés par clé et clavette, fournis et posés par le lot 4 - charpente ;
- De parements plâtre REI 120 fixés aux deux faces de la ferme métallique, en deux couches croisées ; compris sous-voliges en panneaux bois épaisseur 27mm entre chevrons au droit de la cloison ; compris joint compressible de type tresse de fibres minérales sur tout le pourtour de la cloison en contact avec la maçonnerie (murs gouttereaux et extrados des voûtes) et calfeutrement au plâtre gros.
- Fourniture et pose de porte REI 60 dans les cloisons coupe-feu créées dans les combles : 5U.

Compris protection préalable des existants conservés. Fourniture et mise en œuvre de platelages temporaires de travail portant entre les fermes existantes.

- Encoffrement REI 120 des TD et coffrets des combles.
- Calfeutrement des passages de câbles : local TGBT, tours d'escaliers, combles, etc.

Colonnes sèches

Mise aux normes et extension des colonnes sèches, en respect de la norme NF S61-759-1 :

- CS 1 : existante tour nord. Mise aux normes : rajout d'un volume anti-bélier au niveau de la prise supérieure.
- CS 2 : existante tour sud.
 - Création d'une prise supplémentaire dans la salle 3, sous le carillon, pour attaque de sinistre dans le carillon.
 - Rajout d'un volume anti-bélier au-dessus de la prise supérieure (niveau du carillon).
- CS3 : existante transept sud.
 - Création d'une prise supplémentaire au niveau du chéneau du bas-côté sud.
 - Consolidation de la colonne sèche en partie haute (colonne actuellement branlante).
 - Prolongation de la colonne sèche pour création d'un refoulement dans le comble du transept sud. Passage le long du contrefort sud-ouest du transept, pénétration dans le comble au-dessus de la porte, cheminement le long du mur sud du transept, prise sur le platelage. Compris toutes accroches à la maçonnerie et à la charpente bois du comble par moises chevillées fournies et posées par le lot 4 - charpente.
- CS4 à créer le long du transept nord.
 - Création de la colonne sèche, de diamètre nominal 65mm (DN 65), avec alimentation en pied de façade DN 40 et prises DN 40 : deux à l'extérieur, une au niveau du chéneau du bas-côté nord et une en pied de toiture du transept nord ; une à l'intérieur, dans le comble du transept nord. Passage le long du contrefort nord-ouest du transept, pénétration dans le comble au-dessus de la porte, cheminement le long du mur nord du transept, prise sur le platelage. Compris toutes accroches à la maçonnerie et à la charpente bois du comble par moises chevillées fournies et posées par le lot 4 - charpente.

Assemblages des colonnes sèches par raccord rainuré à collier pour éviter les points chauds sur place.

- Pour les quatre colonnes sèches, installation de pancartes indestructibles à chaque alimentation et prises, ainsi que tous suppléments pour mise aux normes.

Les échafaudages empièteront pendant le chantier sur l'accès à la colonne sèche CS4. Pour y pallier :

- Rallongement provisoire en pied de la colonne sèche CS4 pour déport de l'alimentation hors de l'emprise des échafaudages de pied.
- Prolongement de la colonne sèche en tête jusqu'à la plateforme supérieure, au niveau du plateau réservé aux sapeurs-pompier.

Gargouilles sèches dans les grands combles

Création d'exutoires aux quatre angles de la croisée, dans le comble de la nef (dans chaque travée), dans les combles du transept (quatre par bras) et dans le comble du chœur (une par travée) - total 34 exutoires :

- Extraction partielle des tas de charge lorsque nécessaire pour l'écoulement des eaux vers les exutoires.
- Carottage des exutoires depuis l'extérieur, diamètre 10mm. Opération à réaliser par cordistes avec contrôle et intervention par l'extérieur du bâtiment pour récupérer les gravats en fin de carottage et rejointoyer les parements en périphérie de l'exutoire. Compris ragréages sur les pitons d'ancrage de la carotteuse sectionnés en fin d'opération.
- Pose de tuyaux de descente en cuivre en traversée des maçonneries, compris calfeutrement/rejointoiement.
- Pose de grillage anti volatile en extrémité extérieure.
- Mise en œuvre de cages grillagées en maille cuivre sur cadre en intérieur pour protéger les évacuations de bouchements par des débris et le passage de rongeurs ou de volatiles.

C/ TRAVAUX D'ACCOMPAGNEMENT À LA RESTAURATION DE LA FLÈCHE

En début de chantier, pour le déplacement des feuillards du paratonnerre de la flèche par le lot 5 - Couvertures :

- Carottage diamètre 5cm à travers la corniche. 3U : 1 au pied de versant nord de la nef, 1 au sud, 1 sur chevet

Après la dépose de la charpente de l'aiguille par le lot 4 - Charpente et avant dépose des couvertures de la lanterne par le lot 5 - Couvertures :

- Pose d'une étanchéité sur l'extrados de la voûte de la croisée : feutre d'interposition, bande porte-solin sur les murs-bahuts, membrane EPDM avec bande périmétrique et relevés de 20cm sur les portes-solin, autour des jambes de force et des décharges de la flèche, manchonnage des tubes PVC d'exutoires. Lestage de la bêche par

plaques de répartition béton.

Après la dépose complète de la charpente par le lot 4 - Charpente :

- Nettoyage des exutoires récemment créés à chaque angles de la croisée.
- En avaloir, mise en œuvre de caisson en grille amovible métallique pare-gravois 5x5cm sur cadre plat soudé en découpe.
- Provision pour reprises de maçonnerie au droit des corbeaux.
- Resurfaçage de l'arase des murs bahuts, au niveau des appuis des pièces de charpente (entrants diagonaux et goussets d'angle), pour pose de plomb d'interposition par le lot 5 - Couvertures. Aux quatre angles, rainurage de gorges d'évacuation et de ventilation, de part et d'autre de l'appui des poutre-entrants diagonales.

Après repose de la couverture en plomb de la lanterne par le lot 5 - Couvertures :

- Dépose de l'étanchéité en extradors de la voûte de la croisée.
- Resuivi et complément de la chape récemment coulée (opération précédente de mise en sécurité des combles) en chaux fibrée de chanvre (5cm d'épaisseur) sur l'extrados de la voûte de la croisée : nettoyage général, purge des parties instables de la chape, compléments en recherche et dans les angles de la croisée, autour des corbeaux.

En fin de chantier :

- Repose du muret de clôture en pierre du square des Bénédictins, à l'identique de l'existant. Remplacement des pierres fracturées à l'identique : nature de la pierre, dimensions, aspect de taille.
- Nettoyage par micro-gommage et rejointoiement de l'ensemble du mur bahut, des piles, du portail et des portillons, pour harmonisation.
- Repose de la grille de clôture sur muret en pierre.
- Décapage et remise en peinture de l'ensemble des grilles. Teinte au choix de l'architecte en chef.

IV. LOT 4 : CHARPENTE

A/ FOURNITURE DES BOIS NEUFS

Les pièces de bois de la charpente de la flèche se décomposent en deux catégories :

Les pièces dites "exceptionnelles" :

De longueur supérieure ou égale à 8m et/ou de section supérieure ou égale à 30x30cm. Fournies par la maîtrise d'ouvrage, sur un marché de fourniture séparé du chantier. Le présent lot charpente réceptionnera pièce par pièce les bois fournis au démarrage de la restauration de la charpente. Il procédera à la réception de ces pièces par tous les contrôles visuels nécessaires et en donnera acte au maître d'ouvrage et au maître d'œuvre. Toutes les pièces doivent être de qualité D30 sauf les pièces suivantes qui pourront être de qualité D24 :

- 14 et 15 - 1^{ers} et 2^{èmes} poteaux de contrefort des fermes diagonales - 30x30cm x 2,5ml et 26x26cm x 2ml
- 29 et 30 - Poteaux arêtier doubles faîtages pan de bois - 31x31cm x 10ml et 13,5ml
- 42 - Poinçon ferme périphérique - 29x29 cm x 10ml

Il devra le transport depuis leur lieu de stockage (scierie des Géants à Craon en Mayenne) et son propre atelier.

Les pièces dites "courantes" :

Toutes les autres pièces qui ne sont pas exceptionnelles. Fournies classiquement par le présent lot.

Toutes les pièces courantes seront en chêne, ressuyées (taux d'humidité inférieur à 30%), de classe D30 (selon la norme NF EN 338), sauf les pièces suivantes qui pourront être de qualité D24 (critère indiqué sur le tableau des débits joint au présent dossier) :

- 6 - Brides moisées
- 14 et 15 - 1^{ers} et 2^{èmes} poteaux de contrefort (greffes)
- 29 et 30 - Poteaux arêtiers doubles faîtage pan de bois (verts)
- 35 - Jambe de force (greffe)
- 41 - Faîtages étresillons
- 42 - Poinçon ferme périphérique
- 47, 73 et 74 - Branches de croix de St-André
- 51 et 52 - Goussets et demi-goussets d'angle de l'enrayure 1
- 54 - Sablières-ceintures de l'enrayure 2
- 55 - Goussets de noue de l'enrayure 2
- 58 - Sablières-ceintures de l'enrayure 3
- 60 - Sablières-ceintures de l'enrayure 4
- 62 - Gousset de l'enrayure 5
- 111 à 116 - Pannes

B/ ACCÈS DE CHANTIER

- Mise en œuvre de tous les moyens nécessaires au chevauchement des plots béton du tabouret métallique (échelles de toiture, garde-corps) pour entretien des fonds de chéneaux en pied de toiture.

C/ SÉCURISATION DES COMBLES

- Compléments de passerelles :
 - Dans les combles de la nef et du chœur : élargissement des passerelles existantes de part et d'autre des nouvelles cloisons CF pour créer une aire de retournement. Largeur 3m.
 - Dans les combles de chacun des bras du transept : réfection des passerelles pour élargissement pour création de plateformes de manœuvre pour les pompiers.
 - Dans le comble de la croisée : passerelles périphériques de circulation : emmarchements d'accès, chevauchement des entrails d'axe, support sur les poutres-entrails diagonales et sur les murs bahuts. Largeur 1m.
 - Dans le comble de la chapelle de la Vierge : complément de marches en chevauchement du mur bahut en béton.

- Complément des garde-corps des passerelles d'accès dans les combles :
 - Grands combles : réfection des garde-corps pour potelets plus solides, ajout d'une lisse intermédiaire et d'une plinthe.
 - Combles des bas-côtés : ajout d'une lisse intermédiaire et d'une plinthe
- Fourniture et pose d'accroches des nouvelles cloisons CF aux entrails retroussés : 6 accroche par cloison (5 cloisons) par engueulement charpenté, serré par clé et clavette. Toutes coordinations avec le lot 3.
- Fourniture et pose de moises chevillées support des accroches des extensions des colonnes sèches dans les bras nord et sud du transept : pièces verticales moisant l'entrait et le sous-arbalétrier de la première ferme du bras. Toutes coordinations avec le lot 3.

Accroches, platelages et garde-corps en chêne, en réutilisation des chutes issues du marché de fourniture de bois exceptionnels de la flèche.

D/ DÉPLOMBAGE

Suivi du taux de contamination

- Au démarrage du chantier, des mesures initiales seront prises par le présent lot en 10 points stratégiques : base-vie, sur les 3 plateformes d'échafaudages et à mi-hauteur des échafaudages de l'aiguille, au pied de la flèche, sur l'extrados de la croisée, à 3 niveaux d'enrayure.
- Pendant le démontage de la flèche, les mesures seront relevées aux mêmes points deux fois par semaine pour suivre l'évolution du taux de plomb pendant le chantier et réajuster les mesures de protection et de déplombage en fonction du niveau d'exposition.
- Pendant le reste du chantier, les mesures seront relevées mensuellement.

Mesures de protection des travailleurs

Les équipements de protection individuels des travailleurs sont à la charge de l'employeur et sont présumés être compris dans les prix des prestations de l'entreprise. Ne sont décrites ici que les installations de chantier nécessaires à un travail en milieu plombé.

Nota : deux cabines de décontamination complète, avec douche et vestiaire, sera mise à disposition par le lot 1 sur la plateforme supérieure (niveau enrayure 4) pour toute la durée de la tranche optionnelle 1 durant laquelle se fera la décontamination de la charpente.

Pour la manipulation des pièces de charpente à pied d'œuvre sera à la charge du présent lot :

- Installation d'une cabine de décontamination au plomb (pédiluves et lavabos) à l'entrée de l'aire de travail en pied de grue.
- Pendant la manipulation des pièces sur l'aire de travail, balisage de la zone, bâchage au sol.

Décontamination

Après montage des échafaudages, et avant dépose des couvertures, déplombage complet de la charpente (souche en TF puis aiguille en TO2) :

- Dépose ponctuelle de couverture ardoises et sa volige support pour dégager le passage à un homme dans les parties hautes de l'aiguille inaccessibles depuis l'intérieur. Ceci en autant de point que nécessaire pour accéder à la totalité de la charpente entre enrayures, soit depuis les accès en pied de charpente (trappe de l'enrayure 5 ou trappe de la galerie supérieure), soit par les ouvertures pratiquées dans la volige.
- Nettoyage des pièces de charpente par aspiration à filtre à très haute efficacité (THE) pour retirer les particules toxiques (déjections, plomb). Aspirateur portatif pour travail encordé à travers la totalité de la charpente de l'aiguille (le déplombage de la souche aura été pratiquée lors de l'opération préalable de mise en sécurité). Toutes sujétions pour précautions plomb, comprenant :
 - EPI adapté au niveau d'exposition au plomb
 - Confinement polyane préalable, avec sas d'accès, des échafaudages reliant la cabine de décontamination et l'accès à la charpente
 - Décontamination des échafaudages de la zone, après déplombage de la charpente et avant déconfinement

Après dépose des couvertures (hors voliges) :

- Au fur et à mesure de la dépose des voliges et du démontage de la charpente par le présent lot, aspiration THE des assemblages et des parties découvertes pour retirer les particules libérées par le démontage.

En fin de dépose de la charpente :

- Décontamination de toutes les surfaces des extrados des voûtes de la croisée souillées par la poussière au plomb tombées lors de la dépose de la charpente. PI : la décontamination des déjections et du plomb sur la croisée aura été réalisée au préalable.

Le déplombage final des pièces de charpente se fera en atelier de l'entreprise, cf. partie "Restauration en atelier".

E/ DÉMONTAGE COMPLET DE LA CHARPENTE

Après dépose des ornements métalliques et des couvertures :

- Contreotypage de la teinte de la peinture rouge au minium de plomb pour restitution sur bois et sur métal. Échantillons à soumettre à l'architecte en chef.
- Relevé et marquage précis de l'ensemble des pièces de charpente, en suivant la nomenclature établie par la maîtrise d'œuvre, par éléments constitutifs de la charpente : diagonales, pans de bois, fermes périphériques...
- Dépose de la pointe en fer frettée sur la partie sommitale de l'aiguille et soutenant la croix : dévissage, levage et évacuation à la grue.
- Dépose en démolition des voliges.
- Dépose en conservation des fourrures support des couvertures en cuivre.
- Démontage pièce par pièce de la charpente en conservation de l'intégrité de toutes les pièces (sauf celles repérées préalablement par le maître d'œuvre à changer) ; dégrippage et dévissage des écrous de boulons, en vue de leur réutilisation ; faute d'y parvenir, découpe des boulons à la scie sabre (NB : l'ensemble des boulons non conservés sera à prévoir à neuf au présent lot, la qualité d'acier étant strictement fixée d'après les essais de caractérisation fournis par la maîtrise d'œuvre - à préciser au PRO) ; évacuation par grutage. Compris tous étalements et contreventements provisoires de charpente nécessaires au maintien de la charpente avant la dépose de chaque pièce. Ordre de démontage :
 - Dépose de la charpente de l'aiguille et de la lanterne, de haut en bas, jusqu'à l'enrayure 5 exclus.
 - Après dépose de la terrasse en plomb et des couvertures cuivre par le lot 5 - Couvertures, dépose de la lanterne, dans l'ordre indicatif suivant qui fera l'objet d'une étude d'EXE au niveau pièce à pièce par l'entreprise :
 - Enrayures 5 et 4
 - Guettes, écharpes, jambes de force, faux-arbalétriers
 - Poinçon et poteaux au-dessus du premier niveau d'entures
 - Après pose du parapluie ouvrant par le lot 1 et après dépose des couvertures en tuiles par le lot 5 - Couvertures, dépose de la souche, dans l'ordre indicatif suivant qui fera l'objet d'une étude d'EXE au niveau pièce à pièce par l'entreprise :
 - Pannes
 - Noues et leurs contreventements (contrefiches et coyers)
 - Demi-faîtages à pans de bois (étrépillons de faîtage, écharpes, goussets de noue, ceintures enr. 2 et 3, coyers enr. 2 et 3 et poutres enr. 1, poteaux de contreforts)
 - Poteaux arêtières des faîtages avec les contreventements des herses du fût (ceintures et écharpes)
 - Désassemblage des fermes périphériques avec les fermes diagonales : en tête d'entrants périphériques et diagonaux.
 - Fermes diagonales : demi-fermes NE et SO puis ferme NO-SE (arbalétriers, entrants enr 2 et 3, goussets, poteaux, contreventements, poinçon)
 - Fermes périphériques pouvant être enlevées d'un seul tenant (env. h9m x 13m, env. 4T). Compris tous étalements et contreventements de charpente nécessaires à la dépose (inversion des efforts au levage).
 - Dépose sans conservation de l'entrait NO-SE 3^{ème} niveau et des écharpes rapportées en 1913.
 - Dépose de l'ensemble du tabouret, sans réemploi des pièces en pleine longueur, mais en conservation de toutes les parties saines pour reclassement et réemploi dans le cadre de la restauration (remplacements, entures, greffes). Certains assemblages seront déposés en conservation avec bois tronqués, nettoyés et posés en dépôt dans le comble (mémoire matérielle de la charpente dans son état d'origine).
- Le démontage de la charpente située sous le niveau de l'enrayure 4 se fera sous parapluie ouvrant posé sur le tabouret. Pour le levage et l'évacuation des pièces sous parapluie, ouverture du parapluie assurée par le présent lot, par translation de chaque bâtière, autant que de besoin, et après vérification des prévisions

météorologiques : parapluie à ne pas ouvrir par temps pluvieux ou menaçant. Parapluie à refermer à chaque fin de demi-journée de travail.

- Dépôt des pièces de charpente sur l'aire de travail, aménagée dans le square des Bénédictins, pour chargement par lot à la grue sur camion stationné dans le square. Toutes sujétions de protection au plomb.
- Transport en atelier pour restauration.
- Coordination avec le lot 1 pour le démontage des échafaudages à l'avancement de la dépose de la charpente : dépose d'un niveau d'échafaudage après démontage de la charpente à l'intérieur de ce niveau.
- Après dépose complète de la charpente de la flèche, dépose sans réemploi des poutres-manivelles d'étalement des entrails diagonaux :
 - Mise en place d'un palan au-dessus des poutres manivelles, supportées sur les murs bahuts.
 - Suivant besoin, démontage des poutres manivelles par dévissage (séparation des différents morceaux de la poutre), en suspendant chaque morceau au palan. Poids d'une poutre composée de 3 éléments : 1,9t.
 - Déplacement des morceaux avec le palan puis évacuation par grutage.

F/ RESTAURATION EN ATELIER

- Maîtrise des conditions de dépose et de stockage pour prévenir la déformation des pièces déposées.
- Décontamination de toutes les pièces souillées par les déjections et déplombage complémentaire :
 - Test par fluorescence X pour déterminer la profondeur de la contamination au plomb des bois. Test initial avant déplombage et test après déplombage.
 - Déplombage des faces peintes au minium de plomb, par méthode au choix de l'entreprise (décapage, aspiration, égrenage, ponçage), méthode qui devra respecter au maximum le bois ancien et offrir un support propre pour la mise en peinture à l'huile de lin. Immersion par bain interdite. Méthode à faire valider par l'architecte en chef sur présentation d'échantillons.
 - Aspiration des autres faces et de tous les ouvrages déposés.
 - Compris toutes dispositions nécessaires pour protection des travailleurs contre le plomb. Le protocole de protection devra être décrit par l'entreprise dès la remise de son offre.
- Établissement des épures d'origine (avant déformation) de chacun des éléments constitutifs de la charpente de la flèche : plans diagonaux, plans des pan de bois, plans des fermes périphériques, plan des herse du fût, de noues, des enrayures, des facettes de l'aiguille...
- Mise sur ligne des pièces, épure par épure. Adaptation des épures d'origine pour réutilisation des bois existants en bon état mais légèrement déformés.
- Changement des pièces fortement dégradées. Constat d'état sanitaire par le charpentier et plan des interventions à soumettre au maître d'œuvre. Plan d'EXE et notes de calcul à soumettre au VISA avant exécution. Les pièces repérées ci-dessous au stade étude constituent une indication (repérées en rouge sur les plans Projet ; répartition des pièces exceptionnelles / courantes / greffes sur les plans Etat des Lieux) : voir tableau des débits joint à ce rapport.
 - Tabouret refait totalement à neuf : les 2 brins des 2 poutres-entrails diagonales, les 4 poteaux corniers, les 4 jambes de force, les 2 poutres-sommiers, les 4 brides moisées, les 4 coyers d'axe moisés, les 4 goussets centraux et les 4x2 demi-goussets d'angle.
 - Greffes en pied du poinçon et des poteaux NO-SE retaillés lors de la restauration de 1913. Greffes et rossignols sur les écharpes diagonales NO-SE retaillées lors de cette même restauration.
 - Remplacement des pièces trop déformées pour être réutilisées dans la charpente remontée sur épures :
 - Sur les fermes diagonales : les 4 décharges moisées et les 4 arbalétriers
 - Sur les fermes d'axe : coyers moisés des enrayures 1, 2 et 3, les écharpes moisées entre enrayures 2 et 3, les étresillons de faîtage
 - Les noues
 - Changement ou réparation des pièces dégradées par les infiltrations de la galerie en plomb :
 - Greffe du poinçon de part et d'autre de la galerie (enrayure 4), avec reproduction des moulures
 - Greffe des poteaux intérieurs NO et SO de l'enture jusqu'à l'enrayure 4
 - Double-poteau sud jusqu'à l'enrayure 4 pour le poteau extérieur et jusqu'à l'enrayure 6 pour le poteau intérieur
 - Greffe de la jambe de force sud jusqu'à l'enrayure 4

- Enrayure 3 : demi-entrait moisé SO, 1 ceinture
- Enrayure 4 : 3 ceintures
- 2 écharpes de croix de Saint-André du fût
- Changement des pièces fracturées, vissées ou fissurées :
 - Poteau de fût interne sud-est entre les enrayures 1 et 2
 - Double-poteau sud-ouest entre les enrayures 2 et 3
 - Poinçon de la ferme périphérique nord et 1^{er} entrait retroussé moisée de cette même ferme
 - 1^{er} entrait retroussé moisée de la ferme périphérique ouest
 - Enrayure 2 : 2 goussets, 4 ceintures, 2 goussets de noue
 - Enrayure 3 : 1 ceinture
 - 5 écharpes de croix de Saint-André du fût
 - 1 faux-arbalétrier diagonal
 - 1 gousset de l'enrayure 5
 - 1 écharpe de croix de Saint-André de la ferme périphérique sud.
- Provision pour changement de pièces non accessibles en phase études : 10%, soit 6,3m³.
- Augmentation des sections des pièces suivantes : décharges moisées, arbalétriers moisés.
- Au croisement des entrails diagonaux qui sont à lier : brides métalliques neuves en copie des brides d'origine.
- Mise en œuvre de prisonniers pour lier les brins des entrails diagonaux, emplacements selon plans.
- Mise en œuvre de prisonniers pour lier les brins des double-poteaux du fût, à espacement régulier, selon plans.
- Pose d'une platine métallique de support des pieds de la flèche, sur les corbeaux corniers : de 54cm de large pour porter les pieds des pièces assemblées, d'une épaisseur suffisante pour être indéformable : 2 à 3 cm pour former pente d'évacuation de l'eau. Rainurage par trois fois de la plaque, 5mm de large, pour évacuation de l'eau. Sur feuille de plomb d'interposition entre la pierre et la platine métallique, posée par le lot 5 - Couvertures.
- Ajout d'une âme entre les moises des arbalétriers, en pied. Assemblage des âmes en pied par embrèvement et ergot. Assemblage des âmes en tête, avec l'âme existante, par enture à encoches.
- Ajout de pièces de reprise partielles des charges et des poussées en pied des arbalétriers, selon les plans de détails de LeBE : à chacun des deux angles ouest de la croisée, un contre-poteau de section 31x31cm, assemblé en tête au brin inférieur des entrails diagonaux, assemblé en pied au poteau cornier par double embrèvement couvert.
- Amélioration des assemblages pour optimiser la transmission des efforts, selon détails de principe de LeBE :
 - assemblages entre les arbalétriers et les doubles poteaux diagonaux pour rendre prioritaire la transmission des efforts verticaux au niveau de l'enrayure 3 ;
 - assemblages couverts entre les arbalétriers et les entrails diagonaux de l'enrayure 3 pour former portique ;
 - assemblages entre les arbalétriers et les poutres entrails diagonales de l'enrayure 1, avec ajout de fourrures entre les moises des arbalétriers, en retrait par rapport aux arbalétriers, avec adents latéraux de fixation dans les moises ;
 - assemblages entre les décharges et les doubles poteaux diagonaux pour rendre prioritaire la transmission des efforts verticaux au niveau de l'enrayure 2 ;
 - assemblages couverts entre les décharges et entrails diagonaux de l'enrayure 2 ;
 - assemblages couverts entre les décharges et les poteaux corniers ;
 - assemblages entre les écharpes moisées, les coyers moisés de l'enrayure 3 et les double-poteaux, dans les faîtages pan de bois ;
 - assemblages entre les écharpes moisées et les coyers moisés de l'enrayure 2, dans les faîtages pan de bois ;
 - assemblages entre noues et poutres-entrails diagonales par léger embrèvement.
- Pour tous les autres assemblages :
 - restitution à l'identique selon existant, lorsque toutes les pièces de l'assemblage sont changées
 - restitution à l'identique selon l'existant, en adaptation aux pièces conservées, lorsqu'au moins une pièce de l'assemblage est conservée
 - révision, lorsque toutes les pièces de l'assemblage sont conservées
 - pour les assemblages non accessibles en phase études, une provision de 10% a été appliquée en restitution ; le reste est en révision.
- Réparation des pièces dégradées par entailles et/ou greffes.

- Montage à blanc sur épure de l'ensemble des pièces pour retailles / compléments.
- Traitement de surface et traitement par pulvérisation contre les insectes xylophages par produit incolore de l'ensemble des pièces anciennes.
- En atelier, remise en peinture de toutes les pièces de bois, sur les trois faces supérieures de chaque pièce :
 - 1 couche d'apprêt naturel, respirant, fortement accrochant à la surface de bois décapée, nourrissant le bois en profondeur (de type "primaire caramel" de la Malouinière, ou équivalent) ; teinte au choix de l'architecte en chef, sur présentation d'échantillons, en contretypage de la teinte naturelle du bois ; séchage 2 à 3 jours, 48h minimum
 - 2 couches de peinture à l'huile de lin aux pigments naturels rouges d'après la teinte ancienne contretypée en début de chantier, validée par l'architecte en chef sur présentation d'échantillons ; finition mate. Protection des ouvrages métalliques pour les rechapés.
 - En poste à part, mise en peinture de la quatrième face de chaque pièce de bois par 2 couches de primaire d'accroche naturel identique à l'apprêt précédemment décrit, de teinte identique au bois naturel, pour éventuel encapsulage des particules plomb restantes.
- Mise en peinture teinte rouge du lambris sous galerie supérieure et du poinçon sur la hauteur de l'étage ajouré, avec dessins en festons. Mêmes prescriptions que ci-dessus, mais finition pour extérieur. Compris toutes retouches en œuvre.
- Nettoyage par abrasion des boulons conservés, redressement et traitement anti-rouille. Provision de conservation : 20%.
- Remplacement à neuf de tous les boulons, écrous et brides de toutes les pièces de bois neuves et en recherche sur pièces anciennes : provision 80%. Sujétion pour emploi d'acier doux, à teneur très basse en carbone pour conserver la souplesse des aciers originels (caractérisés par analyses en laboratoire).
- Restauration de toutes les autres pièces métalliques.
- Remise en peinture sur tous les ouvrages métalliques, neufs ou restaurés : deux couches d'anti-rouille, couche d'impression et deux couches de peinture ton brun d'après contretypage de l'existant, à réaliser en atelier. Après montage, retouches en œuvre pour parfaire tous les assemblages.
- Restauration des fourrures support des couvertures en cuivre, en coordination avec le lot 5 - Couvertures : révision des assemblages, réparations des pièces dégradées par greffe, compris mouluration en continuité avec l'existant. Délardement de 6mm de profondeur minimum au droit des soudures rivetées (rivets dépassant de 6mm) pour laisser libre les mouvements de dilatation des cuivres sur leur supports bois.

G/ REPOSE DE LA CHARPENTE

Remontage de la charpente :

- Amenée des pièces sur l'aire de travail située dans le square des Bénédictins, au nord de la cathédrale.
- Pose à la grue pièce à pièce, hors éléments suivants préalablement assemblés à pied d'œuvre, sur l'aire de travail dans le square, avec tous contreventements nécessaires à leur levage (inversion des efforts) :
 - les 4 pieds de tabouret : poteau cornier et son contre-poteau (côté ouest), jambe de force, décharge moisée, bride moisée ;
 - fermes périphériques.
- Assemblage en place en raccord avec les charpentes déjà en place dans les 4 combles des bras de la cathédrale.
- Ordre de remontage, donné à titre indicatif sur les planches de remontage, mais fera l'objet d'une étude d'EXE au niveau pièce à pièce par l'entreprise :
 - 1/ Tabouret entièrement refait à neuf, dans l'ordre :
 - Pieds de tabouret pré-assemblés (poteaux corniers, contre-poteaux, jambes de force, décharges et brides) posés sur platines métalliques installées sur les corbeaux
 - Poutres-sommiers (la NE-SO puis les demi-sommiers NO et SE)
 - Poutres-entrants posées avec écartement des brides et décharges déjà installées dans le pré-assemblage des pieds : 1^{er} niveau : NE-SO puis les demi-poutres NO et SE ; 2^{ème} niveau : NO-SE puis les demi-poutres NE et SO
 - Goussets d'angle et goussets centraux
 - Moises intérieures des entrants périphériques boulonnées à leurs extrémités aux poutres-entrants diagonales
 - 2/ Souche, dans l'ordre :
 - Fermes périphériques pré-assemblées à pied d'œuvre : deuxième moise des entrants, poinçon, arbalétriers,

poteaux, sous-arbalétriers, entrails retroussés et contreventements. Assemblage des fermes périphériques sur les fermes diagonales : deuxième moise de l'entrait périphérique, puis verrouillage des assemblages de la ferme périphérique. Compris tous étaielements pour maintien en place des fermes périphériques, en attente du montage des fermes diagonales ; tous remaniements des étaielements pour le montage des fermes diagonales.

- Fermes diagonales : d'abord la ferme NO-SE puis les demi-fermes NE et SO. Dans l'ordre : premières moises des entrails enr. 2 et 3, poinçon et tous les poteaux avec leurs contreventements secondaires (brins de croix de St-André, faux-entrails), deuxièmes moises des entrails enr. 2 et 3 et leurs goussets, arbalétriers moisés.
- Herses de fût : ceintures enrayures 2 et 3, écharpes avec les poteaux arêtières des faîtages pan de bois.
- Faîtages pan de bois : d'abord la N-S puis la O-E. Dans l'ordre : premières moises des poutres enr. 1 et des coyers enr. 2 et 3, poteaux de contrefort, deuxièmes moises des poutres enr. 1 et des coyers enr. 2 et 3 avec ceintures enr. 2 et 3 et goussets de noue, écharpes, étrépillons de faîtage.
- Noues avec leurs contrefiches et leurs coyers.

3/ Lanterne, après dépose du parapluie ouvrant et bâchage de l'enrayure 3, dans l'ordre, d'abord dans les fermes diagonales puis dans les fermes de faîtages :

- Prolongement du poinçon et des poteaux par enture.
- Contreventements de la lanterne : faux-arbalétriers, guettes, jambes de force et écharpes.
- Assemblage des enrayures 4 et 5 : entrails, goussets, coyers, ceintures (sablières et pannes). Après montage de l'enrayure 4, le charpentier devra laisser place au couvreur (lot 5) pour la réalisation de la couverture en plomb de la lanterne.

4/ Aiguille, dans l'ordre, d'abord dans les fermes diagonales puis dans les fermes de faîtages :

- Prolongement du poinçon et des poteaux diagonaux par entures, avec les contrefiches et les jambes de force pour les maintenir
 - Assemblage des entrails, avec leurs goussets, des enrayures 6 à 12
 - Prolongement des poteaux de faîtages par enture, avec jambes de force et contrefiches
 - Assemblage des coyers, avec leurs sablières-ceintures, des enrayures 6 à 12
 - Contreventements en facettes de l'aiguille
 - Assemblages des enrayures 13 à 18 ? à l'identique de l'existant redressé
 - Fixation des armatures métalliques en tête d'aiguille, support de la couronne ducale, fixation de la croix.
- Repose des fourrures support des couvertures en cuivre, en coordination avec le lot 5 - Couvertures.
 - Coordination avec le lot 1 pour le remontage des échafaudages à l'avancement de la repose de la charpente.

H/ PLATELAGES ET ÉCHELLES

Dépose et restauration en atelier

- Dépose en conservation des platelages de la croisée et des échelles en bois de l'aiguille (4 échelles : entre chacune des enrayures de l'aiguille : 5 à 9).
- Stockage en atelier de l'entreprise pour toute la durée du chantier.
- Remplacement des bois altérés, révision des assemblages.
- Traitement xylophage des bois.

Repose

Après repose de la charpente de la souche et de la lanterne et après repose des couvertures de la souche par le lot 5 - Couvertures :

- Remontage des platelages de la croisée et compléments suivant plan architecte. Adaptation des pentes pour passage au dessus des poutres-entrails d'axe ; réaxement des passerelles pour passer au plus près des arbalétriers, en laissant le passage d'un homme (passerelles actuellement désaxées à cause des renforts d'urgence posés sous les arbalétriers).

Après repose de la charpente de l'aiguille :

- Remontage des échelles selon les dispositions actuelles, avec visserie neuve en acier inox patiné ou acier à peindre en ton brun.
- Fourniture et pose de 2 échelles en bois neuves pour accéder à l'extrados de la voûte depuis les platelages de la croisée.

V. LOT 5 : COUVERTURES CUIVRE, PLOMB, ARDOISES, TUILES

A/ ACCÈS PROVISOIRES DE CHANTIER

- Dépose ponctuelle de tuiles pour création d'un chevêtre d'accès à la zone chantier à l'intérieur des combles dans le versant ouest de la toiture du transept nord, depuis la plateforme intermédiaire des échafaudages. Tuiles et voliges stockées chez l'entreprise pour toute la durée du chantier.
- Création d'un sas étanche provisoire en couverture zinc sur ossature bois, avec porte verrouillable (pour sécuriser le comble la nuit). Compris tous raccords de la couverture en zinc avec la toiture en tuile : noquets, abergement, évacuation des EP.
- Bois (solives, voliges, tasseaux) en chêne, sur chutes des bois exceptionnels. À récupérer auprès du charpentier qui les aura réceptionner auprès du scieur. Compris tous traitements nécessaires à leur usage.
- Réfection de la couverture et de la charpente en fin d'opération.

B/ TRAVAUX DE SÉCURISATION INCENDIE

- Tôle d'écoulement des eaux de toiture au droit des TD sous toiture.

Pare-projectiles

Pose de mailles métalliques pare-projectiles sur les tours pour éviter toute pénétration d'éléments volatiles incandescents transportés par le vent :

- Installation d'une maille métallique fine au nu intérieur des baies des salles hautes des tours orientées vers la toiture de la nef
- En pied de toiture des tours, installation d'une maille de récupération sur structure treillis soudé formant pare-gravois afin d'éviter les points de chaleur provoqués par les retombées d'éléments volatiles incandescents.

Amélioration de l'accès des secours à l'intérieur de la cathédrale

- Installation d'une boîte à clé en façade sud, contre la face est du contrefort de la 5^{ème} travée, à 4m au-dessus du sol, à disposition du SDIS : ouverture par code, rangement de 2 pass généraux et des plans d'intervention
- Installation de mains courantes dans les tourelles d'escalier pour faciliter l'ascension : main courante en serrurerie (section rond plein) sur écuysers disposés tous les mètres linéaires, en face externe de l'escalier, abouts affinés se retournant en spirale

C/ PARATONNERRE

En début de chantier :

- Vérification des accroches et de la continuité des descentes foudres existantes ; réparations éventuelles. Vérification à doubler en fin de chantier.
- Déport des feuillards en pied de toiture pour les éloigner des colonnes sèches du transept, selon plans :
 - Descentes du paratonnerre de la flèche à faire circuler en pied de versants nord et sud de la nef et pas sur les pieds de versants des bras de transept
 - Raccord aux descentes des tours ouest sur les versants de la nef, au niveau du premier contrefort à l'ouest de la croisée
 - Traversée de l'étanchéité en plomb en fond de chéneau : pénétration du feuillard dans un manchon traversant l'étanchéité, collerette soudée au manchon pour abriter les relevés d'étanchéité, relevés d'étanchéité en plomb autour du manchon, passage à travers l'épaisseur de la corniche dans carottage réalisé par le lot 3 - Maçonnerie. Le manchon devra pouvoir être soudé et ne pas provoquer de coulures en façade. Le cuivre étamé sur toutes ses faces, intérieures et extérieures, pourra être envisagé.
 - Circulation des feuillards le long de la façade de la nef puis de la façade du bas-côté, accroches à fixer dans les joints de pierre.
 - Circulation sur la toiture du bas-côté, accroches par pattes fixées entre les tuiles.
 - Circulation horizontale au sol, en pied de façade, pour rejoindre la prise de terre existante, sous fourreau de protection.
- Même principe de traversée de l'étanchéité à mettre en œuvre dans le chéneau du chevet pour le passage du

feuillard du chœur vers sa prise de terre dans la cour de la sacristie.

- Déport des feuillards à réaliser par cordistes côté sud et côté chevet ; côté nord, à réaliser sur échafaudage de toiture sur bas-côté nord installé en TF, avec mise en attente de la section du feuillard sur toiture du bas-côté pour fixation après dépose de l'échafaudage.

Paratonnerre de chantier

Pour la durée du chantier :

- Mise en œuvre de l'installation préconisée par l'étude foudre réalisée par le lot 8.
- Déport des feuillards sur les toitures adjacentes (au niveau de la souche) et sur l'échafaudage (au niveau de la lanterne et de l'aiguille).
- Dépose de la pointe pour restauration. Pointe provisoire pour la durée du chantier, si nécessaire.

D/ ÉTANCHÉITÉ PROVISOIRE DE CHANTIER

Continuité de l'étanchéité en pied de tabouret métallique

En début de chantier, en vue du coulage de sommiers béton supports du tabouret métallique, par temps clément pour permettre le coulage des plots béton :

- Dépose partielle en conservation, au droit des futurs sommiers béton :
 - des fonds de chéneaux en plomb
 - des gouttières pendantes en cuivre en pied de versant
 - des tuiles en pied de versant (sur 1m de haut environ), de leur voliges, et des coyaux (pour les bras du transept)
- Conservation des tuiles, des gouttières, des tables de plomb et pattes déposées en atelier de l'entreprise durant toute la durée du chantier. Provision pour remplacement de parties défectueuses.
- Bâchage provisoire souple le temps du coulage des plots béton.

Après coffrage des plots et avant coulage :

- Pose de tuyaux PVC en fond de coffrage pour l'écoulement des eaux pluviales : écoulement horizontal entre deux portions de chéneaux plomb ; écoulement vertical entre fond de chéneaux et descente EP.
- Raccords d'étanchéité entre les tuyaux PVC en fond de coffrage et les chéneaux plomb laissés en place.
- Raccords d'étanchéité entre les tuyaux PVC en fond de coffrage et les descentes EP en cuivre.

Après prise des plots béton, dépose de la bâche et mise en œuvre d'une couverture provisoire au-dessus de chaque plot béton, en raccord avec les toitures tuiles et les chéneaux plomb périphériques :

- Réalisation d'une couverture en cuivre couvrant le plot béton : charpente en sapin fixée sur les pieds de tabouret métallique et à cheval sur la main courante du garde-corps d'un côté et sur les chevrons découverts de l'autre ; tôle zinc avec goutte d'eau en rive et noquets en raccord avec la toiture tuile de la cathédrale ; noquets zinc de relevé autour des pieds du tabouret métallique, avec joint silicone, remontant sous la bande de solin périphérique des pieds.
- Pose de gouttières havraises, à la jonction pan de tuiles / couverture zinc. Pose de tuyaux souples en PVC, raccordant les extrémités des gouttières havraises et les descentes EP existantes.

En fin de chantier, remise en état :

- Dépose des couvertures cuivre et des tuyaux PVC.
- Repose à l'identique des coyaux déposés.
- Réfection des fonds de chéneaux plomb en plâtre.
- Repose à l'identique des chéneaux plomb, des toitures tuiles et des gouttières pendantes en cuivre.

L'ensemble de ces interventions se fera sans parapluie : sujétion de bâchage étanche avec remaniement à l'avancement.

Installation du tabouret métallique

Pour mise en place du tabouret métallique par le lot 1 :

- Accompagnement pour passage des tirants en pied du tabouret, traversant chacun des combles des bras de la cathédrale : dépose ponctuelle de tuiles et de litelage, pose de chatières en zinc provisoires. Réfection à l'identique en fin de chantier.

E/ DÉPOSE DES COUVERTURES

Dispositions communes : dépose, évacuation et sécurité incendie

- Les éléments de couvertures seront déposés avec soin pour restauration en atelier puis repose ou réutilisation, sauf indication contraire.
- Ils seront évacués à la grue, éventuellement après entrepôt sur la plateforme supérieure et / ou sur l'aire de travail dans le square. Ils seront également chargés à la grue sur camion stationné dans le square puis transportés en atelier pour restauration.
- Dépose en conservation des abergements, noues, noquets cuivre et plomb, chéneaux cuivre de la terrasse.
- Dépose en conservation des empanons, chevrons, et toutes pièces support de couverture en contact avec la charpente de la flèche jusqu'aux fermes d'extrémité de la charpente des bras exclues (fermes périphériques de la flèche incluses). Sur l'aiguille, les voliges seront déposées à l'avancement du déplombage de la charpente (voligeage fermant les zones non encore déplombées).

Nota : les voliges seront déposées en démolition par le lot 4 - Charpente qui déplombera les pièces en sous-face.

- Toutes sujétions pour procédure de sécurité incendie : permis-feu pour chaque point chaud signé par le MOA ou son représentant, extincteurs sur échafaudages à proximité des points chauds, fin des travaux par points chauds 2h avant retrait des équipes, ronde à la caméra thermique en fin de journée, avec consignation par photos numériques en sauvegarde.

Couverture en ardoise de l'aiguille

Après montage complet de l'échafaudage de l'aiguille par le lot 1 et après dépose de la jupe en cuivre :

- Dépose soignée en conservation des couvertures en ardoise d'Angers (modèle carré forte, ép. 5mm). Tri, mise sur palette sur la plateforme de la croisée, évacuation à la grue pour emploi possible par l'entreprise.
- Dépose sans conservation des noquets en cuivre.
- Dépose soignée en conservation pour restauration en atelier :
 - de l'échelle de perroquet de l'aiguille,
 - de la trappe d'accès à l'aiguille (au niveau de l'enrayure 9),
 - de la porte d'accès à la galerie supérieure (au niveau de l'enrayure 5),
 - et de l'échelle de la lanterne (entre enrayures 4 et 5).

Couvertures en cuivre

Après montage complet des échafaudages par le lot 1 :

- Depuis les échafaudages, état des lieux des ouvrages soudés à géométrie complexe ou de grande dimension présentant des ouvertures de soudure liées à la dilatation. Repérage et étude de solutions alternatives en recouvrement.
- Nomenclature préalable et marquage rigoureux mais sans atteinte des pièces en vue de leur repose.

Après dépose de la croix, du coq et de la couronne ducale par le lot 6 :

- Dépose soignée en conservation de la jupe en cuivre, avec crochets soudés, consolidés préalablement si besoin pour être transportés solidaires aux feuilles en cuivre (pas de brasage sur place pour démontage des crochets).

Après dépose des sculptures (statues, chimères, oiseaux) par le lot 6 :

- Jusqu'à l'enrayure 4, dépose soignée en conservation des couvertures et décors moulurés de la lanterne, en limitant au maximum les points chauds :
 - Dépose élément par élément ou feuille par feuille, sans débrasurer les pattes de fixation (consolidation préalable si nécessaire pour le transport).
 - Dépose soignée des blocs préfabriqués : pinacles, travées de garde-corps de la galerie supérieure, demi-travées de garde-corps de la galerie inférieure, accolades pendantes, frises, trilobes de la lanterne...
 - Ouverture des seules brasures strictement nécessaires à la dépose des couvertures : brasures des corniches de la galerie supérieure, abouts des entrants de l'enrayure 6, abouts des jambes de force de la lanterne...
- Dépose en conservation des lucarnes en cuivre et zinc.

Après démontage de l'échafaudage de l'aiguille par le lot 1 et après dépose de la galerie en plomb :

- Dépose des couvertures et décors en cuivre du fût (sous niveau enrayure 4), en limitant au maximum les points chauds :
 - Dépose feuille par feuille, sans débrasurer les pattes de fixation (consolidation préalable si nécessaire).

- Ouverture des seules brasures strictement nécessaires à la dépose des couvertures : brasures des corniches de la galerie inférieure, abouts des guettes de contreforts...

Couvertures en plomb

Après dépose de la couverture en ardoise de l'aiguille :

- Dépose en démolition de la couverture en plomb de la galerie supérieure (enrayure 5).

Après dépose des échafaudages de l'aiguille par le lot 1, après dépose de la charpente de l'aiguille par le lot 4 et après installation du bâchage sur l'enrayure 3 par le lot 1 :

- Dépose en démolition de la couverture en plomb de la terrasse de la lanterne (enrayure 4).
- Dépose des supports en plâtre et voliges.
- Sujétion pour traitement des déchets plombés. Déplombage de l'aire de travail après dépose par aspiration THE.

Toitures tuile

Après établissement du parapluie ouvrant sur le tabouret métallique, après bâchage des faces verticales du tabouret et après montage des échafaudages suspendus sous le tabouret par le lot 1 :

- Reportage photographique précis et relevé des motifs des pans à déposer pour reproduction des motifs à la repose (tracé identifiant le nombre de rangs dans les deux sens).
- Dépose en conservation des couvertures en tuiles au droit de la croisée, jusqu'aux fermes médiévales attenantes aux fermes périphériques. Tri et mise sur palette sur les plateformes d'angle, évacuation à la grue, stockage possible entre les contreforts de la façade nord de la cathédrale.
- Dépose des litelages sans conservation.
- Dépose en conservation des chevrons de la toiture en tuiles.
- Fourniture et pose de noquets en zinc fixés sur chevron de rive provisoire en bois, pour raccord de rive des pans de toiture aux bâches du parapluie du tabouret.

F/ RESTAURATION DES CUIVRES

Restauration en atelier de l'ensemble des tôles et décors moulurés déposés :

- Décapage des cuivres anciens pour retirer tous les produits de corrosion : par aérogommage aux projectiles végétaux (noyaux d'abricots 200 à 400µm) + microbilles de verre (50 à 110µm), pression 1 à 2 bars. Le traitement de surface des cuivres, décrit ici, sera arrêté définitivement et précisément, sur tests, par le lot 6 - Sculptures qui le transmettra au présent lot 5 pour application.
- Redressement des pièces déformées : martelage à froid pour les parties solides, martelage à chaud pour les parties fragiles.
- Reprise des perforations par soudure de petites pièces, trous bouchés à la rustine.
- Modification d'assemblages soudés non étanches (notamment ouvrages complexes des bases de colonnettes des baies de la lanterne, soudures en saillie, intersection de pièces) en recherche sur la totalité de la couverture suivant état des lieux avant dépose :
 - interposition de noquets ou abergements assemblés sur pattes, pour assurer les recouvrements
 - consolidation par rivetage des soudures bord à bord fragiles et exposées : ajout de languette en sous-face de la soudure pour rivetage de part et d'autre de la soudure et pour assurer le recouvrement nécessaire à la soudure. En coordination avec le lot 4 - Charpente pour le débardement des fourrures en bois support des couvertures en cuivre, au droit des soudures rivetées.
- Restitution des moulures, pièces décoratives, pièces courantes disparues, en recherche.
- Les pièces neuves de cuivre seront décapées comme les pièces anciennes, après façonnage, et exposées aux intempéries (dans atmosphère similaire à Dijon), dans la même position qu'elles auront sur l'ouvrage, pour favoriser leur patine brune avant pose définitive sur la flèche.

G/ REPOSE DES COUVERTURES

Toitures tuiles

Après restauration et repose de la charpente de la souche par le lot 4 :

- Repose des chevrons. Remplacement / restauration en recherche des pièces défectueuses.

- Réfection du litelage cloué sur chevrons, parfaitement alignés et horizontaux. En chêne issu des chutes des bois exceptionnels, fournis par le MOA, réceptionnés par le charpentier auprès du scieur.
- Fourniture de tuiles neuves en remplacement des tuiles non conservables après tri, au BPU (estimation : 5%, la couverture ayant 30 ans d'âge) : vernissées, teintées selon motif à reproduire identique à l'existant.
- Repose des tuiles déposées, conservées et démoussées, selon les dispositions actuelles, notamment reproduction à l'identique des motifs en tuiles vernissées.
- Réfection à neuf de la crête de faîtage à embarrures et crête de coq, avec remplacement des tuiles cassées.

Couvertures en plomb

En début de chantier :

- Vérification de l'étanchéité de la terrasse en plomb de la lanterne, réparations éventuelles pour garantir l'étanchéité de la souche avant sa dépose.

Après dépose complète de la charpente par le lot 4 et après reprise des arases par le lot 3 :

- Désolidarisation entre maçonnerie et charpente par mise en place d'une feuille de plomb épaisseur 5mm sur les arases du mur bahut aux angles de la croisée (sous poutre-entrants et goussets) et sur les corbeaux corniers.

Après repose de l'enrayure 4 de la charpente (terrasse de la lanterne) :

- Réfection à neuf de la terrasse en plomb selon les dispositions actuelles sauf :
 - Voligeage bois de support refait à neuf et réfection de la forme de pente en plâtre, d'épaisseur 40mm minimum pour assurer un degré coupe-feu de 2h de haut en bas.
 - Relevés d'étanchéité sur poinçon à réhausser au-dessus de la mouluration du poinçon, entaille dans le bois.
 - Relevés d'étanchéité sur jambes de force à réhausser.
 - Adaptation au revers de l'édicule de l'escalier pour suppression du chéneau encaissé inaccessible.
- Protection de la terrasse plomb en CP sur plots réglables et CP de répartition.

L'ensemble de ces interventions se fera sans parapluie : sujétion de bâchage étanche avec remaniement à l'avancement.

En fin de chantier :

- Dépose des protections sur la terrasse en plomb de l'enrayure 4. Révision de la terrasse en plomb, avec réfection à neuf en recherche des parties endommagées.
- En sous-face de la couverture en plomb, mise en œuvre d'un double cours de lames, épaisseur 2x27mm minimum, entre les pièces de charpente de l'enrayure 4, pour assurer un degré coupe-feu de 2h de bas en haut.
- Adaptation du voligeage et jupe en cuivre de l'édicule, suivant détail architecte.
- Doublage de l'édicule de l'escalier pour le rendre coupe-feu 2h : doublage du voligeage de l'édicule et de la porte par l'intérieur, par un second cours de lames en bois pour une épaisseur totale de bois de 50mm minimum ; lames vissées, vis masquées par cabochons de protection en bois ; ajout de joints intumescents en feuillure de la porte de l'édicule.
- Protection au feu de l'enrayure 5 : mise en œuvre, sur l'enrayure 5, d'un plancher bois en double cours de lames, sur lambourdes, épaisseur 2x27mm minimum, écartement des lames pour laisser libre l'écoulement de l'eau ; mise en œuvre d'une trappe d'accès au droit de l'escalier d'accès à l'aiguille, en double cours de lame, même épaisseur que le plancher, sur gonds, avec serrure sur pass en face inférieure (fournie par le lot 7 - Menuiserie), poignée en face supérieure et système de blocage en position ouverte.

Après repose de la couverture en ardoise de l'aiguille :

- Réfection à neuf de la couverture en plomb de la galerie supérieure selon les dispositions actuelles.

Lucarnes

Après repose des couvertures en tuile :

- Repose des lucarnes avec réutilisation des empanons, chevrons. Mêmes géométries qu'actuellement, avec redressement du faîtage.
- Couverture cuivre sur la porte créée devanture des 4 lucarnes, par le lot 7 - Menuiserie, pour accès d'entretien aux abouts d'entrants diagonaux.
- Remplacement de la couverture en zinc par du cuivre neuf.

Couvertures en cuivre

Après repose de la terrasse en plomb de la lanterne, repose des couvertures en cuivre jusqu'à l'enrayure 4 pour assurer l'étanchéité de la souche. Puis, après repose complète de la charpente de l'aiguille par le lot 4, repose de

toutes les autres couvertures et de tous les décors :

- Pose de voliges neuves, fournies par le MOA sur chutes des bois exceptionnels, réceptionnés par le charpentier auprès du scieur.
- Repose des fenestrons quadrilobés.
- Repose des tôles en cuivre, avec soudures à l'étain-plomb. Toutes sujétions pour procédure de sécurité incendie avec permis-feu : extincteurs sur échafaudages à proximité des points chauds, fin des travaux par points chauds 2h avant retrait des équipes, ronde à la caméra thermique en fin de journée.
- Compléments des pattes de fixation disparues ou déformées, identiques aux existantes, en cuivre étamé.
- Couvertine de protection en tôle acier sur la partie extérieure du poinçon : sur 3 faces dans la partie supérieure, sur 4 faces en pied avec moulurations repoussées ; lame d'air de ventilation ; tôles à peindre suivant décor ancien de chevronnage blanc et rouge.
- Installation d'une maille fine foncée anti-volatile sur les baies et garde-corps de l'étage ajouré.

Couverture en ardoise de l'aiguille

- Réfection du voligeage, épaisseur 27mm.
- Réfection à neuf de la couverture en ardoise. Pose clouée avec pointe cuivre en tête. Ardoises neuves MH, épaulées avec rives taillées en biseau, de dimensions identiques aux existantes : 32x22cm, pureau de 11cm, épaisseur 5mm. Sans pyrite ni fissures ouvertes ou rebouchées. Ardoises neuves naturelles d'Espagne, de type CUPA PIZARRAS, sélection EXCELLENCE, à bords épaufrés, dito existant, conformes à la Norme européenne EN 12326-1 Spécifications (critères A1-T1-S1-D1), au Label Marque NF – code D1 et garantie 30 ans par le fabricant. L'entreprise devra fournir le Certificat d'Authenticité et de Garantie de 30 ans à la fin du chantier. Pose conformément au DTU 40-11. Pose classique suivant existant, à pureau régulier.
- Noquets cuivre réutilisés, remplacés/réparés en recherche des défectueux.

H/ RESTAURATION ET REPOSE DES MOYENS D'ACCÈS

Porte d'accès à la galerie supérieure

- Dépose en démolition de l'habillage plomb.
- Remplacement du verrou et du gond cassés.
- Resuivi du cadre en bois.
- Réfection de l'habillage en plomb.
- Repose avec fixations boulonnées neuves.

Trappe d'accès à l'aiguille

- Dépose en démolition de l'habillage en ardoise.
- Resuivi du cadre en bois et adaptation pour ouverture à la française.
- Réfection de l'habillage en ardoise.
- Repose sur gonds et équipement d'un verrou, avec fixations boulonnées neuves.

Échelle de la lanterne

- Redressement du barreau tordu
- Ajout d'une crinoline en cerclage acier à peindre
- Brossage, traitement anti-corrosion deux couches, remise en peinture (une couche d'impression et deux couches de peinture ton brun), teinte au choix de l'architecte
- Repose avec fixations boulonnées neuves.

Échelle de l'aiguille

- Remplacement des barreaux tordus ou disparus.
- Brossage, traitement anti-corrosion deux couches, remise en peinture (une couche d'impression et deux couches de peinture ton brun).
- Crinoline de sécurité neuve. Même finition.

VI. LOT 6 : SCULPTURES EN CUIVRE ET ORNEMENTS MÉTALLIQUES

A/ DÉPOSE DES DÉCORS EN CUIVRE ET DES ORNEMENTS ET ÉLÉMENTS EN FER

Après montage des échafaudages des statues et avant montage du tabouret par le lot 1 :

- Dépose des statues, compris leurs armatures ferriques. Ouverture en tête (calotte rivetée à démonter) pour accès à l'armature interne. En une pièce, dépose par élingage de l'armature interne, évacuation à la grue, mise en caisse à pied d'œuvre sur l'aire de travail et transport en atelier pour restauration.

Après montage complet de l'échafaudage de l'aiguille par le lot 1 :

- Dépose soignée en conservation pour restauration en atelier :
 - de la pointe,
 - de la croix en fer,
 - du coq,
 - de la couronne ducale en cuivre avec sa structure ferrique,
 - des oiseaux armés,
 - des chimères armées.

B/ RESTAURATION ET REPOSE DES DÉCORS EN CUIVRE

Mêmes prescriptions de restauration et de repose que pour les couvertures en cuivre. Le traitement de surface des cuivres sera établi avec précision par le présent lot, sur présentation d'échantillons pour validation par l'architecte en chef. Il devra transmettre son protocole précis au lot 5 - Couvertures qui l'appliquera pour le nettoyage des cuivres de couverture.

- Décapage des cuivres anciens pour retirer tous les produits de corrosion : par aéroponomie aux projectiles végétaux (noyaux d'abricots 200 à 400µm) + microbilles de verre (50 à 110µm), pression 1 à 2 bars.
- Les pièces neuves de cuivre seront décapées comme les pièces anciennes, après façonnage, et exposées aux intempéries (dans atmosphère similaire à Dijon), dans la même position qu'elles auront sur l'ouvrage, pour favoriser leur patine brune avant pose définitive sur la flèche.
- Redressement des pièces déformées : martelage à froid pour les parties solides, martelage à chaud pour les parties fragiles.
- Reprise des perforations par soudure de petites pièces pré-patinées, trous bouchés à la rustine.
- Restitution des décors disparus ou trop dégradés.
- Repose des décors en cuivre, avec soudures à l'étain-plomb. Toutes sujétions pour procédure de sécurité incendie avec permis-feu : extincteurs sur échafaudages à proximité des points chauds, fin des travaux par points chauds 2h avant retrait des équipes, ronde à la caméra thermique en fin de journée.

Prescriptions supplémentaires selon les éléments de décor :

Statues, chimères et oiseaux

- Pour toutes les sculptures à ossature intérieure ferrique : désassemblage soigné des feuilles de cuivre, nettoyage, déformations corrigées au marteau, trous bouchés à la rustine.
- Brossage, passivation des armatures en fer, autant de couches que nécessaire pour résister à l'atmosphère humide. Remplacement à neuf en recherche : provision 20%, passivation autant de couches que nécessaire.
- Interposition de feuilles de téflon entre les anneaux cuivre et l'armature en fer.
- Réassemblage des tôles par brasures fines à l'étain-plomb.
- Après repose de toutes les couvertures en cuivre par le lot 5, repose des chimères et des oiseaux selon mêmes modes de fixation que l'existant.
- Après dépose de l'échafaudage de l'aiguille, repose à la grue des statues frettées dans une cage métallique.

Couronne ducale

- Nettoyage soigné des feuilles de cuivre.
- Brossage des fers et traitement anti-corrosion (passivation autant de couches que nécessaire), voire remplacement selon la section résiduelle restante.

- Isolement fer/cuivre par feuille de teflon interposée.
- Réfection fine des brasures à l'étain-plomb.
- Repose sur la pointe de l'aiguille.
- Mise en place d'une maille métallique tendue dans la couronne pour empêcher les oiseaux d'y nicher.

C/ RESTAURATION ET REPOSE DES AUTRES ORNEMENTS MÉTALLIQUES

Croix

- Contrôle de l'ensemble de ferronnerie de la croix. Reprise des assemblages et rivetages.
- Brossage, application de deux couches d'anti-rouille, remise en peinture. Provision pour réfection de la dorure à la mixtion sur les ornements, au cas où des traces seraient retrouvées sur l'ouvrage. Après montage, retouches pour parfaire tous les assemblages.
- Repose sur la pointe de l'aiguille.

Coq

- Contrôle des rivetages et soudures.
- Brossage, décapage, application de deux couches d'anti-rouille, réfection de la dorure à la mixtion.
- Repose sur la croix.

Pointe

- Brossage, application de deux couches d'anti-rouille, d'une couche d'impression et de deux couches de peinture ton brun.
- Réfection de la fixation lors de la repose de la pointe.

VII. LOT 7 : MENUISERIE

Sécurisation incendie

- Dépose des serrures électroniques et sur les portes intérieures en parties hautes ne donnant pas sur des espaces ouverts au public (musée du carillon, tribune de l'orgue) et pose de fermes-portes : 7U.

Escalier en colimaçon

Après pose du parapluie ouvrant et avant dépose de la charpente de la souche :

- Relevé, marquage et constat d'état.
- Démontage complet de l'escalier pour restauration en atelier. Évacuation des éléments à la grue.

En atelier :

- Greffes et réparations soignées du poinçon sur ses parties fissurées.
- Greffes et réparations soignées des pièces du limon et de la main courante fissurées.
- Remplacement des barreaux manquants, à l'identique des existants.
- Restauration de tous les assemblages défailants, en recherche.
- Traitement xylophage de l'ensemble des pièces.
- Revernissage de l'ensemble des pièces, anciennes et neuves avec uniformisation de la teinte.

Après repose de la charpente de la souche par le lot 4 :

- Relevé précis de la charpente restaurée pour adaptation des ferrures et des pièces de l'escalier qui repose sur les enrayures 2, 3 et 4.
- Réassemblage de l'escalier sur place après repose de la charpente de la souche, avec visserie neuve en acier inox patiné ou acier à peindre en ton brun.

Le détail des ferrures existantes assurant la fixation de l'escalier à la charpente, et le principe de leur adaptation pour suivre les modifications géométriques de la charpente redressée, seront étudiées en PRO.

Lucarnes

- Création d'une porte en devanture des 4 lucarnes, en double cours de planches en chêne, avec feuillure, à couvrir de cuivre par le lot 5 - Couvertures, pour accès d'entretien aux abouts d'entrants diagonaux. Fourniture et pose de serrure électronique suivant organigramme de la cathédrale.

Trappe d'accès à l'aiguille

- Fourniture d'une serrure électronique suivant organigramme de la cathédrale pour l'accès à l'aiguille. Insertion dans la trappe réalisée et posée par le lot 5 - Couvertures.

VIII. LOT 8 : DÉTECTION INCENDIE DE CHANTIER / SUIVI SÉCURITÉ INCENDIE DE CHANTIER / SÛRETÉ DE CHANTIER / ÉLECTRICITÉ

Voir le détail des interventions dans le rapport d'ALTO.

A/ ÉCLAIRAGES ET RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

Alimentation du grand lustre de la croisée

- En amont du chantier de restauration de la flèche, consignation de l'alimentation du grand lustre du chœur. Remise en marche en fin de chantier.

Éclairage de service de la flèche

- Fourniture et pose des éclairages de service de la flèche : 55 luminaires tubulaires étanches répartis comme suit dans la charpente de la flèche : 16 en applique sur les murs bahut, 8 en applique sur chaque enrayure de la souche (4 enrayures), un par enrayure de l'aiguille (5 enrayures). Chemins de câble déportés de 20cm des pièces charpente.

B/ ÉLECTRICITÉ DE CHANTIER

Le présent lot devra la fourniture de l'électricité du chantier. Puissance selon les besoins des autres lots.

C/ SÉCURITÉ INCENDIE

SSI de chantier

Un système de sécurité incendie provisoire sera installé pour toute la durée du chantier. Les zones à détecter évolueront en fonction de l'avancement du chantier : dépose et repose de la charpente et des couvertures qui modifient les volumes fermés tout au long du chantier.

Le SSI de chantier sera de Catégorie A avec alarme de type 1. La centrale SSI, de type adressable, sera installée dans un abri dédié, mise en place par le présent lot, sur la plateforme intermédiaire, sur les échafaudages de la flèche.

Le SSI sera alimenté par une alimentation électrique de sécurité (AES), assurant une autonomie de 12 heures à l'état de veille et de 10 minutes en alarme pour la partie détection ECS.

La centrale SSI sera couplée à un télé-transmetteur ou tout autre équipement permettant de diffuser les alarmes et autres défauts à un prestataire extérieur 24h/24. Celui-ci dispose d'une liste d'appel prioritaire (à définir par les intervenants interservices (exemple : 1/ entreprises, 2/ conservateur RUS, 3/ ACMH, 4/ propriétaire, 5/ affectataire).

Détection des volumes fermés suivants :

- Comble du chœur
- Comble du bras nord du transept
- Comble du bras sud du transept
- Comble de la croisée cloisonnées sur ses 4 côtés par les cloisons coupe-feu et en partie haute par la terrasse de la lanterne, selon l'avancement du démontage / remontage des couvertures de la croisée
- Aiguille, selon l'avancement de la dépose / repose des voliges fermant le volume.

La détection sera conventionnelle, doublée par des caméras optiques couvrant chacun des volumes qui sera équipé d'un éclairage commandé depuis les combles.

Levée de doute à distance

Un dispositif de levée de doute à distance par caméra thermographique (qui détecte une élévation de chaleur) équipera les différents volumes fermés sus-cités et les pieds de toiture en extérieur. Une analyse de risques permettra de déterminer les zones les plus sensibles à équiper.

Les images seront accessibles depuis le poste de sécurité à l'entrée de la base-vie et en report au même prestataire extérieur 24h/24 que le SSI. La levée de doute à distance ne remplace pas la levée de doute sur place mais permet une anticipation de levée et de l'alerte en cas de sinistre.

L'alarme du SSI ne sera stoppable que sur place et obligera donc l'agent à monter sur les échafaudages pour

l'éteindre. Cela dans le but de l'inciter à réaliser la levée de doute sur place.

D/ SÛRETÉ DE CHANTIER

La détection anti-intrusion de chantier sera installée par le présent lot pour mutualiser la surveillance H24 avec celle de la détection incendie, par la même société de surveillance. Détection réalisée par détecteurs volumétriques, barrières infrarouge, vidéosurveillance. Sirène d'alerte.

Des tourniquets de contrôle d'accès seront installés sur chacune des entrées sur le chantier, sur la rue du Dr Maret : 1 portillon personnels et 1 portail véhicules de livraison du chantier.

Les tourniquets seront ouvrables par badges ou cartes, fournis par le présent lot aux intervenants et visiteurs de chantier, sur demande préalable et contrôlée.

E/ COMMUNICATION SUR CHANTIER ET AVEC LES SECOURS

Deux téléphones rouges GSM seront installés sur le chantier (dans le poste de sécurité et sur la plateforme haute des échafaudages) pour pouvoir contacter les secours en cas de sinistre.

De la radiotéléphonie de sécurité sera mise à disposition des agents pour communiquer d'un point à l'autre du chantier (de la base-vie au sommet de la flèche).

F/ PRÉSENCE HUMAINE POUR SURVEILLANCE INCENDIE ET INTRUSION

La présence d'un agent de sécurité sur place est prévue durant toutes les heures d'ouverture du chantier + 2h après la fin des travaux, chaque soir. Cet agent sera présent dans le PC Sécurité à l'entrée de la base-vie pour surveiller les écrans de report SSI, des caméras thermiques et des caméras anti-intrusion. Il contrôlera les entrées sur le chantier. Le roulement se fera entre 2-3 agents, formés spécifiquement au site, au chantier et à ses installations techniques de surveillance et de contrôle.

G/ PROTECTION CONTRE LA FOUDRE

Le présent lot sera chargé de la fourniture et des interconnexions du système paratonnerre de l'édifice, selon l'avancement du chantier et des montage / démontage des échafaudages de la flèche. La pose des feuillards sera à la charge du lot 5 - Couvertures.

- Mesures initiale et finale de la prise de terre de l'édifice. Suivant résultats, toutes adaptations nécessaires pour l'améliorer (ajout de piquets, etc.)
- Sur les échafaudages, mise en place d'un dispositif d'alerte orage, conforme à la norme IEC 62793 destiné à avertir les compagnons en cas de risque météorologique imminent.

V. ANNEXES

Tableau des pièces de charpente et des assemblages de la flèche	archipat , François AUGER
Cahier des charges de fourniture des bois	archipat , François AUGER
Diagnostic de la flèche et ses annexes, novembre 2022	archipat
Notice structure de l'ouvrage et du tabouret métallique	LeBE
Note de stabilité au vent de l'ouvrage	LeBE
Note de tenue au feu de l'ouvrage	LeBE
Rapport des tests de nettoyage et de patine des cuivres de l'ouvrage	Gaëlle GIRALT
Rapport d'étude géotechnique G2	Géotec
Rapport d'analyse des aciers de la flèche	A-Corros
Diagnostic des arbres du square des Bénédictins	ACER