



# CATHÉDRALE NOTRE-DAME DE PARIS



## PHASE 3 – TRAVAUX DE RESTAURATION POST-2024 SOUS-OPERATION n° 1

### RESTAURATION DU CHEVET

#### DOSSIER DE CONSULTATION DES ENTREPRISES



# Sommaire

---

- **FICHE DE RENSEIGNEMENT**

- **RAPPORT DE PRESENTATION**

  - Préambule

  - 1 – Présentation de l'opération

  - 2 – Organisation de chantier

  - 3 – Description sommaire des travaux

  - Annexe – Nomenclature des espaces

- **CAHIER DES CLAUSES ADMINISTRATIVES PARTICULIERES (C.C.A.P.)**

- **CALENDRIER PREVISIONNEL D'EXECUTION DES TRAVAUX**

- **DECOMPOSITIONS DU PRIX GLOBAL ET FORFAITAIRE (D.P.G.F.) et BORDEREAUX QUANTITATIFS ESTIMATIS (B.Q.E)**

- **CAHIER DES CLAUSES TECHNIQUES COMMUNES (C.C.T.C.) & ADDITIF RISQUES PLOMB ET AMIANTE**

- **CAHIERS DES CLAUSES TECHNIQUES PARTICULIERES (C.C.T.P.) & ADDITIFS RISQUES PLOMB ET AMIANTE**

- **DOCUMENTS GRAPHIQUES ET PHOTOGRAPHIQUES**

  - ☐ CAHIER 1 : Planches graphiques générales
  - ☐ CAHIER 2 : Les maçonneries, décors sculptés et vitraux
  - ☐ CAHIER 3 : Les couvertures du chœur et paratonnerre
  - ☐ CAHIER 4 : Détails

- **ANNEXES GENERALES**

  - ☐ ANNEXE 1 : Plan d'installation de chantier (P.I.C.)
  - ☐ ANNEXE 2 : Note d'organisation de chantier (N.O.C.)
  - ☐ ANNEXE 3 : Plan de déploiement des coffrets électriques



- ANNEXE 4 : Plan de déploiement des branchements en eau
- ANNEXE 5 : Diagnostic plomb
- ANNEXE 6 : Diagnostic amiante
- ANNEXE 7 : Plan général de coordination (P.G.C.)

#### ■ ANNEXES PARTICULIERES

- ANNEXE 1 : Carlo BLASI, Mathias FANTIN, *Paris – Cathédrale Notre-Dame - Restauration des arcs-boutants du chœur (PRO) et cahier des charges échafaudages*, Rapport structure des bureaux d'étude COMES STUDIO ASSOCIATO et BESTREMA, janvier 2025
- ANNEXE 2 : TABLIER : Etudes d'exécution du tablier- LEBRAS FRERES, mai 2020
- ANNEXE 3 : TABLIER et CINTRES : Vérification des structures provisoires
- ANNEXE 4 : Lot 10\_Paratonnerre : Rapport *Etude technique foudre*, ARF NA20200922-01 établi par FRANKLIN FRANCE CENTRE-EST complété par l'étude technique pour les travaux ETF NA20201002-01, 8 octobre 2020.
- ANNEXE 5 : Lot 10\_Paratonnerre : Rapport de *Vérification complète concernant le Système de Protection Foudre de la Cathédrale Notre Dame de Paris à Paris (75)* par FRANCE PARATONNERRE n°RC240203 indice 2, 7 février 2024
- ANNEXE 5 : Lot 10\_Paratonnerre : Rapport *Prises de Terre Paratonnerres*, n°350001534/35001544 réalisé par FRANKLIN ENERGIE, 23 octobre 2024.
- ANNEXE 5 : Ph. VILLENEUVE, R. FROMONT, ACMH, *Synthèse des sculptures monumentales déposées après incendie – Fleurons chevet*, septembre 2024
- ANNEXE 6 : NOTE SCIENTIFIQUE « *Consolidation - dessalement* » Société SOCRA, mars 2021



CATHÉDRALE  
NOTRE-DAME DE PARIS

TRAVAUX DE RESTAURATION  
POST-2024



# ANNEXES PARTICULIÈRES

DOSSIER DE CONSULTATION DES ENTREPRISES

## Restauration du chevet

*Février 2025*



Maîtrise d'Ouvrage :

ETABLISSEMENT PUBLIC CHARGÉ DE  
LA CONSERVATION ET DE LA  
RESTAURATION DE LA CATHÉDRALE  
NOTRE-DAME DE PARIS

2 bis Cité Martignac - 75007 Paris

Maîtrise d'Œuvre :

Philippe VILLENEUVE  
Rémi FROMONT  
Architectes en Chef des Monuments Historiques

Chantier Notre-Dame de Paris  
Rue du Cloître Notre-Dame - 75004 Paris  
Poste de sécurité - Porte P5  
Tél. : 01 87 76 11 63  
E-mail : [notre-dame@villeneuve-acmh.fr](mailto:notre-dame@villeneuve-acmh.fr)



CATHÉDRALE  
NOTRE-DAME DE PARIS

TRAVAUX DE RESTAURATION  
POST 2024



# ANNEXE PARTICULIERE 1

## Rapport structure

### Restauration des arcs-boutants du chœur et cahier des charges échafaudages

---

DOSSIER DE CONSULTATION DES ENTREPRISES

#### Restauration du chevet

*Février 2025*



Maîtrise d'Ouvrage :

ETABLISSEMENT PUBLIC CHARGE DE  
LA CONSERVATION ET DE LA  
RESTAURATION DE LA CATHEDRALE  
NOTRE-DAME DE PARIS

Maîtrise d'Œuvre : A.C.M.H.

Philippe VILLENEUVE  
Rémi FROMONT



# Paris – Cathédrale Notre-Dame

---

## *Restauration des arcs-boutants du chœur* **Rapport structure PRO et cahier des charges** **échafaudages**

14/02/2025

Prof. Carlo Blasi, Architecte

Mathias Fantin, ingénieur, docteur en architecture



### **Maitre d'œuvre :**

Philippe VILLENEUVE

Rémi FROMONT

Architectes en Chef  
des Monuments Historiques

### **Maitre d'ouvrage :**

Établissement public chargé de la conservation et  
de la restauration de la cathédrale Notre-Dame de  
Paris

2 bis Cité Martignac  
75007 Paris

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Contexte .....</b>	<b>4</b>
1.1	Introduction.....	4
1.2	Structures existantes provisoires issues des travaux de sécurisation .....	4
1.3	Historique .....	7
1.4	Localisation et nomenclature .....	7
1.5	Textes réglementaires.....	9
<b>2</b>	<b>Synthèse des informations disponibles .....</b>	<b>11</b>
2.1	État des lieux des arcs-boutants et des culées.....	11
2.2	Déformations existantes.....	13
2.3	Hypothèses de chargement .....	17
2.3.1	Introduction .....	17
2.3.2	Poussée des voûtes hautes .....	18
2.3.3	Poussée des arcs-boutants supérieurs.....	19
2.3.4	Poussée des arcs-boutants inférieurs.....	21
2.3.5	Efforts de vent .....	22
2.3.6	Bilan des hypothèses de chargement.....	32
<b>3</b>	<b>Préconisations techniques .....</b>	<b>34</b>
3.1	Enjeux .....	34
3.2	Arcs-boutants supérieurs .....	34
3.3	Arcs-boutants inférieurs .....	34
3.4	Petites culées dans l'abside .....	35
3.5	Instrumentations .....	36
3.6	Échafaudages .....	36
<b>4</b>	<b>Procédures d'exécution pour les arcs-boutants supérieurs.....</b>	<b>37</b>
4.1	Tablier existant : raidissement par zone et vérification du plancher .....	37
4.2	Déchargement de l'arc-boutant.....	38
4.3	Reconstruction de l'arc-boutant .....	40
4.4	Vérifications des structures existantes et ajouts éventuels .....	41
4.5	Système pour rendre actives les structures provisoires .....	41
<b>5</b>	<b>Système de contrôle.....</b>	<b>42</b>
<b>6</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>43</b>
<b>Annexe A</b>	<b>Liste des documents annexes.....</b>	<b>45</b>
<b>Annexe B</b>	<b>Cahier des charges pour les échafaudages.....</b>	<b>46</b>
B.1	Principes fondamentaux pour le calcul des charges.....	46

B.2	Vérification en phase EXE des structures provisoires existantes .....	47
B.3	Efforts verticaux et horizontaux admissibles sur la cathédrale .....	48
B.3.1	Généralités sur les appuis sur les pierres .....	48
B.3.2	Capacité portante au sol (terrain naturel) .....	49
B.3.3	Capacité portante des appuis du tablier et des cintres .....	50
B.3.4	Capacité portante sur les terrasses hautes .....	54
B.3.5	Sur les terrasses basses (déambulatoire extérieur) .....	57
B.3.6	Sur les terrasses basses (chapelles) .....	60
B.4	Efforts horizontaux maximaux pouvant être supportées par les culées .....	61
B.4.1	Culées des grands arcs-boutants .....	61
B.4.2	Base des petits arcs-boutants de l'abside .....	63
B.5	Démontage d'un l'arc-boutant uniquement .....	63

## Suivi des modifications

Auteur	Date	Indice	Modification
MF-CB	23/01/2025	A-C	Première version du document
MF-CB	14/02/2025	D	Mise à jour suivant réunion du 11/02/2025
MF-CB	17/02/2025	E	Suppression bandeau provisoire

# 1 Contexte

## 1.1 Introduction

Ce rapport est rédigé dans le cadre des études de maîtrise d'œuvre pour la restauration des arcs-boutants du chœur de la cathédrale Notre-Dame de Paris. Ce rapport concerne les aspects structurels des travaux au stade PRO (projet).

Le projet prévoit la restauration de la plupart des volées des arcs-boutants et des culées du chœur, dans certains cas avec le démontage et la reconstruction totale de la volée et de la culée.

Pour réaliser cette opération, il est nécessaire de préparer des structures capables de contrebuter la poussée des voûtes à la place des arcs-boutants et des culées, ainsi que des échafaudages nécessaires pour les travaux.

Ce document précise notamment la synthèse des points d'appuis possibles pour les échafaudages sur les structures de la cathédrale et quantifie les charges admissibles. Il forme ainsi un **cahier des charges** à respecter pour la conception des échafaudages et la réalisation des travaux.

Le présent rapport/cahier des charges devra être signifié aux entreprises de travaux et pris en compte pour les méthodologies et moyens nécessaires dès l'offre.

La quantification des capacités portantes de la cathédrale s'appuie sur les études structurelles menées par Studio Comes et Bestrema, notamment :

- Cathédrale Notre-Dame : Projet de reconstruction et consolidation des structures. Juillet 2021.Paris (Comes)

## 1.2 Structures existantes provisoires issues des travaux de sécurisation

Il existe actuellement des structures provisoires construites dans le cadre du chantier de sécurisation de la cathédrale (2019-2020), qui sont utiles à la présente opération.

Sous les arcs-boutants, qui contrebutent la poussée des voûtes de la cathédrale, se trouvent, en effet, de robustes cintres qui sont reliés, à leur base, à un tablier, qui fait le tour de tout le chœur et de l'abside, composé de portiques en acier sous les cintres, de grandes poutres en acier et de panneaux de bois (CLT) de 12 cm d'épaisseur, comme indiqué sur la figure suivante. Les dimensions exactes des structures réelles devront être vérifiées pour l'élaboration du projet exécutif.



*Figure 1 Plancher métallique-bois (vue de dessous et de dessus en 2024)*

Nous distinguerons dans ce rapport :

- Les portiques métalliques, composés de 2 HEA 320 et qui prenant appui sur les maçonneries forment le support des autres structures provisoires
- Les cintres en bois, qui prennent appui sur les portiques métalliques et en pied au niveau de la culée de l'arc-boutant
- Les solives métalliques, perpendiculaires aux portiques
- Le plancher bois en CLT de 12 cm d'épaisseur, porté par les solives
- Le tablier désigne l'ensemble « portique métallique + solives métalliques + plancher bois »

Il appartient à l'entreprise de vérifier l'état de conservation et la fonctionnalité des structures temporaires en place.



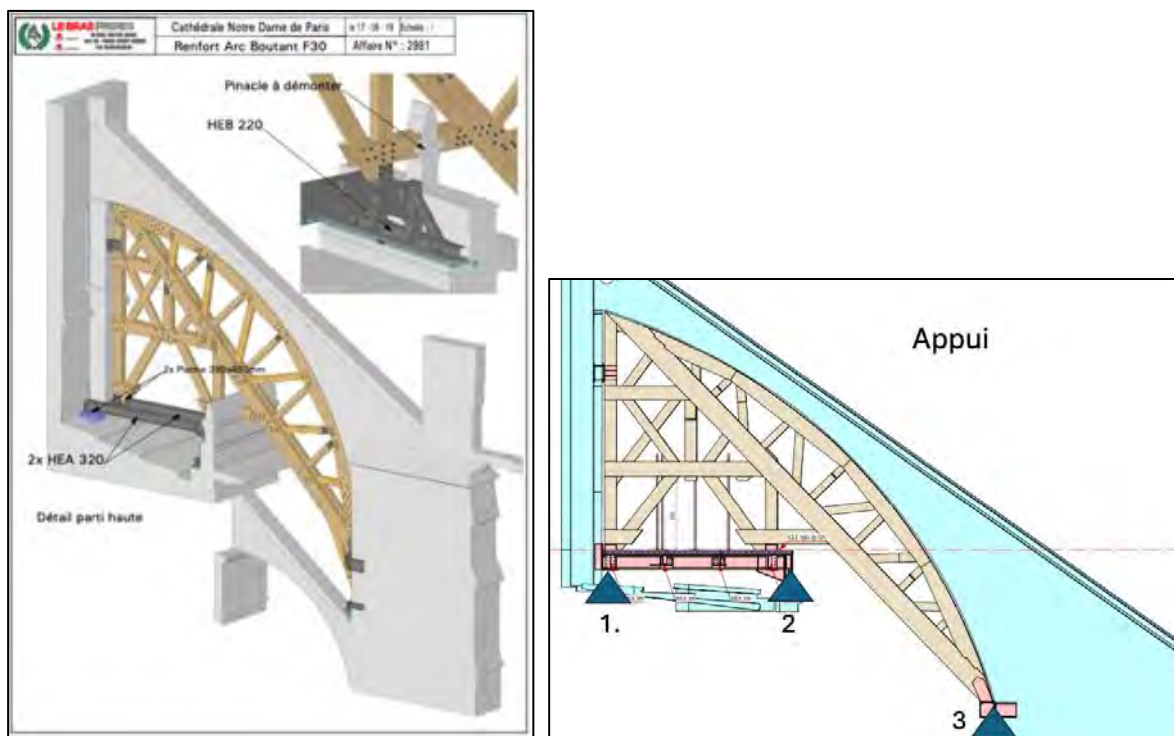


Figure 2 Portiques métalliques appuyés des cintres et du plancher métallique (non représenté)

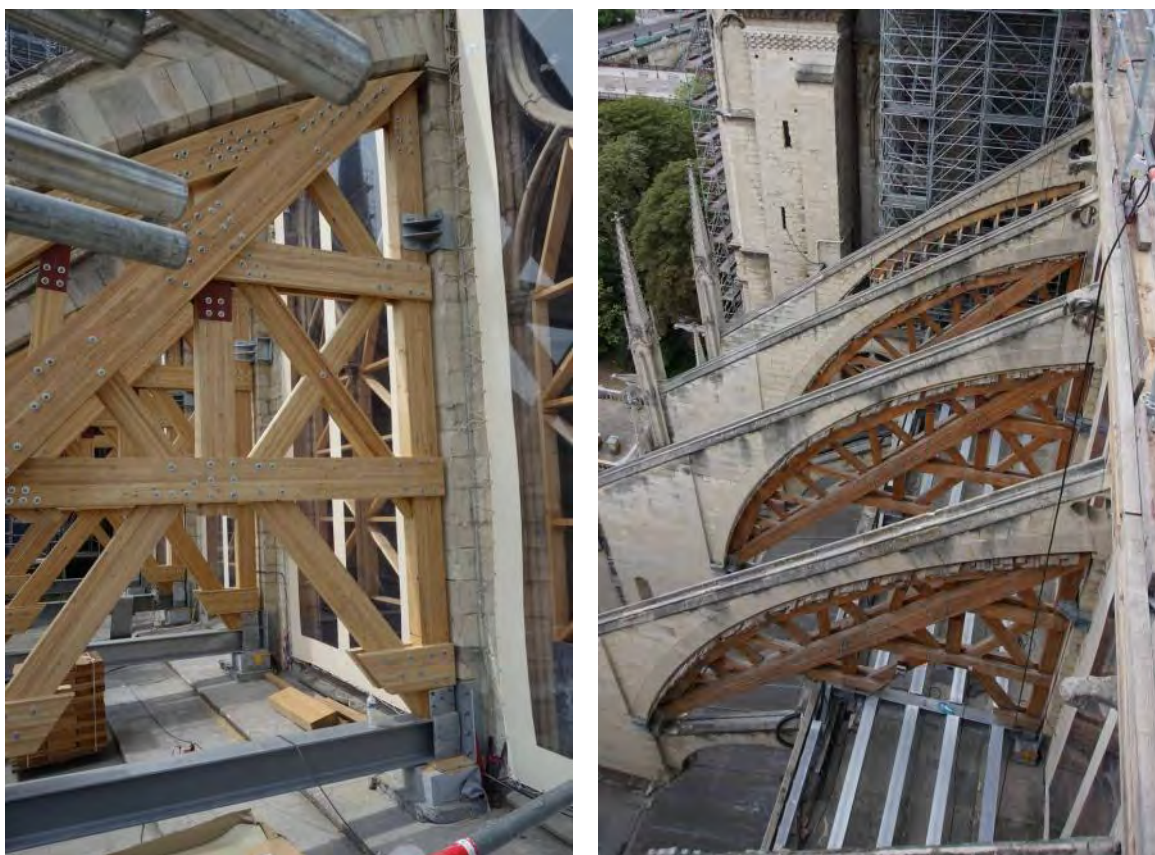


Figure 3 Cintres et portiques (à gauche, en 2019) ; Cintres, portiques et solives métalliques (à droite, en 2020)

### 1.3 Historique

Nous rappelons ici les dates clés à connaître concernant les arcs-boutants du chœur. Ces informations sont tirées de l'étude de diagnostic des architectes.

- XII<sup>e</sup>-XIII<sup>e</sup> s. :
  - o construction des arcs-boutants du chœur
- XVIII<sup>e</sup> s. :
  - o réparation des culées par fixation de dalle de liais de 3 cm d'épaisseur sur les pierres dégradées
- XIX<sup>e</sup> s. :
  - o 1846-1850 : démontage et remontage en pierre neuve des arcs-boutants au sud du chevet
  - o 1853-1858 : démontage et remontage en pierre neuve des arcs-boutants au nord du chevet
- XX<sup>e</sup> s. :
  - o seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle : divers travaux de restauration sur les arcs-boutants et leurs culées

### 1.4 Localisation et nomenclature

La cathédrale est classée au titre des Monuments Historiques depuis 1862. L'édifice est situé à Paris (75004) :

- en zone A1 vis-à-vis de l'Eurocode 1-3 (Neige)
- en zone 2 vis-à-vis de l'Eurocode 1-4 (Vent)
- en zone 1 vis-à-vis du risque sismique
- à environ 35 m d'altitude par rapport au niveau de la mer

La figure 4 donne la nomenclature des différents espaces de la cathédrale. La Figure 5 donne le nom utilisé pour les différentes voûtes dont il sera question dans ce rapport.



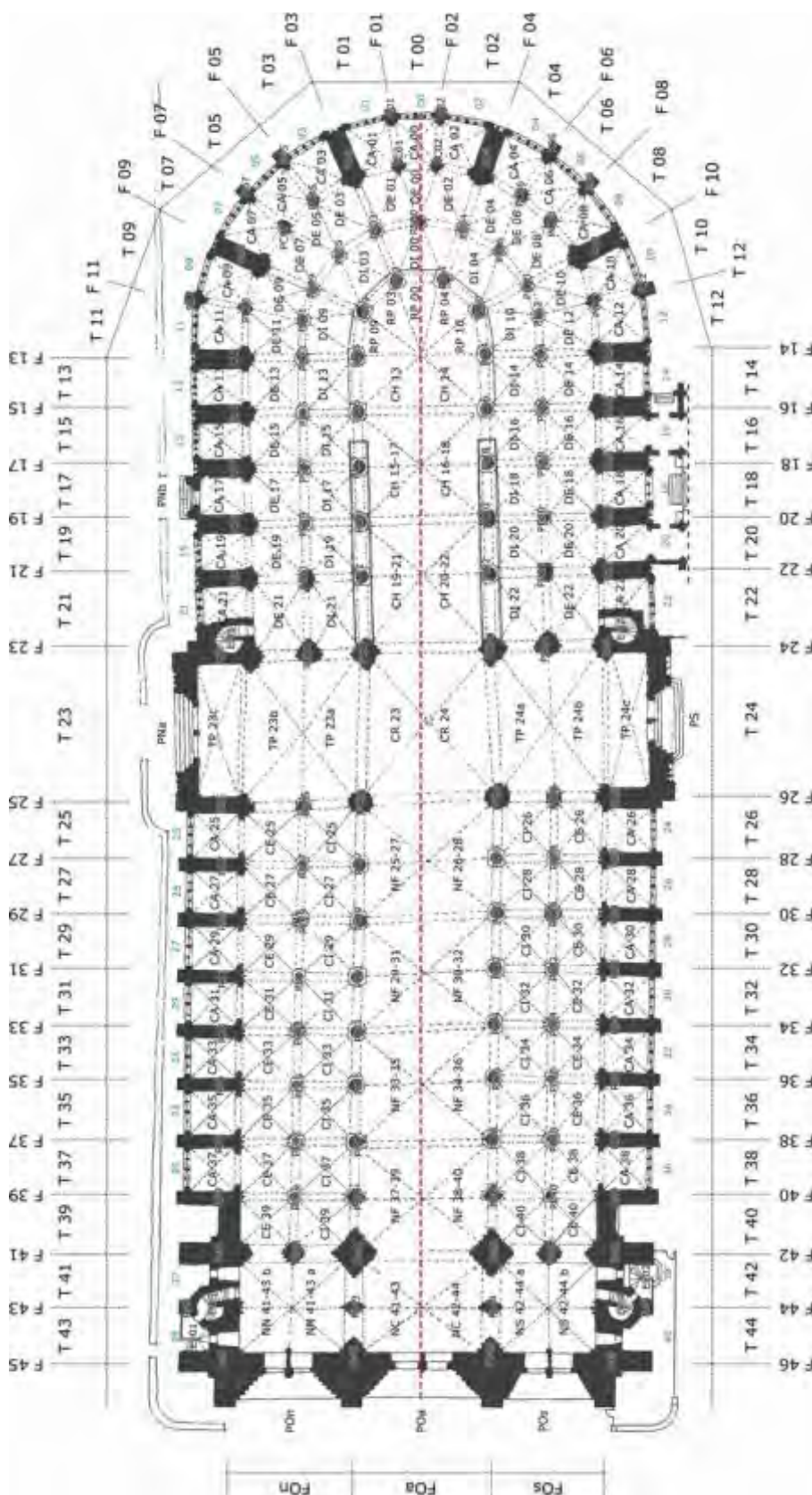


Figure 4 Nomenclature des espaces (fond de plan architecte)

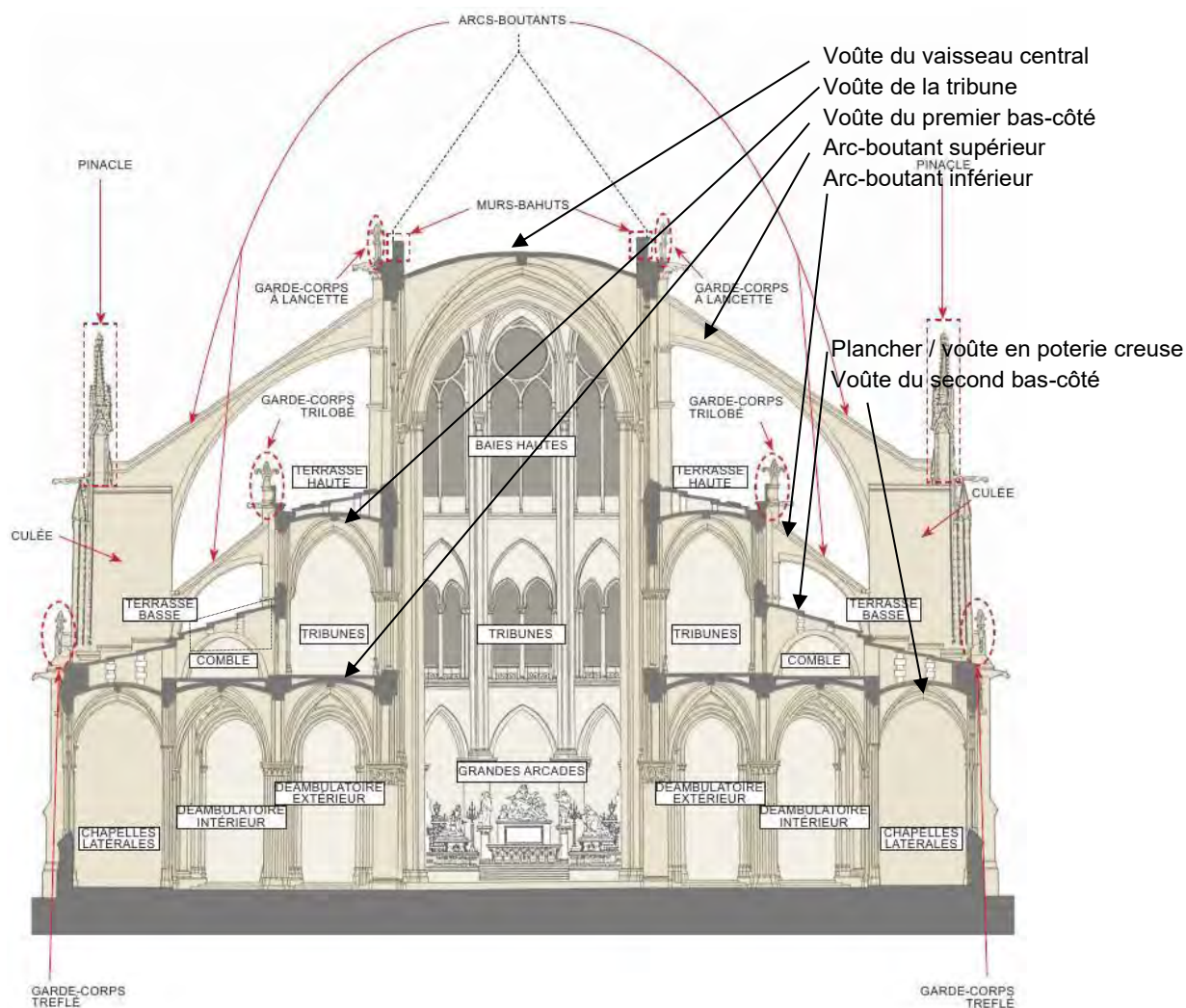


Figure 5 Nomenclature des éléments architecturaux

## 1.5 Textes réglementaires

La liste non exhaustive des textes réglementaires qui sont applicables dans le cadre de cette étude est la suivante :

- NF EN 1990 – Eurocodes structuraux – Bases de calcul des structures
- NF EN 1991-1-1 – Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-1 : actions générales – poids volumiques, poids propres, charges d'exploitation des bâtiments
- NF EN 1991-3 – Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-3 : actions générales – charges de neige
- NF EN 1991-4 – Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-4 : actions générales – actions du vent

- NF EN 1992-1-1 – Eurocode 2 – Calcul des structures en béton – Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments
  - NF EN 1993-1-1 – Eurocode 3 – Calcul des structures en acier – Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments
  - NF EN 1993-1-2 – Eurocode 3 – Calcul des structures en acier – Partie 1-2 : calcul du comportement au feu
  - NF EN 1993-1-8 – Eurocode 3 – Calcul des structures en acier – Partie 1-8 : calcul des assemblages
  - NF EN 1995-1-1 – Eurocode 5 – Conception et calcul des structures en bois – Partie 1-1 : généralités – règles communes et règles pour les bâtiments
  - NF EN 1995-1-2 – Eurocode 5 – Conception et calcul des structures en bois – Partie 1-2 : généralités – Calcul des structures au feu
  - NF EN 1996-1-1 – Eurocode 6 – Calcul des ouvrages en maçonnerie – Partie 1-1 : règles générales pour ouvrages en maçonnerie armée et non armée
  - NF EN 1996-2 – Eurocode 6 – Calcul des ouvrages en maçonnerie – Partie 2 : conception, choix des matériaux et mise en œuvre des maçonneries
  - NF EN 1998-1 – Eurocode 8 – Calcul des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 1 : règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments
- NF EN 1998-3 – Eurocode 8 – Calcul des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 3 : évaluation et renforcement des bâtiments.

## **2 Synthèse des informations disponibles**

### **2.1 État des lieux des arcs-boutants et des culées**

L'état des lieux sanitaire des pierres des arcs-boutants et des culées du chœur a été mis au point par l'architecte. Sur cette base, le maître d'œuvre a prévu d'intervenir sur la majorité des arcs-boutants et culées du chœur. Les culées seront conservées en place, avec changement de pierres en tiroir, à l'exception des culées indiquées sur la figure suivante.



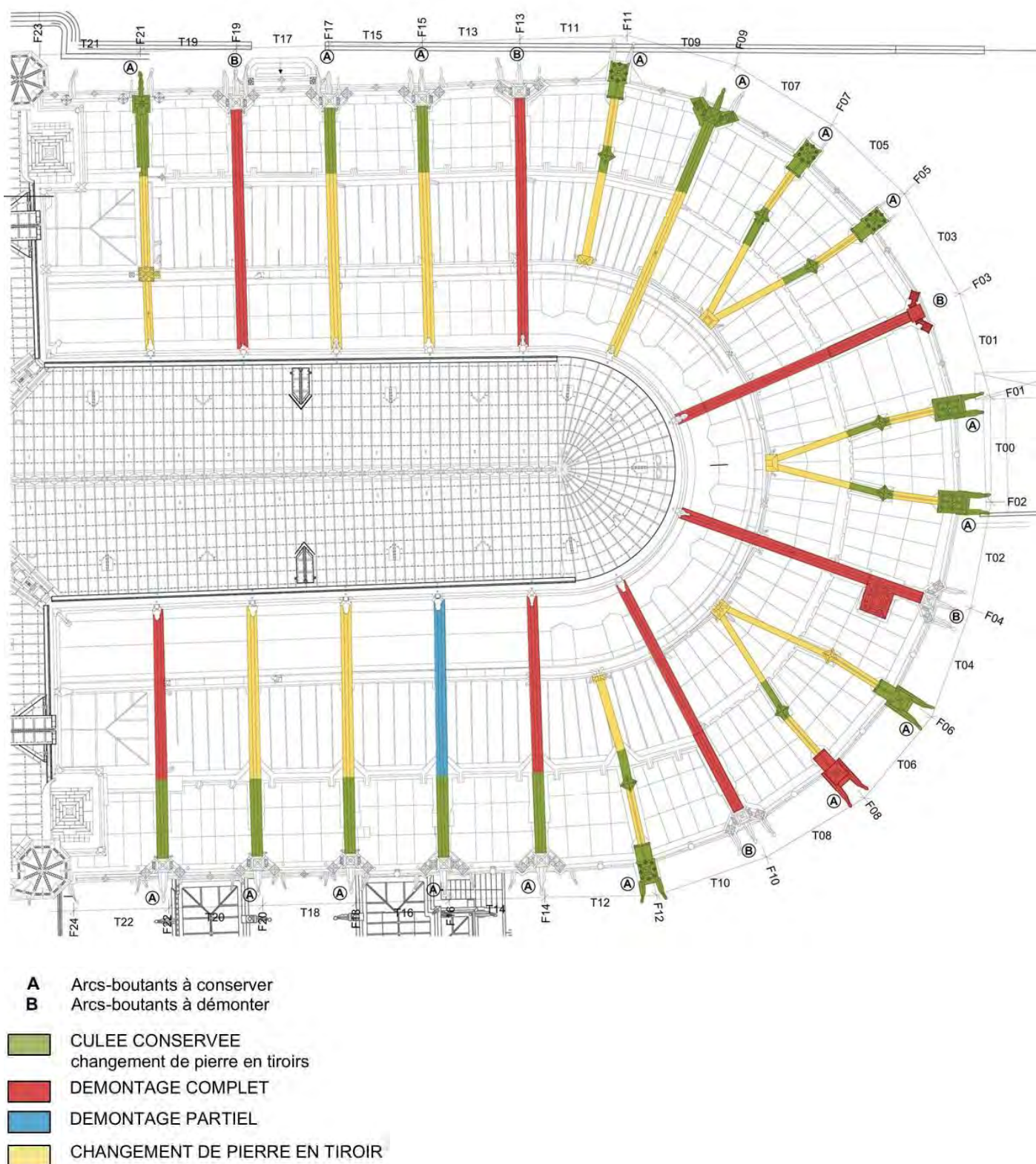


Figure 6 Arcs-boutants et culées concernées par des interventions (plan architecte du 15/01/2025)

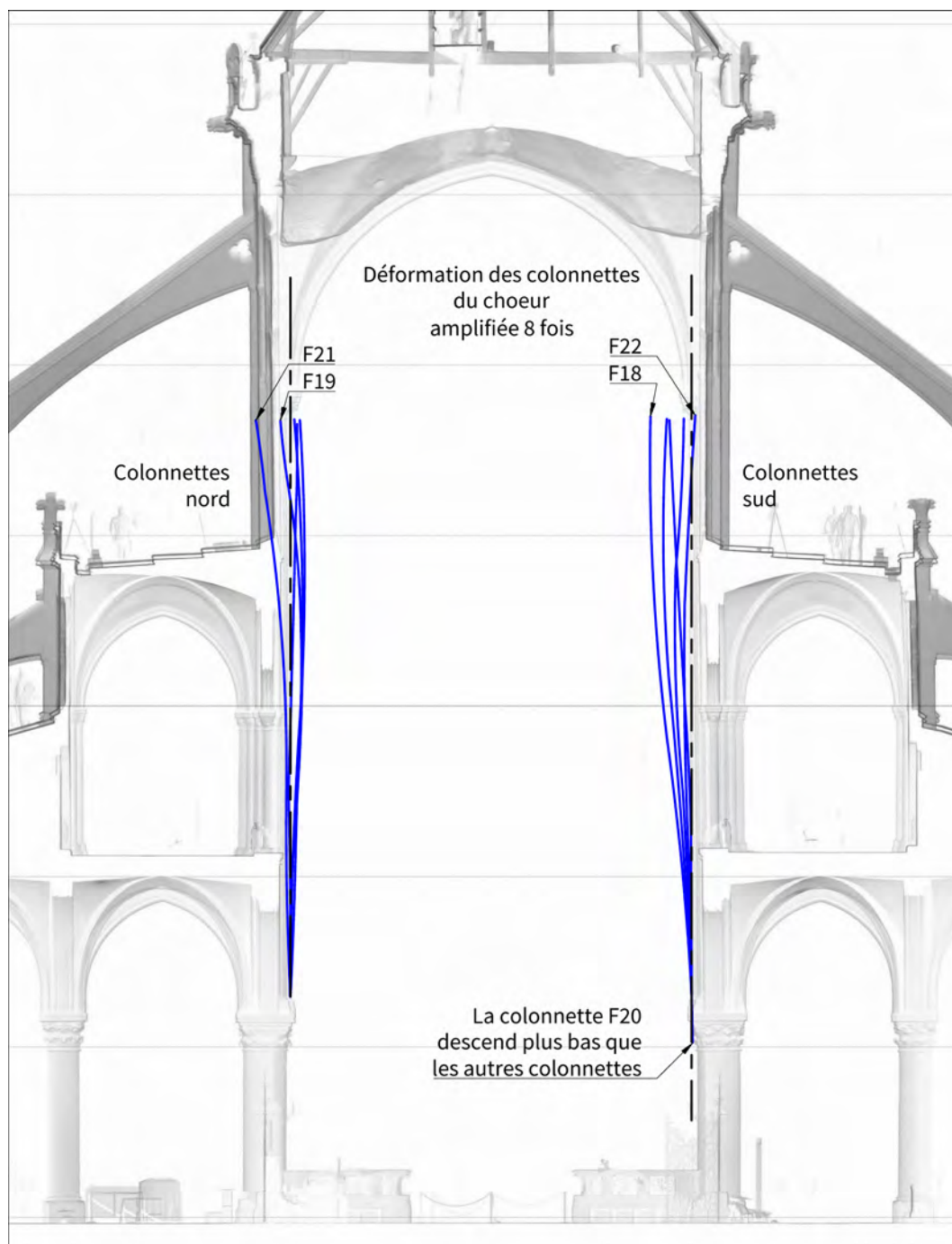
## 2.2 Déformations existantes

Nous rappelons dans cette partie les déformations existantes de la cathédrale, à prendre en compte dans le cadre de la surveillance qui accompagnera l'opération de restauration des arcs-boutants.

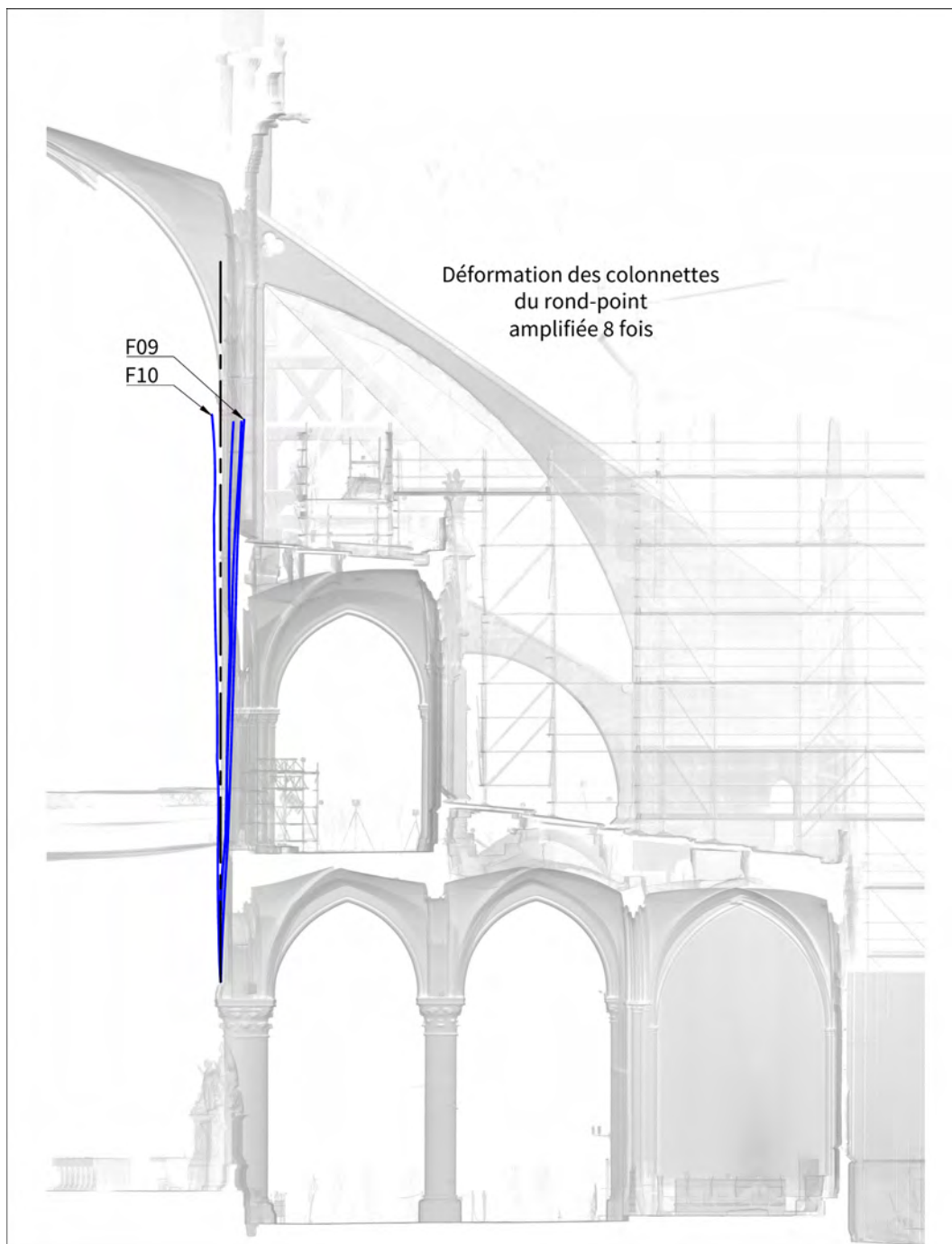
Ces informations sont tirées du Rapport Bestrema « Paris - Cathédrale Notre-Dame - Etude géométrique » indice A du 06/10/2020 [RP01].

Les phénomènes principaux mis en lumière par le relevé des déformations apparues depuis la construction de la cathédrale sont pour le chœur :

- dans les travées droites
  - o le côté nord s'est relativement peu déformé, tandis que le côté sud a basculé vers l'intérieur
  - o une inflexion des déformations est nettement visible à mi-hauteur au droit des chapiteaux de la tribune ; ce phénomène est lié à la poussée des voûtes des tribunes combinée à celle des arcs surbaissés support de la couverture de la terrasse haute
- dans le rond-point
  - o les files ont globalement tendance à se déformer vers l'extérieur
  - o pas d'inflexion notable à mi-hauteur



*Figure 7 Coupe du chœur vers l'est, avec allure des déformations des colonnettes (amplification déformations : 8x)*



*Figure 8 Coupe du rond-point, avec allure des déformations des colonnettes (amplification déformations : 8x)*

*Les déformations mesurées en coupe sont reportées sur une représentation schématique des travées de la cathédrale pour mettre en lumière la tendance générale des mouvements.*



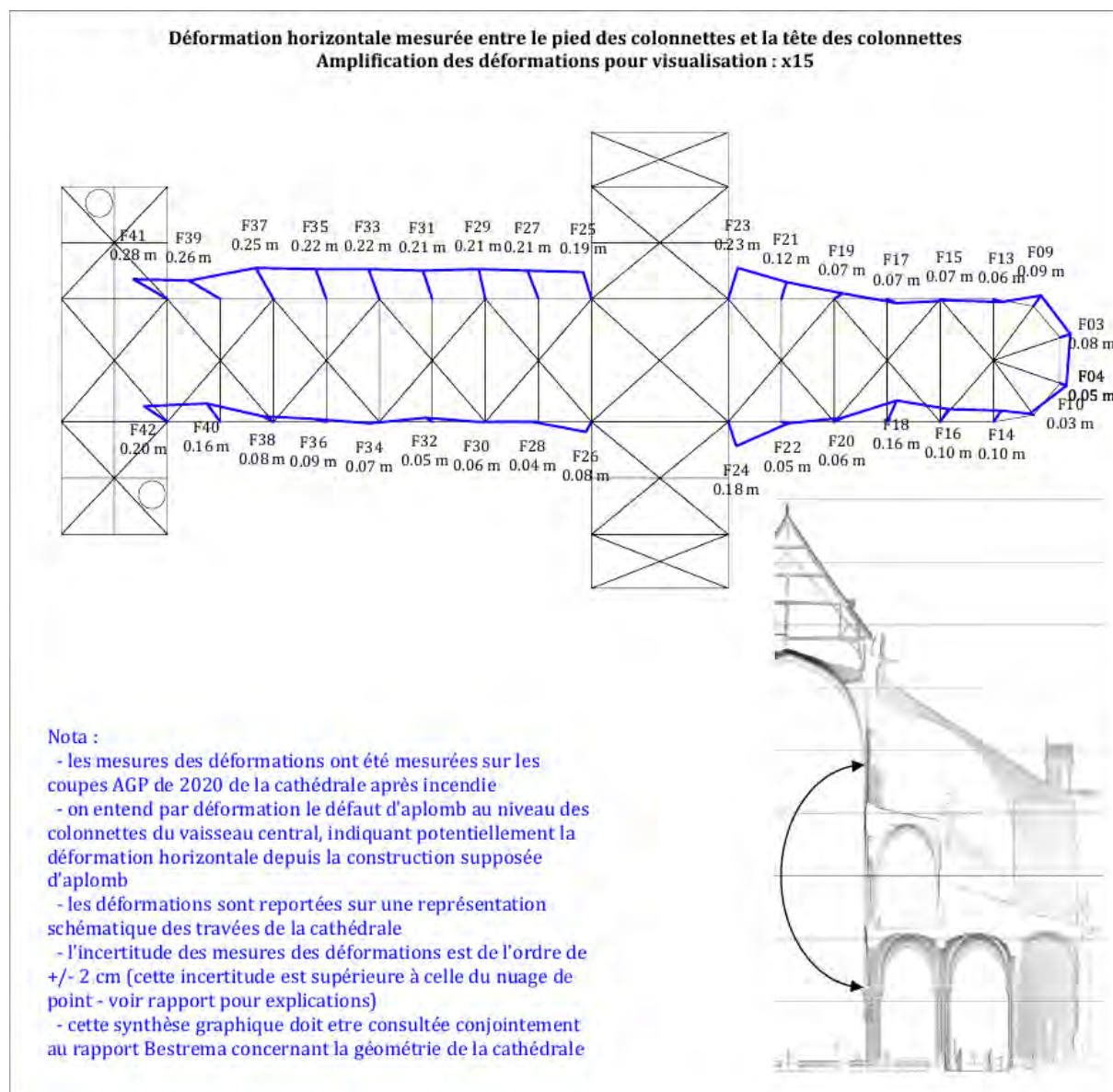


Figure 9 Plan de synthèse des déformations en tête des colonnettes

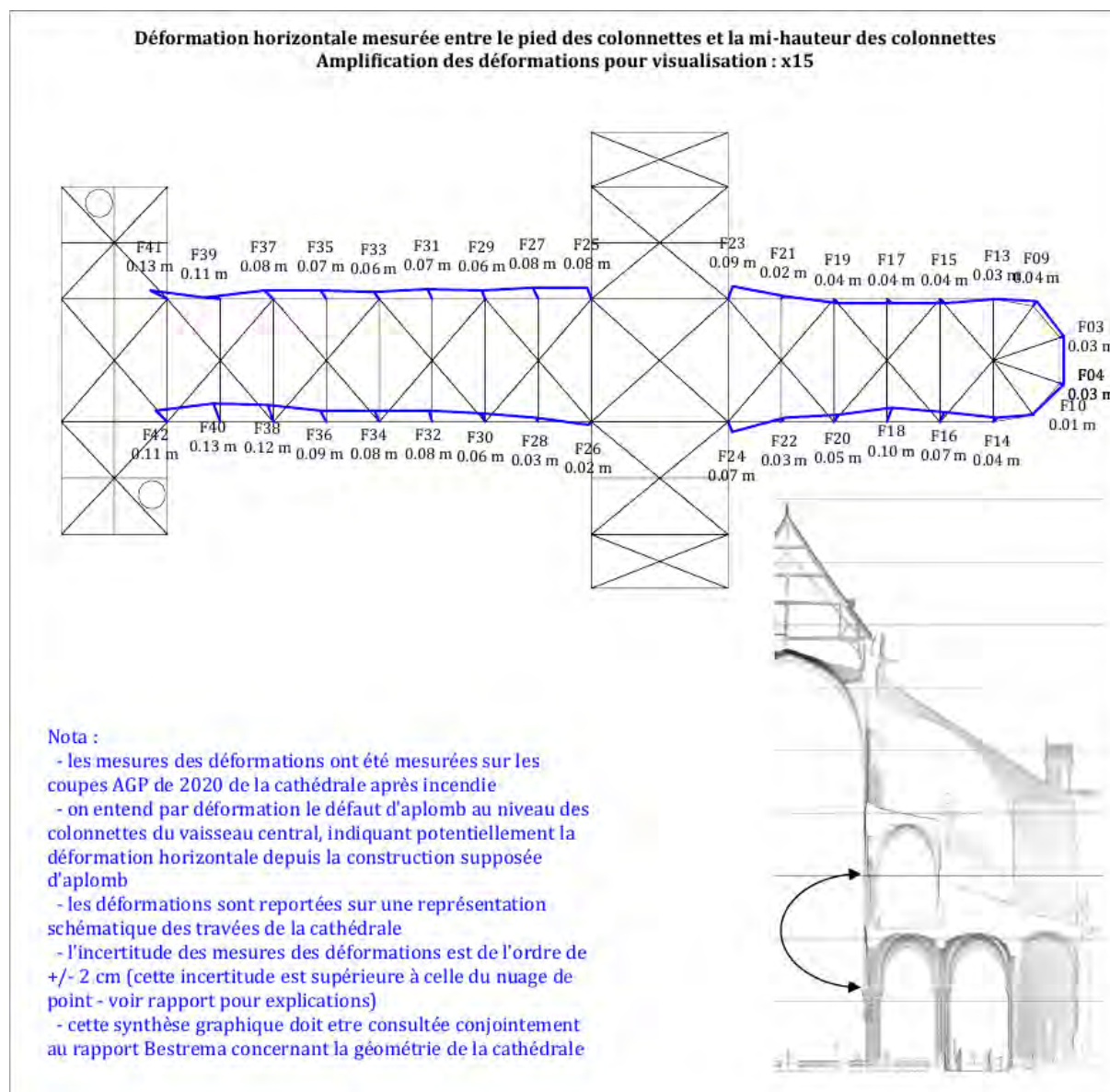


Figure 10 Plan de synthèse des déformations à mi-hauteur des colonnettes

## 2.3 Hypothèses de chargement

### 2.3.1 Introduction

Les hypothèses de chargement à prendre en compte pour le dimensionnement des échafaudages et la requalification du tablier et des cintres sont détaillées dans cette partie.

Pour chaque type d'effort (poussée des voûtes, poussée des arcs-boutants, efforts horizontal du vent), les sources utilisées sont données ainsi que leur exploitation pour établir les charges.

Il est demandé aux entreprises de travaux de se baser directement sur les valeurs de chargement à l'ELS et l'ELU. Le contexte de l'obtention de ces valeurs est donné uniquement à titre informatif pour contextualiser les valeurs.

### 2.3.2 Poussée des voûtes hautes

La source considérée pour la poussée des voûtes hautes est l'étude du groupe de travail (GT) structure du chantier Scientifique CNRS-Ministère de la Culture Notre-Dame. Cette étude est datée de novembre 2024 intitulée « *Évaluation Structurale des Voûtes Confortées du Chœur de Notre-Dame. Comparaison entre état initial et état post-incendie conforté.* »

L'étude du GT structure donne des poussées pour les piles fortes et les piles faibles relativement équivalentes (figure ci-dessous). On retient donc :

- à l'ELS :  $2 \times 65 \text{ kN} = 130 \text{ kN}$ 
  - o car les calculs sont conduits par le GT structure sans coefficient de sécurité sur la masse volumique de la pierre, et donc les valeurs obtenues sont équivalents à celles de l'ELS
- à l'ELU :  $1,35 \times 130 = 175 \text{ kN}$

Nota : ces valeurs sont similaires à celles estimées par Studio Comes lors du diagnostic général de la cathédrale en 2020.

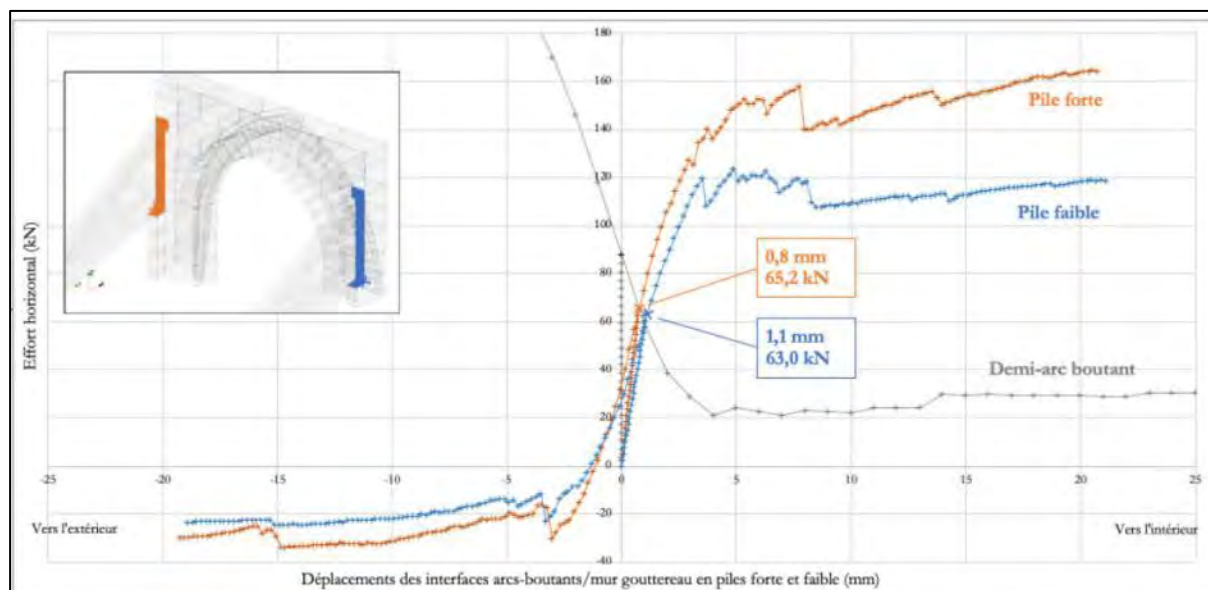


Figure 7 : Courbes poussée-déplacement horizontal associé de l'ensemble voûte-murs gouttereaux en pile forte et en pile faible (interfaces arcs-boutants/murs-gouttereaux) et courbe poussée-déplacement horizontal associé de l'arc-boutant. Les points d'intersection entre courbes correspondent aux couples poussée-déplacement à l'équilibre au niveau des piles forte et faible.

Figure 11 Extrait du rapport de novembre 2024 du groupe de travail structure, donnant la poussée des voûtes sur les arcs-boutants pour une demi travée en pile forte et en pile faible

### 2.3.3 Poussée des arcs-boutants supérieurs

La source considérée pour la poussée minimale et maximale des arcs-boutants est le rapport « Etude statique des arcs-boutants » de Bestrema daté du 20/05/2020. Les hypothèses utilisées dans ce rapport sont :

- Poids volumique moyen de la pierre :  $2000 \text{ kg/m}^3$
- Résistance admissible de la pierre :  $10 \text{ kg/cm}^2$  (hypothèse prudente)
- Étude de la stabilité propre de l'arc-boutant, sans considérer la question de la stabilité de la culée ou des voûtes (étude de l'arc-boutant seul).
- Les calculs sont menés avec la méthode des contraintes admissibles. Les résultats correspondent donc à des valeurs ELS.

Les poussées minimales et maximales sont données dans cette étude sous l'hypothèse d'une résistance admissible de la pierre des arcs de  $10 \text{ kg/cm}^2$  (hypothèse prudente pour les chargements à long terme). Cette hypothèse a peu d'influence sur la poussée minimale de l'arc, mais elle a une très forte influence sur la poussée maximale. La poussée maximale est donc également recalculée avec une résistance admissible de  $20 \text{ kg/cm}^2$ .

L'étude de 2020 donne, pour une résistance admissible de  $10 \text{ kg/cm}^2$  :

- à l'ELS : poussée minimale de 83kN et poussée maximale de 230kN
- à l'ELU : on considère un coefficient de passage de 1,35 pour passer des valeurs ELS à ELU

De plus, en faisant l'hypothèse d'une hypothèse de résistance admissible de la pierre des arcs de 20 kg/cm<sup>2</sup> (au lieu de 10 kg/cm<sup>2</sup>), la poussée maximale est de **460kN** à l'ELS (calcul complémentaire Bestrema décembre 2024, voir figures ci-dessous).

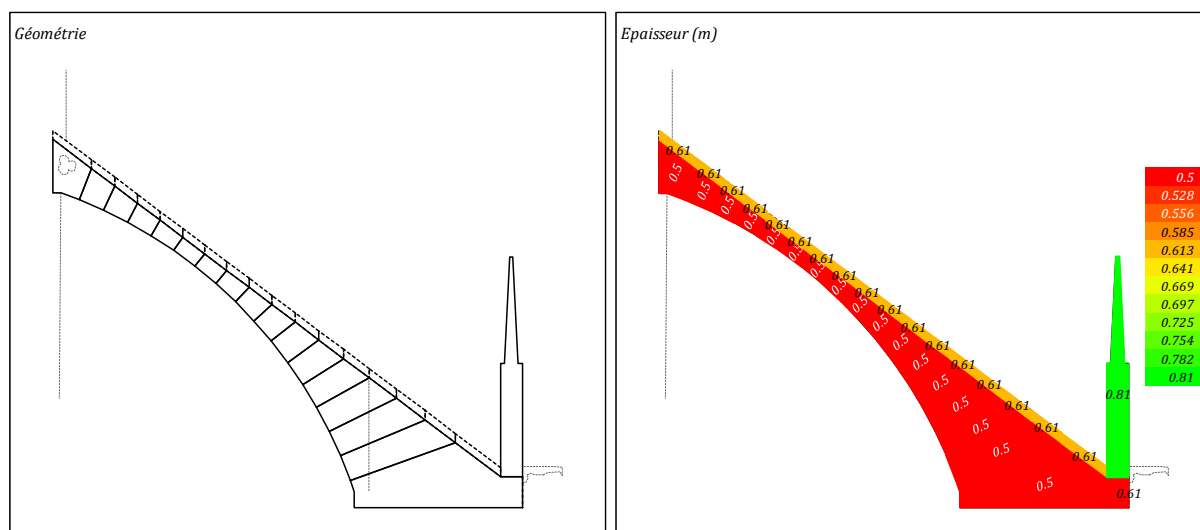


Figure 12 Géométrie et épaisseur considérée pour les calculs de la ligne des pressions

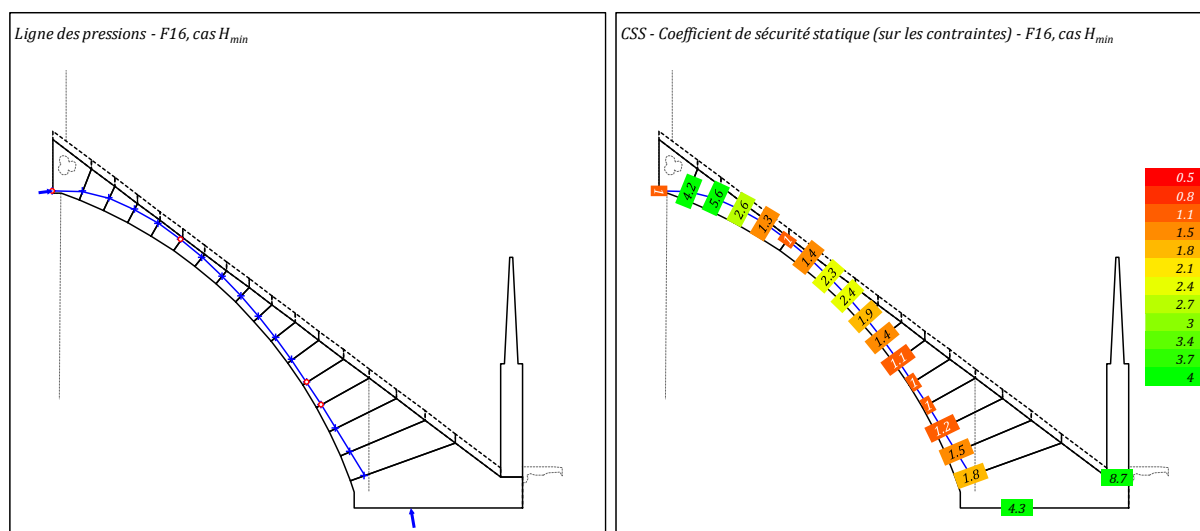


Figure 13 Ligne de pression correspondant à la poussée minimale donnant un coefficient de sécurité statique de 1,0 (contrainte maximale atteinte : 10kg/cm<sup>2</sup>) ; calcul tiré de l'étude de 2020



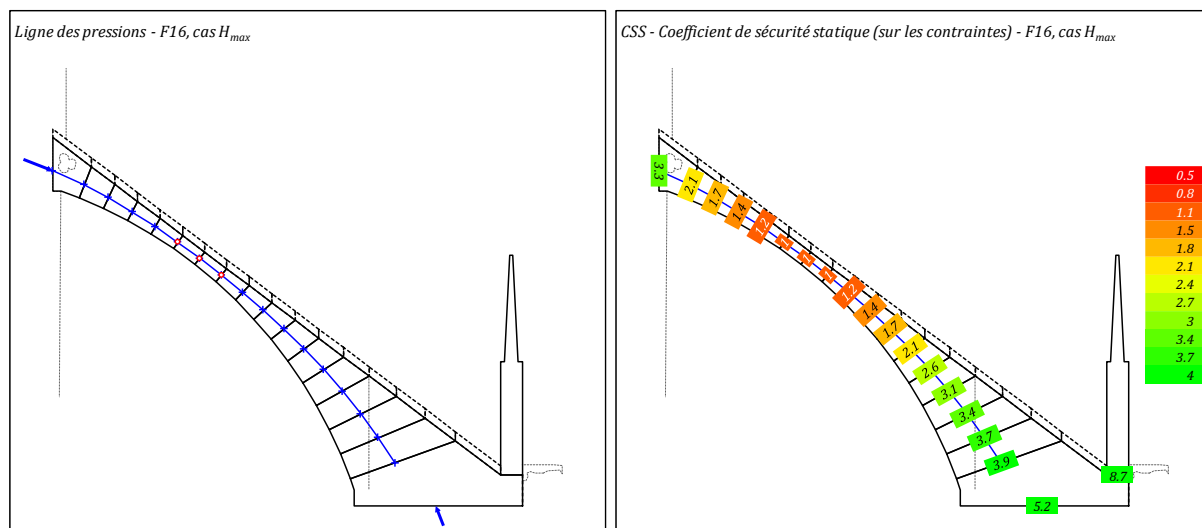


Figure 14 Ligne de pression correspondant à la poussée maximale donnant un coefficient de sécurité statique de 1,0 (contrainte maximale atteinte :  $10\text{kg/cm}^2$ ) ; calcul tiré de l'étude de 2020

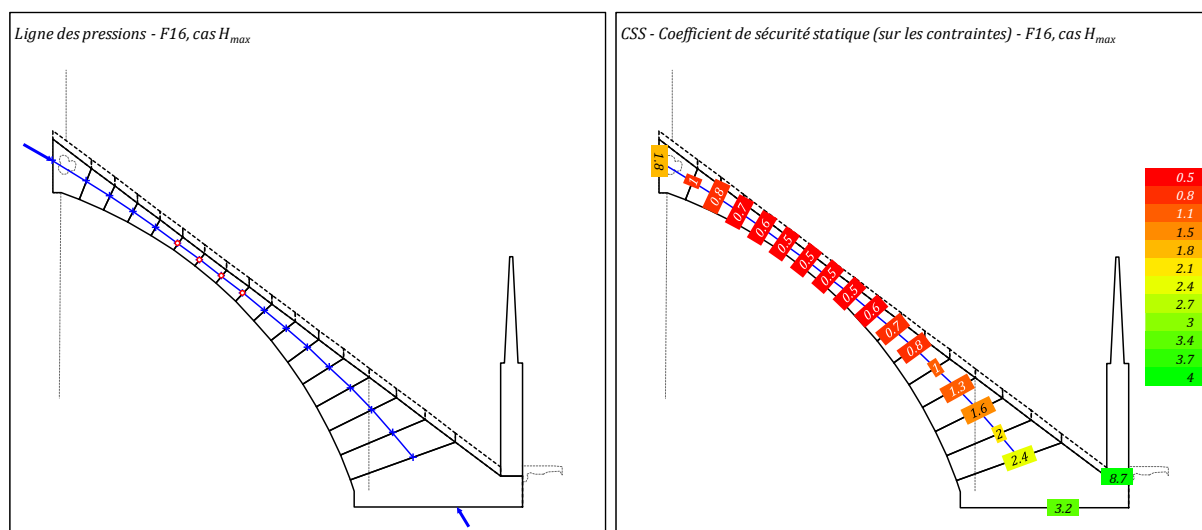


Figure 15 Ligne de pression correspondant à la poussée maximale donnant un coefficient de sécurité statique de 0,5 (contrainte maximale atteinte :  $20\text{kg/cm}^2$ ) ; calcul complémentaire Bestrema décembre 2024

### 2.3.4 Poussée des arcs-boutants inférieurs

La poussée des arcs-boutants inférieurs qui contrecarrent la poussée des voûtes des tribunes est d'environ  $4.000\text{ daN}=40\text{ kN}$ .

Pour mémoire, dans cette zone deux types de structure appliquent des poussées dans la direction des arcs-boutants. Les voûtes des tribunes elles-mêmes, et les arcs surbaissés qui supportent la couverture des tribunes (les terrasses hautes en dalle de pierre). Des tirants métalliques ont été ajoutés par Viollet-le-Duc au XIXe siècle lors de la construction des couvertures en dalle de pierre pour reprendre la poussée des arcs qui portent les dalles de pierre.



Figure 16 Arcs surbaissés portant la terrasse et tirants métallique reprenant leur poussée (l'extrados de la voûte visible est celui des voûtes des tribunes)

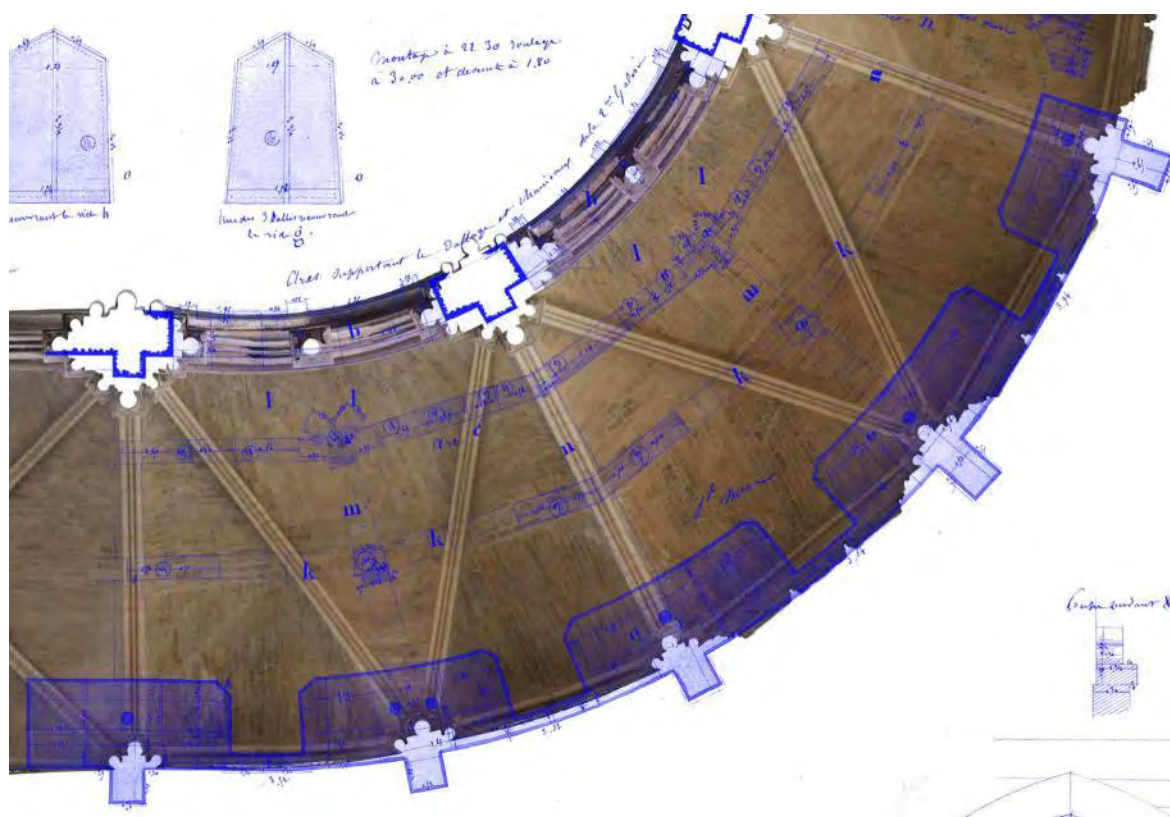


Figure 17 Superposition des plans du XIXe des arcs surbaissés portant la terrasse sur une orthoimage des voûtes des tribunes du chœur

### 2.3.5 Efforts de vent

#### Sources

Les efforts de vent sur le chœur sont tirés des résultats de l'étude « Exposition au vent de la Cathédrale Notre-Dame de Paris » réalisée par le CTSB (référence : 2022 EN-CAPE 21.040 C – V2). L'étude du CSTB a été réalisée en deux phases :

- une simulation numérique qui évalue les vitesses stationnaires du vent sur l'ensemble de la cathédrale en tenant compte de son environnement. Le résultat premier de cette étude est la cartographie des vitesses et pressions moyennes du vent sur la cathédrale. De ces valeurs moyennes sont déduites les vitesses et pressions de pointe en se basant sur les formules de l'Eurocode.
  - o Cette simulation numérique fournit donc les pressions de pointe du vent en tout point de la cathédrale. Elle est utilisée dans la suite.
- Une simulation expérimentale en soufflerie à couche limite atmosphérique, qui permet la mesure de l'évolution dans le temps de la pression du vent au niveau des points équipés de capteurs. Les toitures, la flèche et les roses ont été équipés de capteurs (le reste de la cathédrale n'a pas été instrumentée). L'évolution dans le temps des pressions est post-traitée numériquement par le CSTB pour obtenir les valeurs moyennes et les valeurs de pointes à considérer
  - o Dans la zone qui intéresse cette étude, cette simulation expérimentale en soufflerie fournit donc les pressions de pointe du vent uniquement sur la toiture. Elle ne peut pas être utilisée directement ici.

Sur ces cartographies, l'échelle des couleurs est :

- compression sur toiture en rouge (pression extérieure positive)
- soulèvement (arrachement) en bleu (pression extérieure négative)

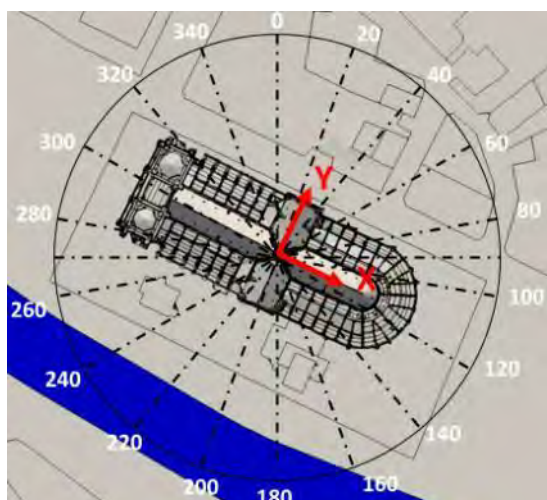


Figure 18 Rose des vents, extrait du rapport du CSTB



localisation	z(m)	Vitesse moyenne (m/s)	Vitesse moyenne (km/h)	Pression dynamique moyenne (Pa)	I(%)	Vitesse de pointe (m/s)	Vitesse de pointe (km/h)	Pression dynamique de pointe (Pa)
Référence Météo	10	12.9	47	103	37	29.8	107	369
Faitage	53	22.3	80	305	22	35.3	127	765
6e Enrayure de la Fleche	66	23.6	85	340	20	36.7	132	825
Sommet de la Fleche	101	26.0	93	413	19	39.3	142	947

Tableau 2-2 - Vitesse et Pression dynamique pour différentes altitudes clés (le niveau 0 est la Seine, le parvis est 8m au-dessus)

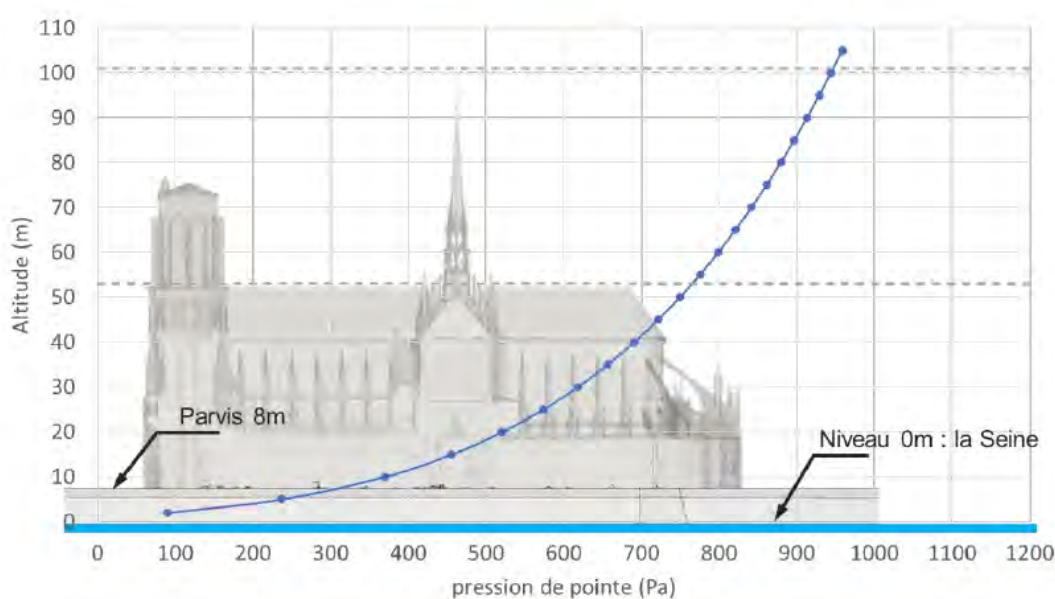


Figure 2-2 - Evolution de la pression de pointe en fonction de l'altitude

Figure 19 Modèle de vent pour la cathédrale, extrait du rapport du CSTB

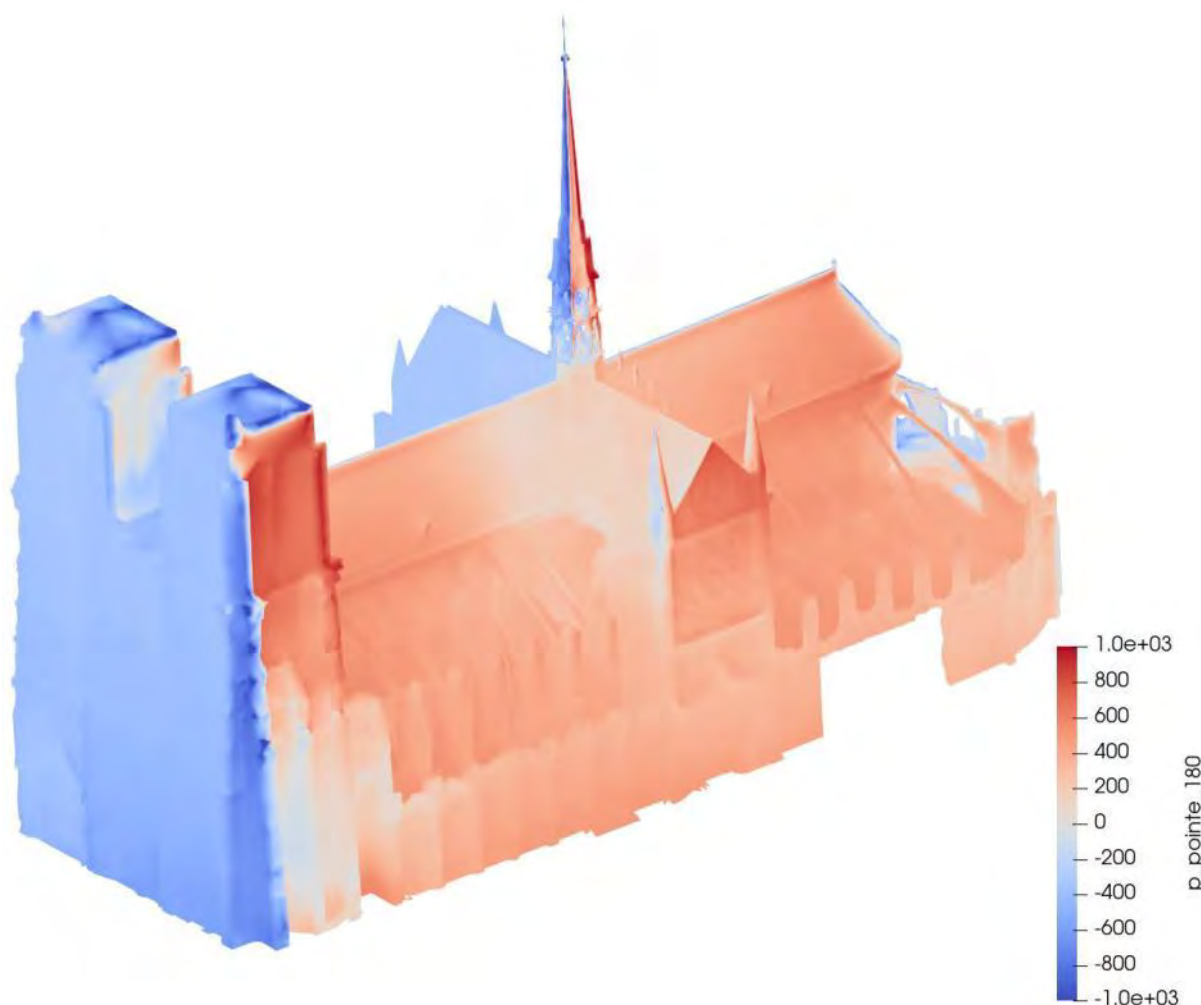


Figure 20 Exemple d'une des répartitions des pressions extérieures de pointes connues, ici pour un vent avec un angle d'incidence de  $180^\circ$

### **Intégration des pressions du vent**

Le repère cartésien xyz utilisé dans la suite est donné sur la Figure 22 (repère différent du repère de base utilisé par le CSTB).

L'axe x est l'axe longitudinal de la cathédrale.

L'axe y est l'axe transversal de la cathédrale (parallèle aux arcs-boutants).

Dans la suite, nous intégrons les pressions du vent sur les toitures et les murs dans la zone du chœur pour trouver :

- la force horizontale maximale  $F_y$  dirigée dans l'axe des arcs-boutants des travées droites. Pour cela, les pressions *extérieures* sont intégrées sur 4 travées de 5,80m, puis divisées par 4.
- la force horizontale maximale  $F_x$  dirigée dans l'axe longitudinal de la cathédrale vers l'extérieur de cette dernière. Pour cela, la pression extérieure et une surpression intérieure correspondant à  $c_{pi}=0,2$  est intégrée.

Nota sur la région d'intégration :

- concernant la hauteur
  - o toute la toiture est considérée, ainsi que 50% de la hauteur du mur entre arc-boutant et dalles des terrasses
- concernant la localisation :
  - o pour les travées droites, on considère 4 travées – voir Figure 22
  - o pour le chevet, on considère uniquement le rond-point – voir Figure 23
    - Cette hypothèse n'est pas du tout triviale. En effet, il existe une indétermination entre les efforts horizontaux du vent qui peuvent être repris ou bien par les arcs-boutants du chevet ou bien les murs des travées droites. Ainsi, les efforts de vent peuvent être rapportés depuis le chevet vers les travées droites via les chainages métalliques et via le ceinturage procuré par les voliges de la charpente. De plus les efforts de vent liés au frottement (vent parallèle au faitage) ne sont pas pris en compte directement par les cartographies des pressions.
    - Il apparaît raisonnable de considérer comme force représentative du vent celle générée par les pressions s'appliquant directement dans la zone du chevet, et de postuler que l'effet des pressions s'appliquant par ailleurs (notamment frottement du vent parallèle au faitage) est repris par les travées droites.

Nota sur les pressions intérieures :

- dans les travées droites, l'intégration des pressions *intérieures* est sans intérêt ici puisqu'elle donne une force horizontale nulle. En effet, en cas de surpression intérieure, la force dirigée vers l'extérieur sur l'arc-boutant sous le vent est compensée par la force dirigée vers l'extérieur sur l'arc-boutant sous le vent, cette dernière diminuant d'autant l'effort de vent transmis par les voûtes entre le côté « au vent » et le côté « sous le vent ».
- au niveau du chevet, il convient d'ajouter la surpression intérieure de pointe à la pression extérieure pour trouver la force totale maximale vers l'extérieur, soit  $-c_{pi} \times q_p = -0,2 \times 765 = -153 \text{ Pa}$ .

Résultats :

- Effort de vent maximal ( $F_y$ ) dans les travées droites :
  - o 115kN ELS par arc-boutant
  - o Cette valeur est atteinte pour un angle d'incidence de  $180^\circ$  (dans le repère de l'étude en soufflerie)
- Effort de vent maximal ( $F_x$ ) dans le chevet :
  - o 136kN ELS pour l'ensemble du chevet

- Cette valeur est atteinte pour un angle d'incidence de 220° (dans le repère de l'étude en soufflerie)
- En première approche, la force à l'ELS dans les...
  - arcs-boutants centraux de l'abside F03 et F04 :  $136/2=68\text{kN}$
  - arcs-boutants latéraux de l'abside F09 et F10 :  $(68+115)/2=92\text{kN}$

– Valeurs ELU : prendre  $1,5 \times \text{ELS}$

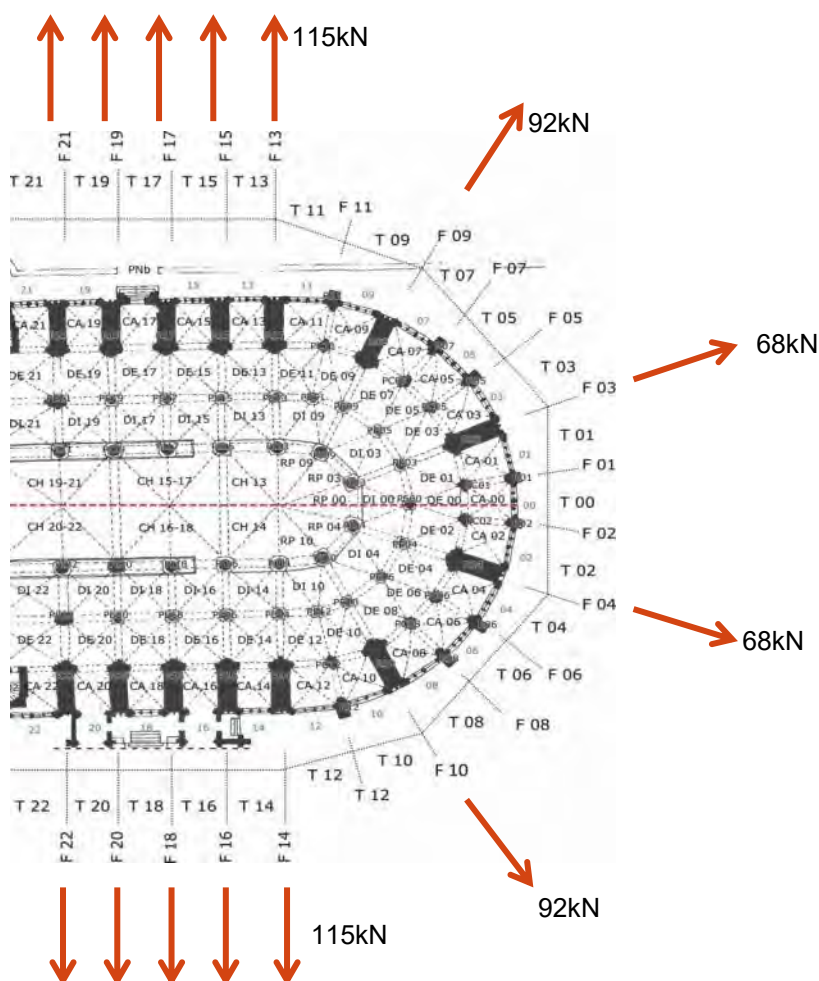
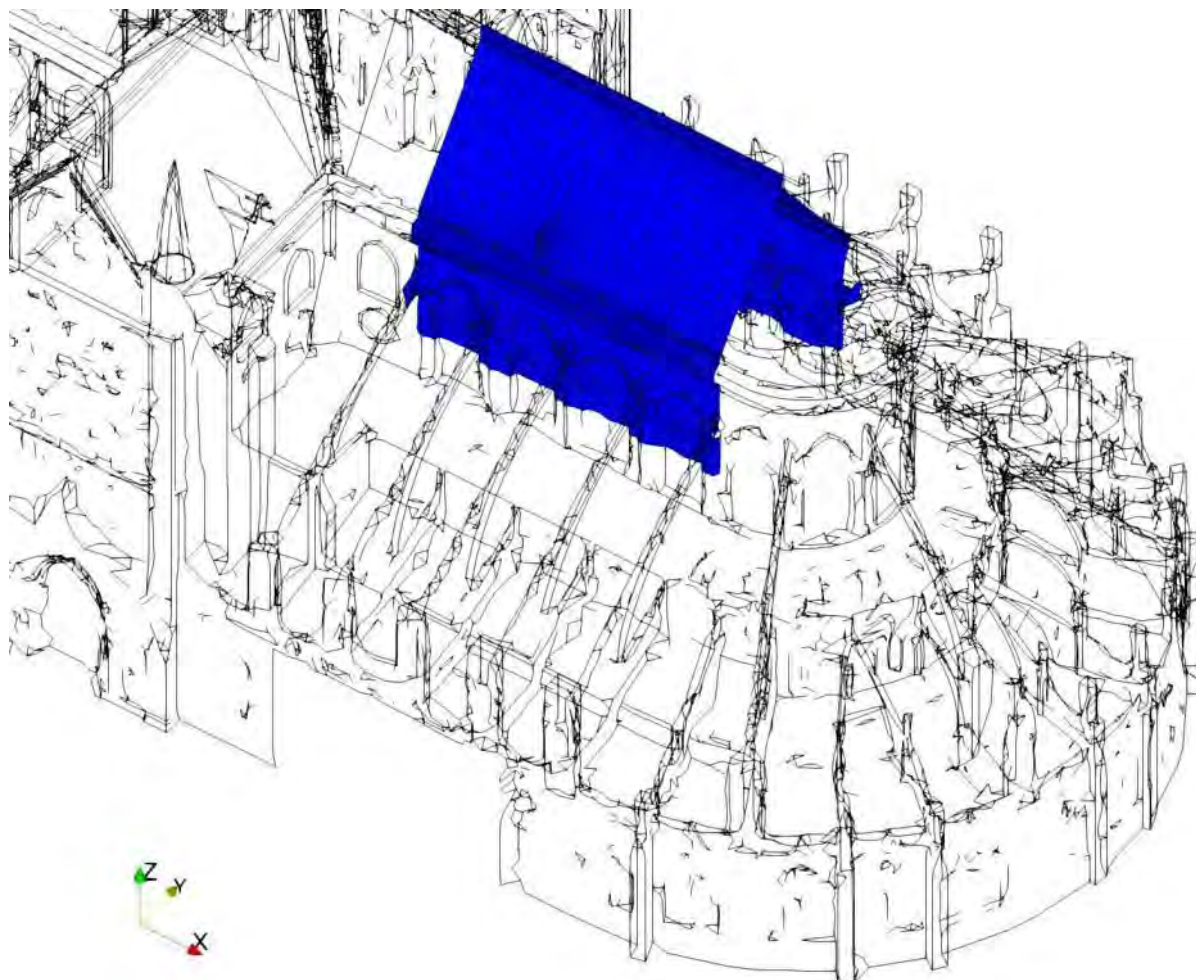
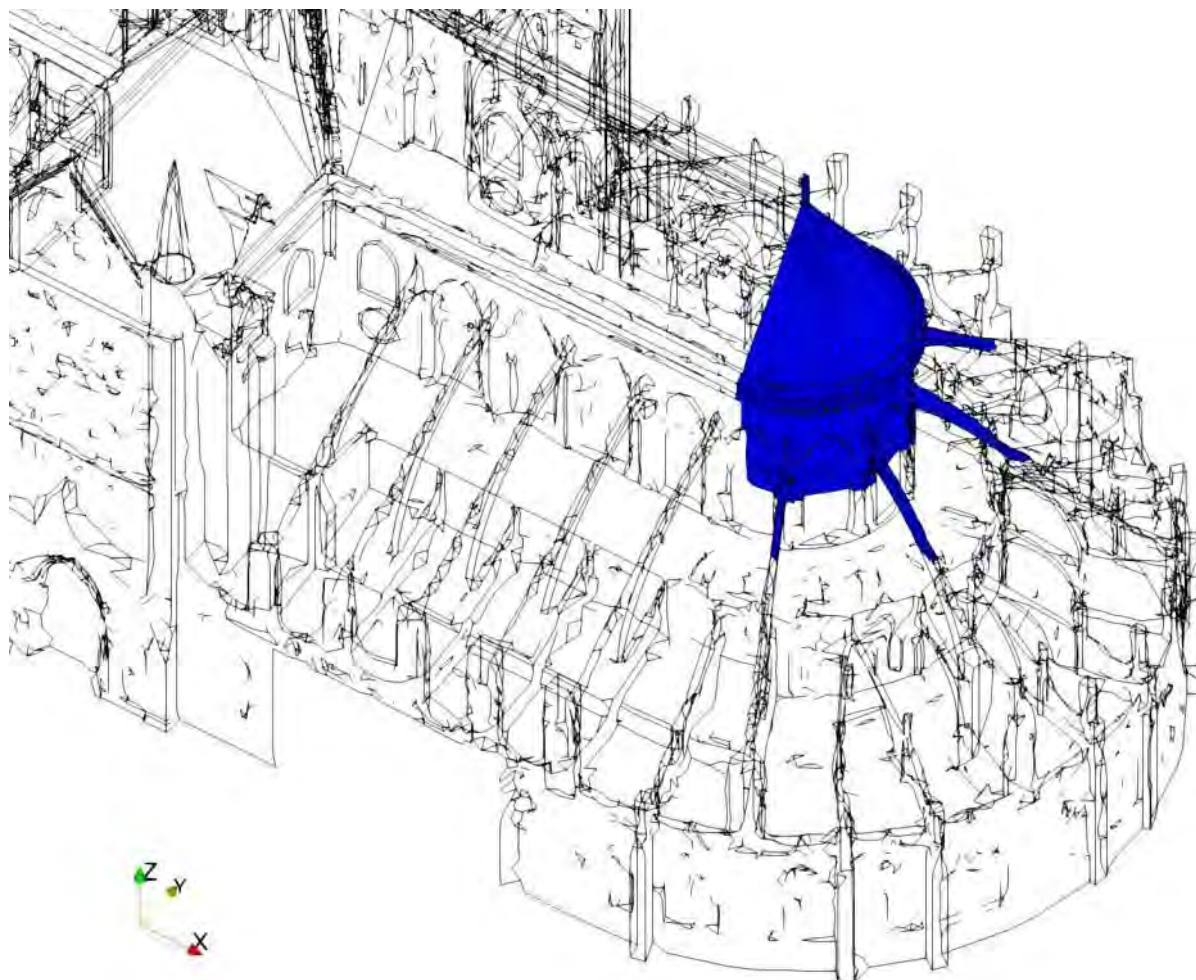


Figure 21 Effort de vent maximaux à l'ELS dans l'axe des arcs-boutants, avant application des coefficients réducteurs



*Figure 22 Zone retenue pour l'intégration des pressions sur les travées droites (4 travées droites)*





*Figure 23 Zone retenue pour l'intégration des pressions sur le chevet*

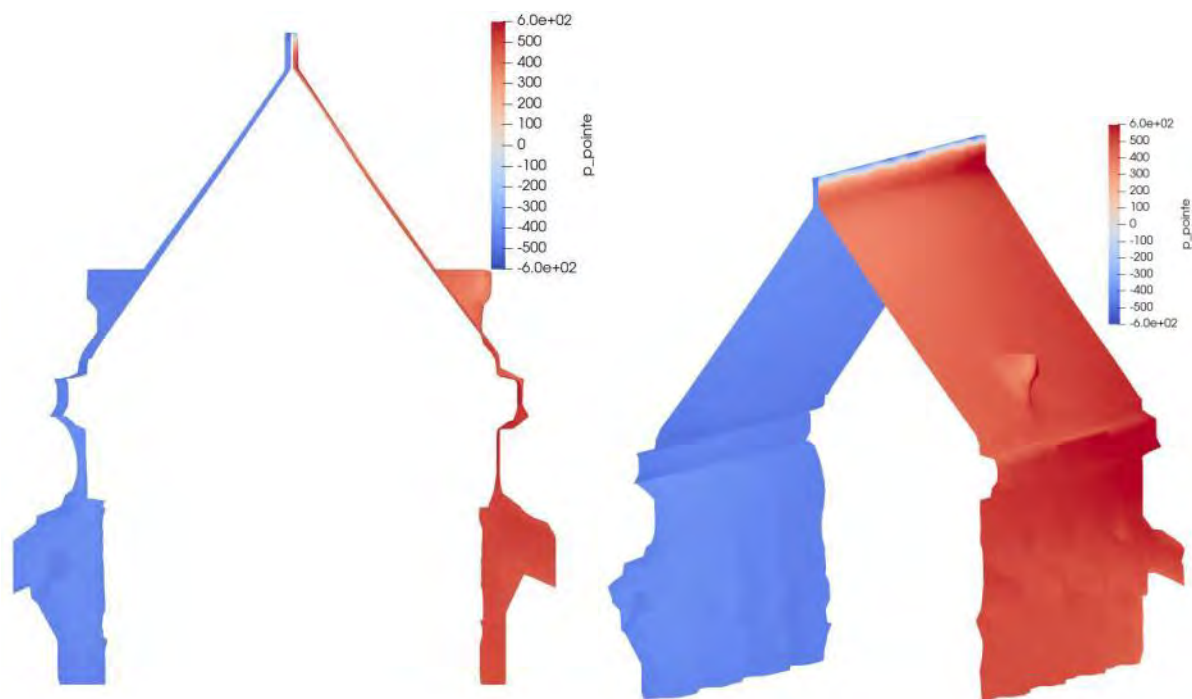


Figure 24 Pression extérieure pour l'angle d'incidence dimensionnant ( $180^\circ$ ) sur la zone retenue pour l'intégration des travées droites

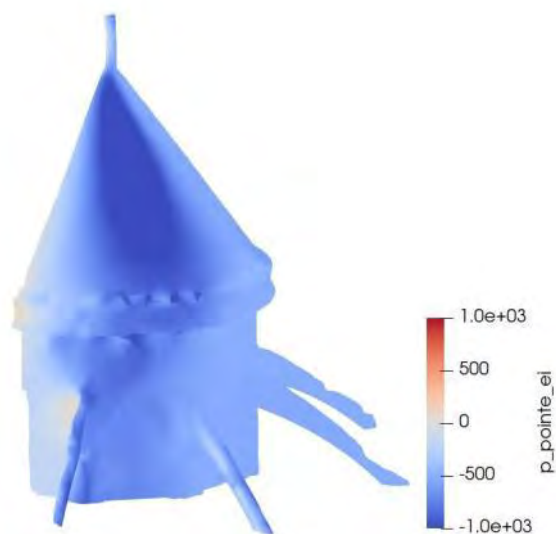


Figure 25 Pression nette pour l'angle d'incidence dimensionnant ( $220^\circ$ ) sur la zone retenue pour l'intégration du chevet

Pour mémoire, la méthode utilisée avec le logiciel Paraview est la suivante :

- Importation de la cartographie des pressions extérieurs aux nœuds  
 pression\_tt\_dir\_noeud.vtm
- Application des filtres successifs :
  - o « transform » pour que l'axe y corresponde à l'axe des arcs-boutants

- « GenerateSurfaceNormals » pour calculer les aires et surfaces
- « Clip » pour ne conserver que 4 travées du chœur (ou le chevet), et en supprimant les structures situées sous l'altimétrie  $z=32\text{m}$
- « Calculator » pour
  - extraire la pression correspondant à l'angle d'incidence en cours d'étude
    - ex travée droite :  $p_{\text{pointe}} = p_{\text{pointe\_180}}$
    - ex chevet :  $p_{\text{pointe}} = p_{\text{pointe\_180}} - c_{pi} \times q_p$
  - calculer la force locale en kN ( $-Normals \times p_{\text{pointe}} / 1000$ )
- « Integrate Variables » pour intégrer toutes les forces locales
- Relever la force du vent correspondant à l'angle d'incidence en cours d'étude
- Faire varier les angles d'incidence pour trouver l'angle d'incidence dimensionnant

### ***Nota sur efforts de vent sur les murs « au vent »***

On considère dans ce qui précède que la pression du vent sur les murs exposés au vent ("au vent") est transmise via les voûtes vers l'arc-boutant situé "sous le vent"

### ***Prise en compte de la durée de projet***

Pour toutes les valeurs données jusqu'à présent, la période de retour des vitesses de vent considérée jusqu'ici est de 50 ans (vent cinquantennal). La durée des travaux est de 3 ans, la dépose complète d'une culée ne représentant qu'une fraction de ce temps.

Nous proposons de retenir une période de retour de 5 ans pour (vent quinquennal) pour déterminer la vitesse du vent à prendre en compte dans le cadre de l'intervention sur les arcs-boutants.

Sous cette hypothèse,

- la vitesse de vent se réduit à  $0,88 \times$  la vitesse du vent cinquantennal
- les pressions (et efforts résultant) se réduisent à  $0,88^2 = 0,77 \times$  la pression du vent cinquantennal



**NOTE**  
Le tableau 4.5(NA) donne le coefficient de probabilité  $c_{prob}$  en fonction de la probabilité  $p$  de dépassement au cours d'une année, ou de son inverse qui est la période de retour.

Probabilité $p$ de dépassement	0,02	0,04	0,10	0,20	0,50
Période de retour (années)	50	25	10	5	2
$c_{prob}$	1,00	0,97	0,92	0,88	0,82

**Tableau 4.5(NA) Coefficient de probabilité**

Figure 26 Extrait du tableau de l'annexe nationale de l'eurocode 1 sur les efforts de vent, donnant le coefficient de probabilité  $c_{prob}$  en fonction de la période de retour considérée

### **Prise en compte de la décorrélation des pressions maximales**

Les calculs qui précèdent intègrent l'effet des pressions maximales qui peuvent se produire sur une travée. Or ces pressions maximales ne vont pas se produire simultanément en tout point des murs et des toitures. La norme prévoit la prise en compte de ce phénomène avec le coefficient  $CsCd$ .

En l'absence de méthode de calcul du coefficient,  $CsCd$  adaptée aux structures telles que les arcs-boutants et les voûtes de la cathédrale, nous retenons un facteur multiplicatif  $CsCd = 0,90$  pour tenir compte forfaitairement de la décorrélation des pressions maximales.

### **Bilan des efforts vent**

**Les efforts finaux à prendre en compte pour les calculs sont donc les valeurs de la Figure 21 multipliés par le facteur  $c_{prob}^2 \times CsCd = 0,77 \times 0,90 = 0,69$**

### **2.3.6 Bilan des hypothèses de chargement**

Ainsi, les actions extérieures qui agiront sur les ouvrages provisoires sont, à titre indicatif pour les calculs, les suivantes. Ces valeurs sont déduites de l'ensemble des résultats des différents modèles de calcul créés lors des phases de diagnostic et du Consortium des Universités qui ont étudié la stabilité des voûtes de Notre-Dame.

#### **Forces agissant sur les côtés nord et sud du chœur (travées droites) :**

Poussée des voûtes:      ELS = 130 kN  
    ELU =  $130 \times 1.35 = 175,5$  kN  
 Poussée du vent:      ELS =  $115 \text{ kN} \times 0.77 (C_{prob}, T=5 \text{ ans}) \times 0.9 = 80$  kN  
    ELU =  $80 \times 1.5 = 120$  kN

Poussées des arcs-boutants inférieurs qui contrebutent les terrasses hautes  
    ELU = **54 kN**

#### **Forces agissant sur l'abside :**

Poussée des voûtes:      ELU = **43 kN**

Poussées des arcs-boutants inférieurs qui contrebutent les terrasses hautes

ELU = **54 kN**

Poussée du vent :

F9 et F10 ELU = **95 kN**

F3 et F4 ELU = **70 kN**

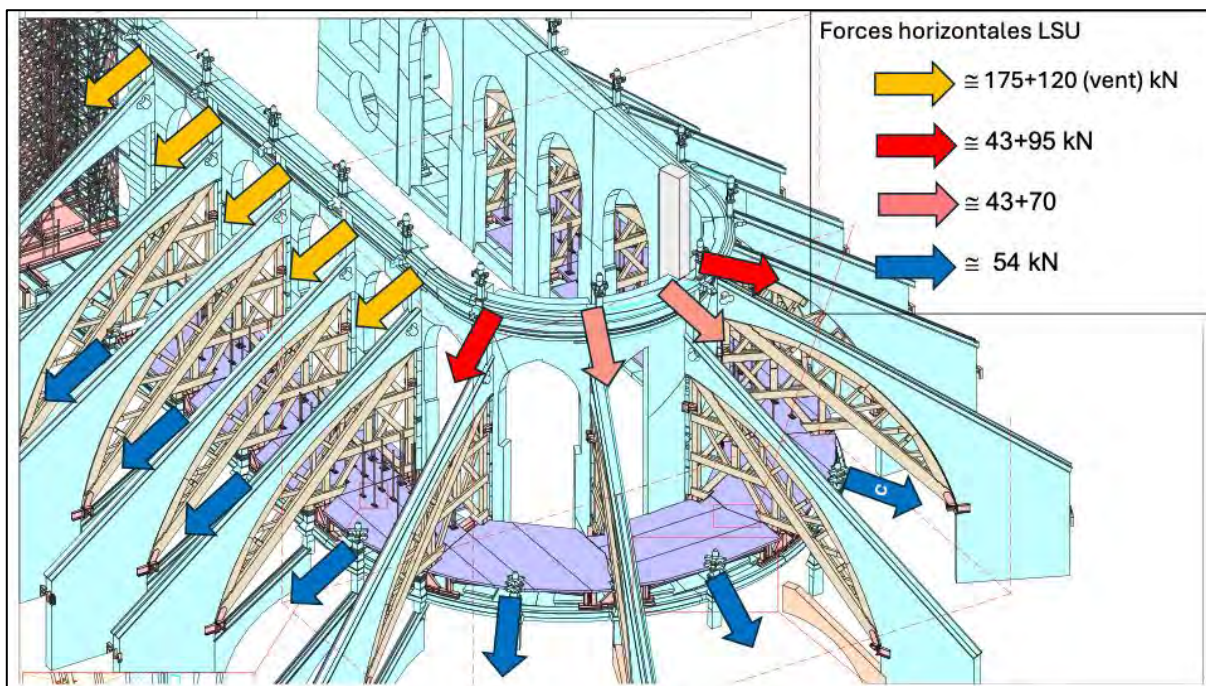


Figure 27 Actions extérieures sur les structures provisoires

### 3 Préconisations techniques

#### 3.1 Enjeux

Les enjeux de l'intervention sont les suivants :

- remplacer les pierres dégradées identifiées par architectes
- assurer pendant ce remplacement la stabilité de la cathédrale
- assurer par la mise en charge des étalements et le contrôle des déplacements des déformations minimales aux différents ouvrages adjacents (autres arcs-boutants et culées, voûtes du vaisseau central, voûtes des tribunes, murs gouttereaux, murs des tribunes...)

Les objectifs fixés par les architectes pour la définition de l'intervention sont :

- pas de structures à l'intérieur de la cathédrale qui sera ouverte aux visiteurs
  - o pour cette raison les solutions du type tirant-bouton à l'intérieur de l'édifice sont exclues
- pas de structures en dehors de l'emprise de la cathédrale
  - o pour cette raison, les solutions nécessitant des renforts des culées par contrefiches situées au niveau du sol sont exclues

#### 3.2 Arcs-boutants supérieurs

Les arcs-boutants supérieurs nécessitent une méthodologie spécifique d'intervention, qui est détaillée dans la partie suivante (partie 4)

#### 3.3 Arcs-boutants inférieurs

Le projet prévoit également le démantèlement et la reconstruction de certains arcs-boutants inférieurs, qui contrebutent la terrasse haute (voûtes des tribunes).

Compte tenu de la modeste poussée de ces voûtes (environ 4 000 daN=40 kN à l'ELS), deux scénarios peuvent se produire.

(1) Si le démontage de l'arc ne concerne pas la culée, dont la maçonnerie conserve une bonne cohésion, le cintre lui-même peut être utilisée pour transférer la poussée sur la culée (Figure 28 à gauche). Le cintre doit être ancré et avoir des dimensions adéquates.

→ Il s'agit du cas général

(2) Si la cohésion de la maçonnerie de la culée est altérée suite au démontage, il est nécessaire de disposer des butons inclinés comme indiqué sur la Figure 28 à droite.

→ Ce cas n'est pas prévu a priori, cette solution est donnée afin d'anticiper un cas particulier qui pourrait se produire sur chantier

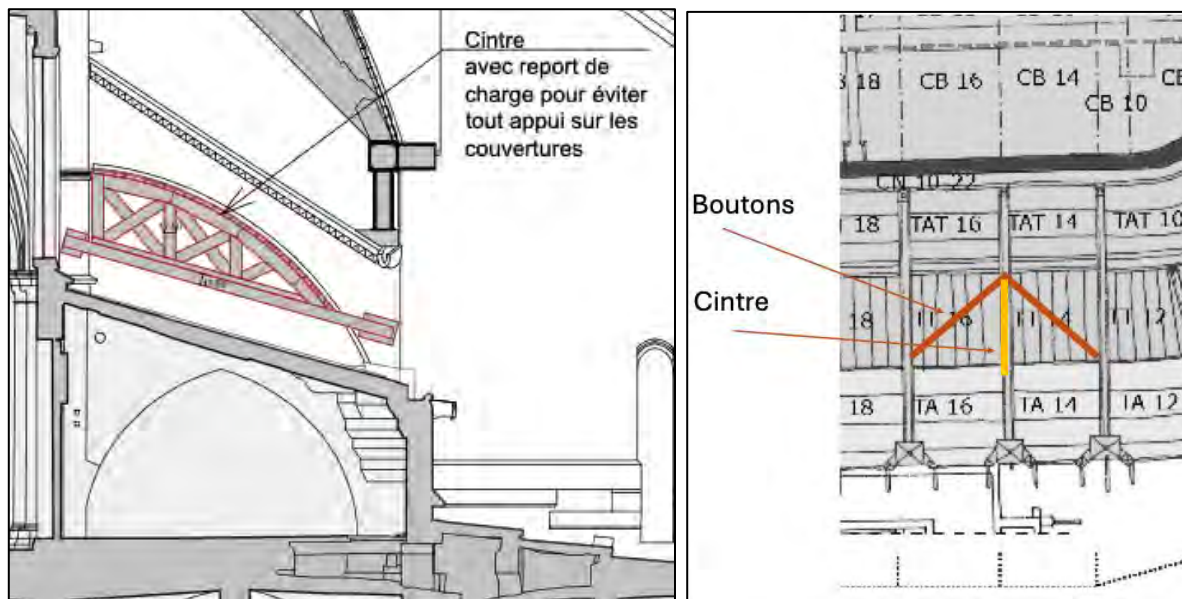


Figure 28 : A gauche le cintre nécessaire au démontage et au remontage des arcs-boutants inférieurs. A droite le schéma des boutons inclinées qu'il faudra rajouter si la culée n'a plus la résistance nécessaire.

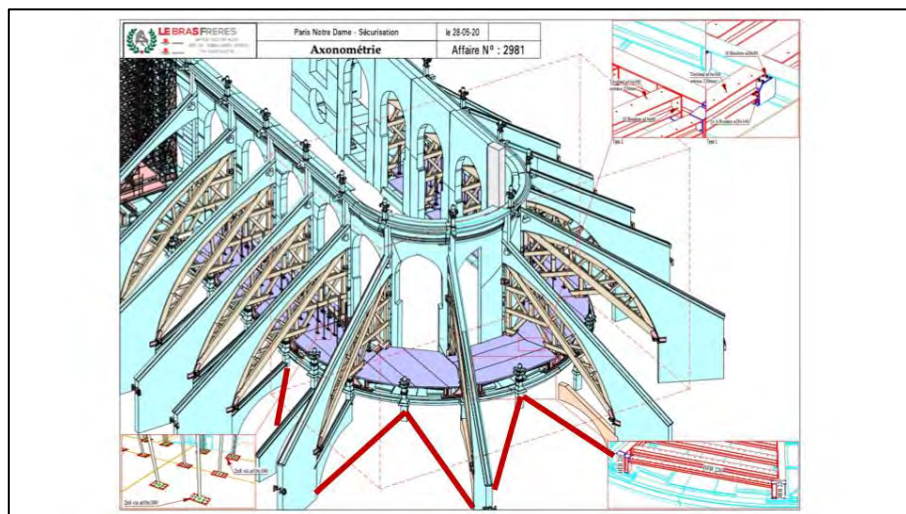


Figure 29 Schéma de principe des bouts pour la restauration des arcs-boutants inférieurs contrebutant les voûtes des tribunes dans le rond point du chœur (arcs-boutants inférieurs non figurés ici)

### 3.4 Petites culées dans l'abside

Le remplacement des pierres détériorées des petites culées présentes sur le périmètre extérieur de l'abside pourra être réalisé pierre par pierre.



### 3.5 Instrumentations

Lors de la réalisation des travaux, il faudra placer des vérins (voir figure 35) pour transmettre les poussées des voûtes aux cintres et des capteurs pour mesurer les mouvements du haut des murs gouttereaux. Les données suivantes doivent être vérifiées :

- Poussée exercée par les deux vérins hydrauliques sur la cathédrale.
- Poussée dans les boutons de l'arc-boutant
- Mouvements du mur gouttereaux au-dessus de l'arc-boutant en cours de démontage et de remontage.

### 3.6 Échafaudages

Nous formulons dans cette partie des préconisations générales qui devront être signifiées et prises en compte par le lot échafaudage dès l'appel d'offre pour prise en compte des méthodologies et moyens nécessaires dès l'offre :

- l'échafaudage devra être autostable sans ancrage dans les culées des arcs-boutants :
  - car ces dernières seront pour certaines démontées
  - car par leur élancement les culées ne peuvent fournir un appui horizontal aux échafaudages perpendiculairement à leur plan
  - les échafaudages devront respecter le cahier des charges fourni en annexe à ce document





Toutefois, le tablier métallique doit être rendu indéformable pour permettre la redistribution des poussées sur les culées voisines de la culée démontée. Cela signifie que, dans les zones d'intervention sur les culées :

- les trous oblongs doivent être soudés de manière à bloquer les déplacements au niveau de l'assemblage
- des profils UPN 200 diagonaux doivent être ancrés au tablier métallique comme indiqué dans le schéma suivant.

Toutefois, des joints de dilatation thermique doivent être laissés. Une solution possible est celle de conserver les trous oblongs au moins dans les zones indiquées sur le schéma suivant.

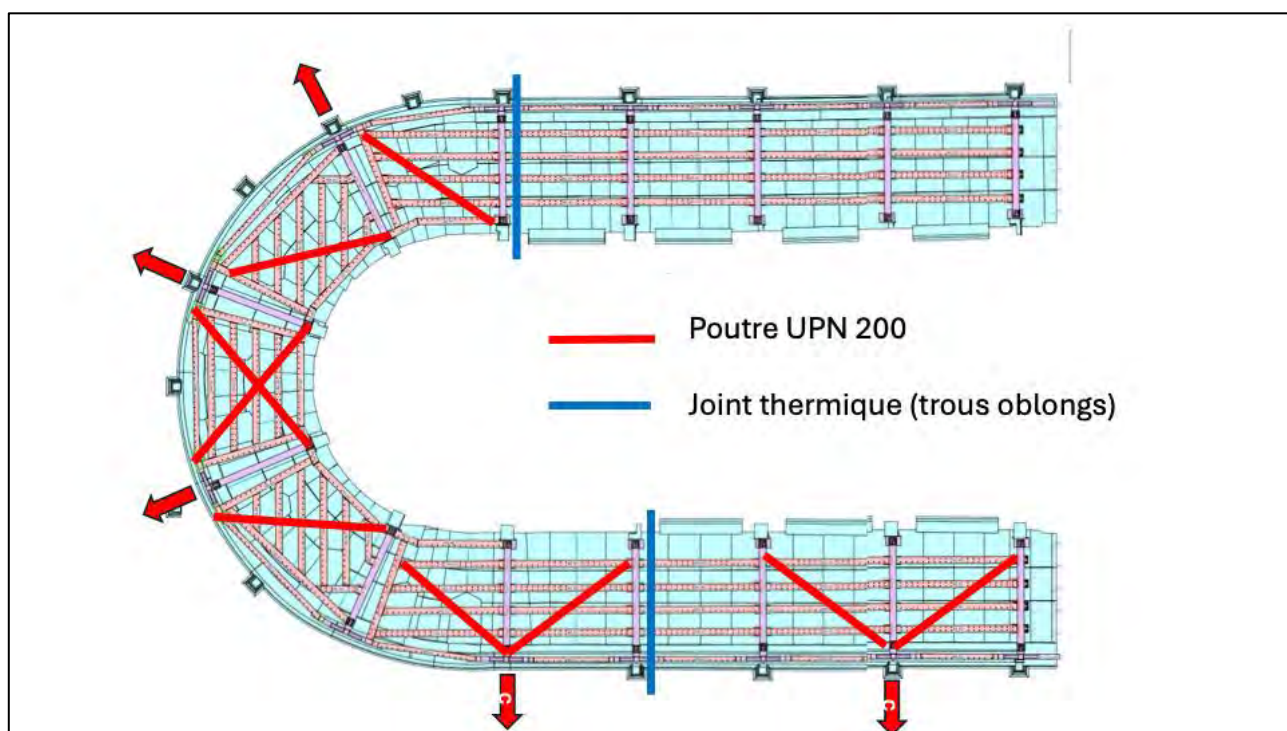


Figure 31 Schéma de principe pour un raidissement du tablier métallique avec des poutres UPN200 tout en conservant deux joints de dilatation

### Vérification du plancher

Par ailleurs l'état de conservation du plancher bois du tablier doit être vérifié et la possibilité de démonter et remonter le plancher doit être pris en compte pour l'installation des poutres UPN 200 si nécessaire.

## 4.2 Déchargement de l'arc-boutant

La méthodologie d'intervention envisagée est la suivante :

- Vérifications préliminaires :

- Vérification visuelle de l'état du plancher bois, des appuis des portiques métalliques sur les maçonneries
- Vérification des calages entre les cintres **voisins** de la travée en cours de travaux et la base de leurs arcs-boutants respectifs (car transfert des poussées vers les culées voisines via ce calage)
- Etape 1 : Utilisation de cales pour charger partiellement l'arc-boutant sur le cintre
  - ~ deux-tiers supérieur de l'arc boutant : cales efficaces
  - ~ tiers inférieur de l'arc-boutant : cales ~ inefficaces car cette zone est autostable
- Etape 2 : Démontage progressif de l'arc boutant, ce qui induit la poursuite de la diminution de sa poussée
  - voir figure ci-dessous, on démonte successivement :
    - 1. assises rampantes
    - 2. mur de remplissage en partie supérieure
    - 3. mur de remplissage en partie inférieure
    - 4. arc
  - nota : au début de cette dernière étape, sciage d'un joint de l'arc, ce qui va conduire à annuler la poussée résiduelle de l'arc
- Monitoring continu pendant étape 1 et 2 pour juger de l'évolution de la poussée de l'arc-boutant. Ce monitoring devra également permettre de compenser les nécessaires mouvements horizontaux des murs gouttereaux.
  - suivi de la poussée horizontale des voûtes sur le cintre
    - → utilisation de cellules de charges (vérins) pour mesure de la force.
  - suivi de la poussée dans le bouton de l'arc-boutant :
    - → la mesure de la compression dans le bouton peut être vérifiée, par exemple, à l'aide de cordes optiques.
  - suivi du mouvement du mur gouttereau au niveau de la tête de l'arc-boutant
  - au fur et à mesure de la déconstruction de l'arc-boutant, sa poussée va diminuer et donc le mur gouttereau aura tendance à se déplacer vers l'extérieur

- cela doit être compensé au fur et à mesure par une mise en charge horizontale du cintre par les vérins
  - il n'est pas possible de mettre en charge « à bloc » les vérins dès le lancement de la déconstruction, car à ce moment-là on additionnerait à la fois la poussée de l'arc-boutant et des vérins et on risquerait d'aggraver le dévers vers l'intérieur des murs gouttereaux du chœur (voir partie 2.2 sur les déformations existantes dans le chœur)

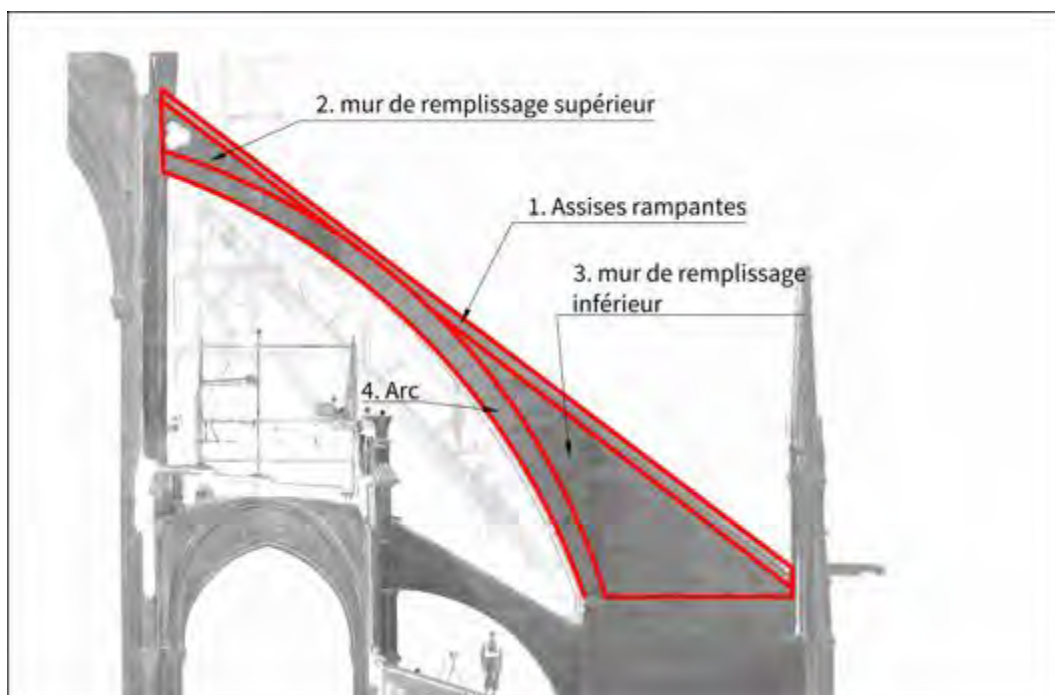


Figure 32 Étapes de démontage de l'arc-boutant, induisant une diminution progressive de sa poussée avant la dépose de l'arc

### 4.3 Reconstruction de l'arc-boutant

Lors de la reconstruction de l'arc-boutant, les mêmes points de vigilance sont valables que pour sa déconstruction (voir partie précédente), à savoir :

- quand les pierres de l'arc-boutant seront remises en place, bien que sur cintre, l'arc-boutant va commencer à appliquer une poussée sur les murs
  - déchargement compensatoire progressive des vérins
- lors du décintrage de l'arc-boutant, la poussée de l'arc-boutant va augmenter significativement.
  - → Le démontage des cintres doit avoir lieu lorsque les mortiers sont suffisamment durcis et doit être effectué étape par étape, en contrôlant les déformations des murs et en diminuant la poussée transmise par les vérins.

#### 4.4 Vérifications des structures existantes et ajouts éventuels

Le démontage et le remontage des arcs-boutants doivent s'effectuer une travée à la fois, de manière à limiter les poussées sur le tablier existant et à ne pas surcharger les culées adjacentes. Le démontage doit suivre le fraisage approuvé.

#### 4.5 Système pour rendre actives les structures provisoires

Pour que la poussée des voûtes soit bien soutenue par les structures de contrebutement provisoires et pour compenser les éventuelles déformations des cintres et des entretoises (estimées en total de l'ordre de 10 mm environ), des vérins doivent être placés entre les cintres et les murs de la cathédrale. Chaque vérin (commandés et contrôlés) pouvant produire jusqu'à une poussée d'environ 150 kN. Les deux vérins sont prévus à côté des cintres actuels comme indiqué sur le schéma suivant.

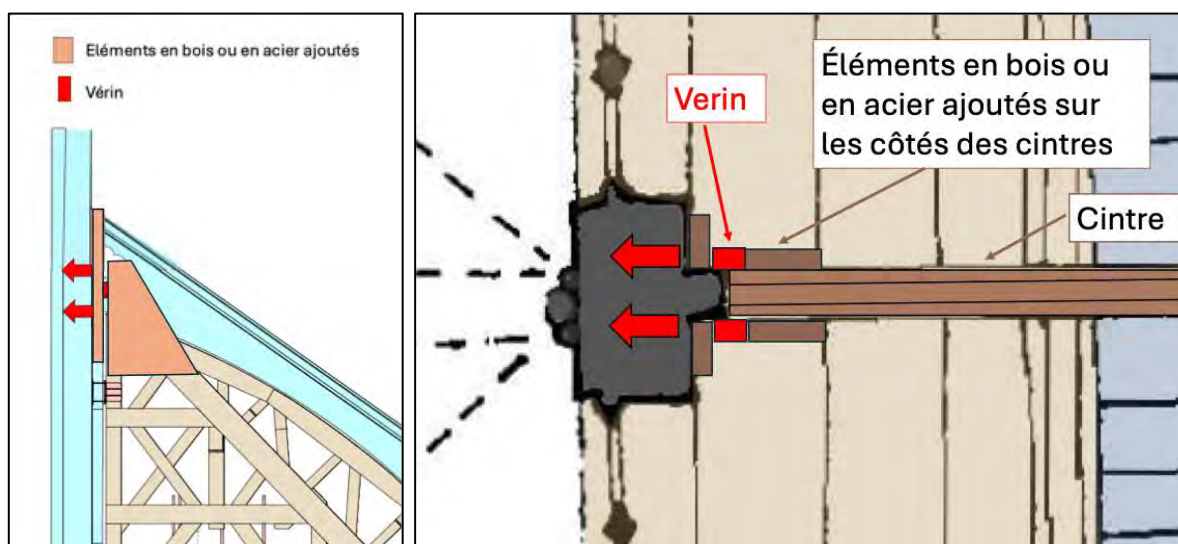


Figure 33 Schéma du contraste entre les murs et les cintres à réaliser à l'aide de vérins avec contrôle des efforts transmis.

Afin de garantir l'action des vérins et d'éviter toute déformation en haut des murs, les parties supérieures des cintres doivent être libres de se déplacer horizontalement par rapport aux murs



## **5 Système de contrôle**

Lors de toutes les opérations de restauration, en cas de démontage des volées des arcs-boutants et des culées, les mouvements horizontaux des sommets des murs gouttereaux doivent être surveillés. Cela peut être fait à l'aide de capteurs laser positionnés dans les tribunes ou avec d'autres équipements. A titre indicatif, des mouvements prévus sont de l'ordre de 10 mm.

Les mouvements du haut des murs et la poussée des vérins devront être contrôlés simultanément, étant donné que les deux phénomènes sont évidemment étroitement liés.

## 6 Conclusion

Ce présent rapport conclut notre mission pour la phase PRO. Les points principaux à retenir suite à cette étude sont :

- Restauration des arcs-boutants supérieurs : utilisation des cintres et du tablier métallique issu des travaux de sécurisation pour la reprise des poussées des voûtes lors de la dépose des arcs-boutants
- Restauration des arcs-boutants inférieurs : création de nouveaux cintres et de boutons en bois pour contrebutement de la poussée des voûtes des tribunes
- Méthodologie spécifique à prévoir pour la dépose des arcs-boutants ainsi que pour leur repose, avec une instrumentation à la fois des efforts et des mouvements
- Étant donné qu'une culée ne peut pas supporter une poussée horizontale supérieure à 50 % de la poussée qui lui est transmise par son arc-boutant, par sa zone d'influence normale, les travaux devront suivre le programme établi en laissant toujours deux culées intactes de part et d'autre d'une culée démontée. (Se référer au cahier 1 - planches graphiques de CHP01 à CHP20).
- Echafaudage : le cahier des charges à respecter pour les zones d'appui des échafaudages et les contraintes admissibles sur la maçonnerie
  - o Les principes fondamentaux pour le calcul des charges des échafaudages sont donnés dans ce rapport. Il sera nécessaire de distinguer :
    - les surcharges d'exploitation réglementaires, avec lesquelles la structure des échafaudages sera dimensionnée
    - les surcharges d'exploitation réelles, correspondant à la méthodologie d'intervention, qui donnera la descente de charges à comparer aux capacités portantes de la cathédrale
  - o Prendre appui préférentiellement à l'appui des points porteurs (murs et arcs principaux). Les capacités de ces points porteurs sont données dans ce rapport.
  - o Il faut éviter les appuis sur les terrasses, sauf en cours de montage. En cours de montage les descentes de charges doivent rester inférieures aux capacités portantes données dans ce rapport
- Dans le cas d'un démontage uniquement de la volée de l'arc-boutant sur les *travées droites* du chœur (donc avec conservation en place de la culée), les cintres existants sont capables de transférer la poussée vers leur culée. Pour éviter la rotation du cintre, les cintres doivent être ancrées à la base afin de contrecarrer la force de levage dans l'appui 1 (**25,2 kN** à ELU).

- Dans le cas du démontage d'une culée des *travées droites* du chœur il est nécessaire de transférer les poussées de la voûte et le vent vers les culées voisines. Ceci peut se produire en renforçant le tablier et en empêchant le soulèvement des cintres dans l'appui 1.
- Dans le cas du démontage d'une culée dans *l'abside*, la poussée des voûtes et le vent peuvent être absorbés par le tablier s'il est rigidifié.

-----

## **Annexe A      Liste des documents annexes**

Ce document est accompagné des annexes suivantes :

- Cahier des charges pour les échafaudages (voir annexe 2 à la suite dans ce même document)
- Annexe 1 – « Restauration des arcs-boutants et des cuvées du chœur - Note de calcul »

## **Annexe B      Cahier des charges pour les échafaudages**

Les échafaudages sont compris ici au sens large, et ce cahier des charges s'applique à la fois aux échafaudages à proprement parler et aux structures provisoires : support des échafaudages (tablier métallique), étaie des arcs-boutants (cintres) et transmission de poussée des voûtes (tablier + cintre).

### **B.1 Principes fondamentaux pour le calcul des charges**

La cathédrale est l'élément limitant pour la capacité portante des échafaudages. En effet, les échafaudages peuvent être renforcés par bracon, par diagonales, par réduction de la maille ou doublage des montants pour porter toute charge utile. A contrario les capacités portantes de la cathédrale sont données et ne sont pas extensibles.

Il a été constaté à plusieurs reprises lors des travaux de 2019 à 2024 sur la cathédrale que l'utilisation des charges réglementaires pour calculer les charges qu'appliquent les échafaudages sur ses appuis (la cathédrale) conduisaient à des charges démesurées par rapport à celles réellement utiles lors du chantier. Or la cathédrale Notre Dame est un monument exceptionnel qui nécessite le plus grand respect pour éviter tout risque, et donc il n'est pas possible de justifier la capacité de la cathédrale à supporter des charges démesurées (qui en pratique ne se produisent pas).

Par exemple lors de l'appui des échafaudages de couverture sur les charpentes, les charges calculées avec des charges surfaciques réglementaire étaient bien supérieures à celles réellement utiles en considérant le nombre d'ouvriers et le poids réel des colis de voliges et de tables de plomb approvisionnés.

Il sera donc fondamental de distinguer lors des études EXE d'échafaudages deux types de calcul :

- Calculs de dimensionnement de l'échafaudage
  - Dans ces calculs, les surcharges d'exploitation réglementaires sont appliquées.
  - Par exemple la norme européenne NF EN 12811-1 exige un échafaudage de classe 6 pour les travaux de maçonneries, donc une capacité portante de 600 kg/m<sup>2</sup>
  - Cette charge surfacique est appliquée sur 1 premier niveau à 100% puis sur un second niveau à 50%, et correspond donc à des surcharges de 900 kg/m<sup>2</sup> du point de vue macroscopique
  - Ce calcul permet de vérifier que l'échafaudage est en tout point suffisamment résistant vis-à-vis de l'utilisation de l'échafaudage



- Ce calcul surestime les charges réellement appliquées aux appuis
- Calculs de vérification des appuis de l'échafaudage
  - Dans ces calculs, les surcharges d'exploitation correspondant aux travaux réellement réalisés sont prises en compte
  - Cela nécessitera une réunion de coordination entre l'architecte, le lot échafaudage et le maçon pour définir le rythme d'approvisionnement des pierres sur les échafaudages, leur positionnement, le nombre de compagnons intervenant pour la pose des pierres, et par conséquent les charges réelles correspondantes
  - En aucun cas, l'échafaudage ne pourra être utilisé pour le stockage de matériel à l'exception des zones prévues spécifiquement à cet effet et prenant en compte la capacité portante de la cathédrale.
  - Les descentes de charges tirées de ce calcul seront utilisées pour valider les appuis de l'échafaudage sur la cathédrale.

Il faudra aussi considérer que la maçonnerie a un comportement différent si les contraintes sont permanentes ou si elles sont de brève durée (par exemple vibrations provoquées par le vent). Le phénomène du fluage des maçonneries réduit la résistance aux phénomènes permanents. On peut considérer que la maçonnerie est capable de résister à des contraintes de brève durée qui peuvent être majorées, à titre indicatif et prudent de 50% des contraintes admissibles permanentes. Pour ce phénomène on peut voir aussi : « *Ungewitter et Mohrmann 1920 Manual of Gothic Construction, 3e édition, Illinois. URL* », texte qui propose une augmentation de la résistance aux temps courts d'environ 100% par rapport à la résistance aux temps longs. Ce phénomène, bien connu sur le plan scientifique, n'est pas encore intégré dans les normes techniques, qui ne contiennent cependant, généralement, pas de normes spécifiques pour les bâtiments historiques monumentaux.

Les charges considérées comme « permanente » ou de moyen terme sont : le poids propre, les surcharges des échafaudages, les poussées des arcs et des voûtes.

Les charges considérées de brève durée sont uniquement le vent ici.

## **B.2 Vérification en phase EXE des structures provisoires existantes**

En phase projet (phase PRO rapport actuel), le dimensionnement des cintres et du tablier ont été vérifiés pour s'assurer de la faisabilité de la solution technique proposée et de l'admissibilité des charges sur la cathédrale. L'ensemble des hypothèses sur les poussées de vent, les poussées de voûtes et des arcs-boutants, et la résistance de la

cathédrale ont été environnées (voir partie 2 de ce rapport). Il a été considéré une charge surfacique de  $300 \text{ kg/m}^2$  sur l'ensemble de la surface de tablier pour représenter la présence de l'échafaudage, dont le détail n'est pas connu en phase projet (voir annexe 1). Les vérifications calculatoires sont présentées sur l'annexe 1 (note de calcul).

En phase chantier, dans le cadre de ses études EXE, l'entreprise devra vérifier si les structures provisoires existantes (tablier et cintres) sont capables de contrebuter les poussées des voûtes, en reprenant les hypothèses de charges concernant le vent et les poussées des voûtes et des arcs-boutants telles que présentées dans ce rapport, et prenant en compte l'échafaudage qui sera conçu en phase EXE pour l'intervention. A cet effet, les notes de calcul suivantes seront attendues de l'entreprise :

- Vérification du dimensionnement du cintre bois pour reprendre la poussée de la voûte (eurocode 5), et dimensionnement des éventuels renforts
- Vérification du dimensionnement du tablier (portique + solive + plancher bois → eurocode 3 + eurocode 5) pour redistribuer la poussée reprise par le cintre vers les culées voisines, et dimensionnement des éventuels renforts (profilés métalliques complémentaires pour rigidifier le tablier)
- Vérification de l'équilibre du cintre pour éviter le soulèvement des appuis des cintres (rotation potentielle liée à la poussée des vérins), et dimensionnement des ancrages nécessaires pour éviter le soulèvement de l'appui 1

Les descentes de charges issues de ces études devront être confrontées aux capacités portantes données dans la suite de cette annexe.

## B.3 Efforts verticaux et horizontaux admissibles sur la cathédrale

### B.3.1 Généralités sur les appuis sur les pierres

Tous les appuis des échafaudages sur les pierres doivent être conçus et calculés pour respecter les conditions suivantes :

- Des socles de répartition devront être prévus sous les pieds pour que la contrainte maximale permanente de compression sur les surfaces des pierres ne dépasse pas **2,5 MPa** ( $25,0 \text{ kg/cm}^2$ ) à l'ELU.
- Les contraintes de compression permanentes maximales au sein de la maçonnerie en pierre de taille peuvent être considérées de **2,0 MPa** à l'ELU. Par conséquent, ceux-ci peuvent atteindre la valeur de **3,0 MPa** pour les contraintes de court terme (en cas de vent).

- À l'intérieur des colonnes de la cathédrale, qui sont constituées d'une maçonnerie de meilleure qualité, la contrainte permanente maximale peut être de **3,0 MPa** à l'ELU et la contrainte à court terme de **4,5 MPa**.
- Le cisaillement maximum dans les culées peut être évalué avec la formule de Mohr-Coulomb :
  - o  $f_{vk} = f_{vk0} + 0,4 \sigma_d$  selon l'Eurocode 6
  - o ou de façon équivalente  $\tau_{max} = C + 0,4 \sigma_n$
  - o où C (la cohésion maximale de calcul) a été évaluée à 0,31 et  $\sigma_n$  est la contrainte de compression
- La charge maximale pour chaque mètre carré ou pour chaque mètre linéaire est indiquée ci-dessous en fonction de la résistance des structures sous-jacentes.

### B.3.2 Capacité portante au sol (terrain naturel)

Les appuis des échafaudages au sol (terrain naturel) doivent être conçus et calculés pour respecter les conditions suivantes :

- Condition de portance locale : la charge transmise par chaque pied doit être répartie avec des cales (planche, bastaing, madrier ou poutre bois en fonction des charges) de manière à ne pas dépasser :
  - o 0,15 MPa (1,5 kg/cm<sup>2</sup>) à l'ELS
  - o Nota : ces conditions ne sont pas directement dépendantes de la résistance des éventuels revêtements de sol, elles sont volontairement inférieures à ces derniers pour forcer la répartition des charges sur des cales et pour réduire tous tassements.
- Condition de robustesse : l'échafaudage doit comporter bracons et diagonales (ou poutres 3D de renforts) et pieds en nombres suffisants pour pouvoir compenser sans déformations importantes la perte théorique d'appui d'un pied (voir infra l'aléa concernant l'existence de points durs ou points mous au niveau des appuis)

Même si les conditions décrites précédemment sont remplies, nous soulignons qu'il pourrait exister ponctuellement des points durs et des points mous localisés en cas de présence (liste d'exemples possibles non exhaustive déjà rencontrés à Notre-Dame ou d'autres chantiers) :

- d'anciens carreaux, égouts ou réseaux
- de vestiges archéologiques (type sarcophage, tombe, ossements formant points mous, ou murs édifices antérieurs disparus formant points durs)

- de sols ponctuellement remaniés, par exemple suite à un sondage ou un percement
- de sols ponctuellement décomprimés, par exemple suite à une circulation d'eau (fuite, défaut d'étanchéité etc.)

La présence de ces éléments peut conduire à des tassements différentiels sous les charges verticales des pieds de l'échafaudage. Pour minimiser les risques correspondant à ce phénomène, nous préconisons :

- de limiter autant que possible les aléas → vérification par l'entreprise, par superposition du plan d'échafaudage avec les plans des réseaux connus (DICT), que les pieds sont bien implantés en dehors des vides correspondant à la présence des réseaux. Sur chantier, il appartient à l'entreprise d'échafaudage de faire les relevés nécessaires pour implanter précisément l'échafaudage à l'aplomb des structures porteuses (sols, murs) et en dehors des vides connus (égout, réseaux, plaques etc.).
- de retenir une capacité portante faible pour les sols (fait ci-dessus)
- de concevoir un échafaudage robuste (voir définition ci-dessus)

### **B.3.3 Capacité portante des appuis du tablier et des cintres**

#### **B.3.3.1 Contexte**

L'entreprise Pierre Noël a construit dans le cadre des travaux de sécurisation en 2019-2020 un ensemble de points d'appuis pour porter les cintres et le tablier métallique. Les capacités portantes de ces points d'appuis (résistance locale du point d'appui construit) sont données dans les parties suivantes.

#### **B.3.3.2 Cas courant**

Les capacités portantes pour les charges verticales sont données à l'ELU dans le tableau ci-dessous pour les charges à long terme (poids propre, surcharges et poussée de voûte) et pour les charges à court terme (vent en plus).

À cause du risque du soulèvement de l'appui 1, un ancrage adéquat du cintre aux murs gouttereaux de la cathédrale doit être prévu. Compte tenu de la valeur élevée de la force qui tend à soulever le support 1., l'ancrage peut être réalisé à l'aide de deux poutres en acier (en rouge) insérée comme en tiroir dans les murs, comme schématisé ci-dessous.

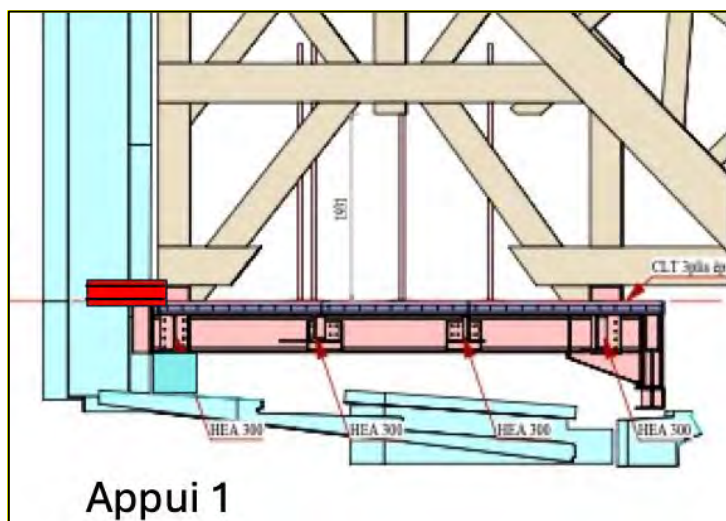


Figure 14. Schéma de principe des poutres d'ancrages du cintre aux murs de la cathédrale pour éviter le soulèvement

	Capacité portante cathédrale $F_c$
Appui 1	Long terme : - 220 kN Court terme : - 330 kN
Appui 2	Court terme : 400 KN
Appui 3 avec la culée conservée	Court terme : 400 kN vert. Court terme : 530 kN horiz.
Appui 3 avec la culée partiellement démontée	Court terme : 300 kN vertical Court terme : 120 kN horiz.
Commentaire	Valeurs à considérer pour vérification des appuis de l'échafaudage

Figure 14. Tableau des capacités portantes de la cathédrale sous les appuis du tablier et des cintres, à l'ELU

Les appuis sur toiture en plomb ne sont pas autorisés. Les appuis au-dessus des dalles de pierre doivent être bien répartis et placés en correspondance avec les supports des dalles (éviter les appuis au milieu des dalles). Les appuis sur les murs et les arcs doivent être, en règle générale, placés alignés avec l'axe des murs et doivent disposer d'un système de répartition évitant toute concentration de contraintes supérieures à celles indiquées ci-dessus.



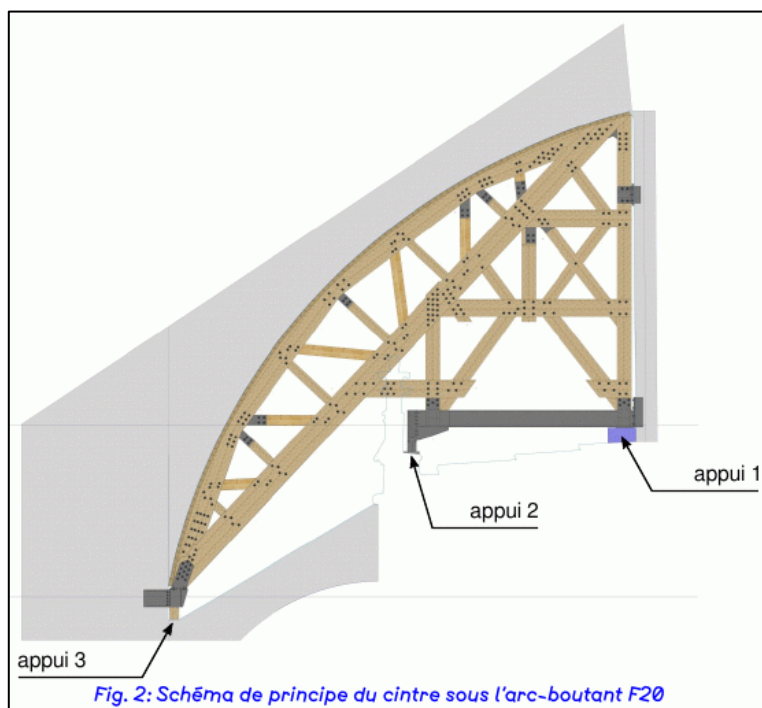


Figure 14. Extrait note de calcul Stono pour PierreNoël du 04/07/2019

### B.3.3.3 Cas particulier (file F21)

Les capacités portantes pour les charges verticales sont données à l'ELU dans le tableau ci-dessous

	Capacité portante cathédrale $F_c$
Appuis 1	Long terme : - <b>220 kN</b> Court terme : - <b>330 kN</b>
Appui 2	Court terme : <b>400 KN</b>
Commentaire	Valeur à considérer pour vérification des appuis de l'échafaudage

Figure 14. Tableau des capacités portantes de la cathédrale sous les appuis du tablier et des cintres pour le cas particulier de la file F21, à l'ELU

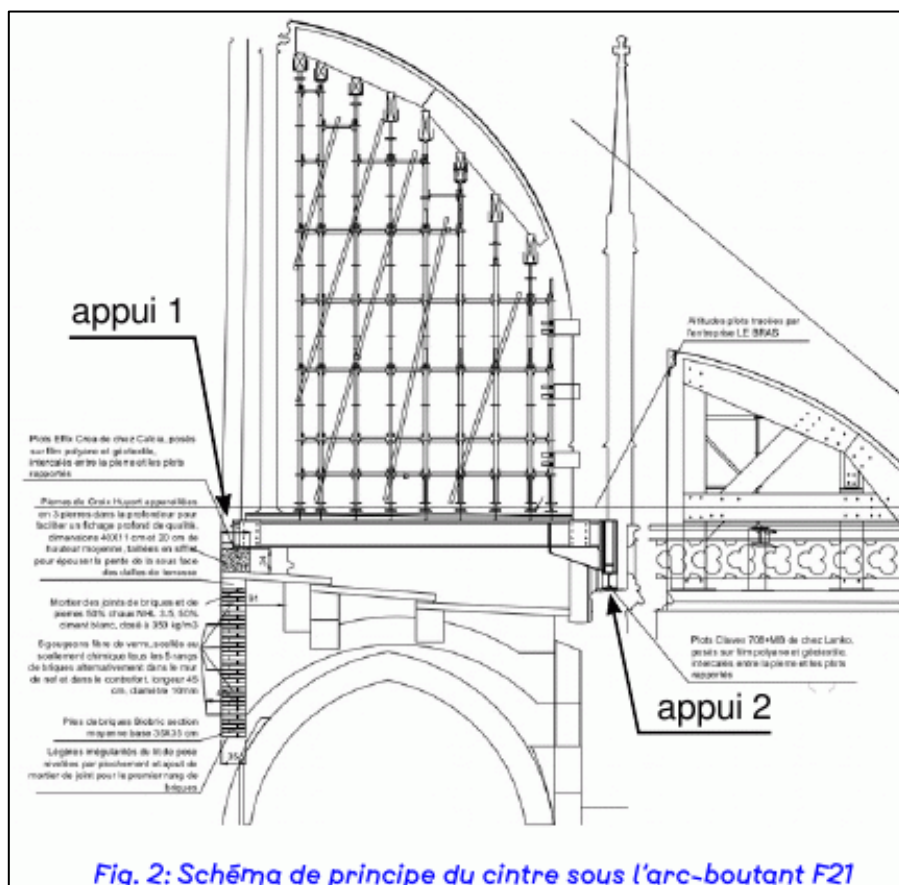


Figure 15. Extrait note de calcul Stono pour PierreNoël du 04/07/2019

### B.3.3.4 Cas particulier (file F22)

Les capacités portantes pour les charges verticales sont données à l'ELU dans le tableau ci-dessous

	Capacité portante cathédrale $F_c$
Appui 1	Long terme : - <b>220 kN</b> Court terme : - <b>330 kN</b>
Appui 2	Court terme : <b>400 kN</b>
Appui 3 avec la culée intègre	<b>400 kN vertical</b> (l.t.) <b>530 kN horizontal</b> (l.t.)
Commentaire	Valeur à considérer pour vérification des appuis de l'échafaudage

Figure 14. Tableau des capacités portantes de la cathédrale sous les appuis du tablier et des cintres pour le cas particulier de la file F22, à l'ELU

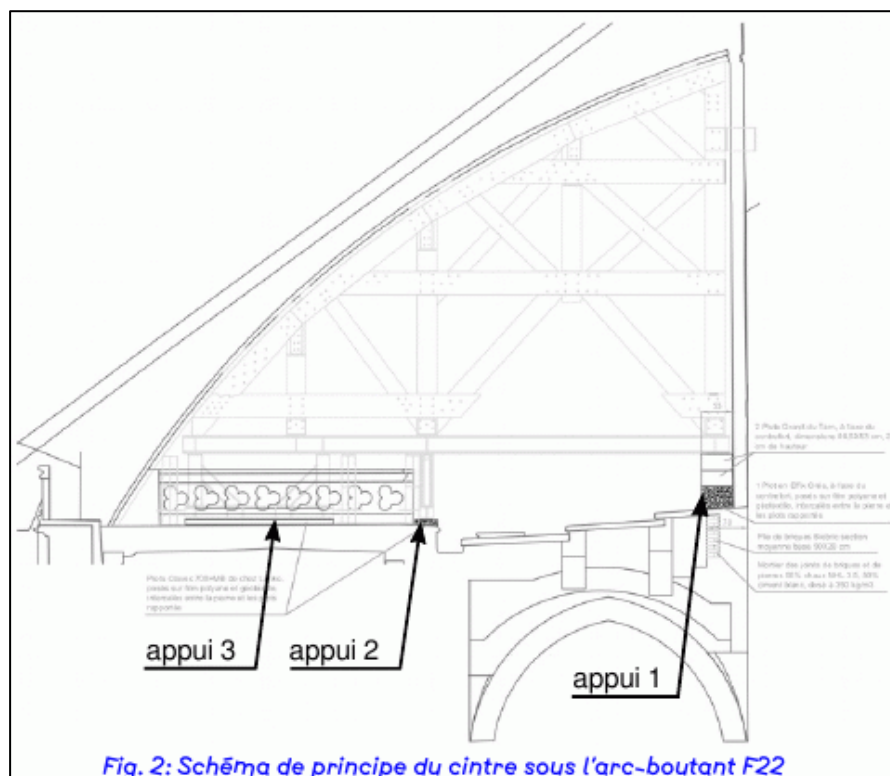


Figure 16. Extrait note de calcul Stono pour PierreNoël du 04/11/2019

Dans le cas de levage de l'appuis 1, un ancrage adéquat aux murs cathédrale doit être prévu.

### B.3.4 Capacité portante sur les terrasses hautes

Il faut éviter d'appuyer les échafaudages directement sur les toitures des terrasses qui ne sont pas prévues pour cela. Dans cette zone les échafaudages devraient être portés directement par le tablier métallique, qui reporte les charges sur les appuis 1 et 2, tant que ce dernier est en place.

Au niveau des terrasses hautes, les capacités portantes sont les suivantes :

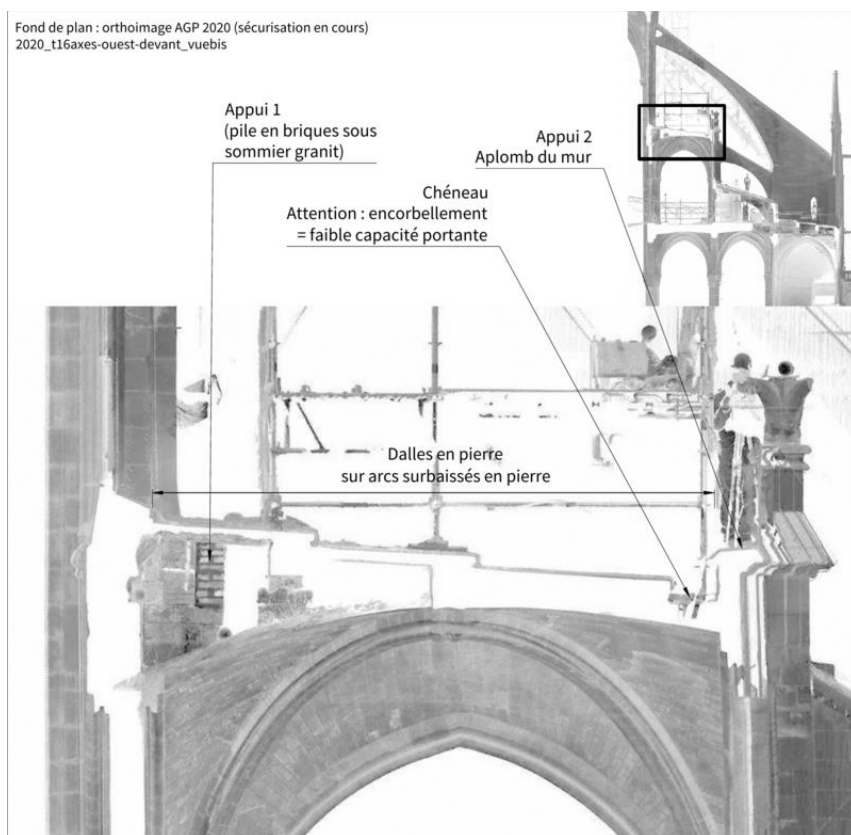
Les capacités portantes sont données à l'ELU

- Appui 1 voir partie précédente
- Appui 2 voir partie précédente
- Dalles en pierre 200kg/m<sup>2</sup>
  - o Cette valeur est donnée par le retour d'expérience de l'usage des dernières années

- Les charges globales (poids propre + surcharges d'exploitation) d'un échafaudage qui prendrait appui sur une toiture terrasse devra donc être inférieur à  $200\text{kg/m}^2$ .
  - Les pieds de poteaux qui concentrent les charges doivent être placés à l'aplomb des arcs support des dalles, et non à mi-portée des dalles
  - Les surcharges d'exploitation sur l'échafaudage ne pourront donc dépasser  $200\text{kg/m}^2$  que si l'échafaudage est conçu pour répartir ses charges sur une surface de terrasse supérieure à la surface de plancher utile de l'échafaudage

– Chéneau

Appui interdit, zone en encorbellement



*Figure 34 Vocabulaire pour les appuis au niveau de la terrasse haute à l'aplomb des tribunes et du déambulatoire intérieur*



*Figure 35 Terrasses haute dans les travées droites (vue côté nord, sur cette photo de 2019 les piles en brique des appuis 1 n'avaient pas encore été construites)*



Figure 36 Terrasses haute dans les travées droites



### B.3.5 Sur les terrasses basses (déambulateur extérieur)

Il faut éviter d'appuyer les échafaudages directement sur les toitures des terrasses qui ne sont pas prévues pour cela. Les appuis à l'aplomb des murs sont à privilégier.

Les capacités portantes sont données à l'ELU

- Aplomb du mur et des arcs
  - o Zones proches des piliers : 200 kN/m
  - o Zones au-dessus du milieu des arcs : 30 kN/m
- Terrasse :
  - o Dalles en pierre 200 daN/m<sup>2</sup>
    - Voir aussi préconisations de la partie sur les terrasses hautes
  - o Couverture en plomb 0 daN/m<sup>2</sup>
    - Aucun report d'appui de pied d'échafaudage n'est autorisé sur les voûtes et planchers en poteries creuses

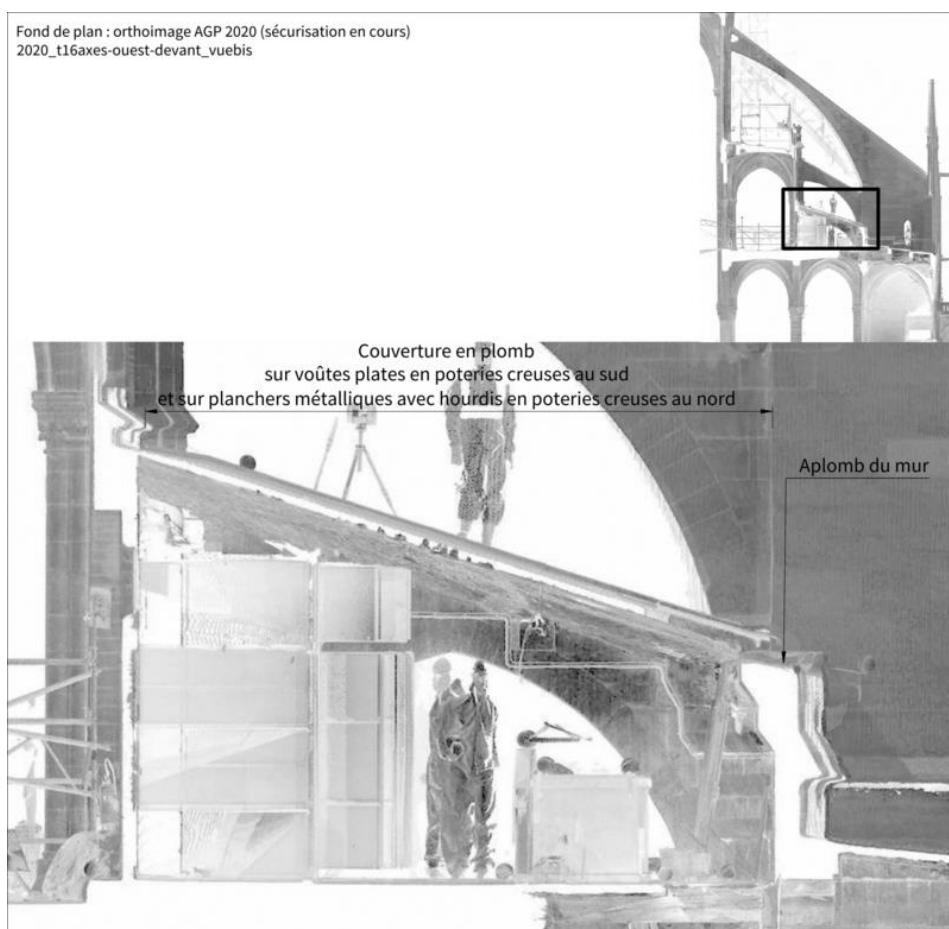
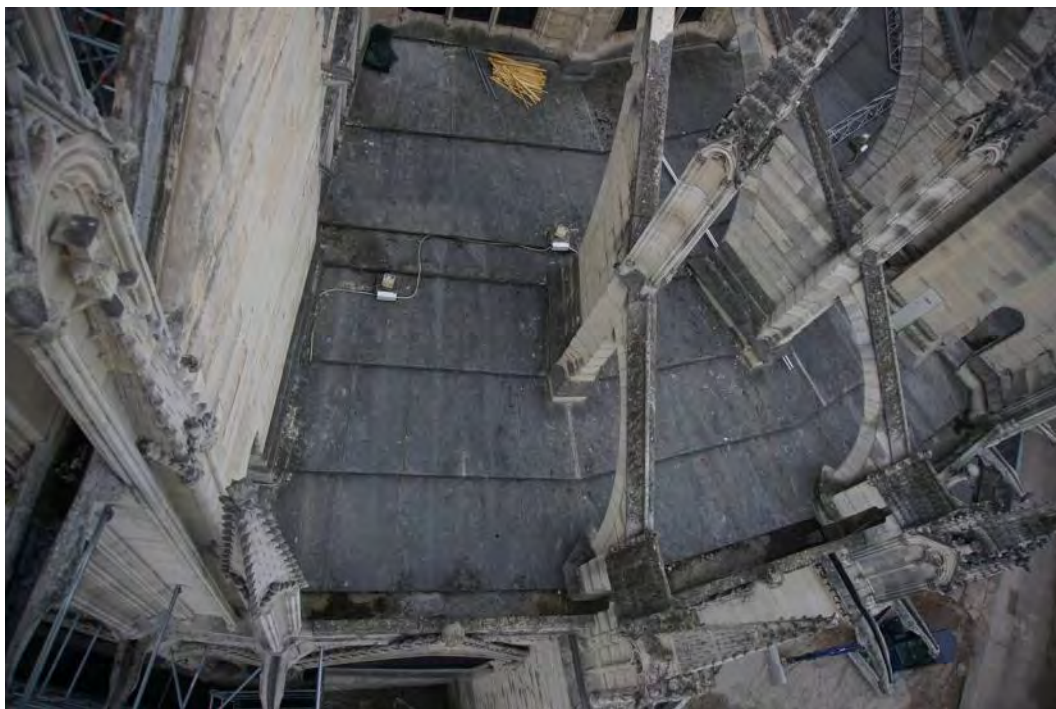


Figure 37 Vocabulaire pour les appuis au niveau de la terrasse basse à l'aplomb des réserves et du déambulateur extérieur

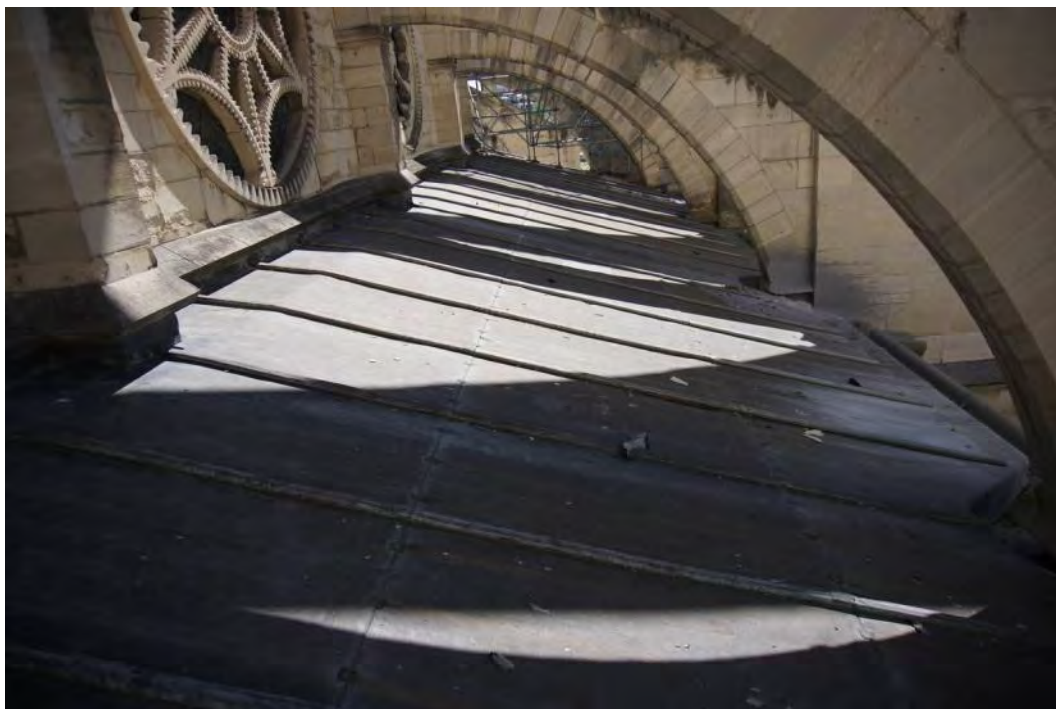




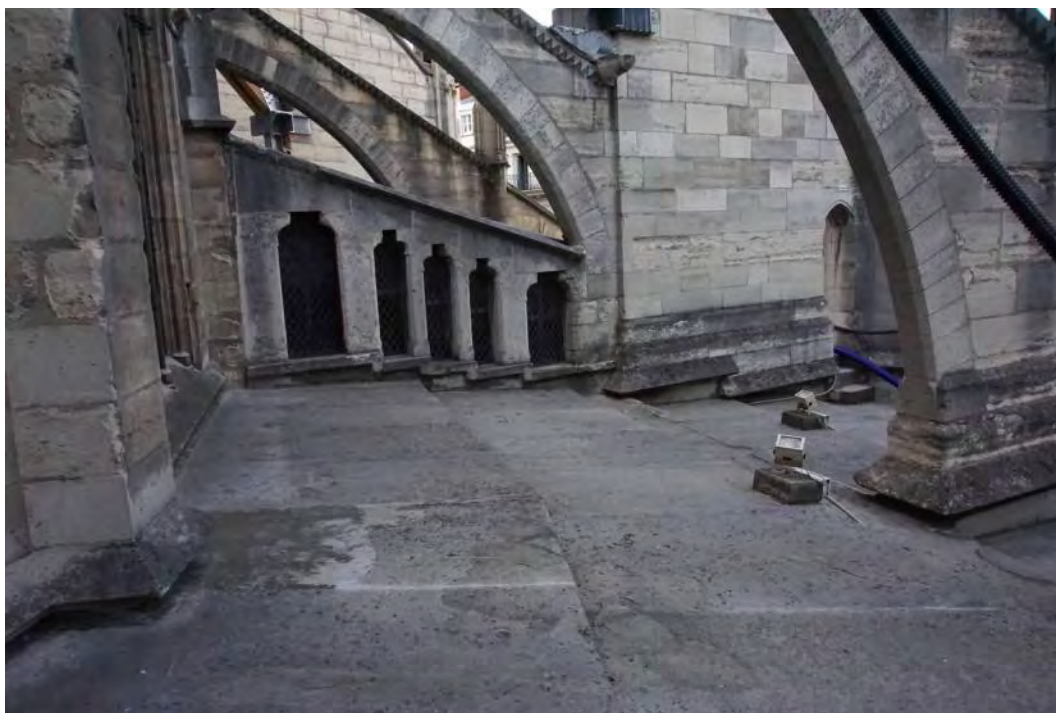
*Figure 38 Terrasses basses dans les travées droites (au droit de la sacristie)*



*Figure 39 Terrasses basses dans les travées rayonnantes du chevet*



*Figure 40 Terrasses basses dans les travées droites (au droit de la sacristie)*



*Figure 41 L'édicule des réserves marque la limite entre les travées couvertes en dalle de pierre sur arcs en pierre de taille et les travées couvertes en table de plomb sur poteries creuses (voûtes plates et planchers)*

### B.3.6 Sur les terrasses basses (chapelles)

Il faut éviter d'appuyer les échafaudages directement sur les toitures des terrasses qui ne sont pas prévues pour cela. Les appuis à l'aplomb des murs sont à privilégier.

Les capacités portantes sont données à l'ELU

- Aplomb du mur et des arcs
  - o Zones proches des piliers : 200 kN/m
  - o Zones au-dessus du milieu des arcs : 30 kN/m
- Terrasse :
  - o Dalles en pierre 200 daN/m<sup>2</sup>
  - o Couverture en plomb 0 daN/m<sup>2</sup> (aucun report d'appui de pied d'échafaudage n'est autorisé sur les voûtes et planchers en poteries creuses)
  - o Voir aussi préconisations de la partie sur les terrasses hautes



Figure 42 Vocabulaire pour les appuis au niveau de la terrasse basse à l'aplomb des chapelles





*Figure 43 Dalles de pierre et des arcs surbaissés de la terrasse basse à l'aplomb des chapelles*

## **B.4 Efforts horizontaux maximaux pouvant être supportées par les culées**

### **B.4.1 Culées des grands arcs-boutants**

#### ***Appuis autorisés***

Concernant la résistance des culées, en plus de ce qui est indiqué au point B.3.3., est précisé ce qui suit. Deux scénarios sont envisagés : culée intacte et culée partiellement démontée. Dans le second cas, la résistance dépend de la cohésion existante entre les différents blocs de la maçonnerie. Les forces sont à l'ELU. Voir aussi le point B.3.3.

- Culée intacte
  - La poussée maximale à court terme est : **530 kN**
- Culée partiellement démontée (La résistance dépend de la cohésion de la maçonnerie).
  - La poussée maximale à court terme est : **120 kN**

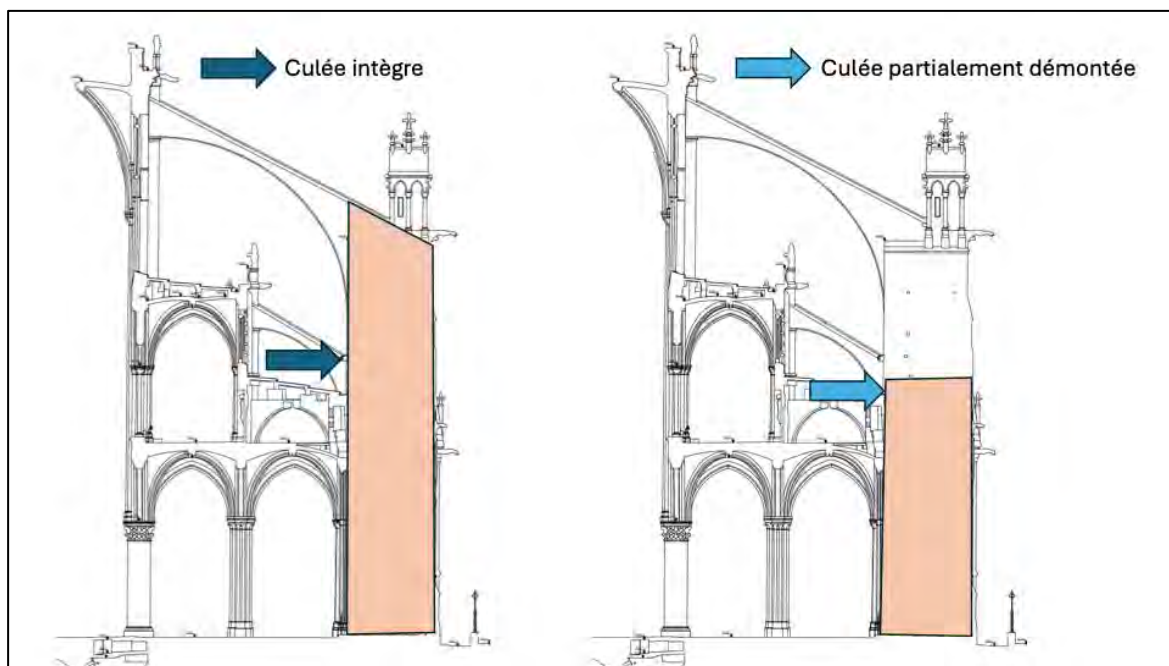


Figure 44 Schéma des forces agissant dans le cas d'une culée intacte ou partiellement démontée. La culée partiellement démontée présente encore une capacité portante, même en l'absence de la compression exercée par la partie supérieure. La capacité peut être confiée à la cohésion de la maçonnerie, si celle-ci n'est pas endommagée.

### Appuis interdits

- Appuis perpendiculaires à l'axe des culées
- L'échafaudage devra donc être autostable sans appuis hors plan sur les culées :
  - o car ces dernières seront pour certaines démontées,
  - o car par leur élancement les culées ne peuvent fournir un appui horizontal aux échafaudages perpendiculairement à leur plan
- La capacité portante des culées sous des charges transversales (perpendiculaire à l'arc-boutant et sa culée) étant très limitée et ne pouvant pas être démontrée, il est autorisé des ancrages sur les culées **uniquement sous réserve** que ces derniers ne soient pas pris en compte pour la vérification de la stabilité par le calcul de l'échafaudage. L'objectif de cette autorisation est que l'échafaudage soit conçu pour être autostable (avec ancrages positionnés ailleurs que sur les culées, ajouts bracons, diagonales, poutres au vent etc.), mais que si pour des raisons réglementaire l'échafaudage doit être lié à une structure voisine tous les xxx mètres cela soit possible.

#### **B.4.2 Base des petits arcs-boutants de l'abside**

On considère la résistance au cisaillement de la base des appuis des petits arcs-boutants, calculée sur la base de la cohésion de la maçonnerie (voir Figure 44).

La poussée maximale soutenable par la culée est : **48 kN**

#### **B.5 Démontage d'un l'arc-boutant uniquement**

Dans le cas d'un démontage uniquement de l'arc-boutant et non de la culée, il n'est pas nécessaire de transférer les poussées des voûtes et du vent vers les culées voisines.

Lorsque le poids de l'arc ne pèse plus sur le cintre, celui-ci a tendance à une rotation et la force pour bloquer le soulèvement à l'appui 1 est de **14,2 kN** sans vent et de **25,2 kN** avec vent.

La charge sur l'appui 2 est de **28,5 kN**.

oooooOOOOOooooo





# Paris – Cathédrale Notre-Dame

---

## *Restauration des arcs-boutants et des cuvées du chœur* **Annexe 1 - Note de calcul**

18.02.2025

Prof. Carlo Blasi, Architecte

Mathias Fantin, ingénieur, docteur en architecture



### **Maitre d'œuvre :**

Philippe VILLENEUVE

Rémi FROMONT

Architectes en Chef  
des Monuments Historiques

### **Maitre d'ouvrage :**

Établissement public chargé de la  
conservation et de la restauration de la  
cathédrale Notre-Dame de Paris  
2 bis Cité Martignac  
75007 Paris

Contents

1   Objet ..... 3

2   Textes réglementaires ..... 4

3   Introduction..... 5

4   Travées droites du chœur..... 9

    4.1   Cas de charge 1..... 9

    4.2   Cas de charge 2..... 11

    4.3   Cas de charge 3..... 14

5   Abside ..... 16

6   Arcs-boutants inférieurs..... 20

Suivi des modifications

Auteur	Date	Indice	Modification
MF-CB	23/01/2025	A	Première version du document
MF-CB	18/02/2025	B	Mise à jour avec ajout résultats abside

## **1 Objet**

La note de calcul examine le comportement des structures provisoires pour contrebuter la poussée des voûtes du chœur en cas de démantèlement des arcs-boutants et des culées dans le cadre de leur restauration.

Ce document est une annexe du rapport « Rapport structure PRO et cahier des charges échafaudages » et doit être consulté parallèlement à ce dernier document qui présente le contexte et les hypothèses de charges de l'étude.

Pour cette fonction, dans la mesure du possible, les structures existantes sont utilisées : les cintres placées sous les arcs-boutants et le tablier placé au-dessus de la terrasse haute. Des intégrations sont prévues pour ces structures afin d'optimiser leur comportement.

## 2 Textes réglementaires

La liste non exhaustive des textes réglementaires qui sont applicables dans le cadre de cette étude est la suivante :

- NF EN 1990 – Eurocodes structuraux – Bases de calcul des structures
- NF EN 1991-1-1 – Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-1 : actions générales – poids volumiques, poids propres, charges d'exploitation des bâtiments
- NF EN 1991-3 – Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-3 : actions générales – charges de neige
- NF EN 1991-4 – Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-4 : actions générales – actions du vent
- NF EN 1992-1-1 – Eurocode 2 – Calcul des structures en béton – Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments
- NF EN 1993-1-1 – Eurocode 3 – Calcul des structures en acier – Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments
- NF EN 1993-1-2 – Eurocode 3 – Calcul des structures en acier – Partie 1-2 : calcul du comportement au feu
- NF EN 1993-1-8 – Eurocode 3 – Calcul des structures en acier – Partie 1-8 : calcul des assemblages
- NF EN 1995-1-1 – Eurocode 5 – Conception et calcul des structures en bois – Partie 1-1 : généralités – règles communes et règles pour les bâtiments
- NF EN 1995-1-2 – Eurocode 5 – Conception et calcul des structures en bois – Partie 1-2 : généralités – Calcul des structures au feu
- NF EN 1996-1-1 – Eurocode 6 – Calcul des ouvrages en maçonnerie – Partie 1-1 : règles générales pour ouvrages en maçonnerie armée et non armée
- NF EN 1996-2 – Eurocode 6 – Calcul des ouvrages en maçonnerie – Partie 2 : conception, choix des matériaux et mise en œuvre des maçonneries
- NF EN 1998-1 – Eurocode 8 – Calcul des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 1 : règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments
- NF EN 1998-3 – Eurocode 8 – Calcul des structures pour leur résistance aux séismes – Partie 3 : évaluation et renforcement des bâtiments

### 3 Introduction

Les cas de charges pris en compte dans cette note sont ceux dans lesquels on prévoit le démontage d'une culée ou d'un arc-boutant.

En cas de démontage total ou partiel d'une culée du côté nord ou sud du chœur (travées droites), les poussées de la voûte et du vent doivent être transmis aux culées adjacentes.

Dans le cas de la conservation de la culée et du démontage seulement d'un arc-boutant, les cintres existants supporteront la poussée de la voûte et la transmettront à la culée de l'arc en cours de restauration.

Les hypothèses de calcul pour les côtés nord et sud (travées droites) sont :

- La poussée de la voûte correspondant à la culée démontée doit être transférée sur les culées adjacentes à droite et à gauche.
- Le calcul ne prend en compte que les deux travées du tablier métallique situées immédiatement à droite et à gauche de la culée démontée.
- Une charge de  $300 \text{ daN/m}^2$  est attendue au-dessus du tablier, mais pour des raisons de sécurité toute accumulation et stockage de matériaux est interdit, afin de réduire au maximum les efforts sur les structures anciennes. Voir détails dans le cahier des charges des échafaudages.
- Un appui vertical doit être maintenu au pied du cintre correspondant à la culée démontée. Cela inclut la conservation d'une partie de la culée pour conserver l'appui actuel ou la création d'un appui provisoire pour soutenir le pied inférieur du cintre (appui 3).
- Par rapport à la situation actuelle du tablier métallique, le calcul a été effectué en considérant les assemblages entre les poutres en acier se comportant comme des rotules (les trous oblongs devront être soudés) et en ajoutant deux poutres UPN200 en diagonale pour une plus grande rigidité du tablier métallique, qui doit se comporter comme un diaphragme rigide pour permettre la redistribution des poussées. Puisque seulement quelques culées seront démontées, il sera possible de conserver certains joints de dilatation thermique pour éviter toute déformation excessive (mouvements différentiels entre acier et maçonnerie).
- Le modèle considère le haut des cintres libre des murs gouttereaux. Les poussées entre les voûtes et les cintres seront transmises au moyen de vérins réglables.
- Le modèle considère les bases des cintres (appui 1) reliées aux murs du cœur de manière à éviter les déplacements verticaux du pied du cintre.
- Le calcul examine les hypothèses de charge suivantes :

- Sur le côté du cœur :

Poussée des voûtes: ELS = 130 kN

$$\text{ELU} = 130 \times 1.35 = \mathbf{175,5 \text{ kN}}$$

Poussée du vent:  $\text{ELS} = 115 \text{ kN} \times 0.77 (\text{C}_{\text{prob}} \text{ Tr 5 anni}) \times 0.9 = 80 \text{ kN}$   
 $\text{ELU} = 80 \times 1.5 = \mathbf{120 \text{ kN}}$

Poussées des arcs-boutants inférieurs qui contrebutent les terrasses hautes  
 $\text{ELU} = \mathbf{54 \text{ kN}}$

- Sur l'abside :

Poussée des voûtes:  $\text{ELU} = \mathbf{43 \text{ kN}}$

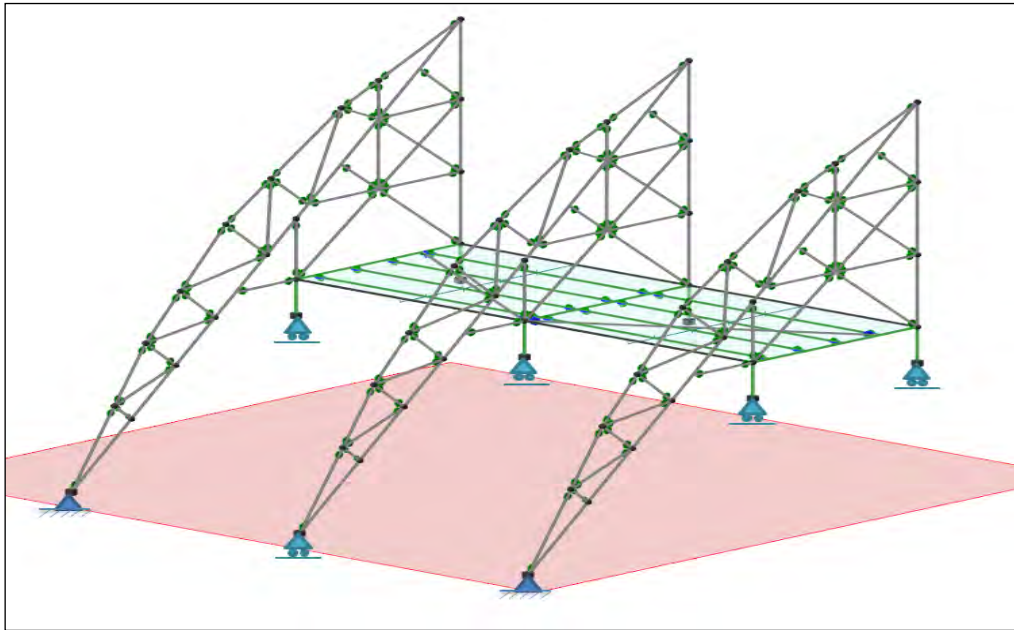
Poussée du vent : Négligeable

Poussées des arcs-boutants inférieurs qui contrebutent les terrasses hautes  
 $\text{ELU} = \mathbf{54 \text{ kN}}$

- En ce qui concerne la seule action statique (à long terme) de poussée des voûtes, la résistance des structures anciennes en pierre est celle indiquée ci-dessous ; pour les actions de courte durée (vent) la résistance des structures peut être augmentée d'environ 50% en tenant compte de l'absence de phénomènes de fluage. Pour une justification supplémentaire du comportement différent de la maçonnerie à des temps courts et longs (phénomène de fluage), voir « Ungewitter et Mohrmann 1920 Manual of Gothic Construction, 3e édition, Illinois. URL », texte qui propose une augmentation de la résistance aux temps courts d'environ 100% par rapport à la résistance aux temps longs.
- La cohésion maximale dans la maçonnerie des culées, en l'absence de contraintes de compression, est évaluée à **0,031 MPa** (voir « Eurocode 6 »).
- Les contraintes de compression permanentes maximales au sein de la maçonnerie des culées et des murs sont de **2,0 Mpa**. Par conséquent, ceux-ci peuvent atteindre la valeur de **3,0 MPa** en cas de vent.
- À l'intérieur des colonnes, qui sont constituées d'une maçonnerie de meilleure qualité, la contrainte permanente maximale peut être de **3,0 MPa** et la contrainte à court terme de **4,5 MPa**.
- Le modèle de calcul considère tous les éléments qui composent les cintres et le tablier métallique articulés avec des rotules, tandis que les assemblages des portiques métalliques sont réalisés avec des joints rigides.
- Le démontage d'une culée doit toujours avoir lieu après le démontage de l'arc-boutant correspondant. Le scénario de l'arc-boutant supporté par la nervure sans la culée n'est pas pris en considération.



- Il appartient à l'entreprise d'effectuer un nouveau calcul EXE après avoir vérifié l'état de conservation des structures en bois (qui sont en place depuis maintenant cinq ans), en vérifiant également les sections et joints résistants réels. Les résultats de ce rapport doivent donc être considérés comme indicatifs en attendant ceux des études EXE.



*Figure 1 : Schéma du modèle de calcul. A noter la possibilité de faire glisser le pied du cintre central qui simule le démontage de la culée centrale. Les mouvements horizontaux ne sont empêchés que par les culées latérales.*

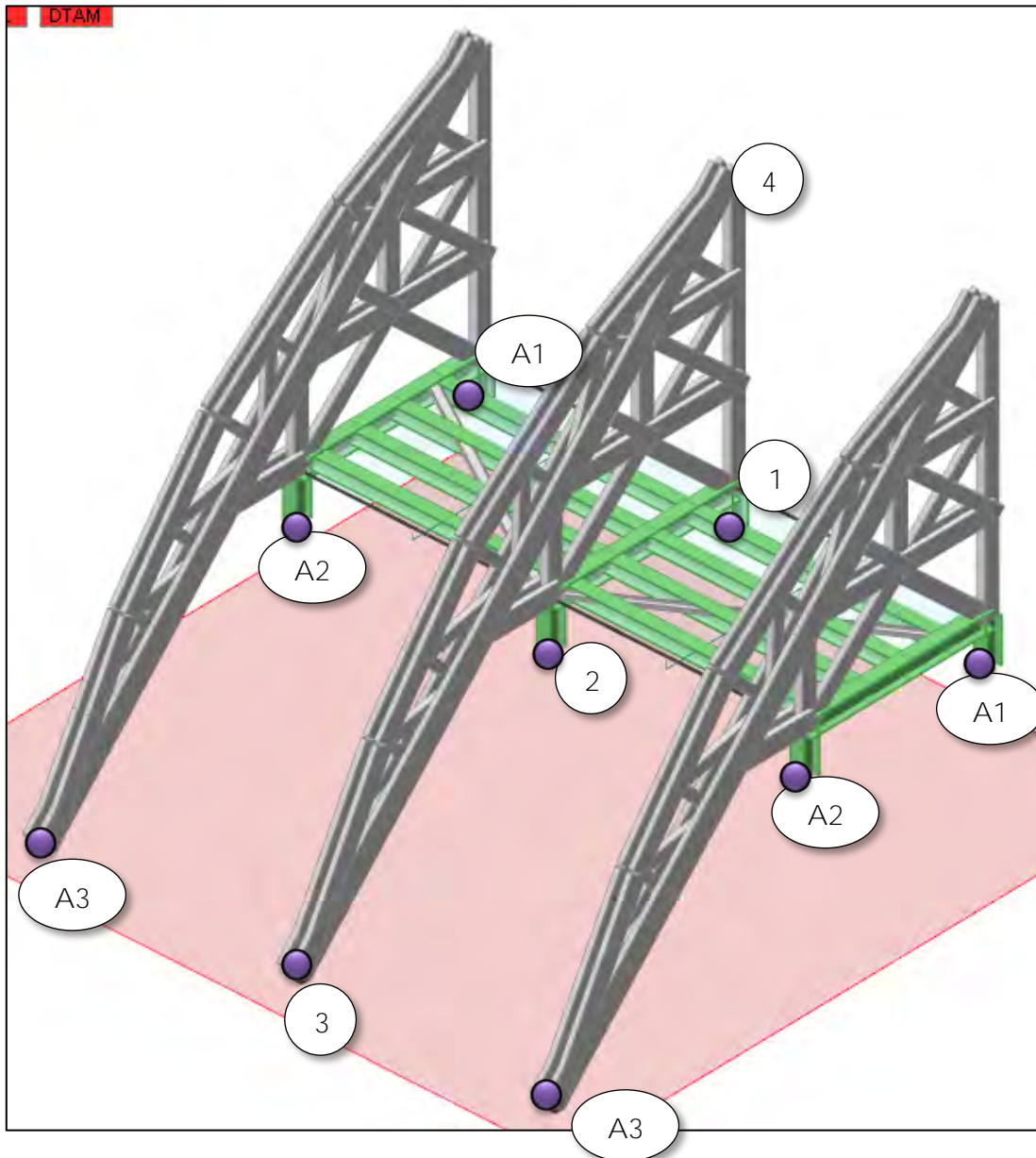


Figure 2. Schéma des appuis et nomenclature. Le code des appuis reste inchangé pour chaque solution

## 4 Travées droites du chœur

**Les structures sont constituées des cintres et du tablier avec l'ajout deux poutres inclinées sous le tablier.**

### 4.1 Cas de charge 1

Le cas de charge 1 considère la poussée active des voûtes (175,5 KN à ELU), sans la présence du poids stabilisateur des surcharges sur le tablier et sans la poussée du vent. Cette condition décrit l'action maximale de soulèvement **à long terme** sur les nœuds 1 en appui sur les murs de la cathédrale

Combinaison de charges

CC1:  $0.9 \times G1$  (propres poids) +  $(1.35 \times G2$  poussée des voûtes)

Les résultats sont à ELU.

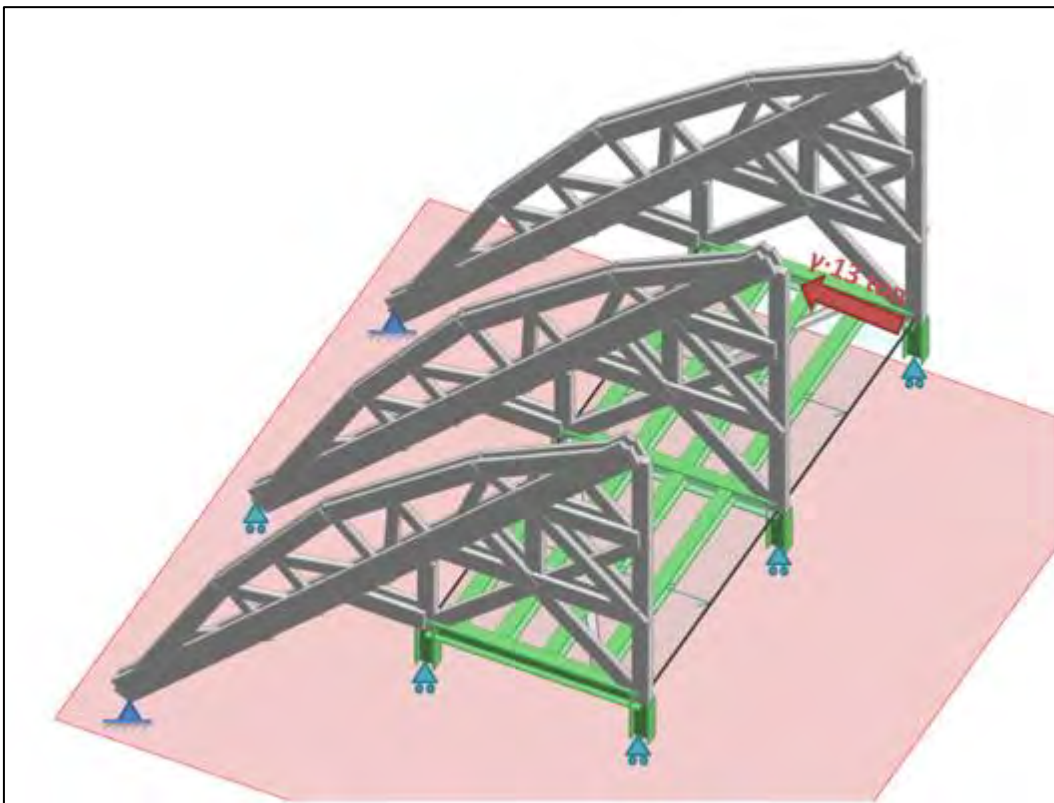


Figure 3. Schéma : condition de charge 1 (long terme)

Les résultats sont résumés comme suit.

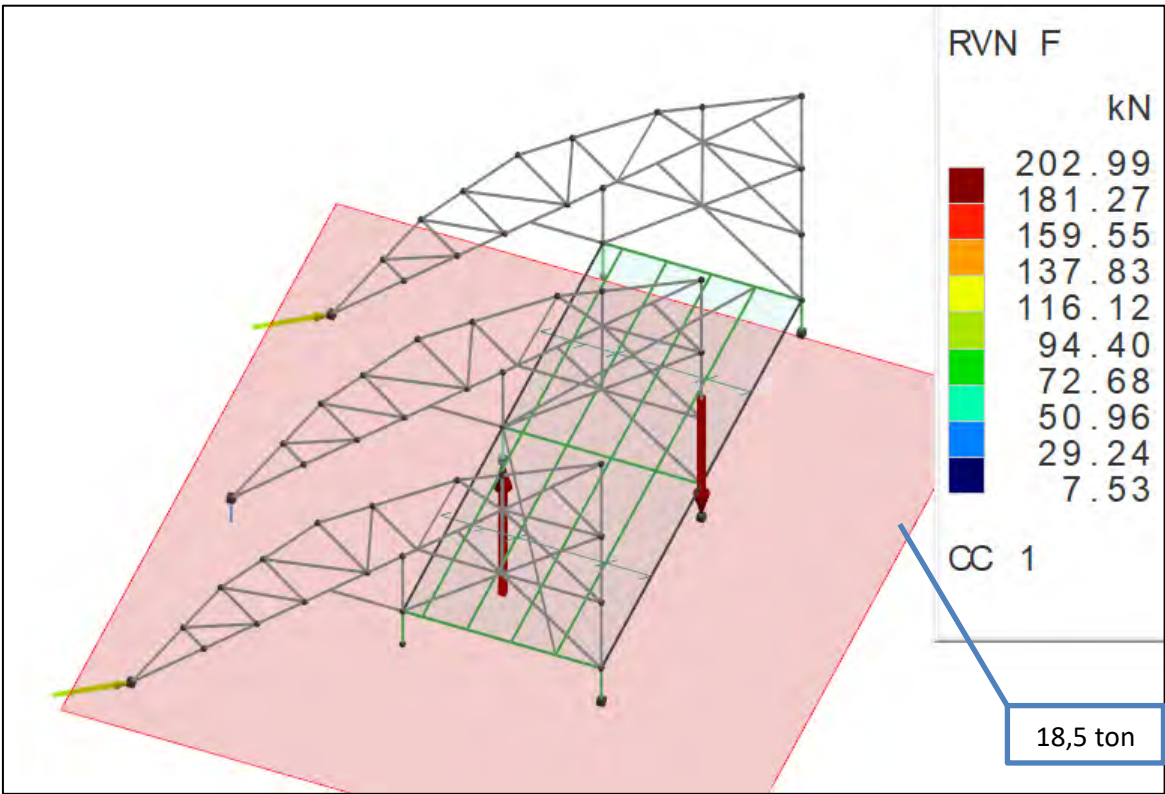


Figure 4. Reaction du cas de charge 1 (long terme)

La force permanente qui tend à soulever le nœud de liaison avec la cathédrale au niveau du tablier est d'environ **185 kN à l'ELU**. Une liaison avec les murs verticaux de la cathédrale qui empêche les mouvements verticaux est donc nécessaire pour la solution structurale 1.

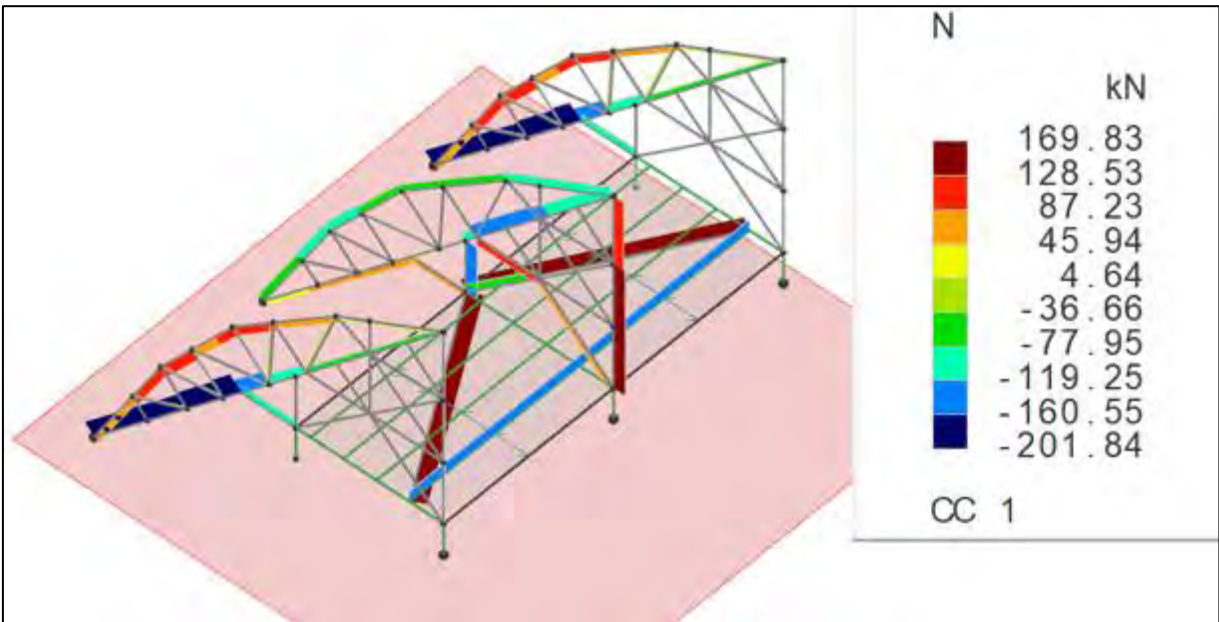


Figure 5. Action à l'intérieur des éléments des cintres et du tablier.



## 4.2 Cas de charge 2

Le cas de charge 2 considère la poussée active des voûtes, sans présence du poids stabilisateur des arc-boutants, sans les surcharges sur le tablier, avec la poussée du vent. Cette condition décrit l'action de soulèvement maximale **à court terme** (vents) sur les nœuds reliant les colonnes de la cathédrale.

CC2:  $0.9 \times G1$  (poids propres) +  $(1.35 \times G2$  poussée des voûtes) +  $(1.5 \times$  poussée du vent)

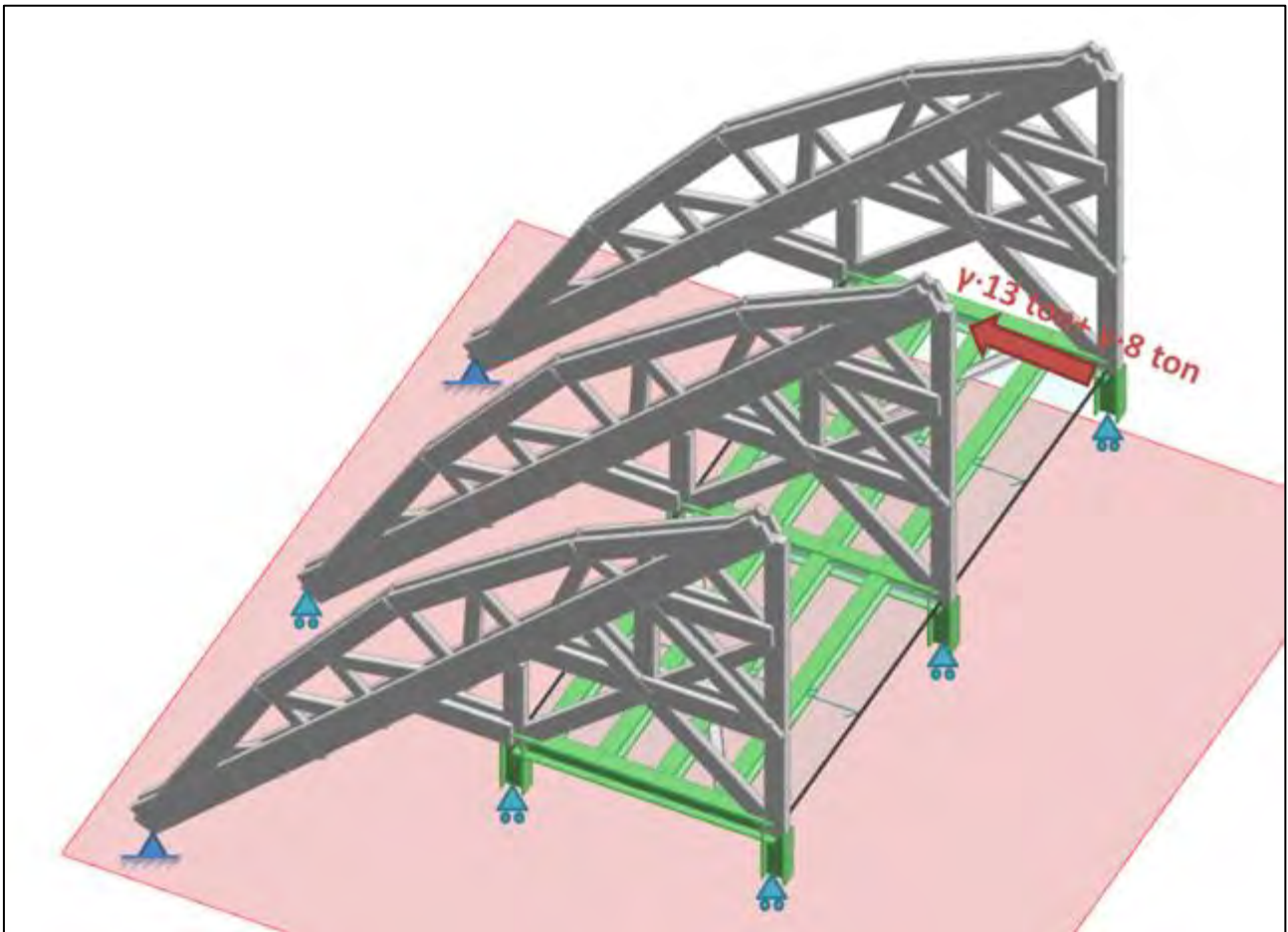


Figure 6. Schéma : condition de charge 2 (court terme)

Les résultats sont résumés comme suit.

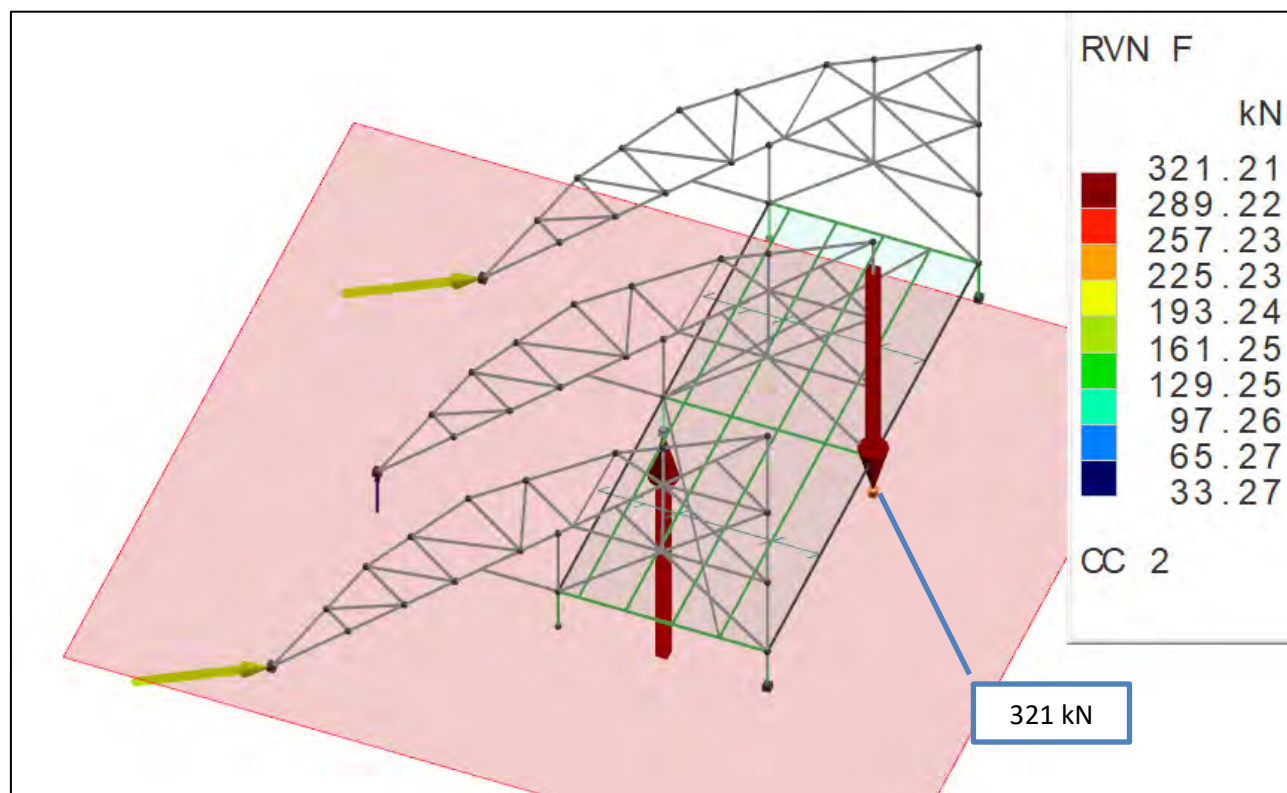


Figure 7. Solution du cas de charge 2.

La force **à court terme** qui tend à soulever le nœud de liaison avec la cathédrale au niveau du tablier est d'environ **321 kN à l'ELU**. Une liaison avec les murs verticaux de la cathédrale qui empêche les mouvements verticaux est donc nécessaire.

Cette condition de charge maximise également les contraintes de traction dans les poutres inclinées ajoutées (UPN 200) et dans les éléments en bois des cintres, comme l'indiquent les figures suivantes.



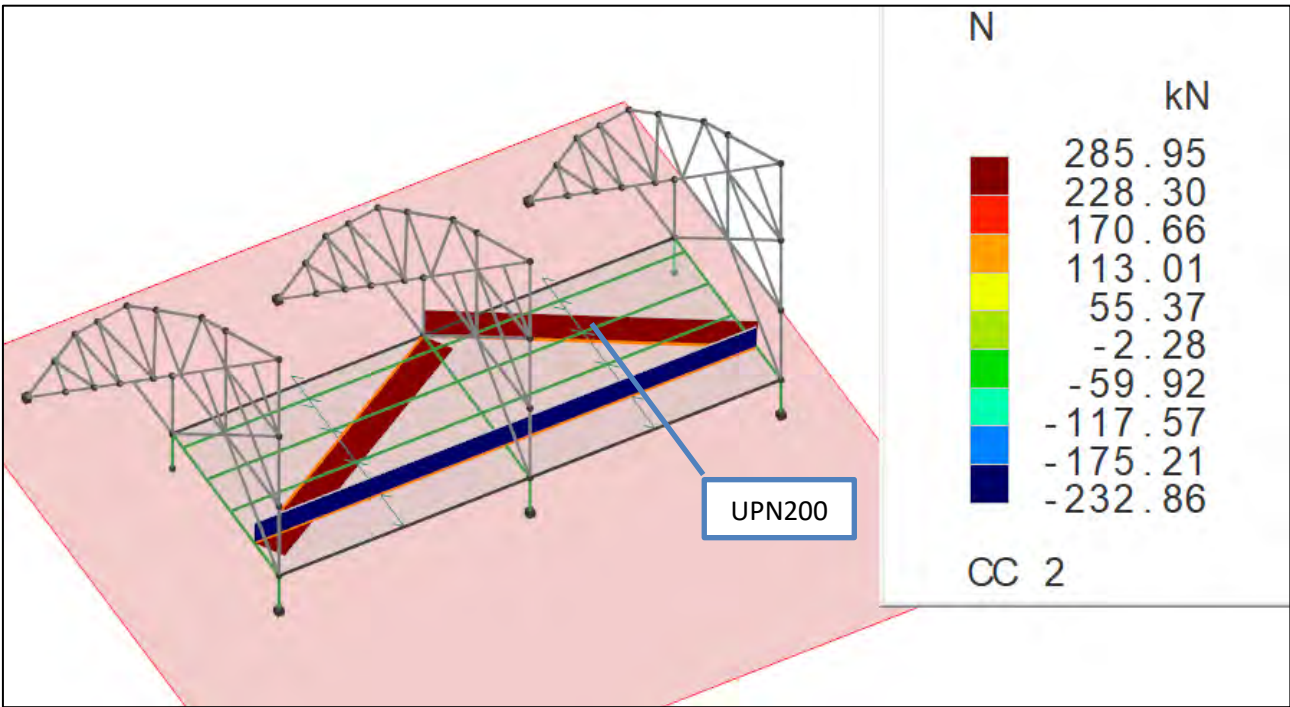


Figure 8. Contraintes de traction dans les éléments diagonaux UPN 200 (environ 285 kN).

Contraintes sur les cintres :

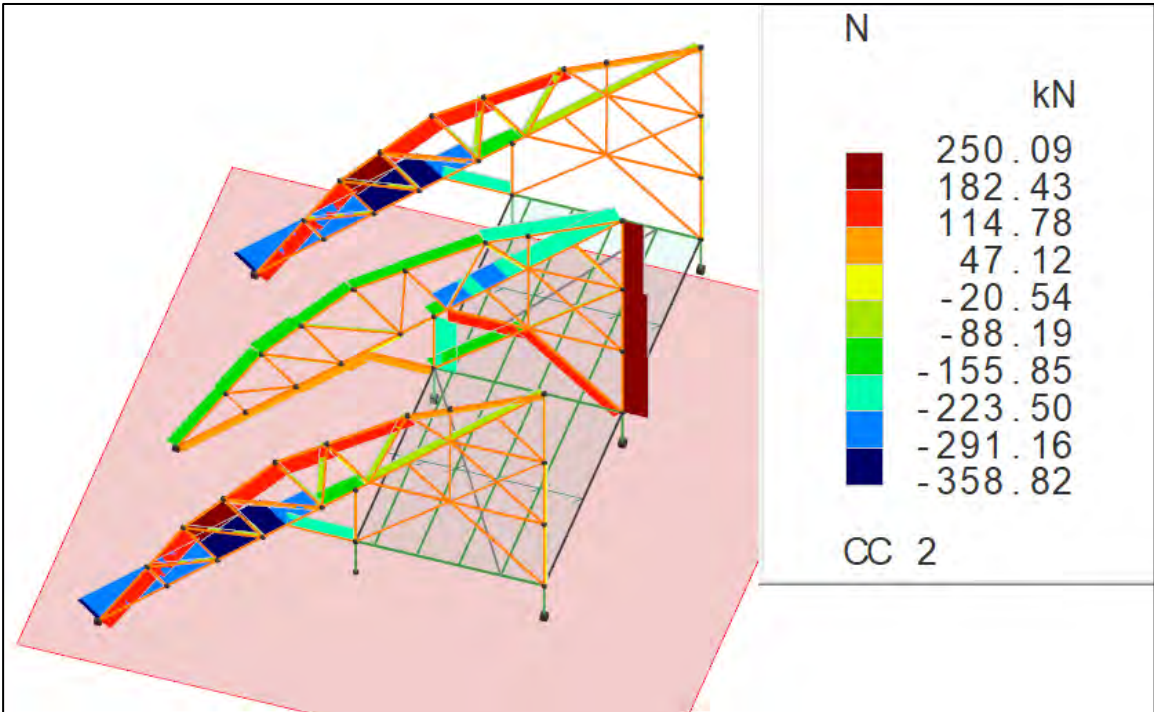


Figure 9. Actions de compression dans les éléments en bois (environ 360 kN).

### 4.3 Cas de charge 3

Le cas de charge 3 considère la condition de charge maximale possible, avec les poids propres, la poussée des voûtes, le vent et les surcharges de 300 daN/m<sup>2</sup> (450 daN/m<sup>2</sup> à l'ELU) sur l'échafaudage. Le poids de l'arc-boutant n'est pas pris en compte car celui-ci est démonté avant le démontage de la culée. La compression sur le nœud 2 est donc maximisée.

**CC3:**  $1.35 \times G1$  (poids propres) +  $(1.35 \times G2$  poussée des voûtes) +  $(1.50 \times \text{surcharge sur le plan de travail}) + (1.50 \times \text{poussée du vent})$

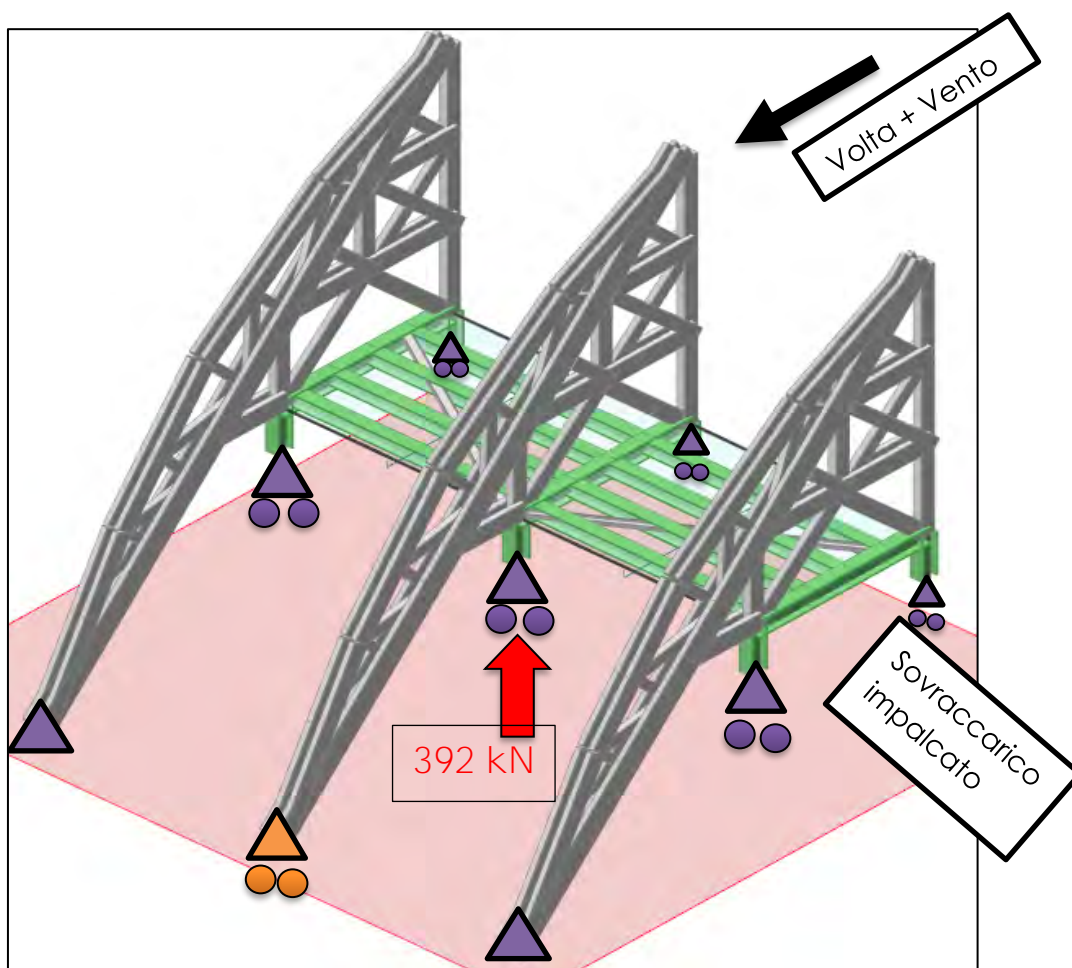


Figure 10. Cas de charge 3 : arc démonté et culée démontée

D'après le modèle Éléments Finis global (voir rapport de diagnostic de 2020), la force agissant en l'état actuel sur les colonnes sous support 2 est d'environ 1200 kN à l'ELS et environ 1620 kN à l'ELU de compression en pied de colonne.

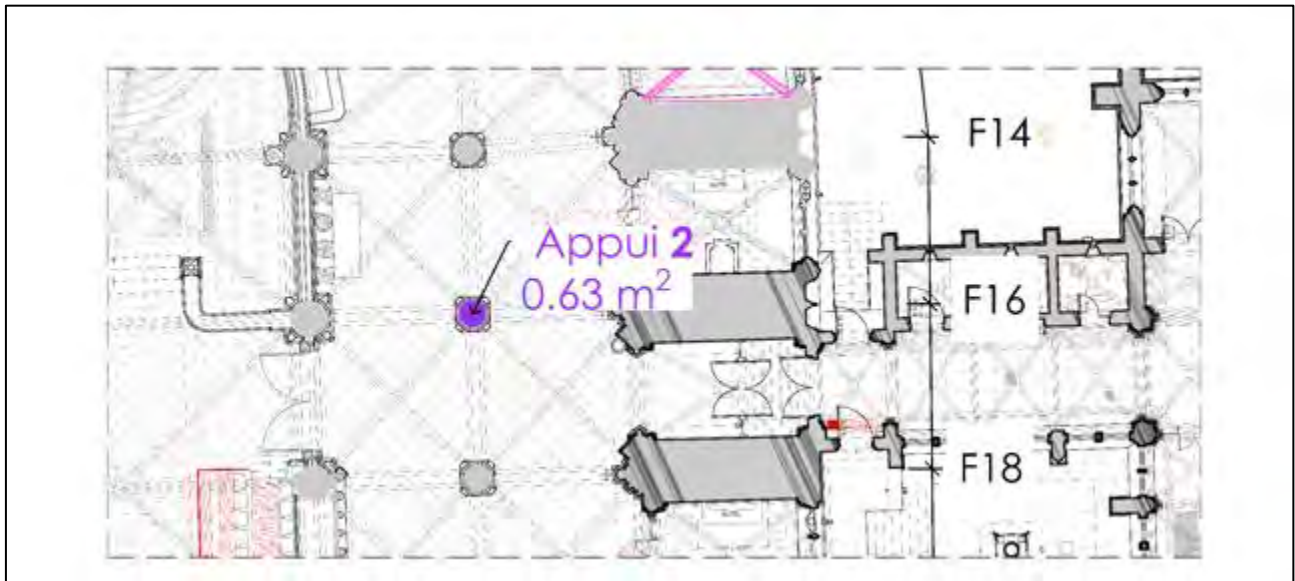


Figure 11. Colonnes sous support 2. On considère une surface de  $0,63 \text{ m}^2$ .

Dans la pire des situations, la charge supplémentaire sur la colonne serait à l'ELU d'environ  $R2 = 1620 + 392 \text{ kN} = 2012 \text{ kN}$ . En considérant une surface d'environ  $0,63 \text{ m}^2$ , la contrainte de compression à l'ELU serait d'environ  $3,19 \text{ MPa}$  ( $31,9 \text{ kg/cm}^2$ ), donc admissible pour une charge à court terme.

## 5 Abside

La poussée des voûtes de l'abside est considérablement inférieure à celle des voûtes des côtés du chœur.

La poussée des voûtes est :

ELU à **43 kN**.

La poussée du vent est :

F9 et F10 ELU = **95 kN**

F3 et F4 ELU = **70 kN**

La poussée des arcs-boutants inférieurs qui contrebutent les terrasses hautes est :

ELU = **54 kN**

Quant au vent, il ne produit une compression des arcs-boutants qu'en cas de dépression sur la toiture de l'abside, il peut donc être négligé.

Dans le cas d'un démontage uniquement de la partie supérieure de la culée qui soutient l'arc-boutant, la poussée transmise par le cintre peut être supportée par la culée même sans le poids supérieur.

Le contrainte de cisaillement maximale produite par la poussée de la voûte est, en effet, inférieure à la cohésion de la maçonnerie (en considérant une cohésion pour la maçonnerie en pierre carrée d'environ 0.031 MPa la résistance au cisaillement d'une culée est d'environ **124 kN**)

Dans le cas d'un démontage total de la culée, la poussée des voûtes, parmi les cintres, est transmise au tablier qui est capable de l'absorber, compte tenu de la forme courbe du tablier et des poutres de raidissement ajoutées (figure 13).



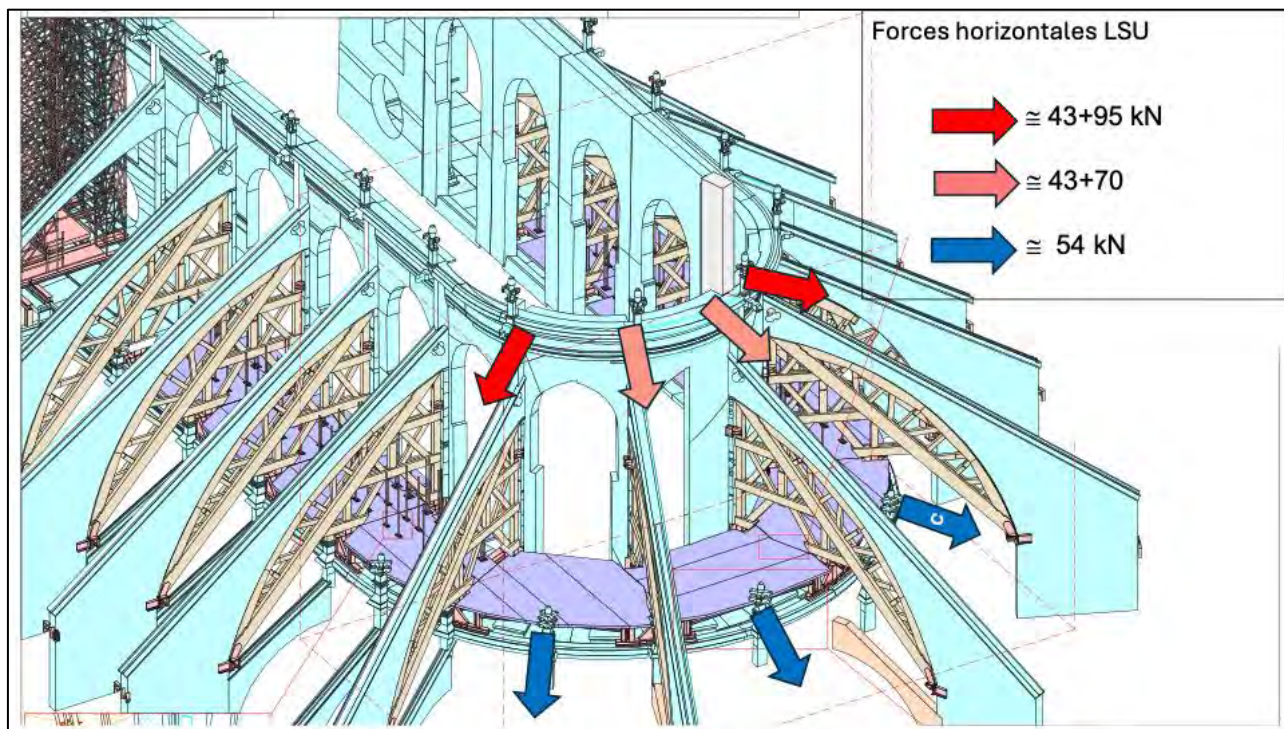


Figure 12. Poussées des voûtes dans l'abside

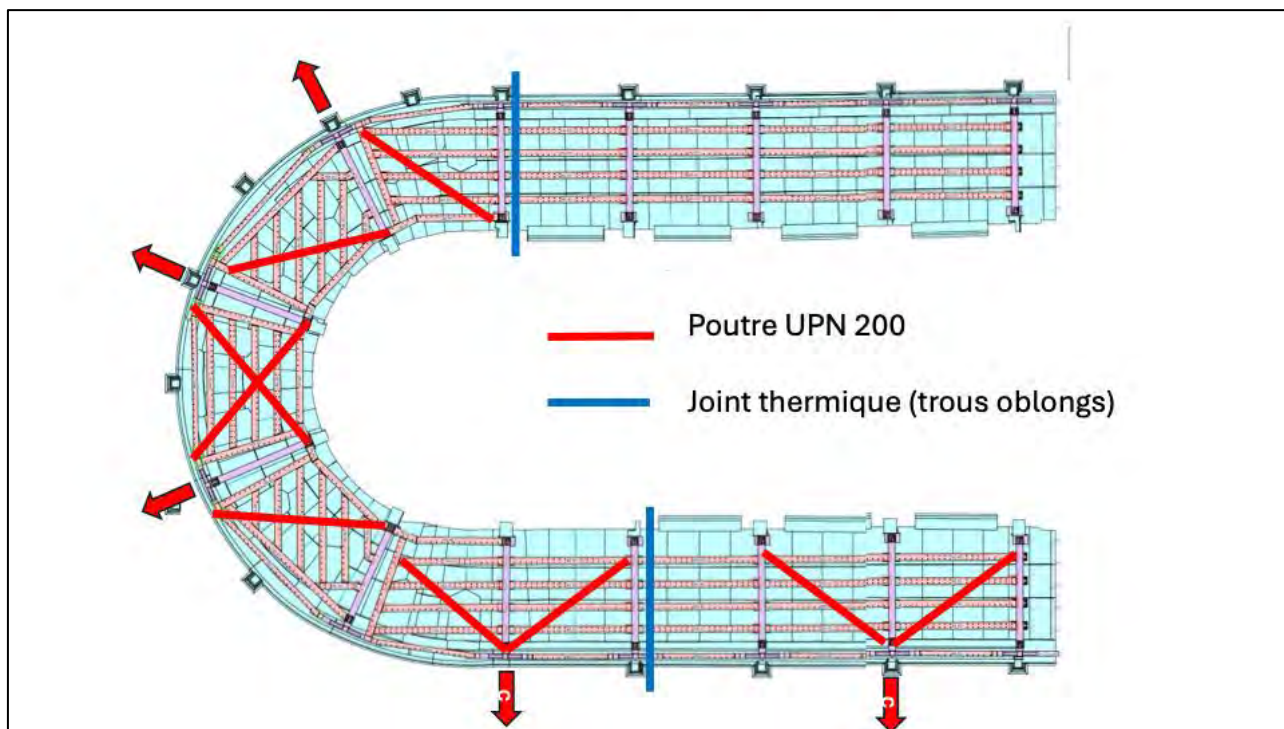


Figure 13. Poutres de raidissement du tablier au-dessus de la terrasse haute et position des joints de dilatation déjà réalisés avec trous oblongs dans les poutres.

Les efforts transmis par les cintres aux structures de la cathédrale, dans le cas d'un arc-boutant et d'un contrefort d'abside entièrement démontés, sont évidemment inférieurs à ceux transmis sur les travées droites du chœur.

Le cas examiné est celui de l'arc-boutant F10.

Les structures du tablier telles que décrites dans les DOE ont été prises en compte dans le modèle.

Les valeurs maximales sont reportées dans les figures suivantes et sont compatibles avec la résistance des structures en pierre de la cathédrale.

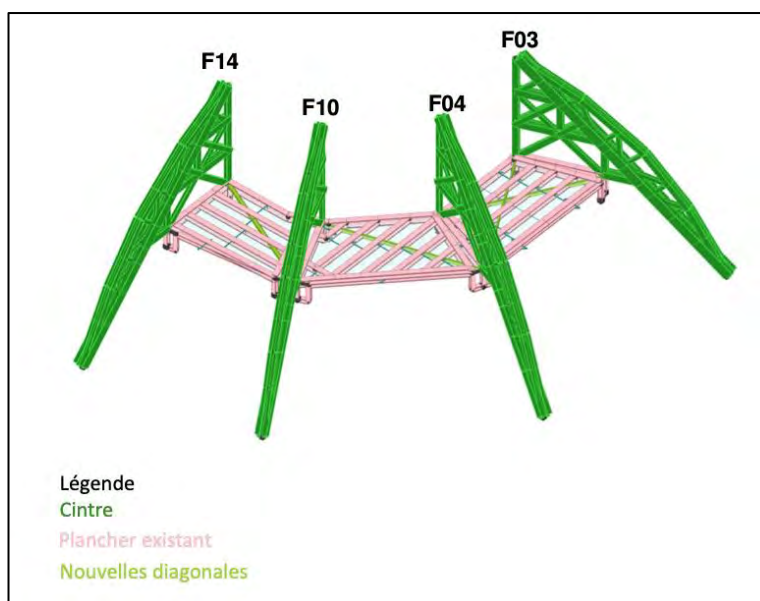


Figure 14. Schéma du modèle de calcul

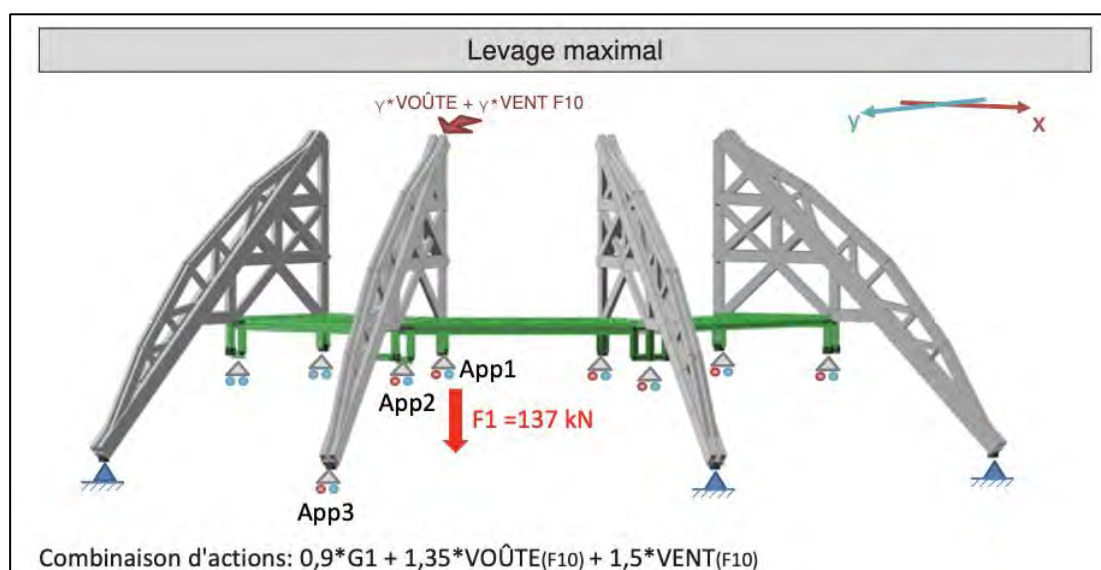


Figure 15. Réaction de l'appui 1 (soulèvement)



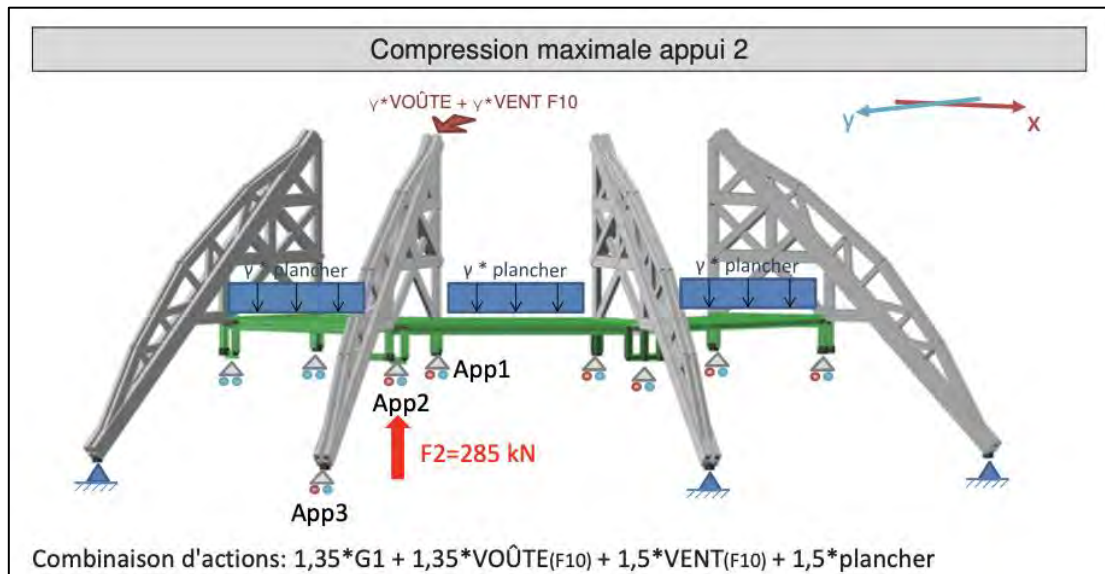


Figure 16. Réaction de l'appui 2 (compression)

## 6 Arcs-boutants inférieurs

La poussée des voûtes supportant la terrasse haute est estimée à environ **40 kN à l'ELS**.

Pour démonter et remonter les arcs-boutants, il est nécessaire de créer des cintres de support.

Sous réserve d'évaluations plus précises, la poussée des voûtes qui soutiennent la terrasse haute pourra être supportée par la culée intermédiaire des petits arcs-boutants. La force de cisaillement maximale de la culée est évaluée en 49 kN même si démontée dans la partie supérieur.

oooooOOOOOooooo

CATHÉDRALE  
NOTRE-DAME DE PARIS

TRAVAUX DE RESTAURATION  
POST 2024



## ANNEXE PARTICULIERE 2

### Etudes d'exécution du tablier

---

DOSSIER DE CONSULTATION DES ENTREPRISES

#### **Restauration du chevet**

*Février 2025*



Maîtrise d'Ouvrage :

ETABLISSEMENT PUBLIC CHARGE DE  
LA CONSERVATION ET DE LA  
RESTAURATION DE LA CATHEDRALE  
NOTRE-DAME DE PARIS

Maîtrise d'Œuvre : A.C.M.H.

Philippe VILLENEUVE  
Rémi FROMONT



**LE BRAS FRERES**

69 RUE VICTOR HUGO  
B.P. 93 - 54803 JARNY CEDEX  
Tel: 03.82.33.20.96

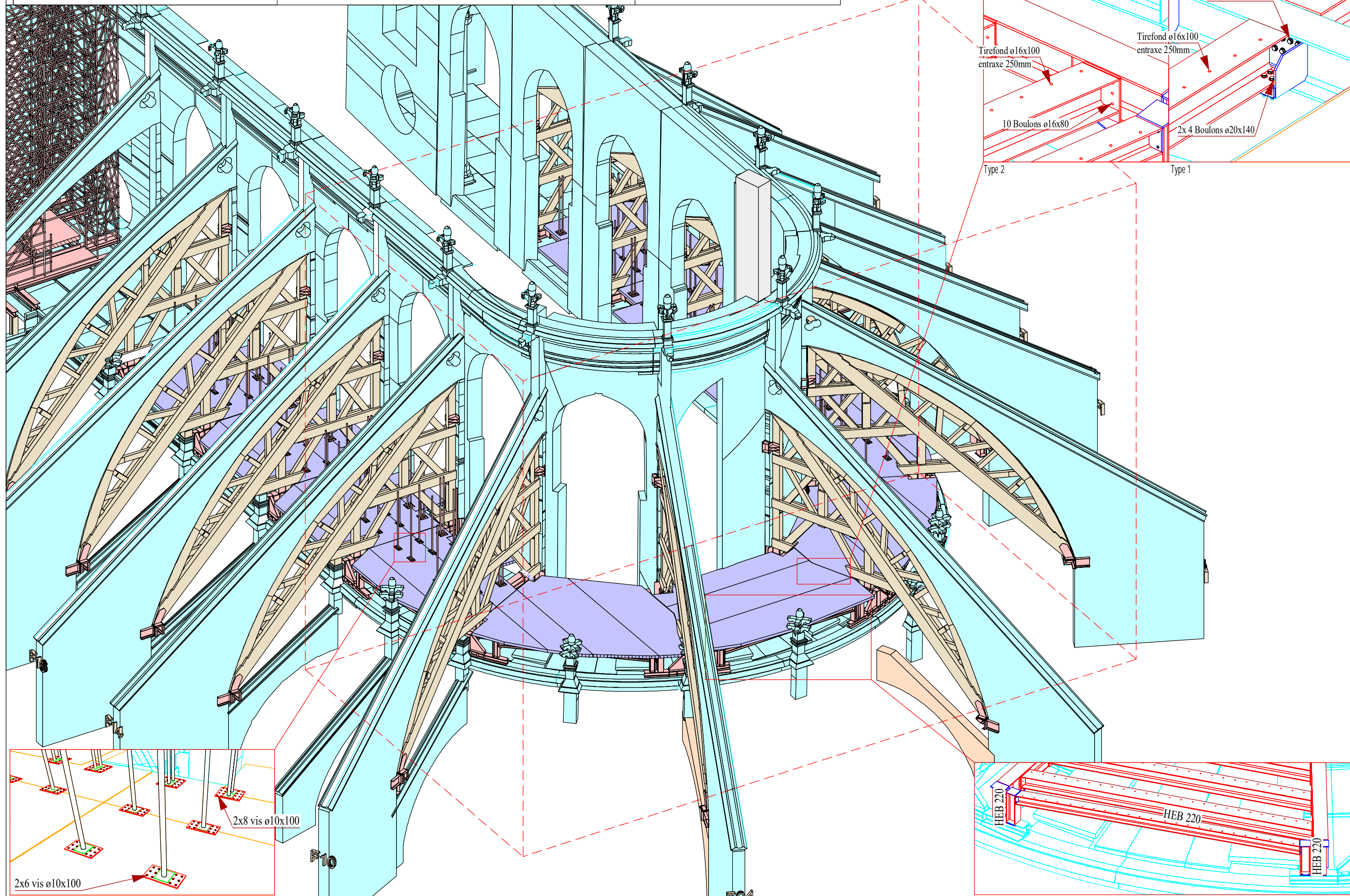


Paris Notre Dame - Sécurisation

le 28-05-20

## Axonométrie

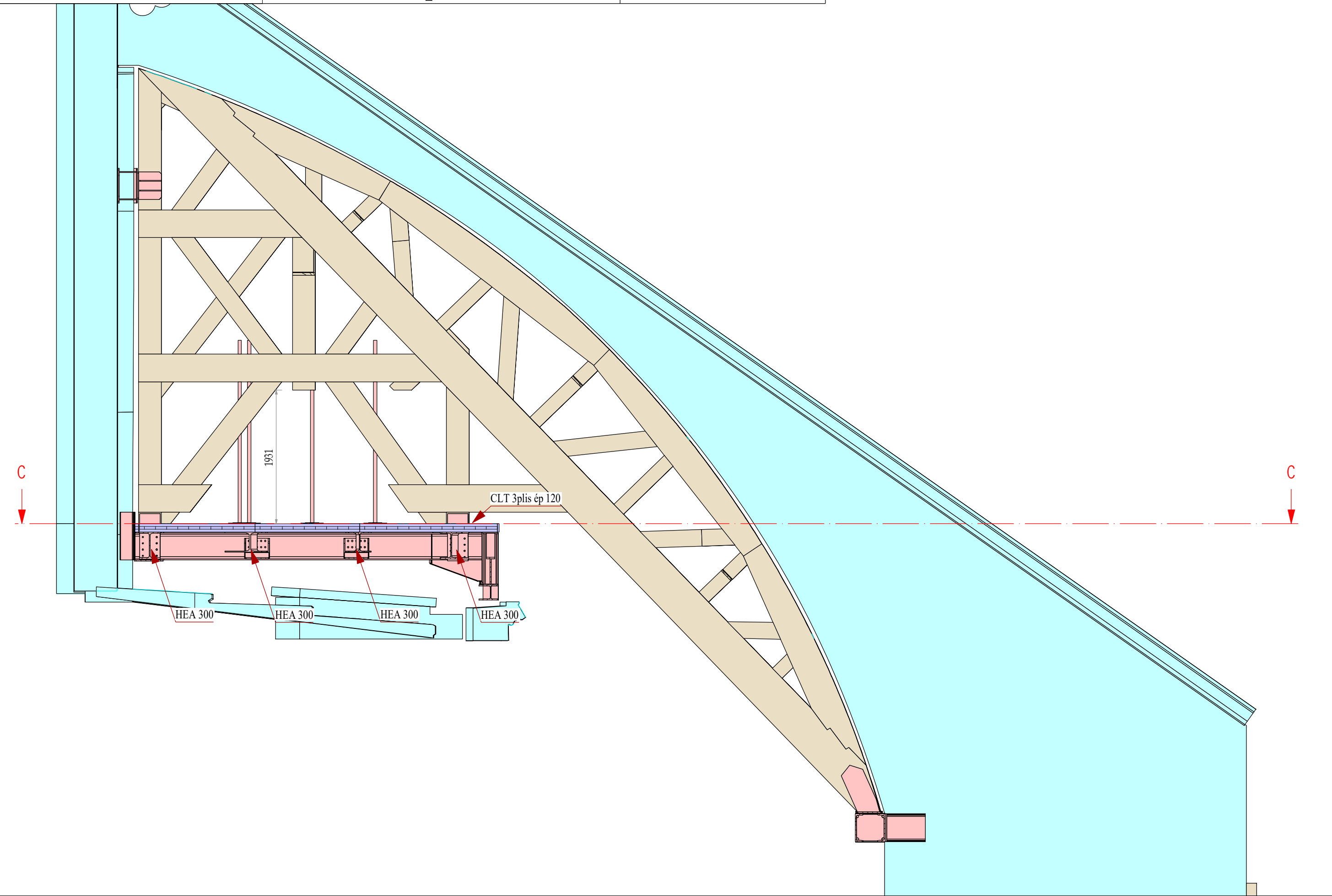
Affaire N° : 2981





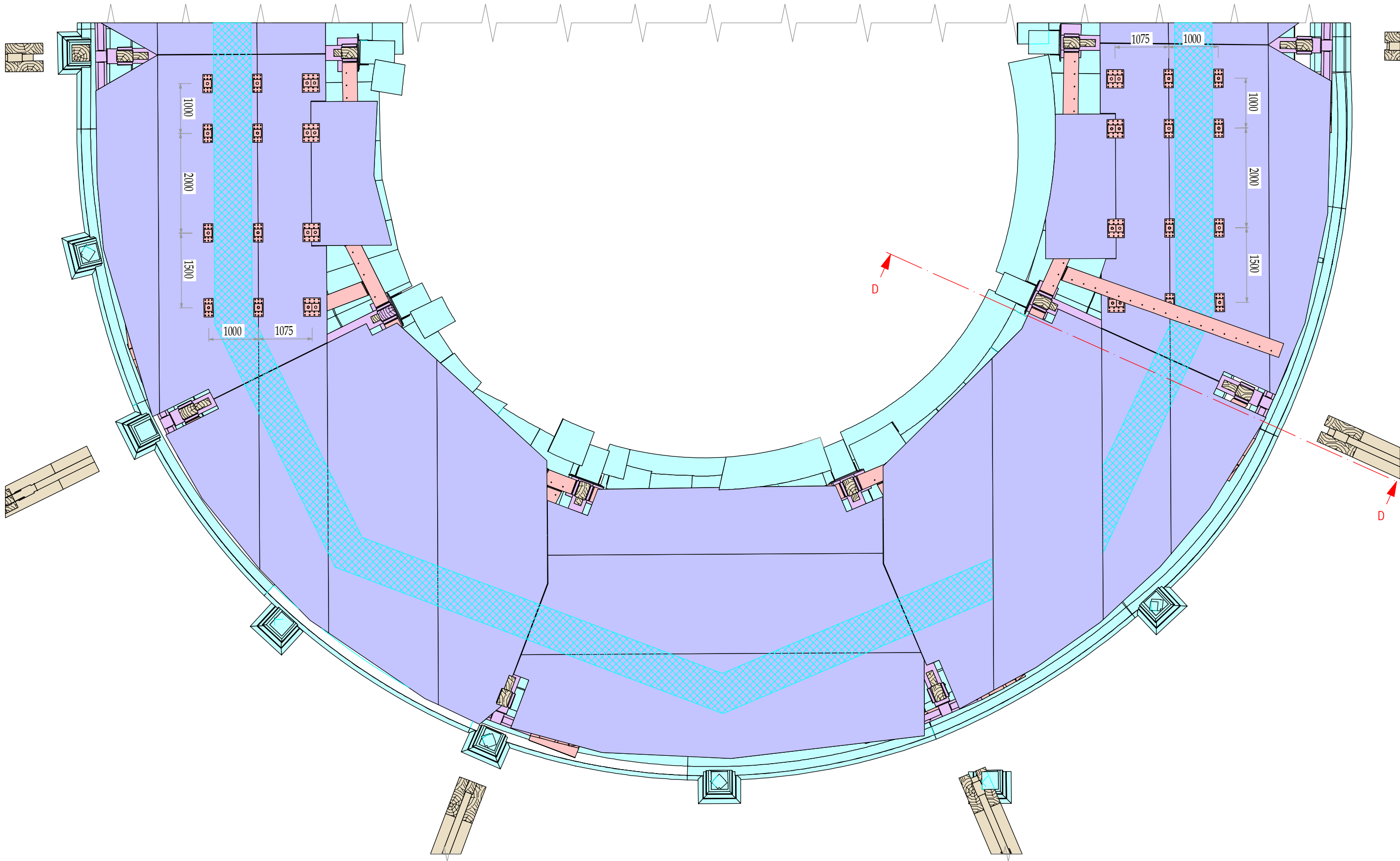
**Coupe A-A**

Affaire N° : 2981



**Coupe B-B avec CLT**

Affaire N° : 2981







**LE BRAS FRERES**  
69 RUE VICTOR HUGO  
B.P. 93 - 54803 JARNY CEDEX  
Tel: 03.82.33.20.96

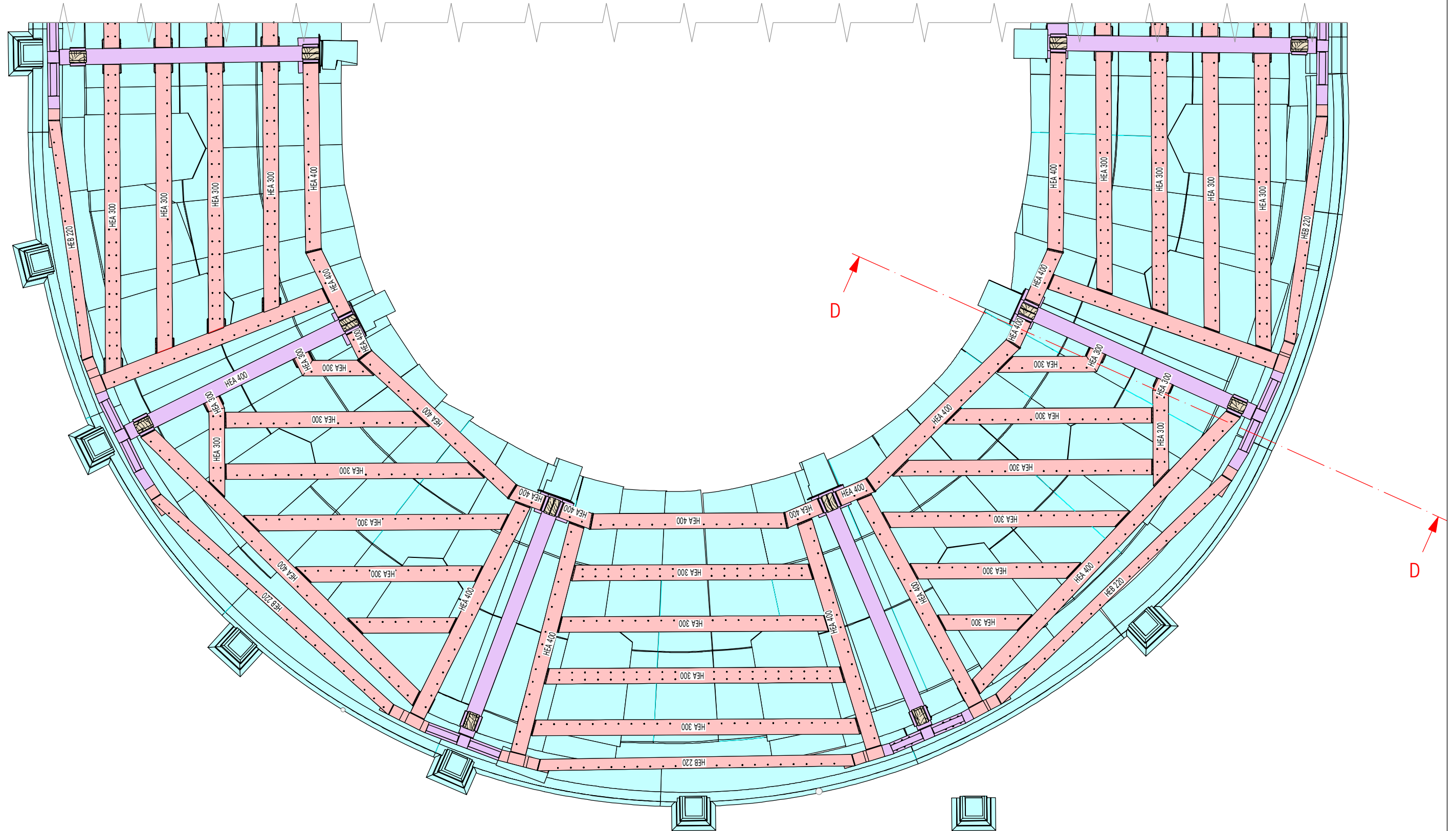
Paris Notre Dame - Sécurisation

le 28-05-20

Echelle : 1/50

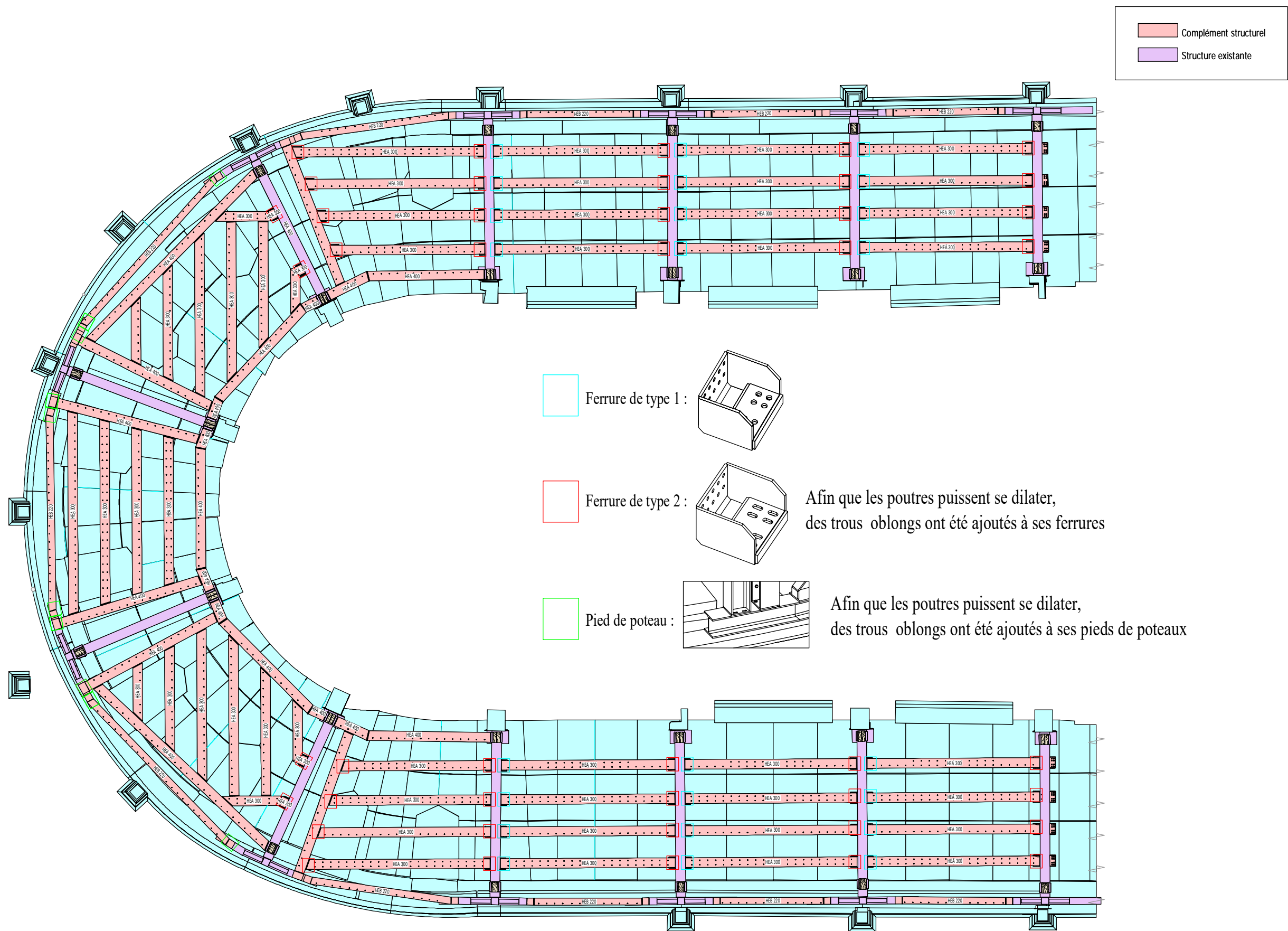
## Coupe B-B sans CLT

Affaire N° : 2981



Coupe B-B avec CLT

Affaire N° : 2981



CATHÉDRALE  
NOTRE-DAME DE PARIS

TRAVAUX DE RESTAURATION  
POST 2024



ANNEXE PARTICULIERE 3  
Tablier et cintres  
Vérification des structures provisoires

---

DOSSIER DE CONSULTATION DES ENTREPRISES

**Restauration du chevet**

*Février 2025*



Maîtrise d'Ouvrage :

ETABLISSEMENT PUBLIC CHARGE DE  
LA CONSERVATION ET DE LA  
RESTAURATION DE LA CATHEDRALE  
NOTRE-DAME DE PARIS



Maîtrise d'Œuvre : A.C.M.H.

Philippe VILLENEUVE  
Rémi FROMONT

## Note

---

Cette note fait suite au rapport de contrôle périodique des ouvrages mis en œuvre lors de la phase de sécurisation de la cathédrale Notre Dame de Paris, ce dernier rapport date du 07 mars 2025.

Le rapport met en évidence certaines interventions nécessaires notamment sur :

- Les planchers bois en CLT ;
- Les fers en console des travées T20 et T18.

Les interventions sur les parties détériorées du plancher, de même que la mise en place d'un contreplaqué, seront finalisées en amont du démarrage du chantier de restauration du chevet. Les déformations des fers en console des travées T20 et T18 feront objet d'une reprise en amont du démarrage du chantier de restauration du chevet.



# LE BRAS FRÈRES

COUVERTURE CHARPENTE ET PATRIMOINE  
DEPUIS 1954

BARDAGE PIERRES de TAILLES  
CHARPENTE COUVERTURE  
MONUMENTS HISTORIQUES  
OSSATURE BOIS INGÉNIERIE

## Cathédrale Notre-Dame de Paris

Sécurisation, confortations d'urgence et sauvegarde de l'édifice

### Rapport de contrôle mars 2025

*Maître d'ouvrage :*                      *Établissement public chargé de la conservation et de la restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris*  
*2 bis cité Martignac*  
*75007 Paris*

*Maître d'œuvre :*                      *Philippe VILLENEUVE Architecte en chef des monuments historiques*

Indice :	Modifications :	Réalisé par :	Date :
0	Première émission	Y. DEBESSE	07/03/2025

**Siège social**  
22, rue des Closeries  
55430 Belleville-sur-Meuse

**Bureaux & correspondance**  
69, rue Victor Hugo BP 93  
54800 JARNY Cedex

Tél. : **+33 3 82 33 20 96**  
Fax. : **+33 3 82 20 18 48**  
**accueil@lebrasfreres.fr**

**[www.le-bras-freres.fr](http://www.le-bras-freres.fr)**

S.A.S au capital de 160 000 euros RC Verdun B 320 182 447 N° TVA : FR 03 320 182 447



---

# Sommaire

1	Présentation du projet .....	3
1.1	Objet de la note .....	3
1.2	Localisation des ouvrages.....	3
2	Etalement des voûtes .....	4
3	Etalement des pignons .....	4
4	Etalement des arcs boutants .....	5
5	Planchers déambulatoires.....	7
6	Conclusion .....	10





# 1 Présentation du projet

## 1.1 Objet de la note

Ce document constitue le rapport de contrôle périodique des ouvrages mis **en œuvre** lors de la phase de sécurisation de la cathédrale Notre-Dame de Paris.

Ce rapport fait suite aux précédents réalisés en juin 2024, février 2024, septembre 2023, mai 2023, février 2023, novembre 2022 et juin 2022.

L'ensemble des contrôles de ce rapport a été réalisé au cours du mois de mars 2025.

Le prochain contrôle sera à effectuer fin juin 2025.

Si des travaux non annoncés sont prévus sur ces ouvrages, l'entreprise Lebras Frères ne pourra pas être tenue responsable.

## 1.2 Localisation des ouvrages

Le contrôle périodique consiste à vérifier tous les 4 mois l'états des ouvrages mis en œuvre lors de la phase de sécurisation, il concerne les ouvrages suivants :

- Etalement pignon Nord → Déposé Décembre 2022
- Etalement pignon Sud → Déposé Décembre 2022
- Etalement pignon Ouest → Déposé Janvier 2022
- Etalement des arcs boutants
  - ~~T26/28/30/32/34/36/38/40~~ → Déposé Novembre 2024
  - ~~T25/27/29/31/33/35/37/39~~ → En cours de dépose mars 2025
  - T1 à 22
- Etalement des voûtes
  - ~~TP23a-23b~~ → déposé
  - ~~CH13-14, 15-18, 19-22~~ → déposé
  - ~~NF 25-28, 29-32~~ → déposé
  - Cintres sous arcs doubleaux de la croisée → déposé
  - Cintres de la croisée → déposé
- Planchers des déambulateurs
  - ~~T26/28/30/32/34/36/38/40~~ → Déposé Novembre 2024
  - ~~T25/27/29/31/33/35/37/39~~ → En cours de dépose mars 2025
  - T1 à 22

Le contrôle est principalement visuel, il consiste à localiser les éventuels désordres (fissures, dégradations, traces d'infiltrations, couchis déchaussés ...) et à resserrer les assemblages boulonnés.

Les plans et photos des relevés effectués sont en annexe de ce document.



## 2 Etalement des voûtes

Depuis le dernier contrôle, les arcs et la voûtes de la croisée ont été restitué.

**L'étalement a été déposé dans la foulée.**

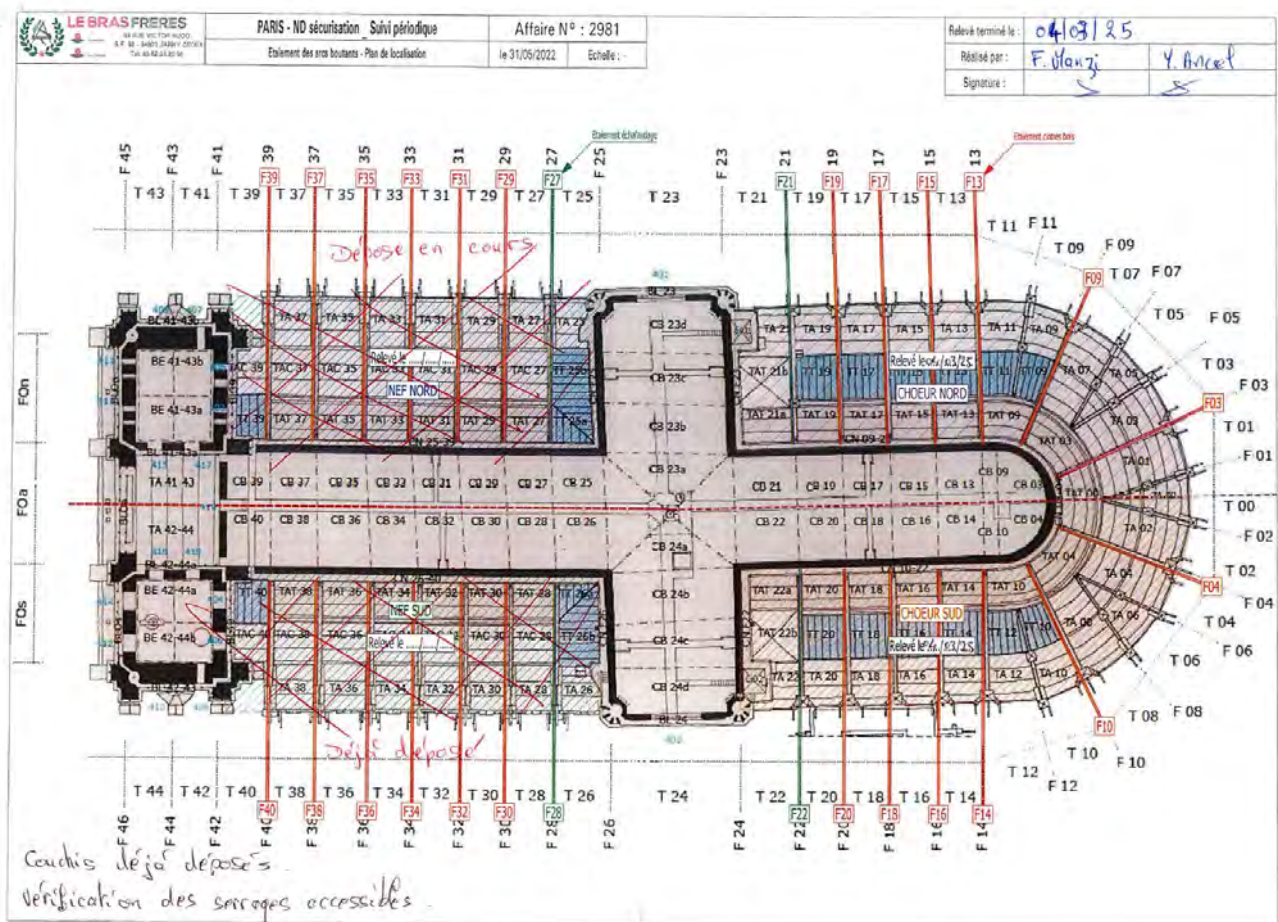
## 3 Etalement des pignons

Depuis le dernier contrôle, les étalements des pignons ont été déposés.

- Etalement pignon Nord → Déposé Décembre 2022
- Etalement pignon Sud → Déposé Décembre 2022
- Etalement pignon Ouest → Déposé Janvier 2022



## 4 Etalement des arcs boutants



L'ensemble des étalements des arcs boutants a été contrôlé, nous avons constaté :

- L'accès aux cintres est compliqué, ils sont globalement en bon état.
- Les assemblages ont été contrôlés visuellement, ceux-ci sont correct, les rondelles sont en contact ou légèrement enfoncées dans les bois témoignant du bon serrage.
- Les couchis des arcs boutants du cœur ont été déposés.

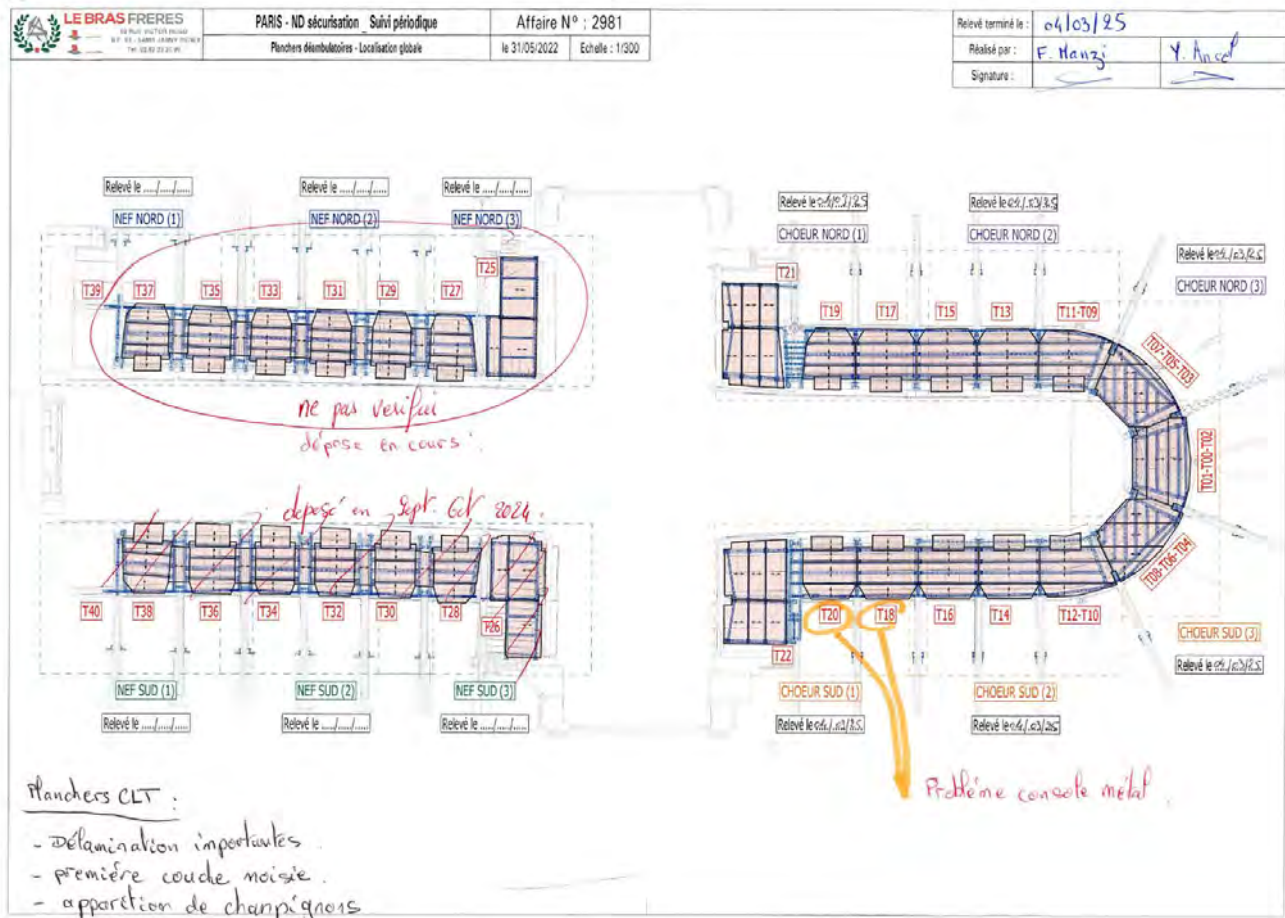




*Etat général des cintres sous arcs doubleaux F20 / F18*



## 5 Planchers déambulatoires



L'ensemble des planchers déambulatoire du choeur a été contrôlé, nous avons constaté :

- Après 4 ans d'exposition aux intempéries, les panneaux CLT sont globalement en très mauvais état. La première des 3 couches de bois composant les plancher CLT est très friables, les couches se décollent entre elles, la cohésion des planchers est compromise la capacité portante de ces derniers est donc fortement réduite.
- Nous constatons également l'apparition de champignons sur les zones présentant des accumulations d'eau (jonctions de planchers, appuis sur les fers).
- Les dégradations des panneaux CLT sont dues à l'exposition aux intempéries (soleil, pluie ...) et la stagnation d'eau (éléments à plat).
- Les assemblages ont été contrôlés visuellement, les serrages sont corrects.
- Certains appuis bétons sont fissurés.
- Présence d'eau sous les films plastiques.
- Sur les travées T20 et T18 les fers en console contre le mur présentent une déformation excessive. Les poutres les reprenant ont vrillées, dans l'état actuel la pérennité de l'ouvrage est compromise, un déchargement des planchers (retrait de l'échafaudage) et la mise en place de renforts est nécessaire pour une exploitation lors des prochaines phases de restauration. De base, ces consoles ne devaient pas reprendre d'appuis d'échafaudage.





Plancher CLT : délamination entre lame, couche supérieure en très mauvais état  
Intégrités des panneaux compromise



Développement de champignon sur les planchers CLT





*Plancher T20 / T18 : Flèche excessive des consoles, torsion des poutres de reprise  
Déchargement des zones en console à prévoir*



## 6 Conclusion

Etalement des voûtes :

- Etalements déposés.

Etalement des pignons :

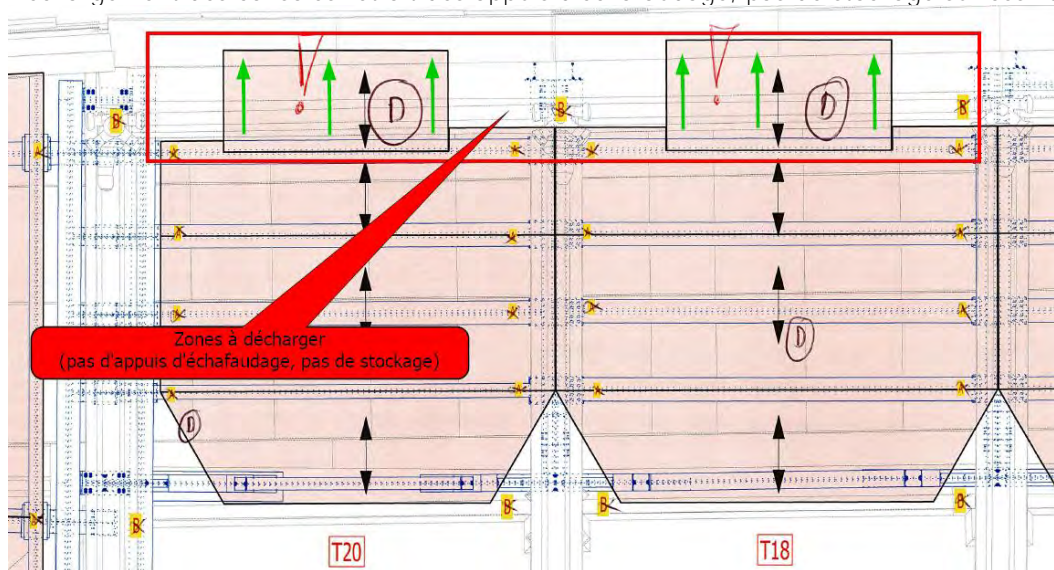
- Etalements déposés.

Etalement des arcs :

- Arcs côté NEF SUD → Déposés Novembre 2024
- Arcs côté NEF NORD → En cours de dépose
- Arcs CHOEUR
  - o Dégradations sommaires des bois **dues à l'exposition** aux intempéries à surveiller.
  - o Serrages des boulons corrects.
  - o Les couchis ont été déposés. Les cintres n'ont donc plus de fonction actuellement.

Planchers déambulatoires :

- **T18 et T20 : déchargement des planchers et confortements nécessaire.**  
Flexion excessive des consoles contre le mur + torsion des poutres de reprise  
Déchargement des consoles retrait des appuis d'échafaudage, pas de stockage sur ces zones.



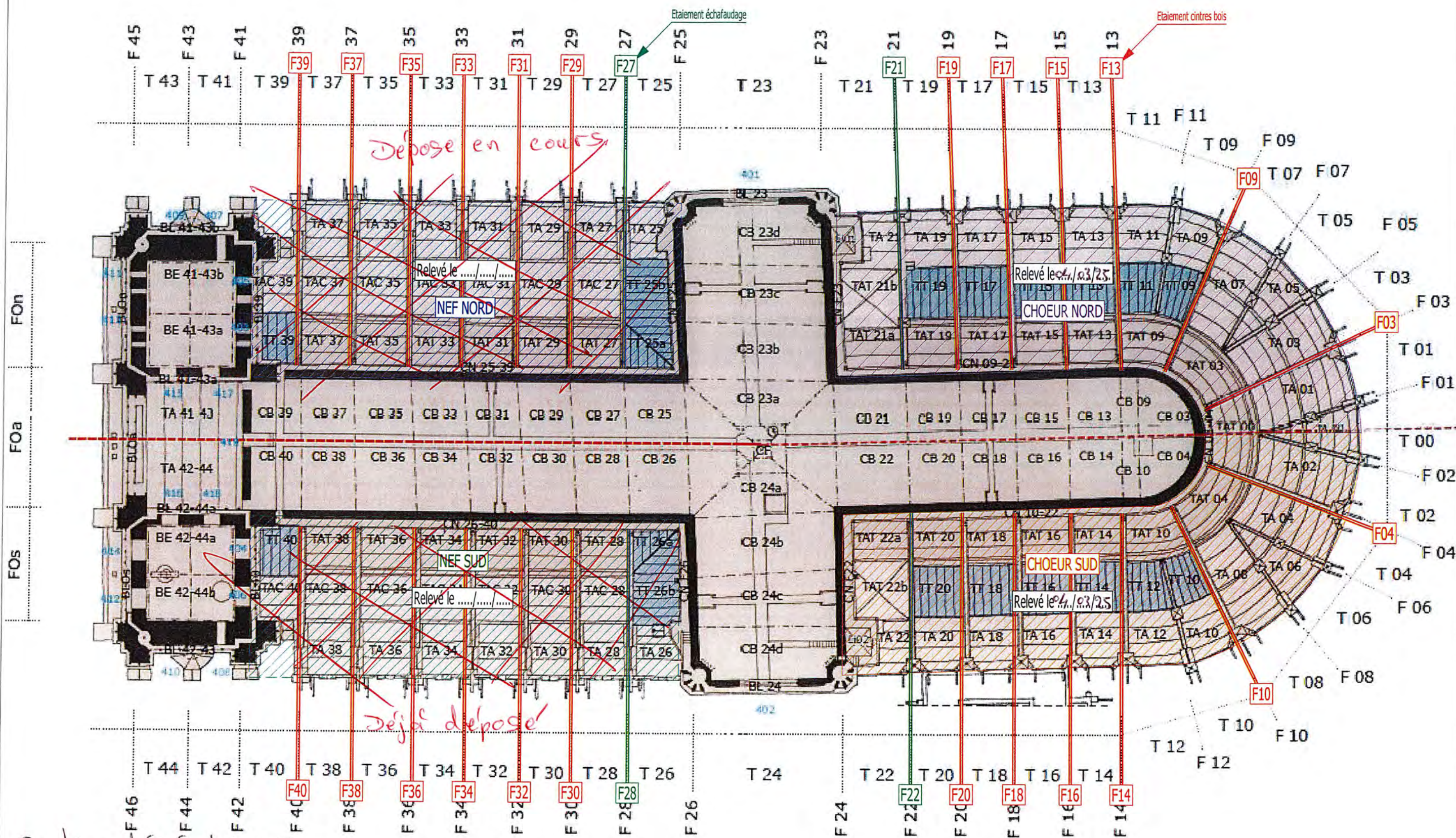
- **Platelage CLT : dégradations des panneaux CLT inquiétante, remplacement à prévoir**  
Intégrité des panneaux compromise (délamination, pourriture, champignon).  
Il faut prévoir un remplacement des planchers CLT si ceux-ci **doivent supporter l'échafaudage pour une future phase de travaux.**

Nota : avant chaque nouvelle sollicitation sur les planchers (modification d'échafaudage, stockage)

- un contrôle approfondi de la structure devra être réalisé sur site,
- la compatibilité des nouvelles charges sur les structures existantes devra être vérifiée (position des appuis, vérification par calcul de la structure et des assemblages).



Fin du document.





Coudes déjà déposés.  
Vérification des serrages accessibles.



Relevé effectué le :	04/08/25	
Réalisé par :	F. Manzi	Y. Arcel
Signature :		

### Vérifications à réaliser :

1- Localiser les stagnations d'eau, les dégradations sur les bois, les couchis tombés

E (Eau) D (Dégradation) C (Couchis)

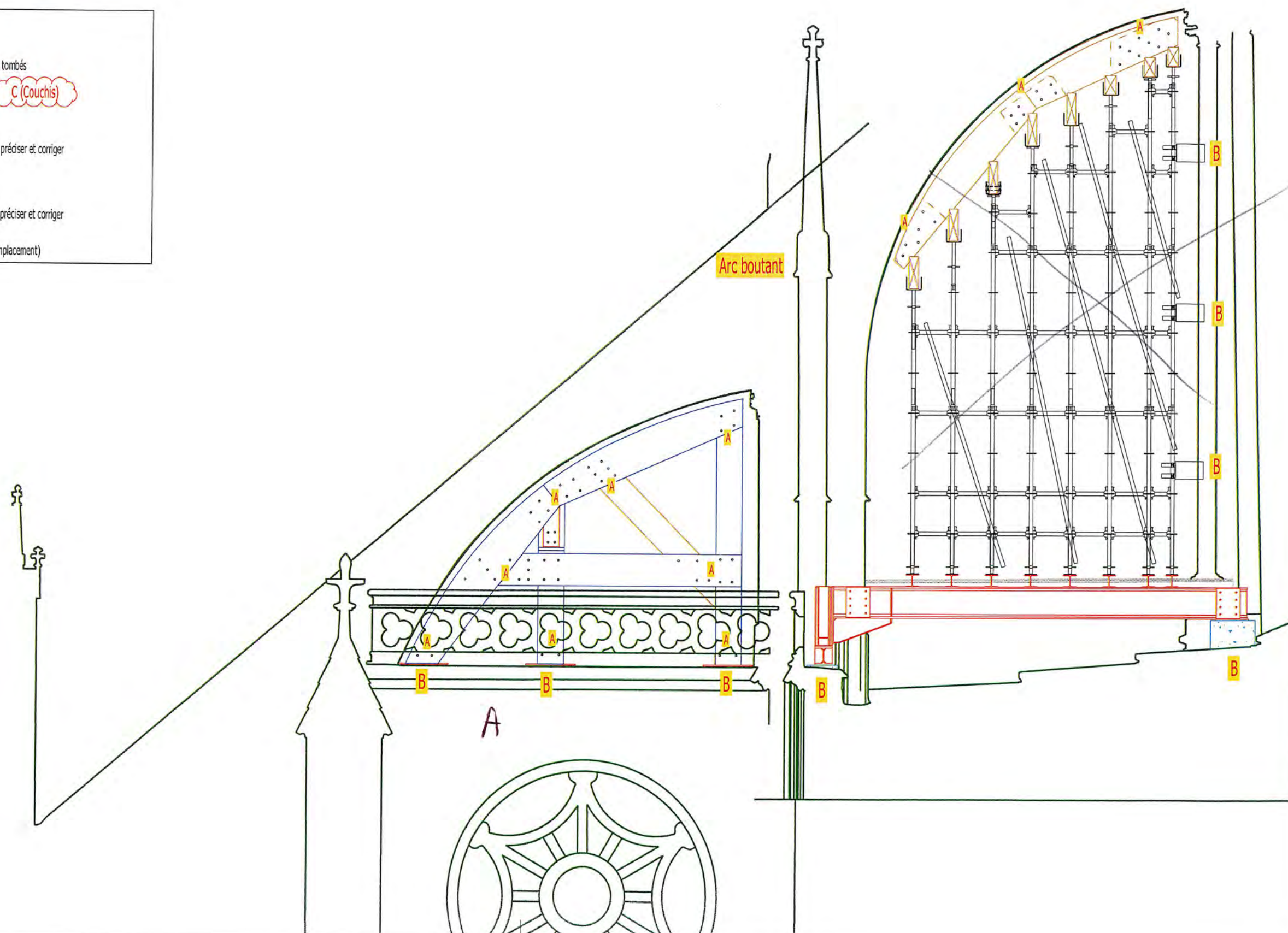
2- Vérification visuelle des assemblages des cintres, ferrures

A non vérifié ~~A~~ vérifié OK ~~A~~ vérifié problème préciser et corriger



3- Vérification des maçonneries au niveau des liaisons avec les cintres

B non vérifié ~~B~~ vérifié OK ~~B~~ vérifié problème préciser et corriger

4- Vérification de la présence de fissures sur les arcs boutants (indiquer l'emplacement)





Relevé effectué le :	04/09/25	
Réalisé par :	F. Manzi	Y. Ancel
Signature :		

### Vérifications à réaliser :

1- Localiser les stagnations d'eau, les dégradations sur les bois, les couchis tombés

E (Eau) D (Dégradation) C (Couchis)

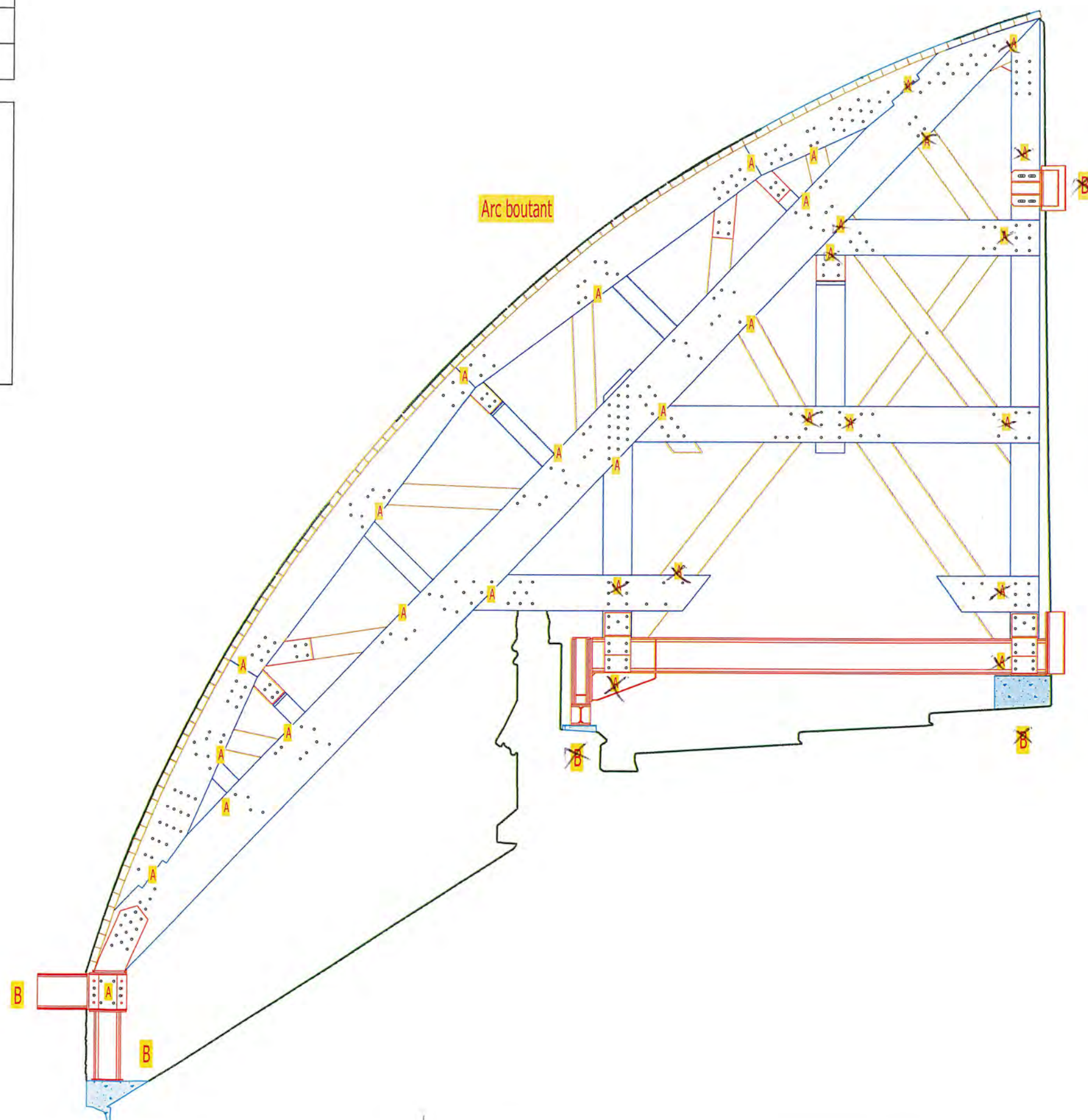
2- Vérification visuelle des assemblages des cintres, ferrures

A non vérifié ~~A~~ vérifié OK ~~A~~ vérifié problème préciser et corriger



3- Vérification des maçonneries au niveau des liaisons avec les cintres

B non vérifié ~~B~~ vérifié OK ~~B~~ vérifié problème préciser et corriger

4- Vérification de la présence de fissures sur les arcs boutants (indiquer l'emplacement)





Relevé effectué le :	04/03/25	
Réalisé par :	F. Manzi	Y. Ancel
Signature :		

### Vérifications à réaliser :

1- Localiser les stagnations d'eau, les dégradations sur les bois, les couchis tombés

E (Eau) D (Dégradation) C (Couchis)

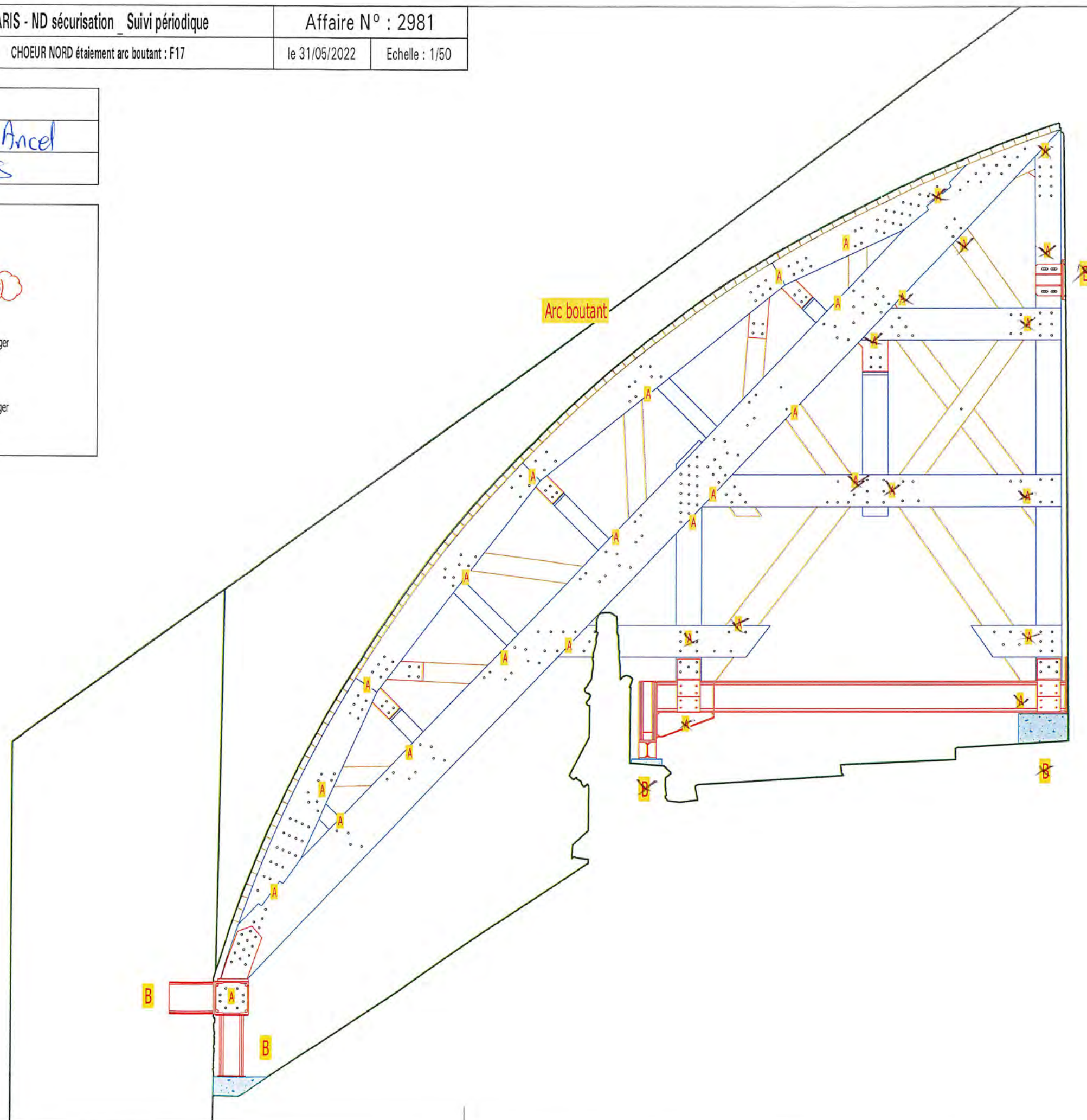
2- Vérification visuelle des assemblages des cintres, ferrures

A non vérifié ~~X~~ vérifié OK  vérifié problème préciser et corriger



3- Vérification des maçonneries au niveau des liaisons avec les cintres

B non vérifié ~~X~~ vérifié OK  vérifié problème préciser et corriger

4- Vérification de la présence de fissures sur les arcs boutants (indiquer l'emplacement)





Relevé effectué le :	04/03/25	
Réalisé par :	F. Manzy	Y. Bancel
Signature :		

### Vérifications à réaliser :

1- Localiser les stagnations d'eau, les dégradations sur les bois, les couchis tombés

E (Eau) D (Dégradation) C (Couchis)

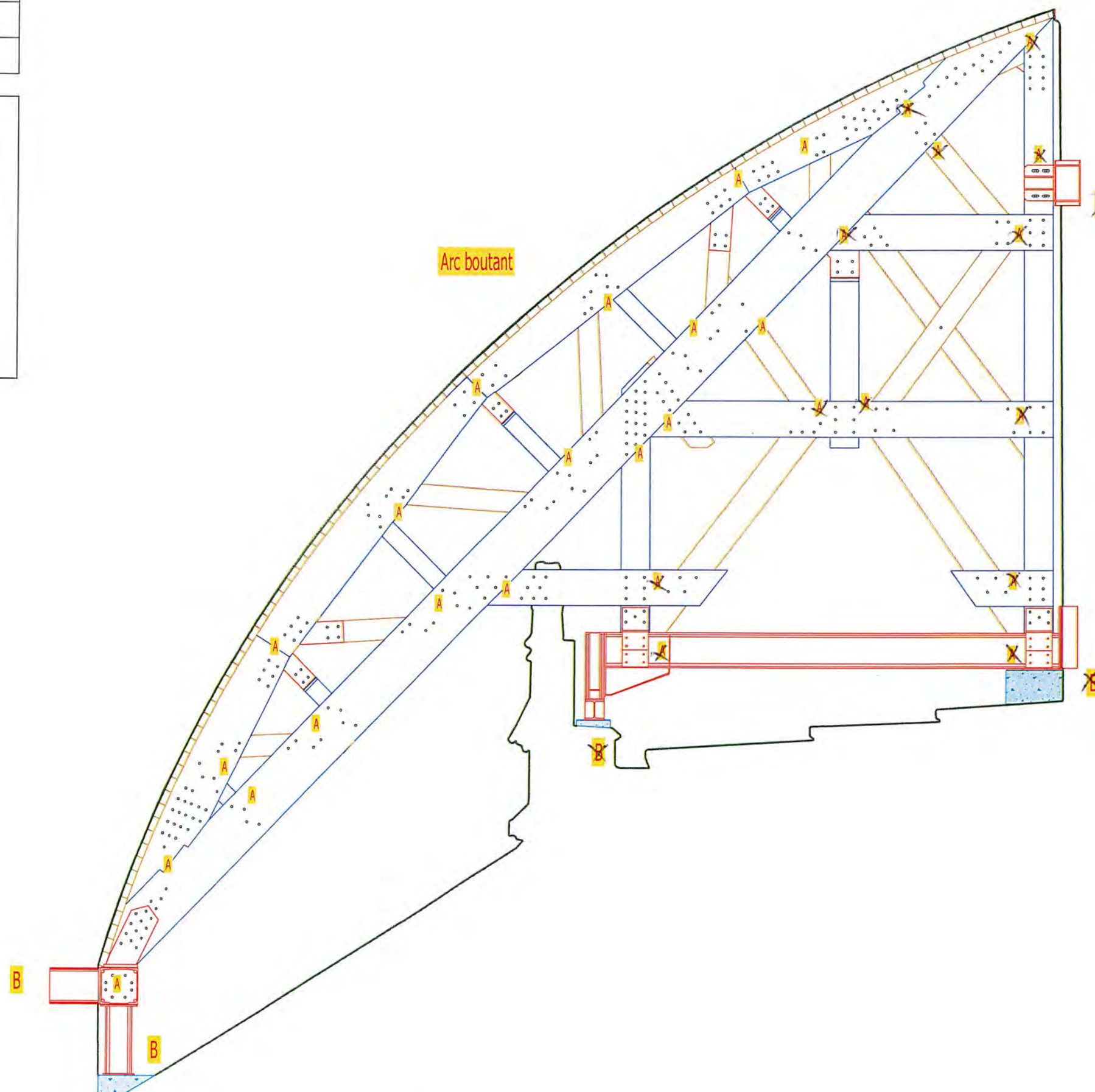
2- Vérification visuelle des assemblages des cintres, ferrures

A non vérifié ~~A~~ vérifié OK ~~A~~ vérifié problème préciser et corriger



3- Vérification des maçonneries au niveau des liaisons avec les cintres

B non vérifié ~~B~~ vérifié OK ~~B~~ vérifié problème préciser et corriger

4- Vérification de la présence de fissures sur les arcs boutants (indiquer l'emplacement)





Relevé effectué le :	04/03/25	
Réalisé par :	F. Manzi	Y. Ancel
Signature :		

### Vérifications à réaliser :

1- Localiser les stagnations d'eau, les dégradations sur les bois, les couchis tombés

E (Eau) D (Dégradation) C (Couchis)

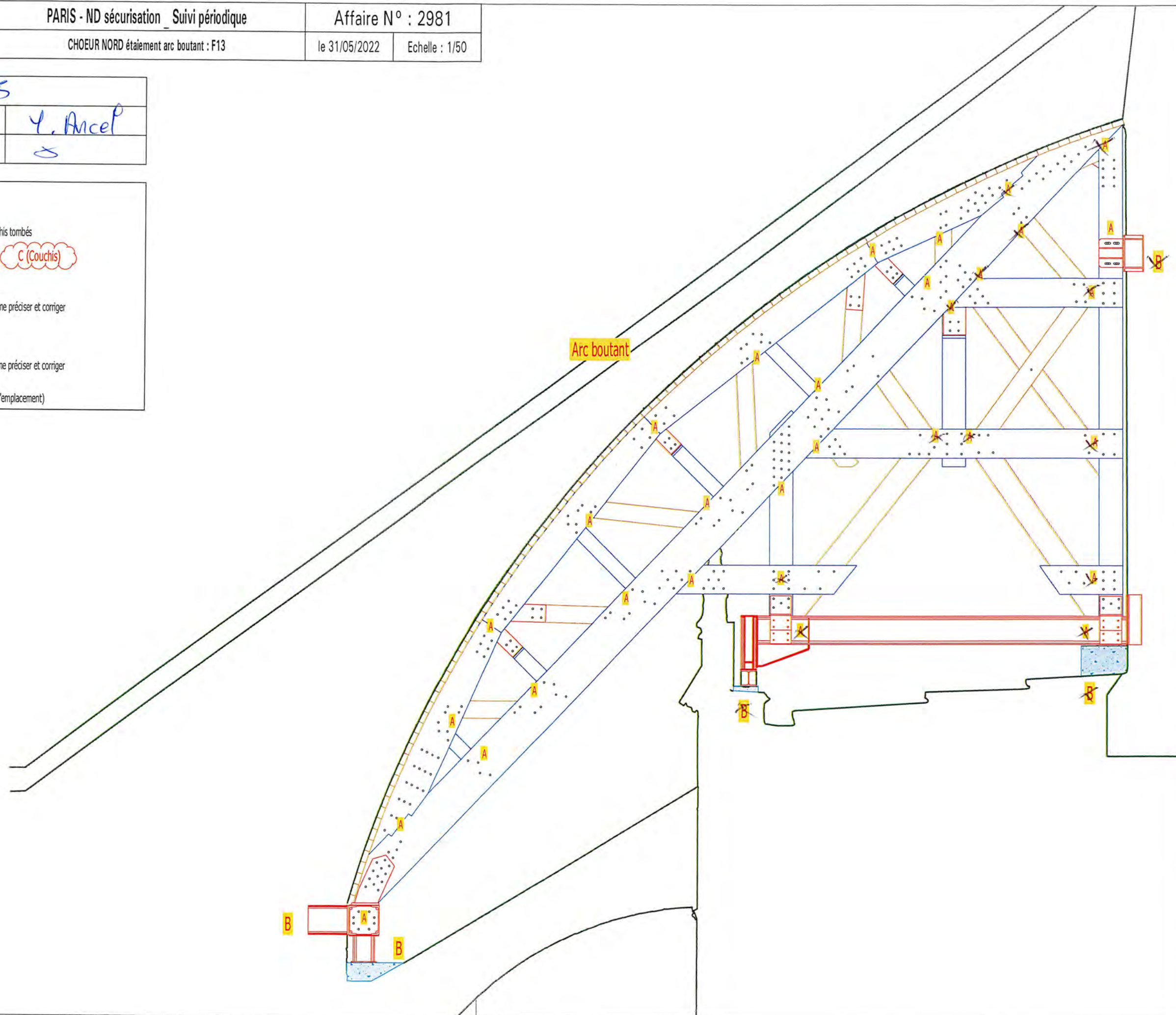
2- Vérification visuelle des assemblages des cintres, ferrures

A non vérifié X vérifié OK (A) vérifié problème préciser et corriger



3- Vérification des maçonneries au niveau des liaisons avec les cintres

B non vérifié X vérifié OK (B) vérifié problème préciser et corriger

4- Vérification de la présence de fissures sur les arcs boutants (indiquer l'emplacement)





Relevé effectué le :	04/03/25	
Réalisé par :	F. Manzi	Y. Ancel
Signature :		

### Vérifications à réaliser :

1- Localiser les stagnations d'eau, les dégradations sur les bois, les couchis tombés

E (Eau) D (Dégradation) C (Couchis)

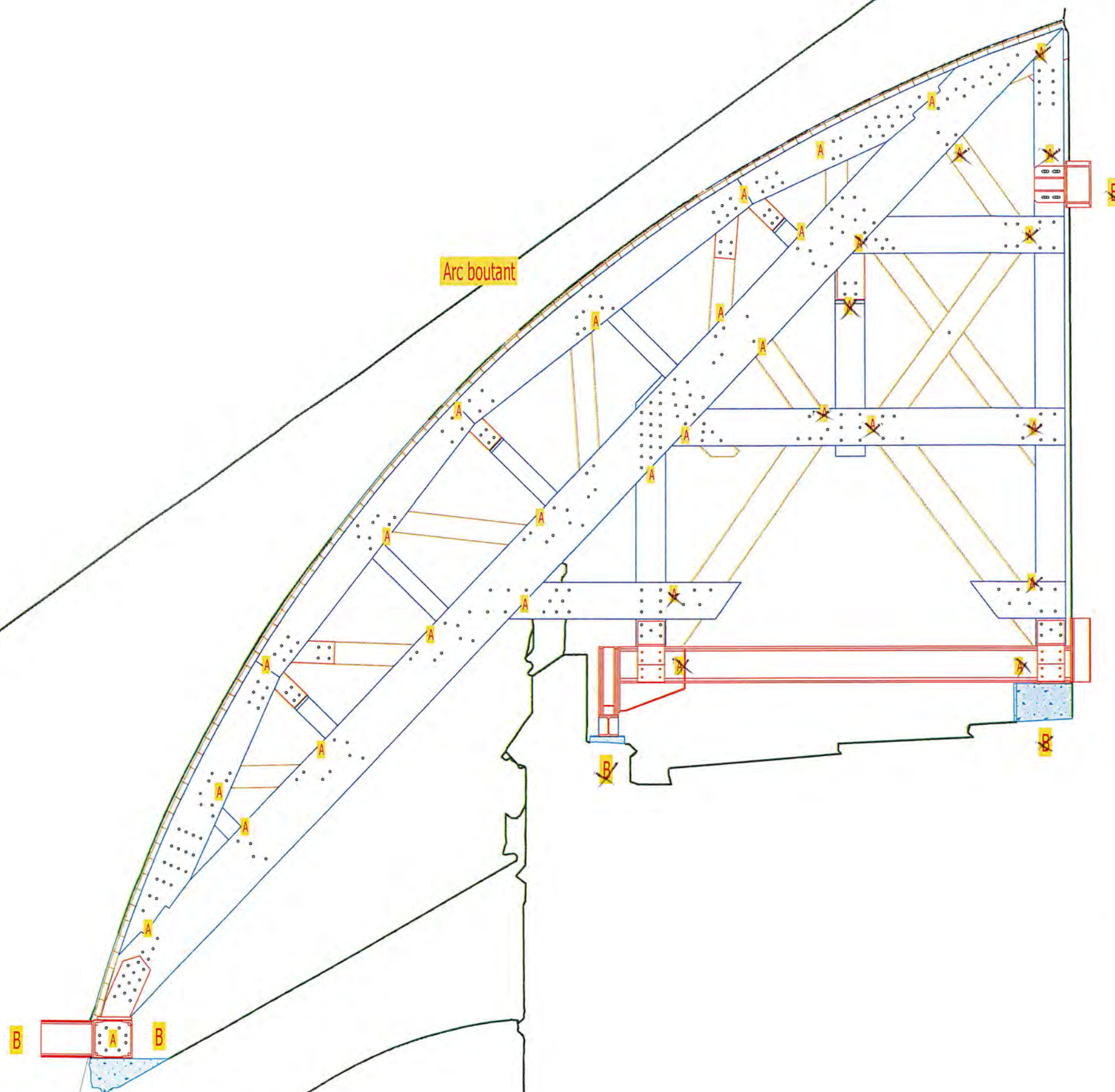
2- Vérification visuelle des assemblages des cintres, ferrures

A non vérifié X vérifié OK A vérifié problème préciser et corriger



3- Vérification des maçonneries au niveau des liaisons avec les cintres

B non vérifié X vérifié OK B vérifié problème préciser et corriger

4- Vérification de la présence de fissures sur les arcs boutants (indiquer l'emplacement)





Relevé effectué le :	04/03/25	
Réalisé par :	F. Manzi	Y. Ancep
Signature :		

### Vérifications à réaliser :

1- Localiser les stagnations d'eau, les dégradations sur les bois, les couchis tombés

E (Eau) D (Dégradation) C (Couchis)

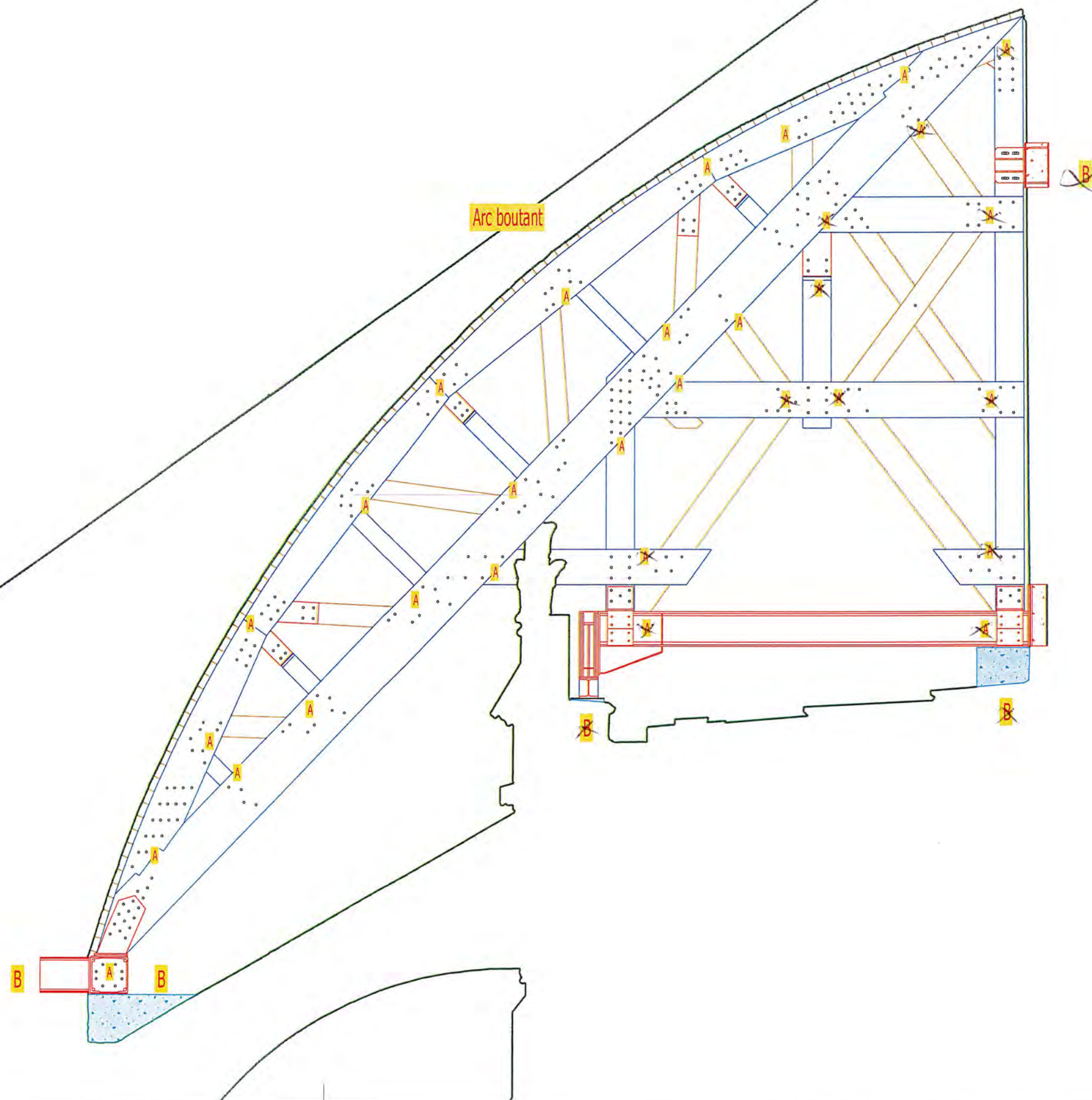
2- Vérification visuelle des assemblages des cintres, ferrures

A non vérifié ~~A~~ vérifié OK ~~A~~ vérifié problème préciser et corriger



3- Vérification des maçonneries au niveau des liaisons avec les cintres

B non vérifié ~~B~~ vérifié OK ~~B~~ vérifié problème préciser et corriger

4- Vérification de la présence de fissures sur les arcs boutants (indiquer l'emplacement)





Relevé effectué le :	04/03/25	
Réalisé par :	F. Manzi	Y. Ancel
Signature :		

### Vérifications à réaliser :

1- Localiser les stagnations d'eau, les dégradations sur les bois, les couchis tombés

E (Eau) D (Dégradation) C (Couchis)

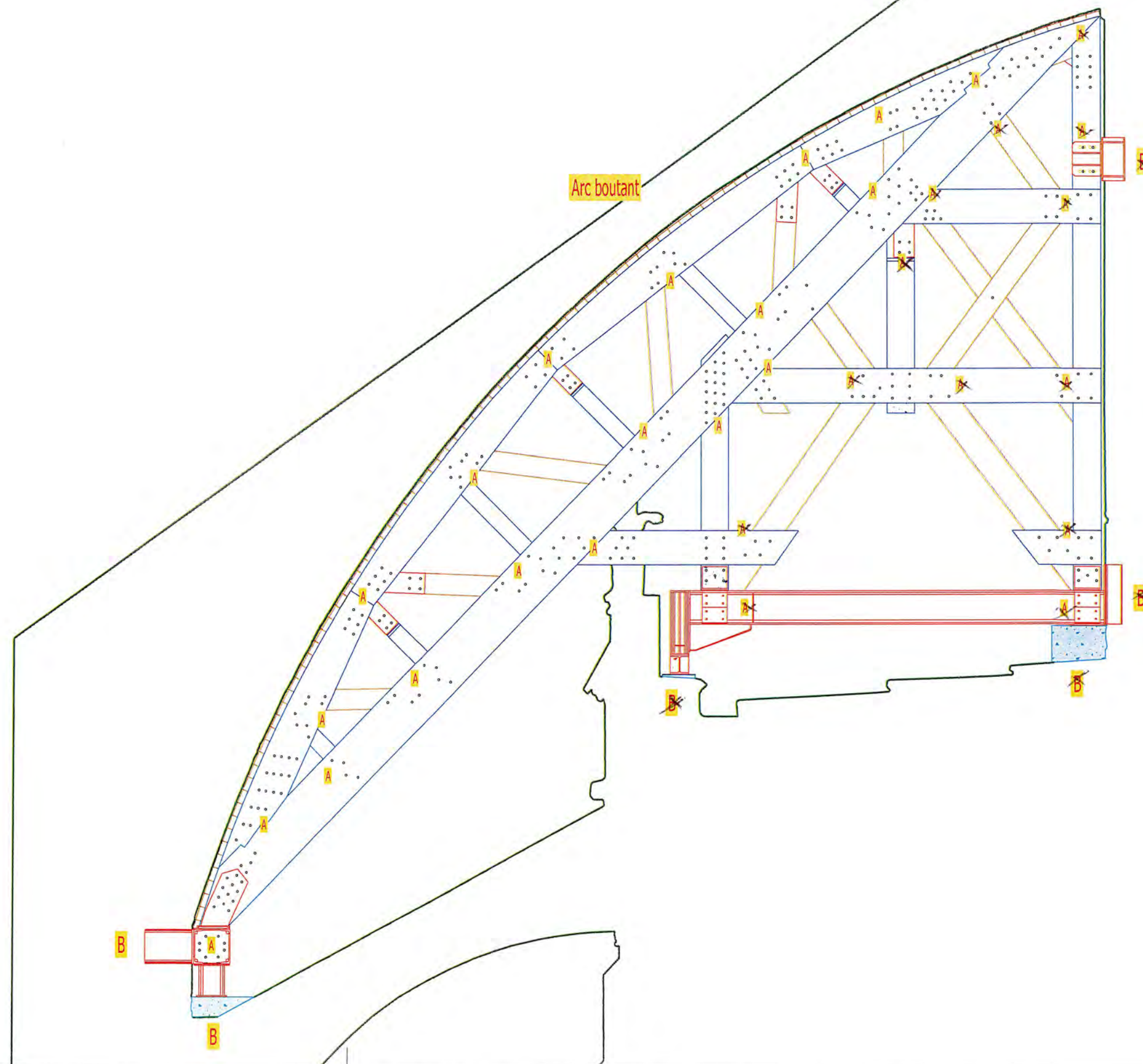
2- Vérification visuelle des assemblages des cintres, ferrures

A non vérifié X vérifié OK A vérifié problème préciser et corriger



3- Vérification des maçonneries au niveau des liaisons avec les cintres

B non vérifié X vérifié OK B vérifié problème préciser et corriger

4- Vérification de la présence de fissures sur les arcs boutants (indiquer l'emplacement)





Relevé effectué le :	04/03/25	
Réalisé par :	F. Manzi	Y. Ancel
Signature :		

### Vérifications à réaliser :

1- Localiser les stagnations d'eau, les dégradations sur les bois, les couchis tombés

**E (Eau)** **D (Dégradation)** **C (Couchis)**

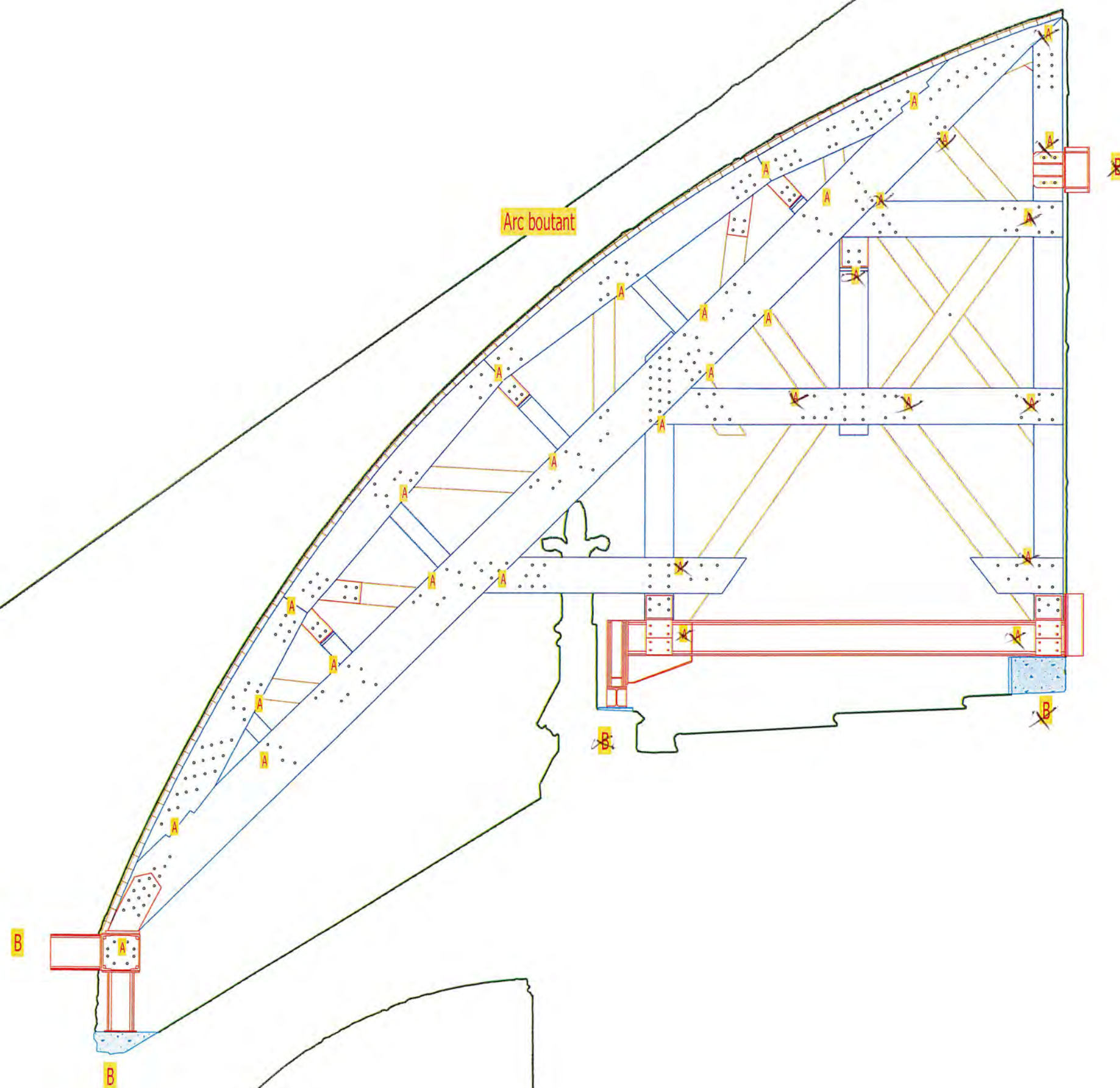
2- Vérification visuelle des assemblages des cintres, ferrures

**A** non vérifié **X** vérifié OK **A** vérifié problème préciser et corriger



3- Vérification des maçonneries au niveau des liaisons avec les cintres

**B** non vérifié **X** vérifié OK **B** vérifié problème préciser et corriger

4- Vérification de la présence de fissures sur les arcs boutants (indiquer l'emplacement)





Relevé effectué le :	04/03/25	
Réalisé par :	F. Manzi	Y. Ancel
Signature :		

### Vérifications à réaliser :

1- Localiser les stagnations d'eau, les dégradations sur les bois, les couchis tombés

E (Eau) D (Dégradation) C (Couchis)

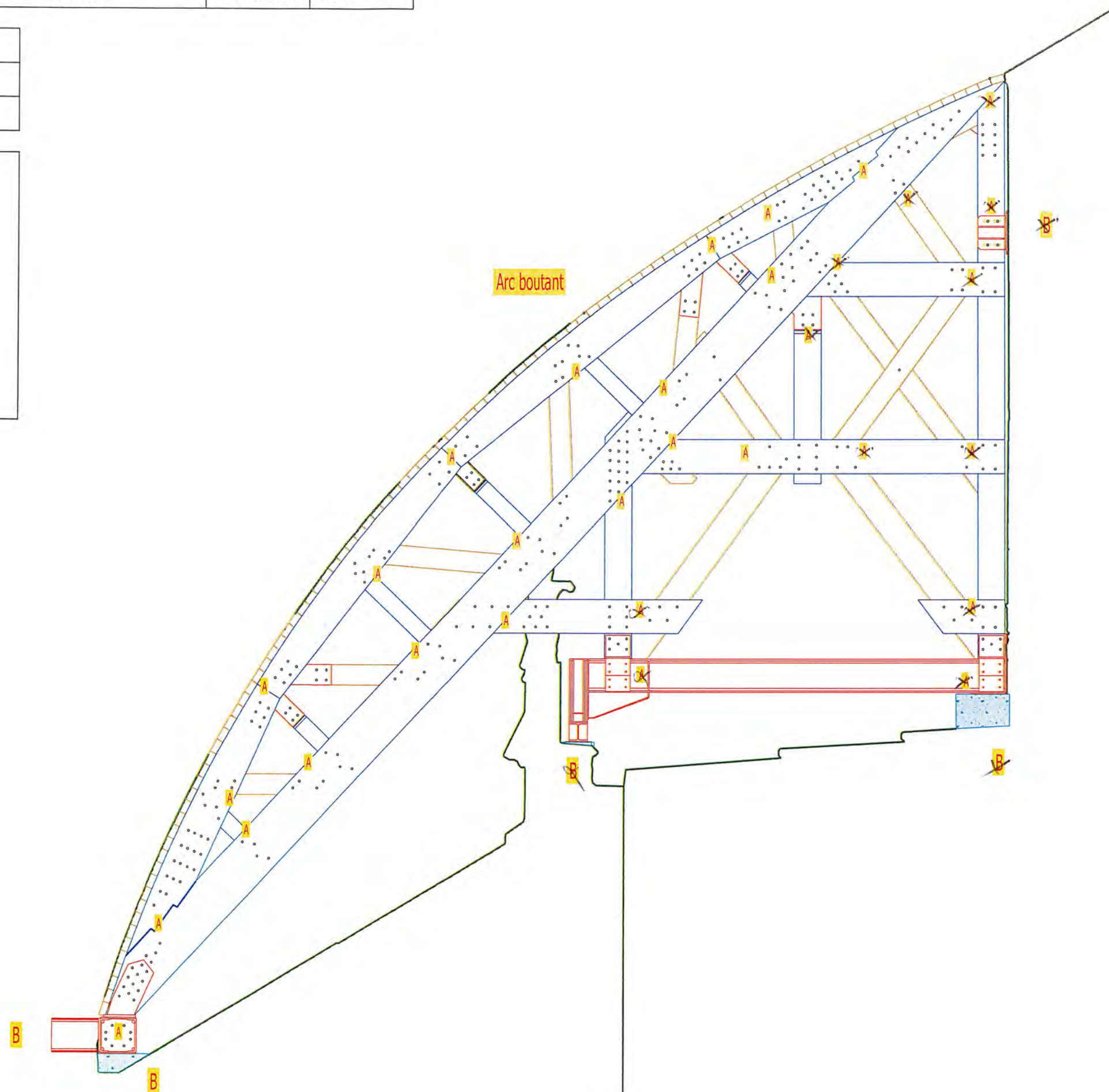
2- Vérification visuelle des assemblages des cintres, ferrures

A non vérifié ~~X~~ vérifié OK  vérifié problème préciser et corriger



3- Vérification des maçonneries au niveau des liaisons avec les cintres

B non vérifié ~~X~~ vérifié OK  vérifié problème préciser et corriger

4- Vérification de la présence de fissures sur les arcs boutants (indiquer l'emplacement)





Relevé effectué le :	04/03/22	
Réalisé par :	F. Manzi	Y. Ancep
Signature :		

### Vérifications à réaliser :

1- Localiser les stagnations d'eau, les dégradations sur les bois, les couchis tombés

E (Eau) D (Dégradation) C (Couchis)

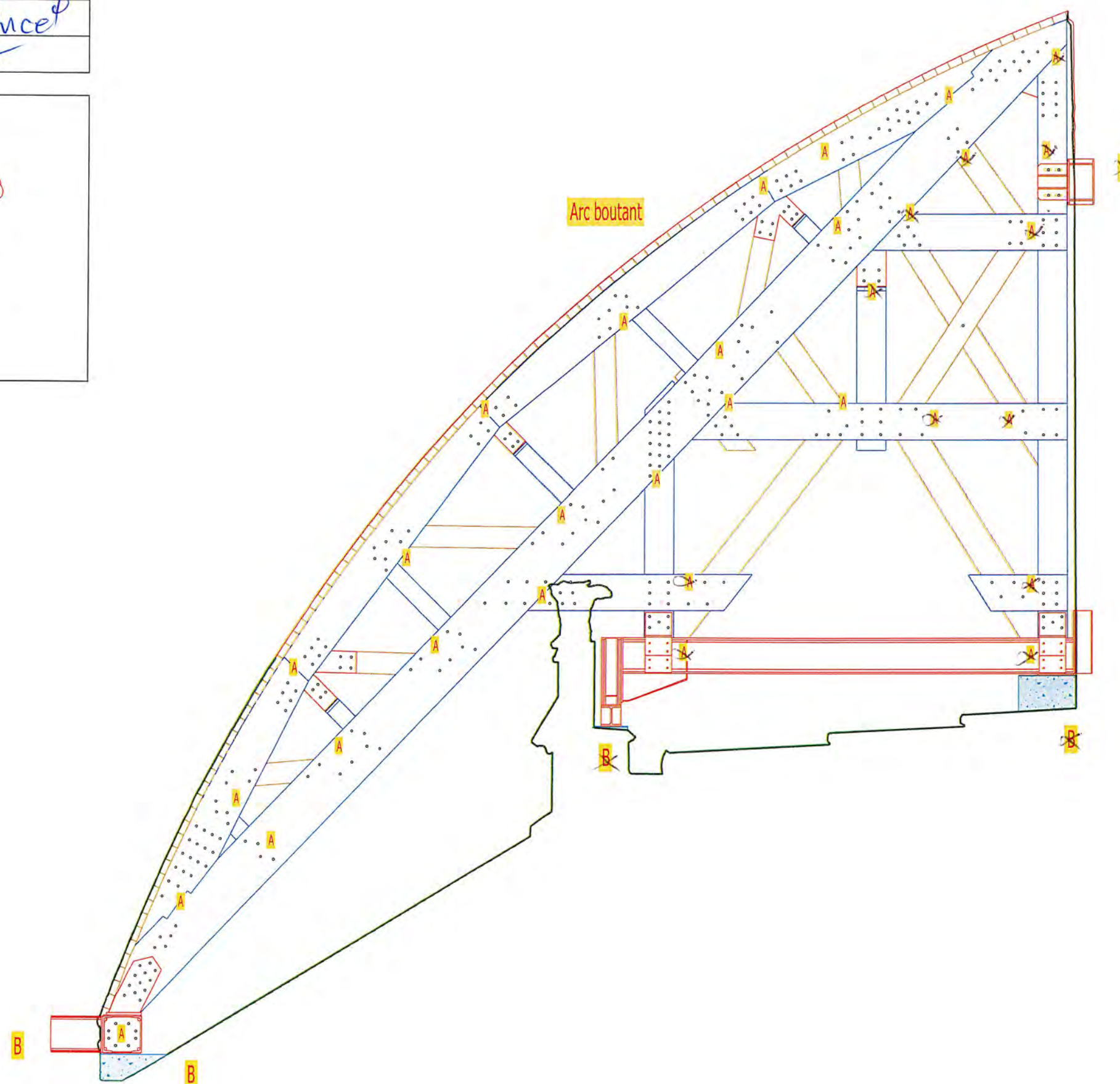
2- Vérification visuelle des assemblages des cintres, ferrures

A non vérifié ~~X~~ vérifié OK ~~A~~ vérifié problème préciser et corriger



3- Vérification des maçonneries au niveau des liaisons avec les cintres

B non vérifié ~~B~~ vérifié OK ~~B~~ vérifié problème préciser et corriger

4- Vérification de la présence de fissures sur les arcs boutants (indiquer l'emplacement)





Relevé effectué le :	06/03/25	
Réalisé par :	F. Manzi	Y. Ancel
Signature :		

### Vérifications à réaliser :

1- Localiser les stagnations d'eau, les dégradations sur les bois, les couchis tombés

**E** (Eau) **D** (Dégradation) **C** (Couchis)

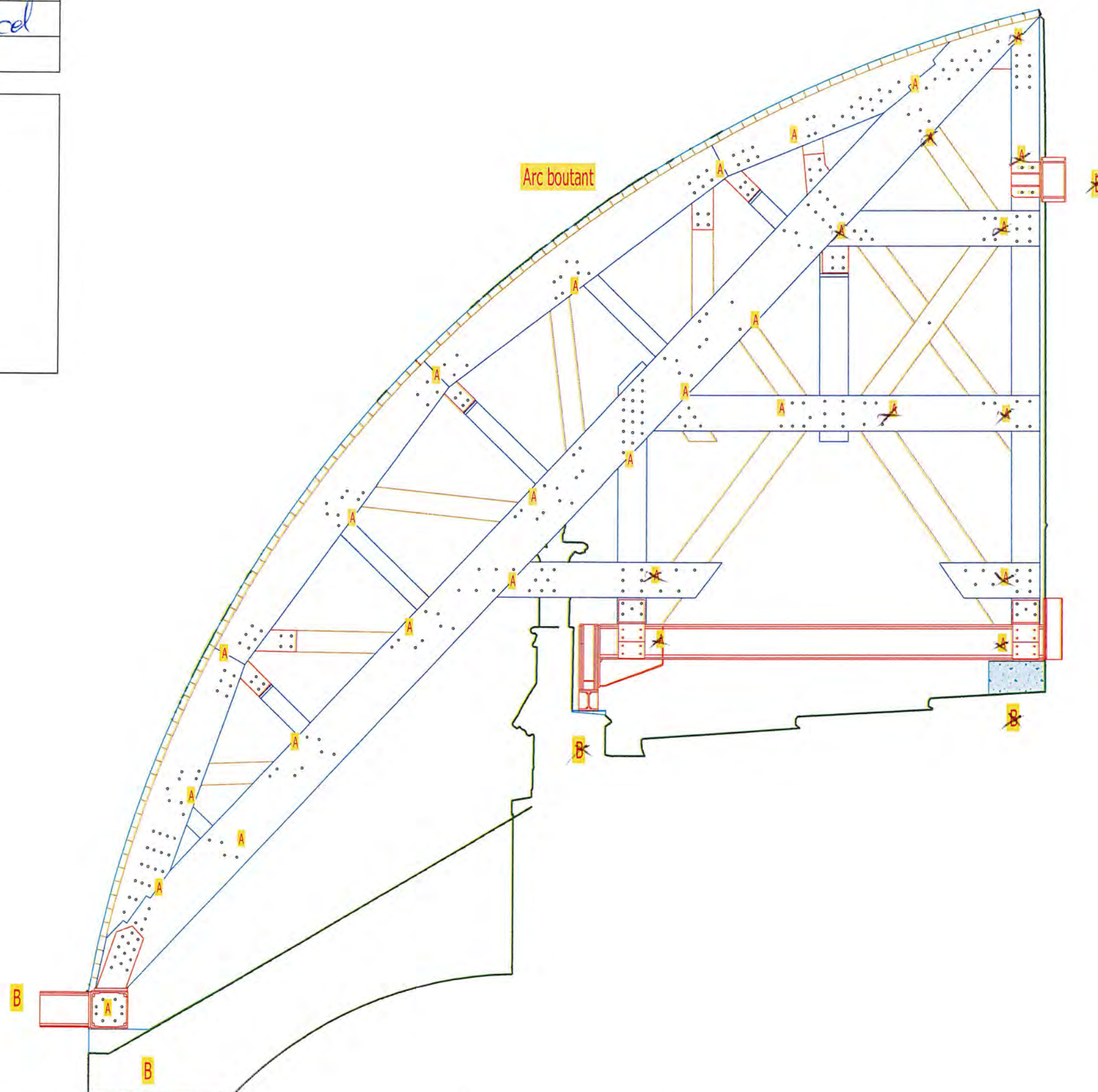
2- Vérification visuelle des assemblages des cintres, ferrures

**A** non vérifié **X** vérifié OK **A** vérifié problème préciser et corriger

3- Vérification des maçonneries au niveau des liaisons avec les cintres

**B** non vérifié **X** vérifié OK **B** vérifié problème préciser et corriger

4- Vérification de la présence de fissures sur les arcs boutants (indiquer l'emplacement)





Relevé effectué le :	04/03/25	
Réalisé par :	F. Manzi	Y. Ance
Signature :		

### Vérifications à réaliser :

1- Localiser les stagnations d'eau, les dégradations sur les bois, les couchis tombés

**E (Eau)** **D (Dégradation)** **C (Couchis)**

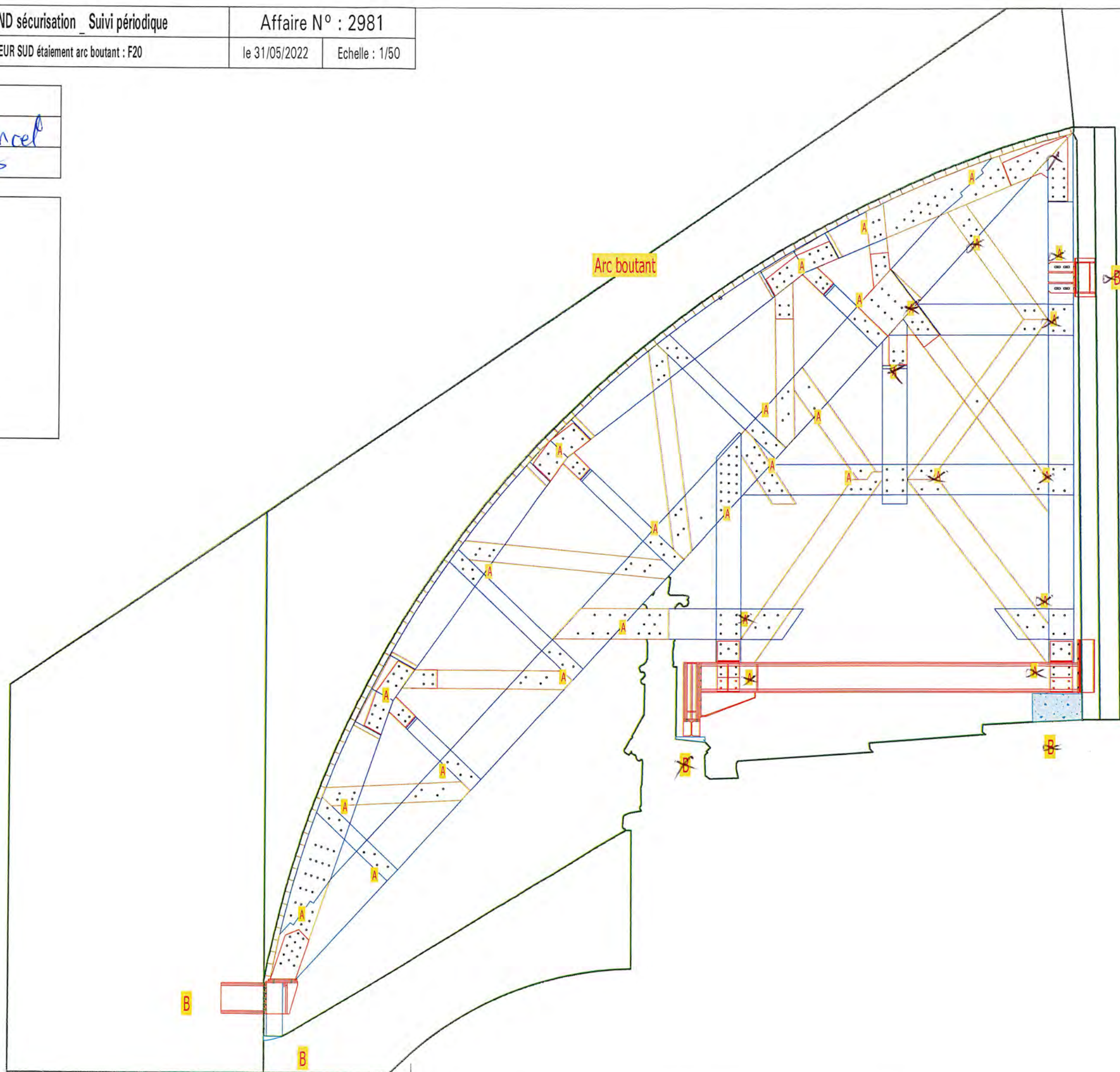
2- Vérification visuelle des assemblages des cintres, ferrures

**A** non vérifié **X** vérifié OK **(A)** vérifié problème préciser et corriger



3- Vérification des maçonneries au niveau des liaisons avec les cintres

**B** non vérifié **X** vérifié OK **(B)** vérifié problème préciser et corriger

4- Vérification de la présence de fissures sur les arcs boutants (indiquer l'emplacement)





Relevé effectué le :	04/03/25	
Réalisé par :	F. Manzi	Y. Ancel
Signature :		

### Vérifications à réaliser :

1- Localiser les stagnations d'eau, les dégradations sur les bois, les couchis tombés

**E (Eau)** **D (Dégradation)** **C (Couchis)**

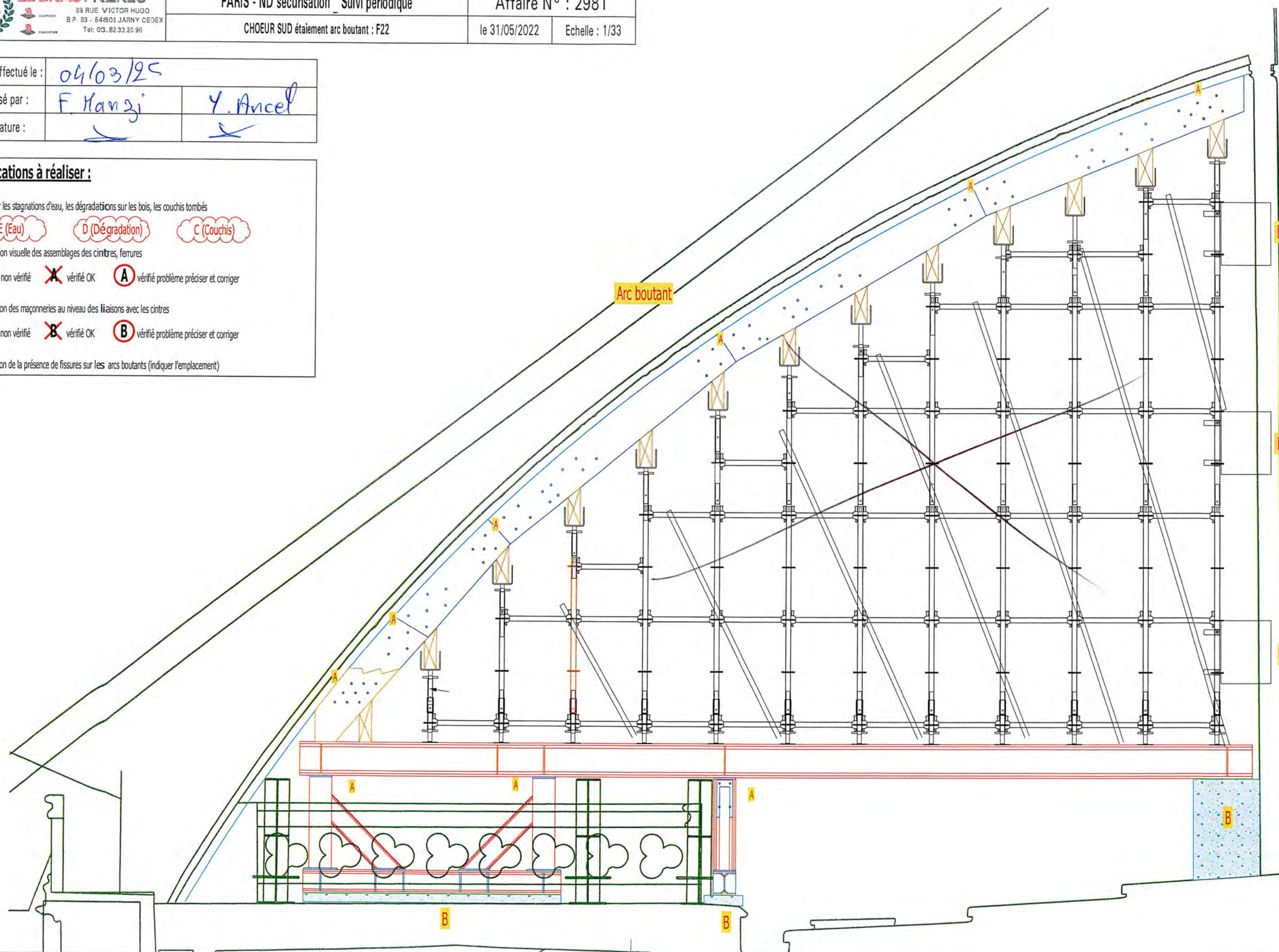
2- Vérification visuelle des assemblages des cintres, ferrures

**A** non vérifié **X** vérifié OK **A** vérifié problème préciser et corriger

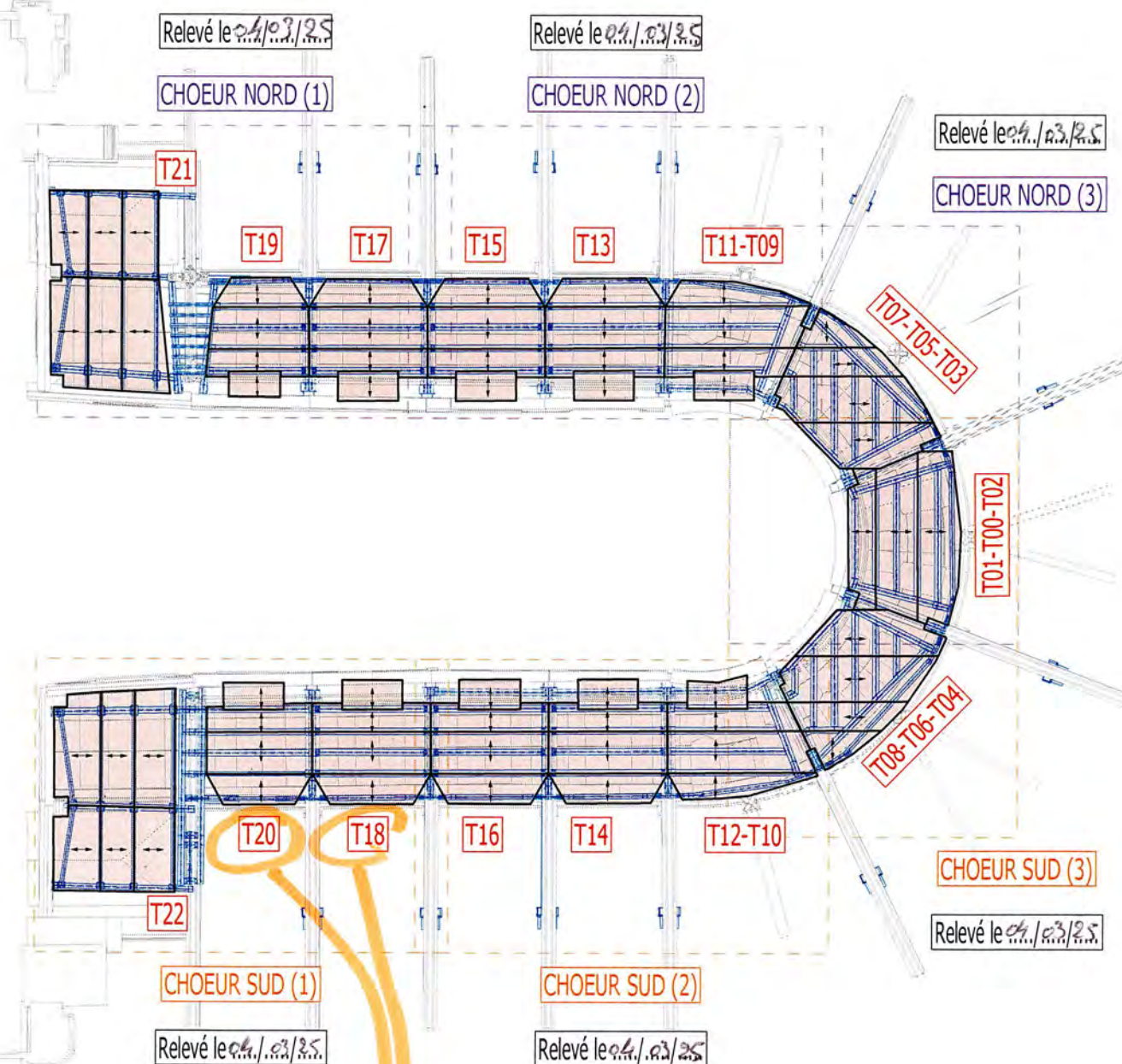
3- Vérification des maçonneries au niveau des liaisons avec les cintres

**B** non vérifié **X** vérifié OK **B** vérifié problème préciser et corriger

4- Vérification de la présence de fissures sur les arcs boutants (indiquer l'emplacement)









### Planchers CLT :

- Délamination importantes
- première couche moisie
- apparition de champignons



Relevé effectué le :	04/03/23	
Réalisé par :	F. Mangi	Y. Ancel
Signature :		

**Vérifications à réaliser :**

1- Localiser les stagnations d'eau, les dégradations sur les bois

**E (Eau)**

**D (Dégradation)**

2- Vérification visuelle des assemblages des poutres supports des planchers

**A** non vérifié

**X** vérifié OK

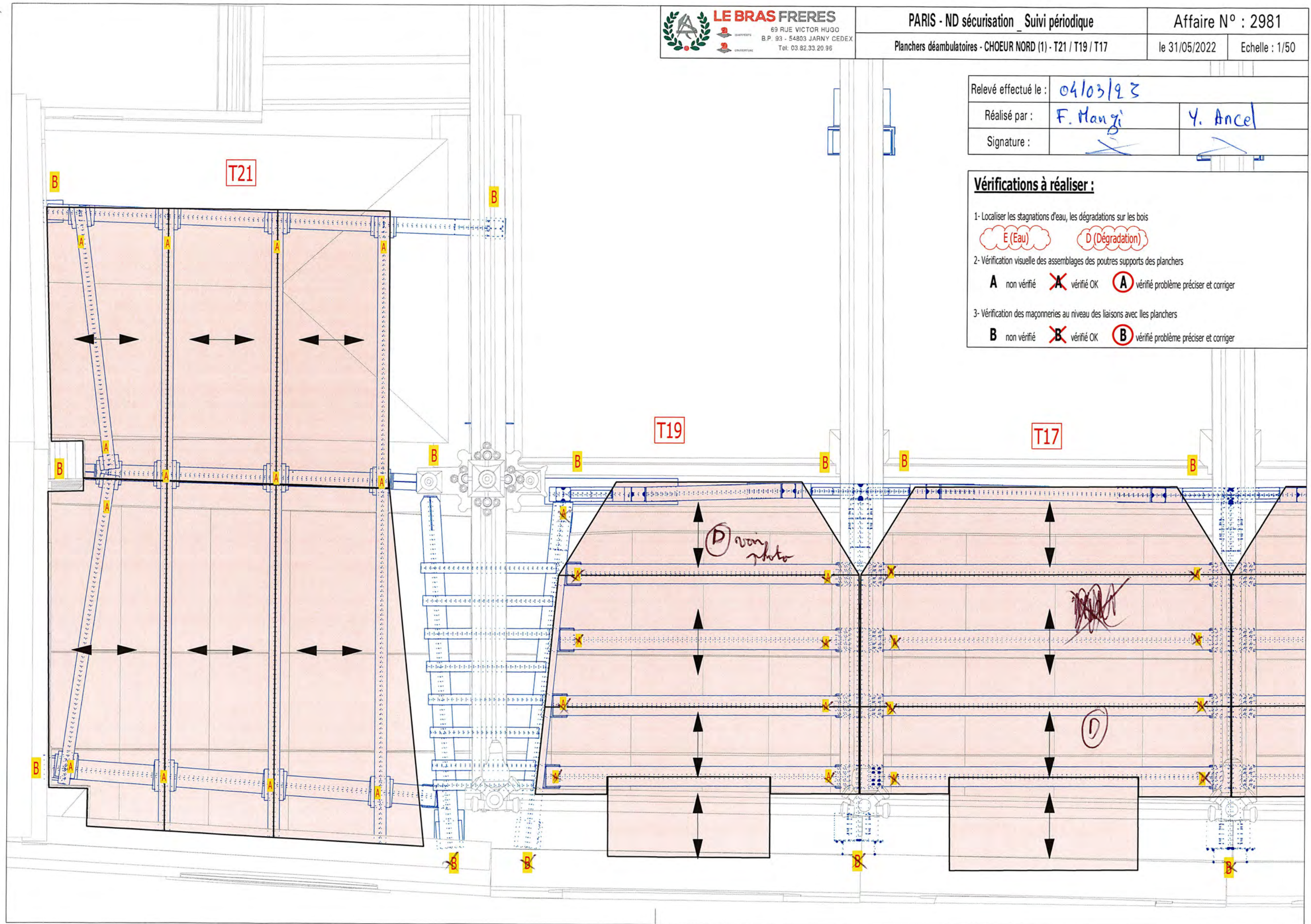
**A** vérifié problème préciser et corriger

3- Vérification des maçonneries au niveau des liaisons avec les planchers

**B** non vérifié

**X** vérifié OK

**B** vérifié problème préciser et corriger





Relevé effectué le :	04/03/25
Réalisé par :	F. Manzi
Signature :	Y. Ancel

### Vérifications à réaliser :

1- Localiser les stagnations d'eau, les dégradations sur les bois

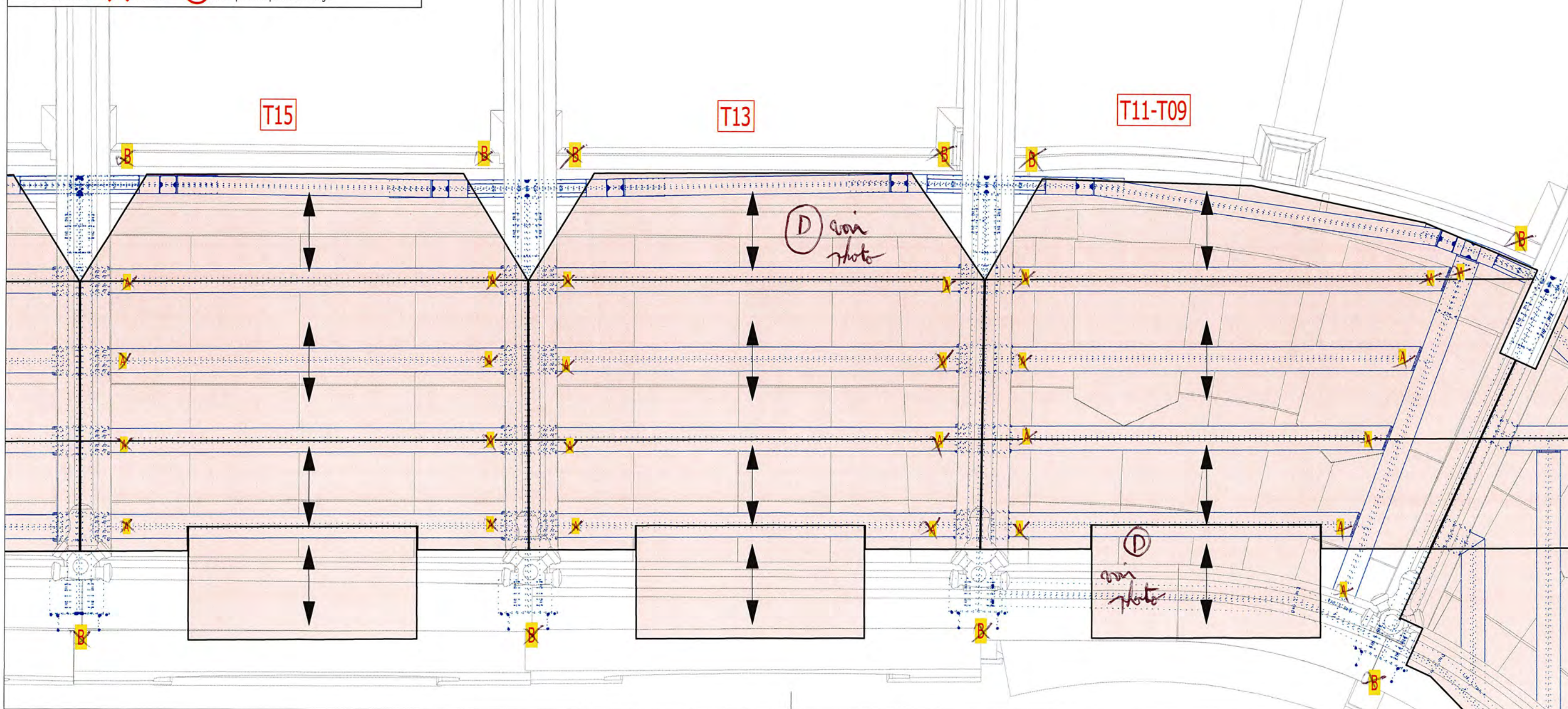
**E (Eau)** **D (Dégradation)**

2- Vérification visuelle des assemblages des poutres supports des planchers



**A** non vérifié **X** vérifié OK **(A)** vérifié problème préciser et corriger

3- Vérification des maçonneries au niveau des liaisons avec les planchers

**B** non vérifié **X** vérifié OK **(B)** vérifié problème préciser et corriger

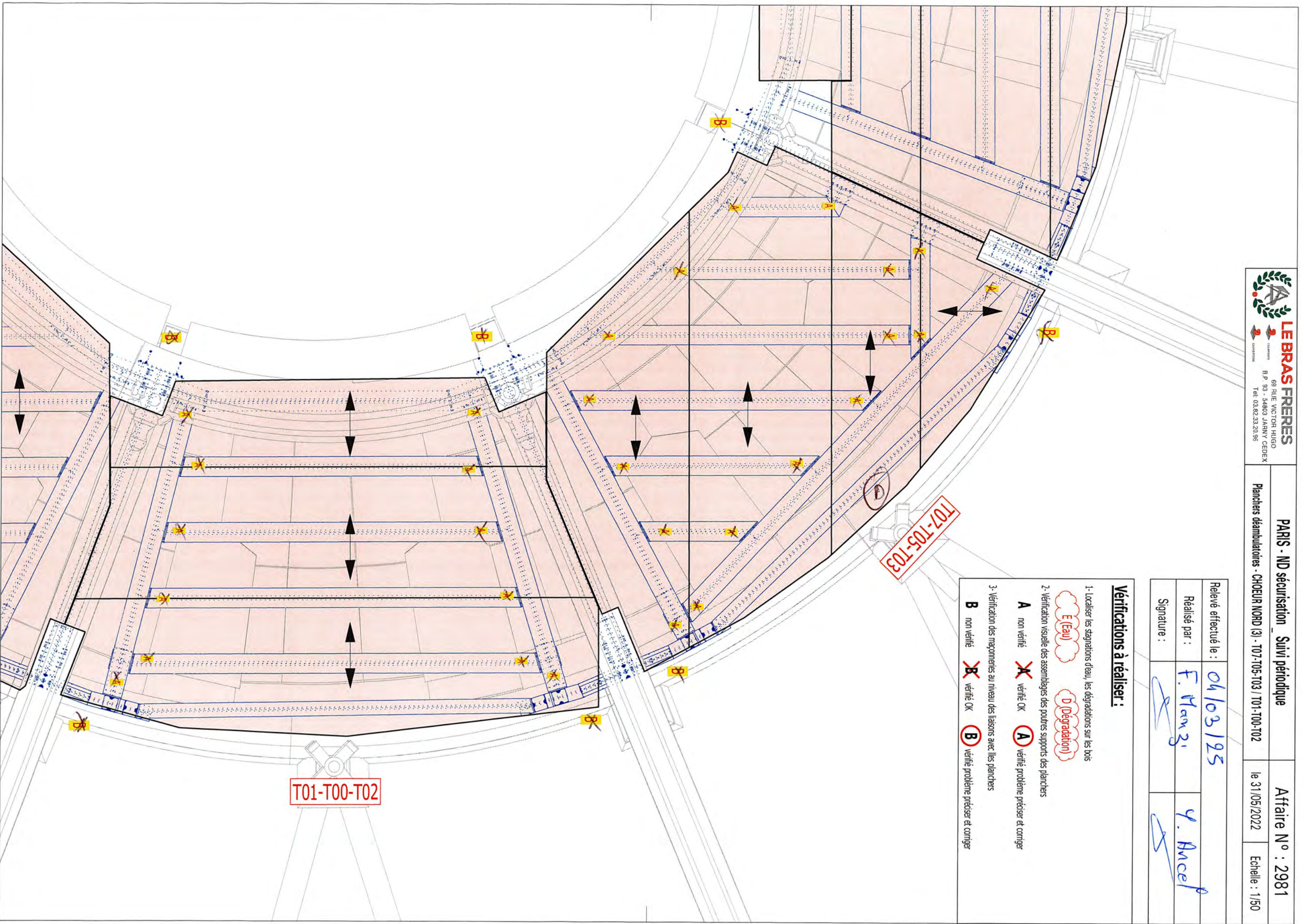




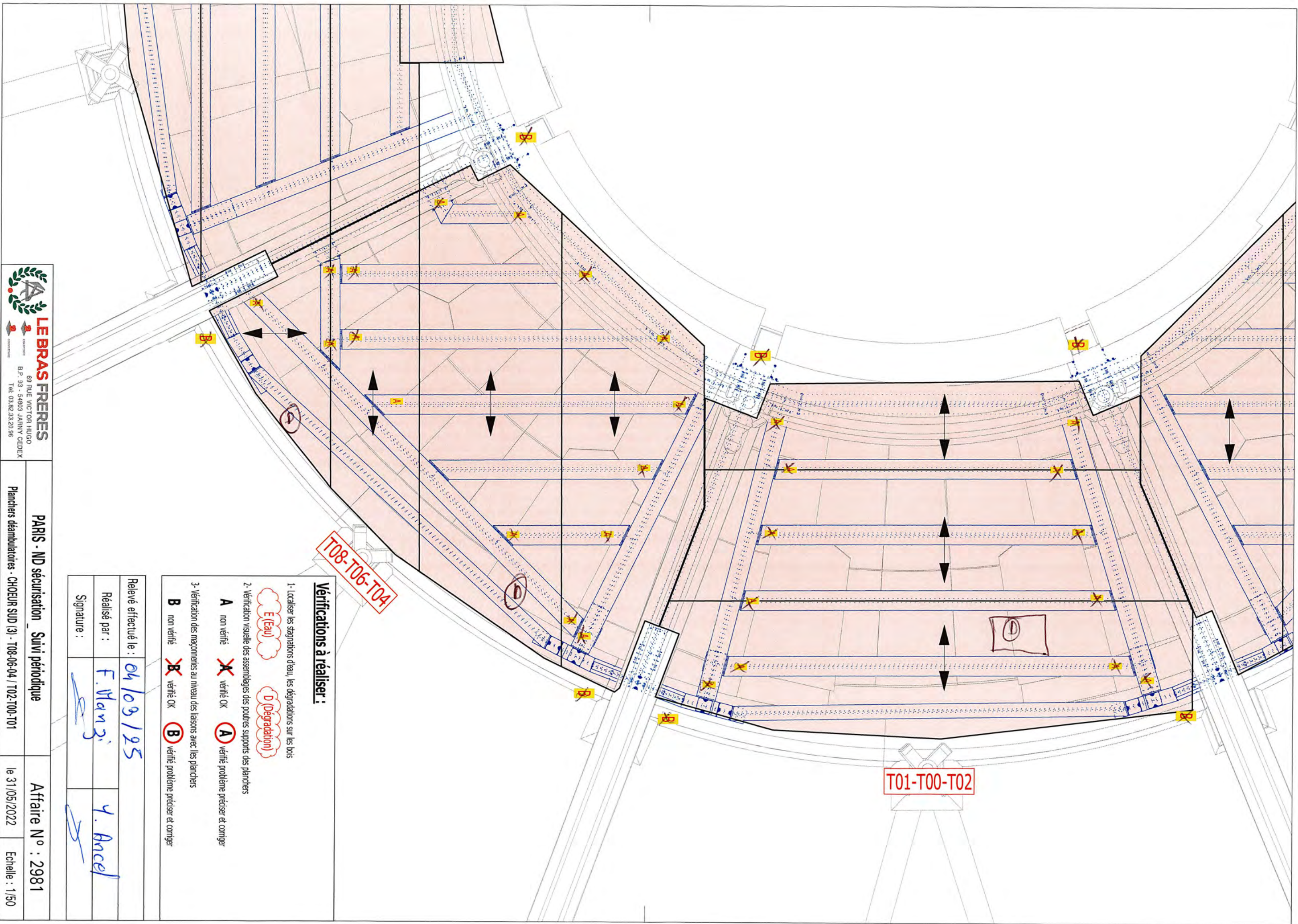
Relevé effectué le :	04/03/25	
Réalisé par :	F. Hanzi	Y. Ancel
Signature :		

**Vérifications à réaliser :**

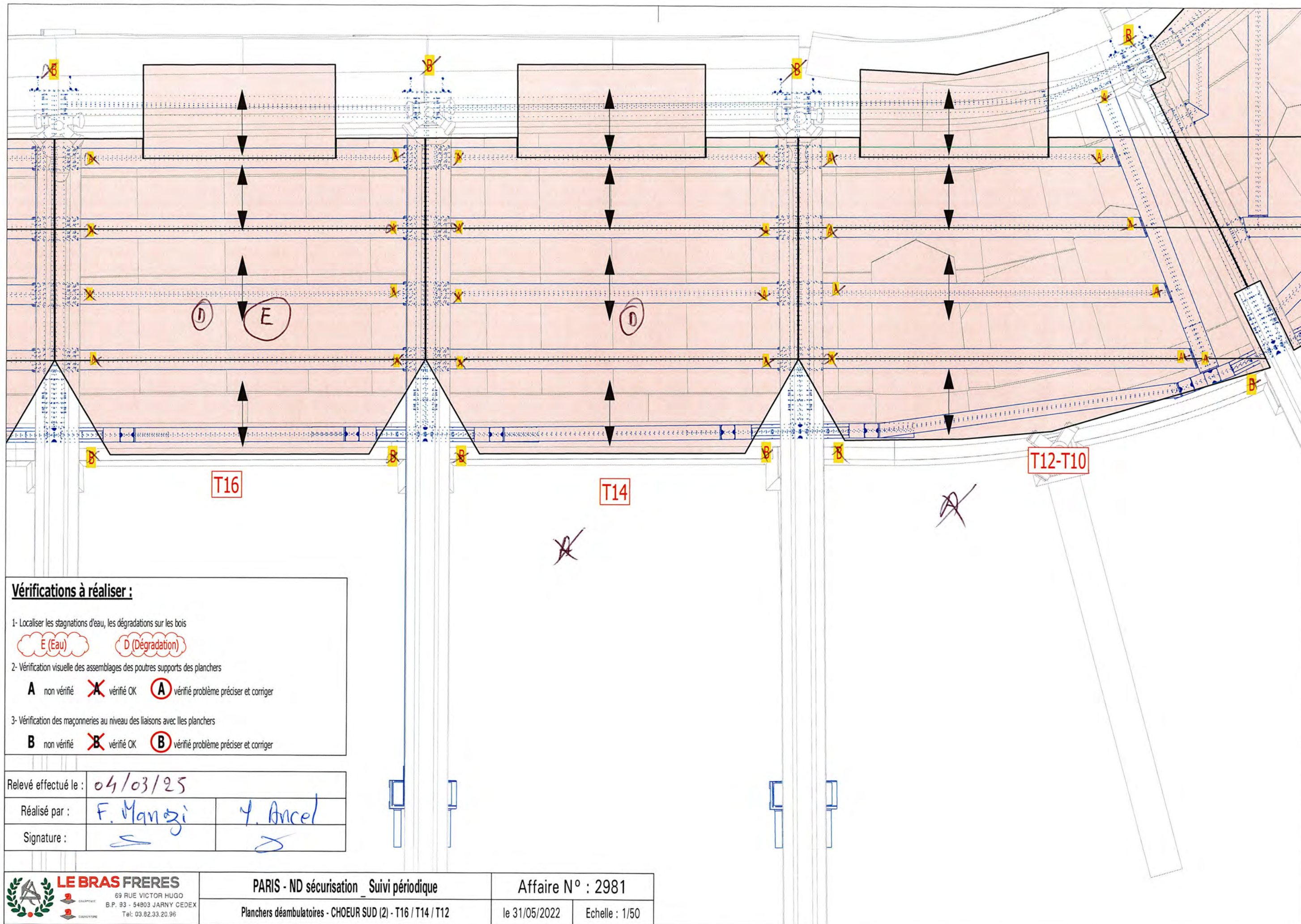
- 1- Localiser les stagnations d'eau, les dégradations sur les bois  
 
- 2- Vérification visuelle des assemblages des poutres supports des planchers  
A non vérifié  vérifié OK  vérifié problème précis et corriger
- 3- Vérification des maçonneries au niveau des liaisons avec les planchers  
B non vérifié  vérifié OK  vérifié problème précis et corriger



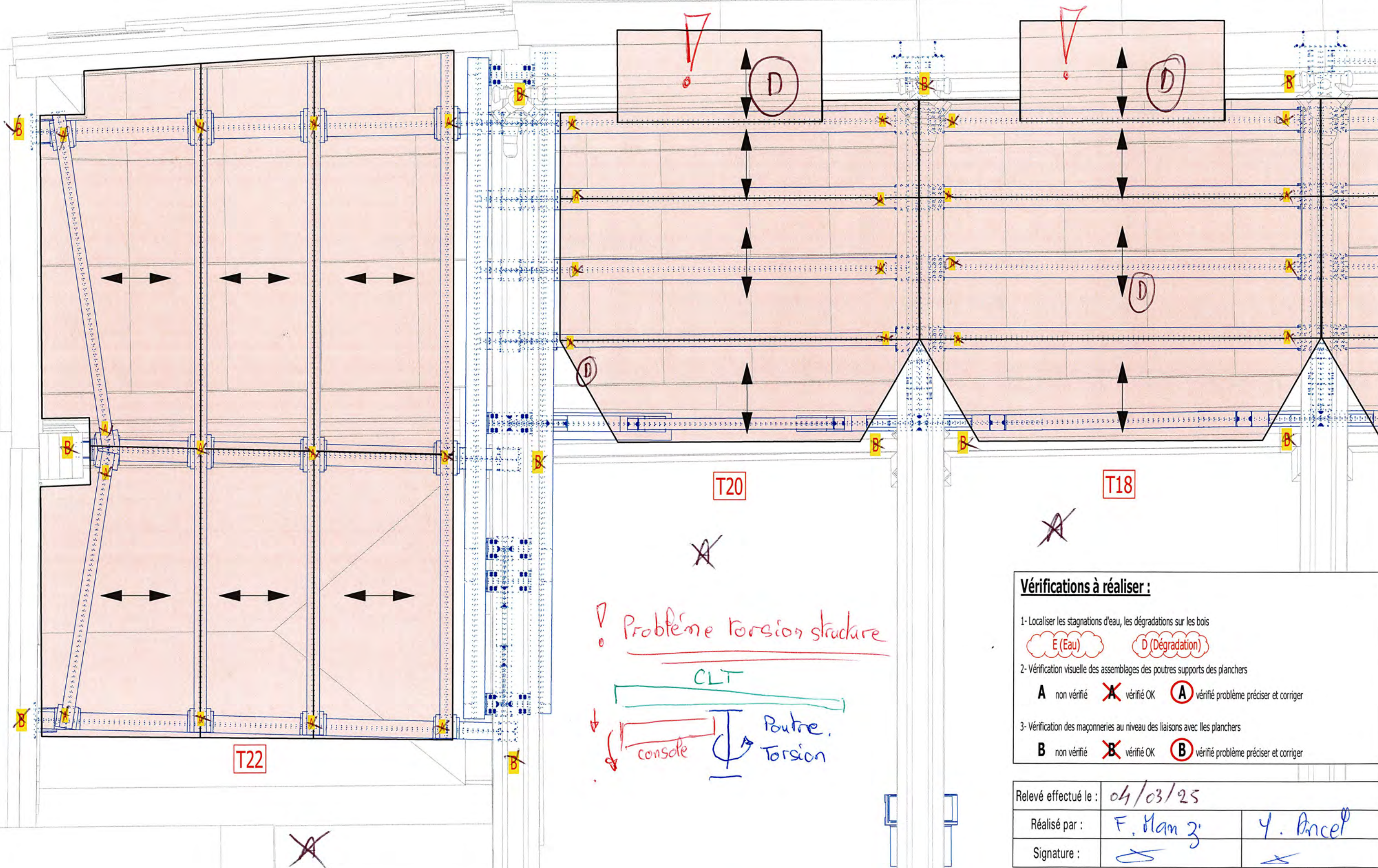














CATHÉDRALE  
NOTRE-DAME DE PARIS

TRAVAUX DE RESTAURATION  
POST 2024



## ANNEXE PARTICULIERE 4

# PARATONNERRE – Etude technique foudre

---

DOSSIER DE CONSULTATION DES ENTREPRISES

### **Restauration du chevet**

*Février 2025*



Maîtrise d'Ouvrage :

ETABLISSEMENT PUBLIC CHARGE DE  
LA CONSERVATION ET DE LA  
RESTAURATION DE LA CATHEDRALE  
NOTRE-DAME DE PARIS

Maîtrise d'Œuvre : A.C.M.H.

Philippe VILLENEUVE  
Rémi FROMONT

# ETUDE TECHNIQUE Foudre



N° NA20201002-01

Cathédrale Notre-Dame de Paris

6 Parvis Notre-Dame – Place Jean Paul II  
75004 PARIS




Siège social : 13, Rue Louis Armand - B.P. 106 - 77330 OZOIR-LA-FERRIERE  
Tél : 01 60 34 54 44 - Fax : 01 64 40 35 43  
franklin@franklin-france.com - www.franklin-france.com

Agence Centre Est : 14 rue de la Grange Saint Pierre – 71850 CHARNAY LES MACON  
Tél : 03 85 34 78 81 – Fax : 03 85 34 94 79  
centre.est@franklin-france.com

Le contenu de ce document est la propriété exclusive de la société FRANKLIN France, il ne peut être communiqué ou reproduit sans autorisation de notre part



Suite à votre demande, nous vous adressons ci-après notre ETUDE TECHNIQUE FOUDRE, pour la cathédrale Notre Dame de PARIS, établie suivant les normes NF C 17-102, NF EN 62305-3 et 4, NFC15-100 et l'ARF NA20200922-01.

Approbation Fonction	Rédacteur	Vérificateur	Emetteur
	Responsable Technique FRANKLIN FRANCE	Responsable d'Agence FRANKLIN CENTRE EST	Responsable Technique FRANKLIN FRANCE
Nom	Nicolas ALNET	Christophe CHOTARD	Nicolas ALNET
Date	02/10/2020	07/10/2020	08/10/2020
Visa			

INDICE REVISION	MODIFICATIONS	PAGES MODIFIEES	DATE
	Emission initiale		08/10/2020
A			
B			
C			

Ce document sera considéré comme validé et définitif sous 15 jours après réception et sans commentaire de votre part dans ce délai. Toute reprise de ce document passé ce délai fera l'objet d'une prestation complémentaire.

## SOMMAIRE

I.	PREAMBULE .....	3
II.	CONCLUSIONS DE L'ARF : .....	4
III.	ETUDE TECHNIQUE .....	5
3.1	Synthèse des différents types de protection.....	6
3.2	Système de Protection Foudre Extérieur à réaliser sur le site. ....	16
3.3	Système de Protection Foudre Intérieur à réaliser sur le site. ....	24
3.4	Dossier des ouvrages exécutés.....	31
3.5	Système d'avertissement.....	32
IV.	ANNEXES .....	33

Le contenu de ce document est la propriété exclusive de la société FRANKLIN France, il ne peut être communiqué ou reproduit sans autorisation de notre part

Siège social : 13, Rue Louis Armand – B.P.106 – 77330 OZOIR-LA-FERRIERE Tél : 01 60 34 54 44 - Fax 01 64 40 35 43 - [www.franklin-france.com](http://www.franklin-france.com)  
SA AU CAPITAL DE 299 200 € SIREN 319747085 APE 2712Z

Agence Centre-Est : 14 rue de la Grange Saint Pierre – 71850 CHARNAY LES MACON. Tél : 03 85 344 78 81 – Fax : 03 85 34 94 79 – [centre.est@franklin-france.com](mailto:centre.est@franklin-france.com)

## I. PREAMBULE

Le présent rapport a pour objet d'étudier, suivant les normes NF EN 62305-3 et 4, NFC 15100 et la norme NF C 17-102, les mesures de protection contre la foudre à mettre en place sur Cathédrale Notre Dame de Paris, en accord avec les conclusions de l'ARF NA20200922-01.

La mise en œuvre des solutions (paratonnerres, parafoudres, plans de masses, liaisons équipotentielles, blindages...) n'entraîne pas une protection parfaite de tous les équipements, mais elle contribue de façon efficace à la sauvegarde de ceux-ci en les protégeant des effets de la foudre les plus dévastateurs.

Les installations de protection contre la foudre doivent faire l'objet d'une vérification complète par un organisme compétent, distinct de l'installateur, après leur installation.

La protection foudre de la cathédrale avait été remise en conformité en par les travaux réalisés de 2011 à 2013.

Suite à l'incendie, une partie de ces installations ont été détruites, et d'autres partiellement dégradées. Le système de protection foudre extérieur, validé esthétiquement à l'époque sera réalisé de la même façon par la mise en œuvre de PDA, ceinturage de la toiture et mise en œuvre d'un paratonnerre à tige simple au sommet de la flèche. Un PDA en sommet de flèche, n'amenant pas de protection supplémentaire.

Au niveau de la protection intérieure (parafoudre) la refonte du système électrique, entraine la refonte du système de protection foudre intérieur.

La présente étude technique doit donc définir les mesures à réaliser pour assurer la protection des structures, pour lesquelles l'ARF a démontré la nécessité de mettre en place des mesures de protection.

## II. CONCLUSIONS DE L'ARF :

Les résultats de l'ARF NA20200922-01 sont les suivants :

Bâtiment / Zone	METHODE		NIVEAU DE PROTECTION		COMMENTAIRES
	Probabiliste	Déterministe	Installation Extérieure de Protection Foudre	Installation Intérieure de Protection Foudre	
Cathédrale	X		I	I renforcé	Le risque foudre total sur le bâtiment sera inférieur au risque tolérable fixé par la NF EN 62305-2, après mise en place d'un SPF (Paratonnerre, parafoudres et liaisons équipotentielles).
Presbytère	X		-	IV	Le risque foudre total sur le bâtiment sera inférieur au risque tolérable fixé par la NF EN 62305-2, après mise en place d'un SPF (Parafoudres sur l'origine des lignes d'alimentations BT).

La réalisation d'une étude technique est donc nécessaire afin de déterminer les dispositions de protection à mettre en œuvre sur le site suivant les conclusions de l'ARF. L'étude technique définira précisément les dispositions techniques à mettre en place sur l'installation existante.



### III. ETUDE TECHNIQUE

#### Réglementation Française en vigueur :

- ✓ Arrêté du 23 mars 1965 portant approbation du règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les Etablissements Recevant du Public (ERP)
- ✓ Arrêté du 25 juin 1980 portant approbation du règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les Etablissements Recevant du Public (ERP)
- ✓ Arrêté du 11 décembre 2009 portant approbation de diverses dispositions complétant et modifiant le règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les Etablissements Recevant du Public (ERP)

#### Normes applicables :

- ✓ NF EN 62305-1 (Novembre 2013) : Protection contre la foudre – Partie 1 : Principes généraux
- ✓ NF EN 62305-2 (décembre 2012) : Protection contre la foudre – Partie 2 : Evaluation du risque.
- ✓ NF EN 62305-3 (décembre 2012) : Protection contre la foudre – Partie 3 : Dommages physiques sur les structures et risques humains.
- ✓ NF EN 62305-4 (décembre 2012) : Protection contre la foudre – Partie 4 : Réseaux de puissance et de communication dans les structures.
- ✓ NF C 17-102 (septembre 2011) : Protection contre la foudre : Systèmes de protection contre la foudre à dispositif d'amorçage.
- ✓ NF C 15-100 (décembre 2002) : Installation électrique à basse tension.
- ✓ UTE C 15-443 (juin 2004) : Installation électrique à basse tension – Guide pratique – Protection des installations électriques basse tension contre les surtensions d'origine atmosphériques ou dues à des manœuvres – Choix et installation des parafoudres.

**Pour la protection du bâtiment ou de la structure du site, chaque installation de paratonnerre comprend reliés entre eux :**

- Le dispositif de capture
- Le(s) circuit(s) de liaison à la terre
- La(es) prise(s) de terre.

Le contenu de ce document est la propriété exclusive de la société FRANKLIN France, il ne peut être communiqué ou reproduit sans autorisation de notre part

Siège social : 13, Rue Louis Armand – B.P.106 – 77330 OZOIR-LA-FERRIERE Tél : 01 60 34 54 44 - Fax 01 64 40 35 43 - [www.franklin-france.com](http://www.franklin-france.com)  
SA AU CAPITAL DE 299 200 € SIREN 319747085 APE 2712Z

Agence Centre-Est : 14 rue de la Grange Saint Pierre – 71850 CHARNAY LES MACON. Tél : 03 85 344 78 81 – Fax : 03 85 34 94 79 – [centre.est@franklin-france.com](mailto:centre.est@franklin-france.com)

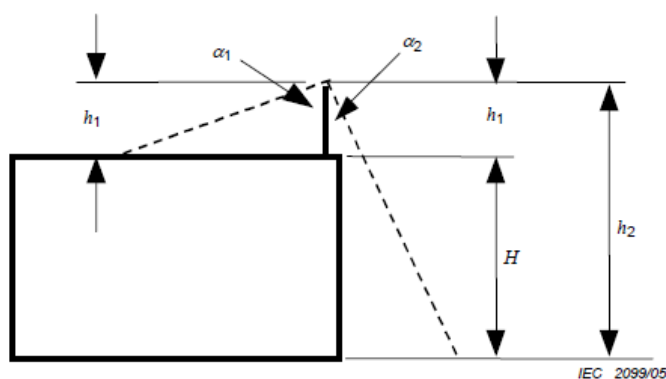


### 3.1 Synthèse des différents types de protection.

#### Protection par Paratonnerres à tige (Pointe franklin) et Cage maillée :

*Basée sur la norme NF EN 62 305 – 3 (attention, il s'agit ici seulement d'une synthèse du contenu de la norme – en cas de discordance entre la synthèse ci-dessous et la norme, seule la norme fait foi).*

La protection par tiges simples consiste en la mise en place de dispositifs de capture d'une hauteur de 2 à 8 m présentant une pointe très effilée. La position et la zone de couverture du paratonnerre sont déterminées suivant le modèle électrogéométrique. Plus simplement, pour les pointes simples, le rayon de protection du paratonnerre dépend de l'angle de protection et du niveau de protection considéré. (Niveau I, II, III ou IV).



#### Légende

$h_1$  hauteur physique de la tige de capture

NOTE L'angle de protection  $\alpha_1$  correspond à la hauteur  $h_1$  du dispositif de capture, cette hauteur étant prise au-dessus du toit à protéger; l'angle de protection  $\alpha_2$  correspond à la hauteur  $h_2 = h_1 + H$ , le sol étant le plan de référence;  $\alpha_1$  est lié à  $h_1$  et  $\alpha_2$  est lié à  $h_2$ .

Pour une cage maillée, le dispositif de capture est constitué de dispositifs de capture disposés aux coins, aux points exposés et sur les rebords (particulièrement aux points hauts) et de conducteurs de toiture. Les conducteurs de toiture forment un polygone fermé dont le périmètre est le pourtour de la toiture et une maille dont le pas dépend du niveau de protection. Pour un niveau I la maille est de 5 m, 10 m pour un niveau II, 15 m pour un niveau III et 20 m pour un niveau IV.

Le nombre de descente dépend du niveau de protection. L'espacement moyen entre descente est de 10 m en niveau I, 10 m en niveau II, 15 m en niveau III et 20 m en niveau IV avec une recommandation d'un conducteur de descente à chaque angle.

#### Disposition générale à la protection foudre

Le circuit de liaison à la terre est constitué par un conducteur cuivre de section minimale de 50 mm<sup>2</sup>, disposé à l'extérieur du bâtiment.

La base de chaque descente est munie d'une borne de coupure de très faible impédance en cupro – alu permettant la mesure de la prise de terre. Cette borne portant la mention paratonnerre et le repère de terre est intercalée à 2 mètres au-dessus du sol.

Le contenu de ce document est la propriété exclusive de la société FRANKLIN France, il ne peut être communiqué ou reproduit sans autorisation de notre part

Siège social : 13, Rue Louis Armand – B.P.106 – 77330 OZOIR-LA-FERRIERE Tél : 01 60 34 54 44 - Fax 01 64 40 35 43 - [www.franklin-france.com](http://www.franklin-france.com)  
SA AU CAPITAL DE 299 200 € SIREN 319747085 APE 2712Z

Agence Centre-Est : 14 rue de la Grange Saint Pierre – 71850 CHARNAY LES MACON. Tél : 03 85 344 78 81 – Fax : 03 85 34 94 79 – [centre.est@franklin-france.com](mailto:centre.est@franklin-france.com)

Les structures métalliques peuvent être utilisées comme organes de capture et conducteurs de descente « naturels » dans la mesure où une continuité électrique est assurée et dans le cas où les risques de point chaud et de percement au point d'impact sont tolérés. Pour que les tôles métalliques soient considérées comme composant « naturel » du dispositif de capture, il faut que ces dernières aient une épaisseur de 5 mm minimum.

Afin d'assurer l'écoulement du courant de foudre dans la terre, une prise de terre doit être constituée. Deux dispositions de prise de terre sont utilisées :

- Une prise de terre de type A : comportant des électrodes radiales (conducteur) ou verticales (piquet) est connectée à chaque descente. Le nombre d'électrodes doit être au minimum de 2 et la longueur constituée par les électrodes enterrées dépend du niveau de protection et de la résistivité du sol (voir figure 2 de la norme NF EN62305-3) – ou à défaut, la valeur de résistance doit être inférieure ou égale à 10 ohms
- Une prise de terre de type B : constituée d'une boucle extérieure à 1m de la structure dont 80% de sa longueur sont en contact avec le sol. Il peut s'agir d'un fond de fouille ou d'une prise de terre maillée.

Le réseau de terre 'foudre' peut être constitué de l'une ou l'autre des 2 dispositions ci-dessus, ou d'une combinaison des 2.

Les prises de terre doivent être interconnectées au circuit de terre général.

La norme est basée sur un principe de protection des bâtiments suivant le modèle électrogéométrique (dit de la sphère fictive).

La mise en œuvre de la protection contre la foudre prend en compte la présence des canalisations électriques, des portes et accès des bâtiments ainsi que le risque de différence de potentiels entre un conducteur du dispositif de protection et une masse métallique à la terre se trouvant à proximité.

Une attention particulière est réalisée afin d'assurer une bonne équipotentialité des masses entre l'installation paratonnerre et les éléments métalliques ou électriquement reliés à la terre, qui sont situés à proximité d'un conducteur de descente.

Suivant la NF C 17-106 et dans le cas d'un site ICPE soumis à l'arrêté du 19 Juillet 2011, un compteur d'impact est à installer. Ce compteur est à mettre en place au-dessus de la borne de coupure.

### Protection par Paratonnerres à dispositif d'Amorçage (PDA)

*Basée sur la norme NF C 17-102 de Septembre 2011 (attention, il s'agit ici seulement d'une synthèse du contenu de la norme – en cas de discordance entre la synthèse ci-dessous et la norme, seule la norme fait foi).*

La protection par PDA consiste en la mise en place de paratonnerres à dispositif d'amorçage basé sur l'initiation d'un traceur ascendant avec soutien de la propagation du traceur ascendant.

Chaque paratonnerre peut être rehaussé par un mât ou ensemble de mâts rallonges.

Il peut être fixé en déport ou sur trépied.

Le rayon de protection d'un PDA dépend de sa hauteur par rapport à la surface à protéger, de son avance à l'amorçage et du niveau de protection choisi.

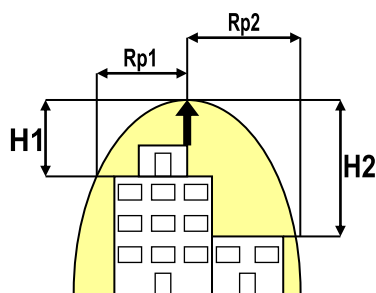
Le rayon de protection d'un PDA dépend de sa hauteur par rapport à la surface à protéger, de son avance à l'amorçage et du niveau de protection choisi.

Le contenu de ce document est la propriété exclusive de la société FRANKLIN France, il ne peut être communiqué ou reproduit sans autorisation de notre part

Siège social : 13, Rue Louis Armand – B.P.106 – 77330 OZOIR-LA-FERRIERE Tél : 01 60 34 54 44 - Fax 01 64 40 35 43 - [www.franklin-france.com](http://www.franklin-france.com)  
SA AU CAPITAL DE 299 200 € SIREN 319747085 APE 2712Z

Agence Centre-Est : 14 rue de la Grange Saint Pierre – 71850 CHARNAY LES MACON. Tél : 03 85 344 78 81 – Fax : 03 85 34 94 79 – [centre.est@franklin-france.com](mailto:centre.est@franklin-france.com)





pour  $H \geq 5m$  :

$$Rp = \sqrt{H(2D - H) + \Delta L(2D + \Delta L)}$$

pour  $H < 5m$ , on utilise la méthode graphique

avec les abaques de la norme **NF C 17-102**

ou la documentation technique du paratonnerre

Chaque paratonnerre doit être connecté à deux descentes et prises de terre.

Le conducteur de descente de section 50 mm<sup>2</sup> minimum est fixé à raison de 3 fixations par mètre.

En pied de descente, le conducteur est protégé contre d'éventuels chocs mécaniques à l'aide d'un fourreau de protection d'une hauteur de 2 m et une borne de coupure permettant la mesure de la prise de terre est intercalée au dessus du fourreau de protection.

Le dispositif de capture peut être connecté à deux types de prise de terre :

- La prise de terre de type « piquets triangulés » est constituée au minimum, d'un ensemble de trois piquets verticaux de 2 mètres. Ces trois piquets sont reliés entre eux par trois brins de ruban cuivre étamé et disposés au sommet d'un triangle équilatéral d'au minimum 2 mètres de côté. Le raccordement du conducteur sur les piquets se fera à l'aide de colliers de serrage.
- La prise de terre de type « patte d'oie » est constituée d'au minimum trois conducteurs de 7m à 8m de longueur, enfouis horizontalement à au moins 50 cm de profondeur.

Conformément aux normes, la prise de terre doit répondre aux exigences suivantes :

- résistance inférieure à 10 ohms
- valeur d'impédance d'onde la plus faible possible

Les prises de terre doivent être interconnectées au circuit de terre général électrique.

La norme est basée sur un principe de protection des bâtiments suivant le modèle électrogéométrique (dit de la sphère fictive).

Des liaisons équipotentiels doivent être réalisées là où les exigences d'isolement ne sont pas satisfaites. La distance de séparation correspondant à l'isolation électrique entre le système de protection foudre et les masses métalliques situées à proximité. Si la distance d'isolement ne peut être réalisée, une interconnexion par conducteur normalisé doit être mise en œuvre.

L'isolation électrique entre le dispositif de capture ou les conducteurs de descente et les parties métalliques de la structure, les installations métalliques et les systèmes intérieurs peut être réalisée par une distance de séparation «  $s$  » entre les parties. L'équation générale pour le calcul de «  $s$  » est la suivante :

$$s = k_i \frac{k_c}{k_m} I \quad (\text{m}) \quad (3)$$

où :

- $k_i$  dépend du niveau de protection choisi (voir Tableau 3) ;
- $k_m$  dépend du matériau d'isolation électrique (voir Tableau 4) ;
- $k_c$  dépend du courant de foudre qui s'écoule dans les conducteurs de descente et de terre ;
- $I$  est la longueur, en mètres, le long des dispositifs de capture et des conducteurs de descente entre le point où la distance de séparation est prise en considération et le point de la liaison équipotentielle la plus proche.

NOTE La longueur  $I$  le long du dispositif de capture peut être ignorée pour les structures à toiture métallique continue agissant comme dispositif de capture naturel.

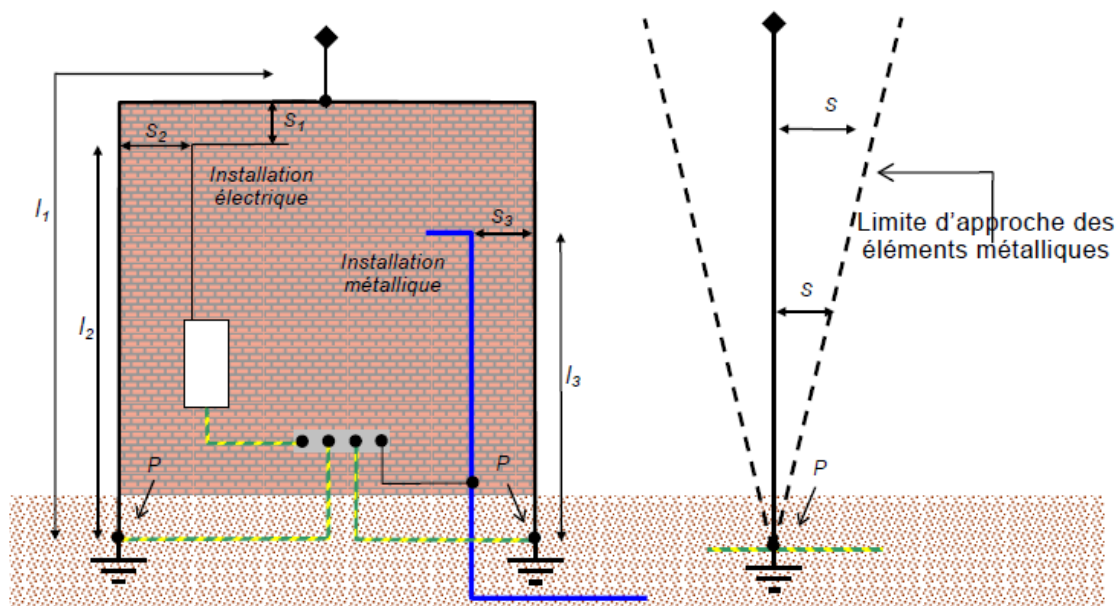



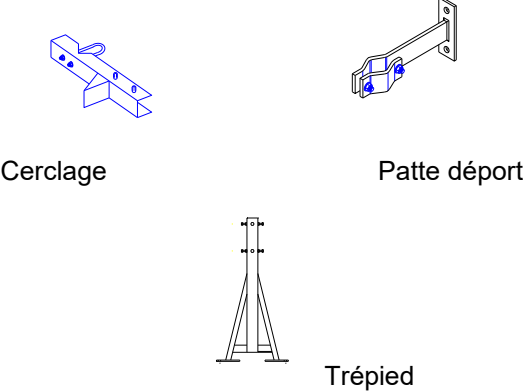
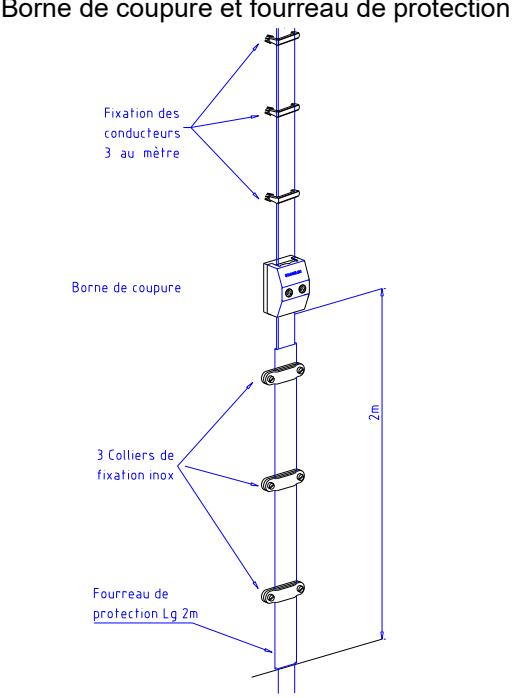
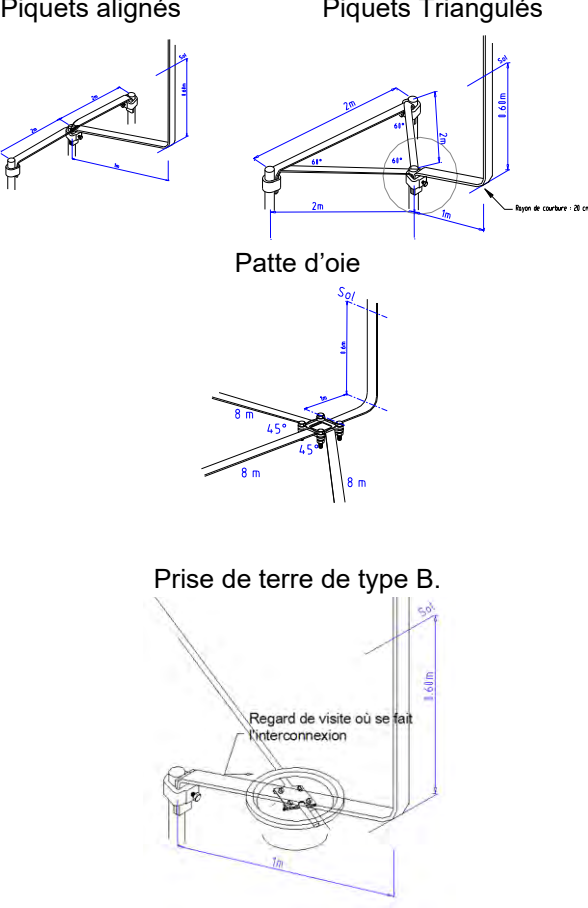
Figure 5 – Illustrations de la distance de séparation en fonction de la longueur considérée et augmentation de la différence de potentiel en fonction de la distance au point d'équipotentialité le plus proche (P)

Le contenu de ce document est la propriété exclusive de la société FRANKLIN France, il ne peut être communiqué ou reproduit sans autorisation de notre part

Siège social : 13, Rue Louis Armand – B.P.106 – 77330 OZOIR-LA-FERRIERE Tél : 01 60 34 54 44 - Fax 01 64 40 35 43 - [www.franklin-france.com](http://www.franklin-france.com)  
SA AU CAPITAL DE 299 200 € SIREN 319747085 APE 2712Z

Agence Centre-Est : 14 rue de la Grange Saint Pierre – 71850 CHARNAY LES MACON. Tél : 03 85 344 78 81 – Fax : 03 85 34 94 79 – [centre.est@franklin-france.com](mailto:centre.est@franklin-france.com)

## Détail de principe d'une installation de protection foudre :

Paratonnerre :	Fixations de paratonnerre
 <p>A dispositif d'amorçage      A tige simple</p>	 <p>Cerclage      Patte déport</p> <p>Trépied</p>
Descente :	Différentes prises de terre :
 <p>Borne de coupure et fourreau de protection</p> <p>Fixation des conducteurs 3 au mètre</p> <p>Borne de coupure</p> <p>3 Colliers de fixation inox</p> <p>Fourreau de protection Lg 2m</p> <p>2m</p> <p>Compteur de foudre</p>	 <p>Piquets alignés</p> <p>Piquets Triangulés</p> <p>Patte d'oie</p> <p>Prise de terre de type B.</p>

Le contenu de ce document est la propriété exclusive de la société FRANKLIN France, il ne peut être communiqué ou reproduit sans autorisation de notre part

Siège social : 13, Rue Louis Armand – B.P.106 – 77330 OZOIR-LA-FERRIERE Tél : 01 60 34 54 44 - Fax 01 64 40 35 43 - [www.franklin-france.com](http://www.franklin-france.com)  
SA AU CAPITAL DE 299 200 € SIREN 319747085 APE 2712Z

Agence Centre-Est : 14 rue de la Grange Saint Pierre – 71850 CHARNAY LES MACON. Tél : 03 85 344 78 81 – Fax : 03 85 34 94 79 – [centre.est@franklin-france.com](mailto:centre.est@franklin-france.com)



**Protection Parafoudre :**

*Basée sur les normes NF EN 62 305 – 4, NF C 15-100 et UTE C 15-443 (attention, il s'agit ici seulement d'une synthèse du contenu des normes – en cas de discordance entre la synthèse ci-dessous et la (les) norme (s), seule (s) la (les) norme (s) fait (font) foi).*

Les parafoudres sont destinés à limiter le niveau des surtensions d'origine atmosphérique transmises par le réseau de distribution à un niveau compatible avec la tension de tenue aux chocs des matériels. L'installation des parafoudres ne doit pas perturber le fonctionnement de l'installation et des dispositifs de protection, ni provoquer de danger pour les personnes et les biens, dans tous les cas, même suite à une défaillance.

La protection contre les surtensions est un complément à la protection contre la foudre.

Suivant la configuration de l'installation électrique et de la distance entre les équipements à protéger, on installe un ou plusieurs parafoudres au niveau des armoires principales, des tableaux de distributions etc....

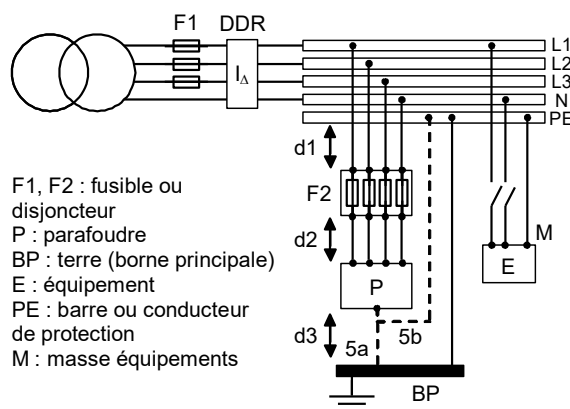
Suivant la NF C 15-100, tout bâtiment équipé d'un paratonnerre doit être équipé au moins d'un parafoudre à l'origine de l'installation.

Protection d'un bâtiment	Nk < 25	Nk > 25
avec 1 protection contre l'impact direct (paratonnerre ...)	<b>OBLIGATOIRE</b> <b>parafoudre type 1</b> <b>12,5 kA (10/350)</b>	<b>OBLIGATOIRE</b> <b>parafoudre type 1</b> <b>12,5 kA (10/350)</b>
alimenté par une ligne aérienne (sans paratonnerre ...)	non obligatoire	<b>OBLIGATOIRE</b> <b>parafoudre type 2</b> <b>In min. = 5 kA (8/20)</b>
alimenté par une ligne souterraine (sans para ...)	non obligatoire	non obligatoire

Conformément aux règles du guide UTE 15-443, le parafoudre est branché en dérivation au plus court sur l'arrivée de l'armoire.

Il est disposé au plus près du jeu de barres ou du bornier principal. En complément de la déconnexion thermique intégrée, une protection contre les courts-circuits en fin de vie est insérée en amont du branchement du parafoudre. L'insertion de la protection tient compte du nombre de pôles à protéger et du courant de court-circuit possible au point considéré.

La mise en œuvre des protections parafoudres dans l'installation doit être réalisée suivant le principe suivant :



**F2 OBLIGATOIRE si F1 > calibre max. Protection du neutre obligatoire.** d1+d2+d3 : distance la plus courte possible (< 50 cm obligatoire). Terre : liaison 5a ou 5b.

Dans tous les cas, l'installation de protection par parafoudres devra être **COORDONNEE** dans sa **TOTALITE**.

Conformément à la norme NFC15-100, la protection parafoudre de type 1 sera mise en place à l'origine de l'installation électrique ; le plus souvent il s'agit du TGBT ou d'un tableau secondaire d'alimentation d'un bâtiment.

**Le dimensionnement du parafoudre de type 1 est donc calculé par rapport à l'analyse du risque foudre (ARF).**

### **Parafoudre de type 1 :**

#### **- Raccordement**

La protection Type 1 sera raccordée au niveau du jeu de barres principal du TGBT.

Une signalisation par voyant mécanique indique le défaut et un contact inverseur permet d'assurer le report d'alarme à distance si nécessaire.

Le raccordement devra être réalisé de la manière la plus courte et la plus rectiligne possible afin de réduire la surface de boucle générée par le montage des câbles phases, neutre et PE.

La mise en œuvre doit être réalisée conformément au guide UTE C 15-443.

#### **- Dispositifs de déconnexion :**

Il sera prévu un dispositif de protection contre les courants de défaut et les surintensités (Fusibles HPC, disjoncteur...).

Afin de privilégier la continuité des installations électriques, les dispositifs de protection des parafoudres respecteront les règles de sélectivité. **Lorsque le parafoudre est installé en aval de l'organe de protection contre les surintensités de l'installation, l'organe de protection de l'installation doit avoir une tenue (limp) au risque foudre supérieure ou égale à celle du parafoudre installé afin de garantir à la fois, l'efficacité de la protection, la sécurité et la disponibilité des installations. Dans les cas contraire, l'utilisateur doit être averti sur l'état de chacun de ces critères, et il peut être choisi d'insérer le parafoudre sans protection associée, suivant les recommandations du constructeur.**

Le contenu de ce document est la propriété exclusive de la société FRANKLIN France, il ne peut être communiqué ou reproduit sans autorisation de notre part

Siège social : 13, Rue Louis Armand – B.P.106 – 77330 OZOIR-LA-FERRIERE Tél : 01 60 34 54 44 - Fax 01 64 40 35 43 - [www.franklin-france.com](http://www.franklin-france.com)  
SA AU CAPITAL DE 299 200 € SIREN 319747085 APE 2712Z

Agence Centre-Est : 14 rue de la Grange Saint Pierre – 71850 CHARNAY LES MACON. Tél : 03 85 344 78 81 – Fax : 03 85 34 94 79 – [centre.est@franklin-france.com](mailto:centre.est@franklin-france.com)

Le dispositif de protection devra permettre une bonne tenue aux chocs de foudre ainsi qu'une résistance aux courants de court-circuit adaptée et garantir la protection contre les contacts indirects en cas de destruction du parafoudre. Une signalisation par voyant mécanique indique le défaut et un contact inverseur permet d'assurer le report d'alarme à distance.

<b>Tension max de régime permanent</b>	<b>Uc</b>	<b>selon la tension réseau</b>
<b>Courant de fonctionnement permanent</b>	<b>Ic</b>	<b>selon la puissance installée</b>
<b>Niveau de protection</b>	<b>Up</b>	<b>≥ 2,5 kV</b>
<b>Courant de décharge</b>	<b>In</b>	<b>20 kA</b>
<b>Courant impulsionnel</b>	<b>Iimp</b>	<b>≥ 12,5 kA</b>
<b>Onde de référence</b>		<b>10/350 μs</b>

Le Courant impulsionnel du parafoudre unipolaire peut être calculé. Il est fonction du niveau de protection, du nombre de lignes électriques (chemins) et du nombre de conducteurs par ligne avec en accord avec la NF C 15-100, un  $i_{imp}$  mini de 12,5 kA.

Pour le niveau I :  $i_{imp} = 100/(m \times n)$

Pour le niveau II :  $i_{imp} = 75/(m \times n)$

Pour le niveau III et IV :  $i_{imp} = 12,5$  kA

Où :

m : nombre de lignes électriques (à l'exclusion des lignes de télécommunications) et de canalisations métalliques connectées au système de protection. (Nombre de chemins susceptibles de véhiculer une partie du courant de foudre)

n : nombre de conducteurs par ligne électrique. (ou par chemin)

### Parafoudre de type 2 :

- Raccordement :

La protection Type 2 est raccordée en aval du disjoncteur principal du tableau divisionnaire. La protection est débrochable afin de faciliter les opérations de maintenance. Une signalisation par voyant mécanique indique le défaut et un contact inverseur permet d'assurer le report d'alarme à distance.

Le raccordement doit être réalisé de la manière la plus courte et la plus rectiligne possible afin de réduire la surface de boucle générée par le montage des câbles phases et PE. La longueur cumulée de conducteurs parallèle de raccordement du parafoudre au réseau doit être inférieure à 0,50 m.

Le câblage est identique au parafoudre type 1.

- Dispositifs de déconnexion :

Il est prévu un dispositif de protection contre les courants de défaut et les surintensités (Fusibles HPC, disjoncteur...). Ce dispositif sera dimensionné par l'installateur. Afin de privilégier la continuité des installations électriques, les dispositifs de protection des parafoudres respecteront les règles de sélectivité.

Le contenu de ce document est la propriété exclusive de la société FRANKLIN France, il ne peut être communiqué ou reproduit sans autorisation de notre part

Siège social : 13, Rue Louis Armand – B.P.106 – 77330 OZOIR-LA-FERRIERE Tél : 01 60 34 54 44 - Fax 01 64 40 35 43 - [www.franklin-france.com](http://www.franklin-france.com)  
SA AU CAPITAL DE 299 200 € SIREN 319747085 APE 2712Z

Agence Centre-Est : 14 rue de la Grange Saint Pierre – 71850 CHARNAY LES MACON. Tél : 03 85 344 78 81 – Fax : 03 85 34 94 79 – [centre.est@franklin-france.com](mailto:centre.est@franklin-france.com)



Le dispositif de protection doit permettre une bonne tenue aux chocs de foudre, ainsi qu'une résistance aux courants de court-circuit adaptée et garantir la protection contre les contacts indirects après destruction du parafoudre. Une signalisation par voyant mécanique indique le défaut et un contact inverseur permet d'assurer le report d'alarme à distance.

<b>Tension Max de régime permanent</b>	<b>Uc</b>	<b>selon la tension réseau</b>
<b>Courant de fonctionnement permanent</b>	<b>Ic</b>	<b>Selon la puissance installée</b>
<b>Niveau de protection</b>	<b>Up</b>	<b>≤ 1,5 kV ou ≤ 2,5 kV selon le réseau</b>
<b>Courant de décharge</b>	<b>In</b>	<b>De 5 à 20 kA</b>
<b>Courant de décharge max</b>	<b>Imax</b>	<b>De 10 à 70 kA</b>
<b>Onde de référence</b>		<b>8/20 μs</b>
<b>Télésurveillance</b>		<b>voyant ou contact</b>

Caractéristiques des protections demandées :

- Montage Rail DIN
- Configuration Modulaire débrochable (Fiche+Embase)
- Signalisation défaut par voyant mécanique
- Télésignalisation par contact sec inverseur 250VAC/125VDC
- Pouvoir de décharge 20 kA nominal en onde 8/20μs (x20 chocs)
- Pouvoir de décharge 40 kA maximum en onde 8/20μs (x1 choc)
- Courant de fuite vers PE < 0,3 mA
- Section raccordable 35 mm<sup>2</sup>

### Caractéristiques des déconnecteurs externes :

En amont du parafoudre, il peut être nécessaire de mettre en œuvre un déconnecteur externe. Ces caractéristiques de câblage, de calibre... doivent être indiquées dans les notices de montage des constructeurs de parafoudres.

Le tableau ci-contre, extrait de l'annexe P (informative) de la norme NF EN 61643-12 indique les tenues aux chocs des fusibles. Des valeurs plus grandes peuvent être obtenues en fonction de la technologie du fusible et doivent alors être démontrées (essais selon NF EN 61643-11) Les caractéristique doivent être indiqué par le fabricant.

Courant assigné du fusible (calibre)	Essais de tenue aux chocs des fusibles	
	Fusible cylindrique cyl. gG en onde 8/20 μs	Fusible à couteaux NH gG en onde 10/350 μs
25 A	5 kA	
32 A	7 kA	
40 A	10 kA	
50 A	15 kA	
63 A	17 kA	
80 A	25 kA	
100 A	30 kA	5 kA
125 A	40 kA	7 kA
160 A	> 40 kA	10 kA
200 A	> 40 kA	15 kA
250 A	> 40 kA	20 kA
315 A	> 40 kA	25 kA

Tableau 1 Extrait de l'annexe P (informative) de la norme EN 61643-12

Pour exemple, avec un parafoudre de type 2 de In = 5 kA, un fusible de 25 A suffit comme déconnecteur externe.

### Parafoudre de réseaux :

La protection réseau est dédiée à la protection des équipements très sensibles ou d'une importance stratégique notoire. Cette dernière est destinée à répondre aux effets induits par la foudre sur les réseaux TBT, de type télécommunication ou transmission de données.

#### - Raccordement :

La protection (protection fine) est raccordée en série. Le raccordement au réseau équipotentiel doit être réalisé de la manière la plus courte possible.

Afin de se prémunir des surtensions arrivant par les lignes téléphoniques (lignes provenant de l'extérieur du site ou lignes internes desservant d'autres bâtiments), il est nécessaire de mettre en place une protection adéquate.

En raison du grand nombre de lignes pouvant être connecté à l'autocommutateur, il est essentiel d'optimiser la protection de celles-ci en différenciant les types de lignes :

Celles provenant de l'extérieur du site : Elles doivent être protégées en raison de leur importance stratégique,

Les lignes internes restant dans le même bâtiment que l'autocommutateur : La protection par parafoudre n'est pas nécessaire. En revanche, il est intéressant d'utiliser les chemins de câbles métalliques comme écrans protecteurs vis-à-vis du rayonnement.

Dans ce cas, la continuité électrique des chemins de câbles doit être assurée sur toute leur longueur.

Les parafoudres à installer seront choisis en fonction de la connectique requise, du niveau de tension du signal, du débit de transmission ou de la bande de fréquence.

De façon générale, ils devront avoir les caractéristiques suivantes :

- une tension de fonctionnement  $U_c$  de 150 V minimum,
- un niveau de protection  $U_p$  de 260 V,
- un courant nominal de décharge de  $I_n$  égal ou supérieur à 5 kA,
- un courant impulsionnel  $I_{imp}$  mini de 1,5 kA
- une perte d'insertion à 3 kHz inférieure à 1 dB.
- Une fin de vie identifiable facilement (Mise en court – circuit ou indicateur de fin de vie)

Le conducteur de raccordement reliant le parafoudre au réseau de terre de l'installation doit avoir une section minimale de 1,5 mm<sup>2</sup> en cuivre.

### 3.2 Système de Protection Foudre Extérieur à réaliser sur le site.

Conformément à l'arrêté du 4 octobre 2010 modifié, dans le cas de site ICPE, les travaux de protection foudre devront être réalisés par une entreprise **compétente et qualifiée**.

**L'Analyse du Risque Foudre N° NA20200922-01 a démontré, la nécessité de mise en place d'une Installation Extérieure de Protection Foudre de niveau I pour la cathédrale.**

Pour rappel : l'arrêté du 11 décembre 2009 indique dans son Article EL4 §1 :  
*Si une installation extérieure de protection des structures contre la foudre (paratonnerres) est prévue, elle est installée conformément à la norme NF EN 62305-3 (décembre 2006).*

Et le Ministère de l'écologie, du Développement durable et de l'Energie indique dans sa note du 22 février 2016, que « Cette disposition ne doit être comprise comme ne s'appliquant qu'aux ERP pour lesquelles la réglementation prévoit l'installation de paratonnerres. En pratique, seuls les arrêtés relatifs aux hôtels d'altitude et aux refuges exigent l'installation de paratonnerres conformément à la norme NF C 17-100.

*Dans l'attente de l'actualisation de la réglementation dans ce domaine, les deux technologies de protection contre la foudre (PDA et paratonnerre à tige fixe) peuvent être utilisées dans ces deux types d'ERP. »*

Les monuments de cultes ne font pas parties de ces dispositions, les différents types de protection contre la foudre peuvent donc être envisagés.

Depuis 2013, dernière campagne de travaux sur le système de protection foudre extérieur de la cathédrale, la cathédrale était protégée par 5 paratonnerres à dispositifs d'amorçage de 25µs reliés chacun à 2 conducteurs de descente et un conducteur périphérique de mutualisation. Un paratonnerre à tige simple, mis en œuvre au sommet de la flèche, avec ceinturage intermédiaire (2) sur la flèche, conducteurs de descente (2) venait compléter le système de protection foudre.

De ce ceinturage ; le système de protection foudre de la flèche était connecté par des conducteurs de toiture (faîte et rive) avec les descentes des PDA.

Le type d'installations réalisées suivant les recommandations du cabinet Axiome et la validation de Mr Benjamin MOUTON (Architecte en chef des monuments historiques jusqu'en 2013) n'est pas remis en cause. De ce fait, notre étude technique sur les effets directs de la foudre reprendra, les éléments des études de 2009 et 2011, ayant entraîné les travaux de mise en conformité de 2011 à 2013.

Les normes n'ayant pas évoluées, il n'y a pas de raison de remettre en cause le choix technique et esthétique de l'époque d'autant plus, que l'on peut réutiliser l'ensemble du réseau de terre, une partie des conducteurs de descentes et les protections des 2 tours qui ont été sauvegardées.

L'installation a été réalisée suivant le principe de la norme NF C 176102 de protection des églises comme indiqué ci-dessous : (extrait de la norme NF C 17-102 de septembre 2011- §7.3)



### 7.3 Edifices religieux

Les clochers, les tours, les minarets et les beffrois sont susceptibles d'être touchés par la foudre en raison de leur proéminence.

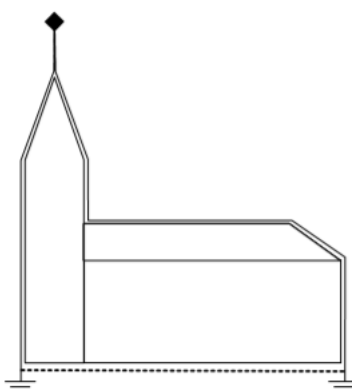
Pour ce type d'édifice, le SPF à dispositif d'amorçage doit comprendre un premier conducteur de descente cheminant directement le long de la tour principale.

Lorsque la hauteur du point culminant de l'édifice est supérieure à 40 m, il est recommandé que le second conducteur de descente spécifique suive le faitage du corps principal de l'édifice.

Lorsque l'extrémité du corps principal de l'édifice est équipée d'un élément proéminent non métallique (une croix, une statue non métallique, etc.), ces objets sont dotés d'un dispositif de capture.

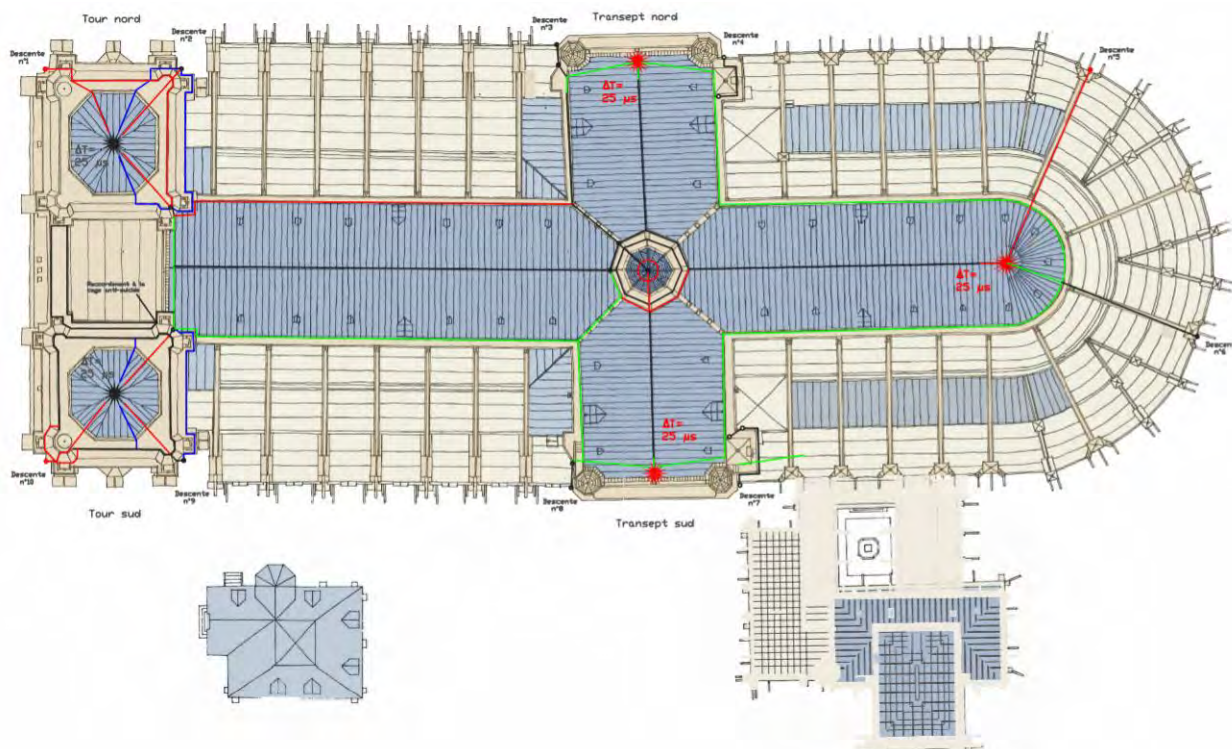
Il convient que toutes les prises de terre du SPF à dispositif d'amorçage et la prise de terre électrique soient interconnectées par une liaison équipotentielle.

Certains édifices disposent de cloches électrifiées. Leur alimentation électrique doit être protégée contre les surtensions à l'aide de parafoudres, conformément à la NF EN 61643-11 et au CLC/TS 61643-12.



Dans les 2 cas, lorsque le clocher est supérieur à 40 deux conducteurs de descentes doivent être réalisés.

Dans son § 5.3.1, la norme NF C 17-102 de 2011, précise : « Pour être considérés indépendants, il convient que les cheminements de deux conducteurs de descente soient séparés d'une distance minimale de 2 m. Pour gérer tout problème pratique pouvant être rencontré, il est toléré que le cheminement soit identique sur une longueur équivalente à 5 % de la longueur totale du conducteur de descente le plus court. »



Extrait : Plan d'implantation des Paratonnerres et conducteur de descentes n° 457-T\_05.

En accord avec l'ARF, le système de protection foudre sera assuré pour un niveau I de protection en accord avec la norme NF C 17-102 de septembre 2011 et la norme NF EN 62305-3 de décembre 2012.

La protection sera donc assurée par un PDA sur chacune des tours, un PDA au-dessus de chacune des statues situées au sommet des pignons Nord et Sud du transept et un PDA au-dessus de la croix à l'extrémité du faîtage du chœur. Soit un total de 5 PDA. LA protection sera complétée par au sommet de la flèche, la mise en œuvre d'un paratonnerre à tige simple.

La mise en conformité vis-à-vis de la norme en vigueur NF C 17-102 de septembre 2011, entraîne la validation du bon fonctionnement des 2 paratonnerres non impactés directement par l'incendie. Les composants électroniques pouvant avoir été dégradés par la charge calorifique dégagée lors de l'incendie de la cathédrale, nous préconisons le remplacement de ces 2 paratonnerres, afin de garantir leur bon fonctionnement dans le temps.

Les travaux suivants devront être réalisés pour répondre aux niveaux de protection retenus par l'ARF et à la vérification périodique.

- Remplacement des 2 PDA existants par des paratonnerre testable (de préférence à distance aux vues de leur implantation au sommet).  
Mise en place en pignon Nord et en pignon sud du transept de 2 PDA.  
Mise en place d'un PDA en extrémité de faîtage du chœur.

- Ces paratonnerres auront une avance à l'amorçage de 25 à 30  $\mu$ s et seront conforme à la NF C 17-102 de septembre 2011.

En niveau I de protection, à 5 m au-dessus du point considéré, les paratonnerres de 25  $\mu$ s posséderont un rayon de protection de 42,7 m et un rayon de 45 m à 20 m au-dessus du point considéré.

Le contenu de ce document est la propriété exclusive de la société FRANKLIN France, il ne peut être communiqué ou reproduit sans autorisation de notre part

Siège social : 13, Rue Louis Armand – B.P.106 – 77330 OZOIR-LA-FERRIERE Tél : 01 60 34 54 44 - Fax 01 64 40 35 43 - [www.franklin-france.com](http://www.franklin-france.com)  
SA AU CAPITAL DE 299 200 € SIREN 319747085 APE 2712Z

Agence Centre-Est : 14 rue de la Grange Saint Pierre – 71850 CHARNAY LES MACON. Tél : 03 85 344 78 81 – Fax : 03 85 34 94 79 – [centre.est@franklin-france.com](mailto:centre.est@franklin-france.com)

Les paratonnerres de 30  $\mu$ s posséderont un rayon de protection de 47 m et un rayon de 50 m à 20 m au-dessus du point considéré.

**Le rayon de protection est calculé comme suit :**

$$R h = \sqrt{(2rh - h^2 + \Delta(2r + \Delta))} \text{ pour } h \geq 5 \text{ m}$$

où :

$R_p(h)$  (m) correspond au rayon de protection à une hauteur  $h$  donnée ;

$h$  (m) correspond à la hauteur de

l'extrémité du PDA sur le plan horizontal

jusqu'au point le plus éloigné de l'objet à protéger ;

$r$  (m) 20 m pour le niveau de protection I

;

30 m pour le niveau de protection II

;

45 m pour le niveau de protection

III ;

60 m pour le niveau de protection

IV ;

$\Delta$  (m)  $\Delta = \Delta T \times 10^6$  : L'expérience sur le terrain montre que  $\Delta$  est égal à l'efficacité obtenue pendant les essais d'évaluation du PDA.

- **Mise en œuvre au sommet de la flèche d'un paratonnerre à tige simple.** Ce dernier pouvant être intégré à l'ornement au sommet de la flèche.
- Réutilisation des conducteurs de descente après vérification de ces derniers et remplacement en bord de rive de toit, des tronçons de conducteur abimé par l'incendie.
- Création pour chaque PDA, de deux conducteurs de descente, pour permettre en accord avec le § 5.3.2 de la norme, la connexion de chaque PDA à au moins 2 conducteurs de descente.  
Les conducteurs utilisés devront être conforme aux normes NF EN 62561-2 et NF C 17-102, ce qui pour un conducteur de type feuillard cuivre étamé correspond à une section supérieure ou égale à 50mm<sup>2</sup> (cf tableau 1 page 8 de la NF EN 62561-2).
- Création de deux conducteurs de descentes, en accord avec la norme NF EN 62305-3, pour le paratonnerre à tige simple de la flèche.
- Du fait de la hauteur de la flèche, réalisation de 2 ceinturages intermédiaires en partie haute.
- Création en toiture d'un réseau de mutualisation permettant la répartition du courant de foudre et la diminution des distances de séparation, par la création d'un ceinturage périphérique de la toiture et la mise en œuvre d'un conducteur en faîtage.
- Les conducteurs de descente des PDA, seront le plus directs possibles et seront fixés à raison de 3 fixations par mètre (tous les 33 cm selon la NF C 17-102), par fixations adaptées. Pour la pointe située sur la flèche, les fixations sont à placer tous les m, ou 50 cm selon les positions et type de conducteurs. Pour une meilleure esthétique et pour le maintien des conducteurs, nous vous conseillons sur les parties verticales, la mise en œuvre d'au moins une fixation tous les 50 cm. Les fixations seront de types : brides pour toiture zinc et plomb, clips inox, crampons maçonnerie... selon les supports rencontrés.

Le contenu de ce document est la propriété exclusive de la société FRANKLIN France, il ne peut être communiqué ou reproduit sans autorisation de notre part

Siège social : 13, Rue Louis Armand – B.P.106 – 77330 OZOIR-LA-FERRIERE Tél : 01 60 34 54 44 - Fax 01 64 40 35 43 - [www.franklin-france.com](http://www.franklin-france.com)  
SA AU CAPITAL DE 299 200 € SIREN 319747085 APE 2712Z

Agence Centre-Est : 14 rue de la Grange Saint Pierre – 71850 CHARNAY LES MACON. Tél : 03 85 344 78 81 – Fax : 03 85 34 94 79 – [centre.est@franklin-france.com](mailto:centre.est@franklin-france.com)



Tableau E.1 – Points de fixation suggérés

Disposition	Points de fixation pour conducteurs ruban, torsadés et ronds étirés et souples mm	Points de fixation pour conducteurs pleins ronds mm
Conducteurs horizontaux sur surfaces horizontales	1 000	1 000
Conducteurs horizontaux sur surfaces verticales	500	1 000
Conducteurs verticaux du sol jusqu'à 20 m	1 000	1 000
Conducteurs verticaux au-dessus de 20 m	500	1 000

NOTE 1 Ce tableau ne s'applique pas à des fixations préfabriquées, qui peuvent requérir des études particulières.

NOTE 2 Il convient que la détermination des conditions d'environnement (c'est-à-dire la charge due au vent prévue) soit effectuée et il se peut que des points de fixation différents de ceux recommandés se révèlent nécessaires.

- Les colonnes montantes utilisés comme conducteur naturel de descente, seront reprise en partie haute au ceinturage périphérique.
- Conservation du réseau de prises de terre. Cette partie du système de protection contre la foudre n'ayant pas été endommagés par l'incendie.
- Toutes les installations métalliques et les systèmes intérieurs situés à une distance inférieure à la distance de séparation  $s$  devront être reliés équipotentiellement avec le système de protection foudre.

Dans le cas présent, la distance de séparation est calculée de la façon suivante :

$$s = k_i \times (k_c / km) \times l$$

Avec :

**K<sub>i</sub>** (dépend du type de SPF choisi) = **0,08** (niveau I)

**K<sub>m</sub>** (dépend du matériau de séparation) = **1** (Air)

**K<sub>c</sub>** (dépend du courant de foudre s'écoulant dans les conducteurs de descente)

$$k_c = \frac{1}{2n} + 0,1 + 0,2\sqrt{\frac{c}{h}}$$

avec

$n$  nombre total de conducteurs de descente  
 $c$  distance entre deux conducteurs de descente  
 $h$  distance (hauteur) entre ceinturage

dans notre cas :  $n = 10$ .  $C$  moyen = 38  $h = 35$

D'où  $k_c = 0,355$

$l$  ( $l$  est la longueur en mètres, le long des dispositifs de capture ou des conducteurs de descente où la distance de séparation est prise en considération et le point de la liaison équipotentielle la plus proche)

⇒ En haut de la flèche :  $L = 130$  m d'où  $s = 3,69$  m

Au niveau de la nef :  $L = 80$  m d'où  $s = 2,27$  m

Au niveau des bas-côtés :  $L = 35$  m d'où  $s = 0,99$

Au niveau des tours :  $L = 80$  m d'où  $s = 2,27$  m.

- Les conducteurs de descentes devront donc être écartés des conducteurs électriques présents en toiture. En cas d'impossibilité, ces conducteurs électriques devront :
  - soit être protégés à leur pénétration dans l'édifice par parafoudre de type 1 adapté aux signaux et tensions véhiculées. (Conducteur en terrasse inférieure, coursives de la nef (éclairage), Sommet des tours (câbles d'éclairage).
  - ou soit être mis en œuvre sous blindage métallique. Les blindages métalliques doivent être reliés aux conducteurs de descente par l'intermédiaire d'un conducteur en cuivre étamé de 50 mm<sup>2</sup>.

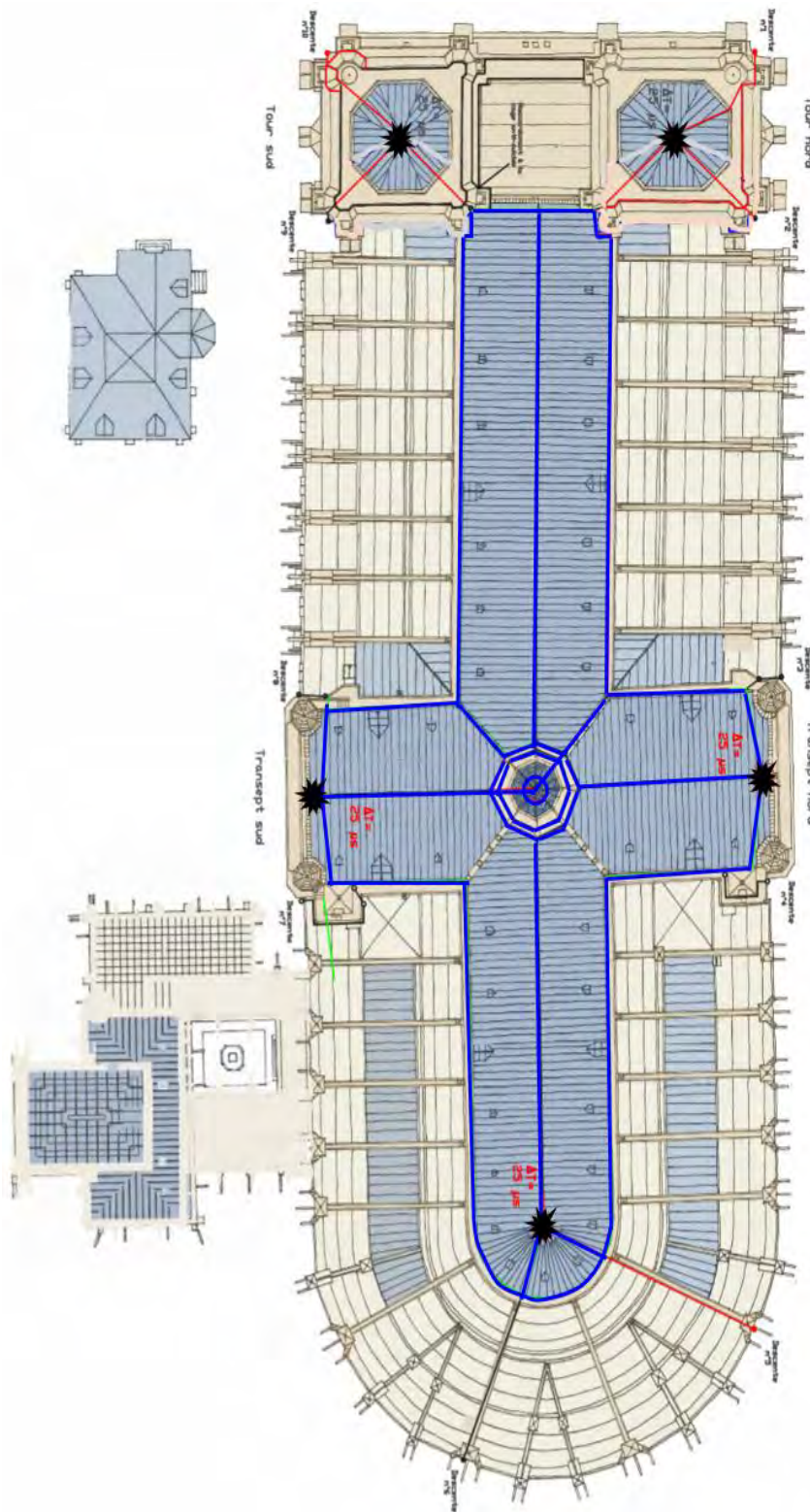
### **Masses métalliques pénétrantes :**

En accord avec les normes électriques, l'ensemble des masses métalliques de type canalisations d'eau, air comprimé, canalisations gaz, etc... devront être raccordées équipotentiellement, au réseau de terre de site (conducteur mini de 6 mm<sup>2</sup>). Les connexions pourront être réalisées avec le réseau de terre sur une barre d'équipotentialité de section mini de 16 mm<sup>2</sup>.

De ce fait sur le site, les travaux suivants seront à réaliser :

- Interconnexion des canalisations d'arrivée d'eau et des canalisations CVC.

**Plan de principe de la protection à remettre en œuvre :**



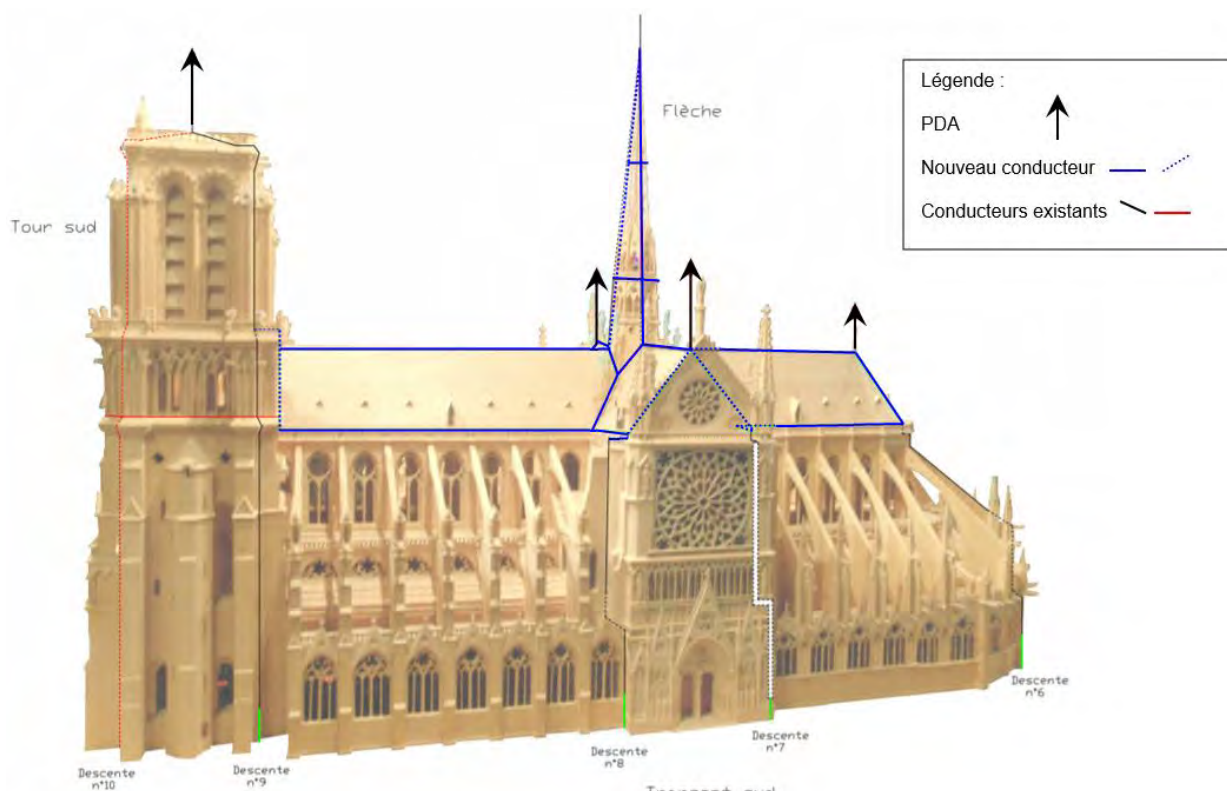
*Plan issu du CCTP Axiome de 2011.*

Le contenu de ce document est la propriété exclusive de la société FRANKLIN France, il ne peut être communiqué ou reproduit sans autorisation de notre part

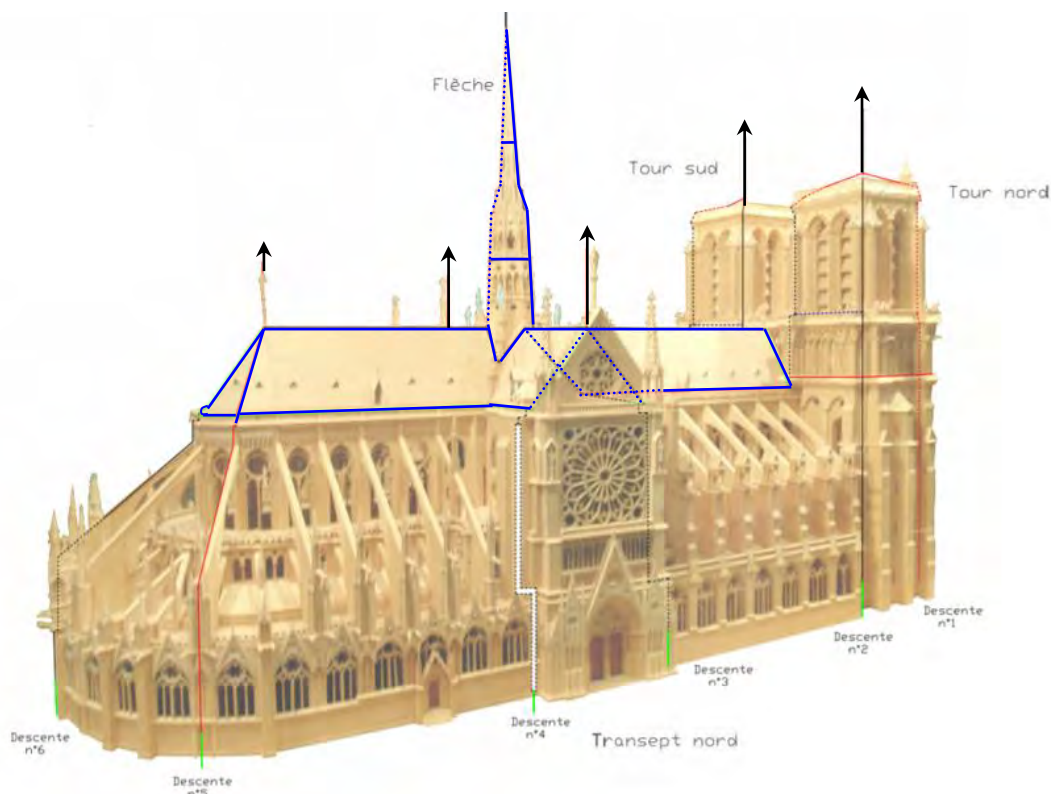
Siège social : 13, Rue Louis Armand – B.P.106 – 77330 OZOIR-LA-FERRIERE Tél : 01 60 34 54 44 - Fax 01 64 40 35 43 - [www.franklin-france.com](http://www.franklin-france.com)  
SA AU CAPITAL DE 299 200 € SIREN 319747085 APE 2712Z

Agence Centre-Est : 14 rue de la Grange Saint Pierre – 71850 CHARNAY LES MACON. Tél : 03 85 344 78 81 – Fax : 03 85 34 94 79 – [centre.est@franklin-france.com](mailto:centre.est@franklin-france.com)





Vue axonométrique Sud – Extrait plan 457-T\_06



Vue axonométrique Nord – Extrait plan 457-T\_07

Le contenu de ce document est la propriété exclusive de la société FRANKLIN France, il ne peut être communiqué ou reproduit sans autorisation de notre part

Siège social : 13, Rue Louis Armand – B.P.106 – 77330 OZOIR-LA-FERRIERE Tél : 01 60 34 54 44 - Fax 01 64 40 35 43 - [www.franklin-france.com](http://www.franklin-france.com)  
SA AU CAPITAL DE 299 200 € SIREN 319747085 APE 2712Z

Agence Centre-Est : 14 rue de la Grange Saint Pierre – 71850 CHARNAY LES MACON. Tél : 03 85 344 78 81 – Fax : 03 85 34 94 79 – [centre.est@franklin-france.com](mailto:centre.est@franklin-france.com)

### 3.3 Système de Protection Foudre Intérieur à réaliser sur le site.

Conformément à l'arrêté du 19 Juillet 2011, les travaux de protection foudre devront être réalisés par une entreprise **compétente et qualifiée Qualifoudre.**

Au sens de la norme, dès qu'un Système de Protection Foudre (SPF) est installé sur un bâtiment, l'origine de l'installation électrique BT doit être protégée par parafoudres de type 1 (Testés en onde 10/350), ainsi que toutes les lignes BT ou TBT entrantes (ou sortantes) (Tableau 771D de la norme UTE C 15-100 et du guide UTE C 15443)

De même, les équipements métalliques interconnectés avec le système de protection foudre extérieur et alimentés par une ligne d'énergie ou une ligne de donnée (par exemple caméra ...) devront être également protégés par des parafoudres testés en onde 10/350 de préférence au niveau de leur pénétration. Il est préférable de déplacer ces équipements ou les conducteurs de descente pour éviter la mise en œuvre de parafoudres. Le courant limp des parafoudres devra être au minimum de 12,5 kA par pôle pour le réseau d'alimentation et de 2,5 kA pour le réseau de données.

Du fait de la multiplicité des lignes, leur protection n'est pas économiquement ou même techniquement raisonnable, il conviendra de protéger les lignes directes importantes pour la sécurité du site en prenant en compte le fait que certaines installations sont à sécurité positive.

La décision de protéger telle ou telle lignes devra être prise en accord avec l'exploitant et en s'appuyant sur les conclusions de l'ARF.

La norme NF EN 62305-4 ne prévoyant qu'un cas : tout protéger.

Les parafoudres à installer seront câblés au plus court (longueur de câblage inférieure à 50cm) et seront associés à un organe de coupure pour permettre la continuité de service dans le cas d'une fin de vie en court-circuit du parafoudre. Les organes de coupure seront installés et calibrés en accord avec la norme NF C 15-100 dans le respect de la protection foudre (calibrage en accord avec les notices constructeurs), de la sécurité des installations et de la continuité de service. La coordination avec le dispositif de protection contre les surintensités de l'installation (DPSI) doit être respectée. Le DPSI doit avoir un limp supérieur ou égal à celui du parafoudre. Dans le cas contraire, la perte d'alimentation peut avoir des conséquences néfastes pour les EIPS, même si la protection contre la foudre est considérée comme acceptable.

Les parafoudres en tête d'installation sont mis en œuvre de préférence immédiatement en aval du disjoncteur principal de l'installation BT. Ils ont pour rôle d'éviter la formation d'étincelles dangereuses dans le réseau de distribution en écoulant par le chemin le plus court possible, le courant partiel de foudre.

Mais le courant partiel de foudre peut provenir soit de l'arrivée générale, soit d'un des départs vers l'extérieur (alimentation de climatisation, éclairage extérieur, ...). La mise en œuvre dans une armoire existante de multiples parafoudres de type 1, n'est pas raisonnable (en termes de cout, et également de place). On peut penser que le courant de foudre prendra préférentiellement le chemin du parafoudre (En effet, à partir du moment où on considère que l'inductance du circuit de départ le plus court est supérieur à l'inductance du jeu de barre (JdB), l'impédance en Haute Fréquence de ce départ est plus élevée que celle du JdB. Le chemin préférentiel est bien le JdB) Et on peut donc convenir que dans le cas d'armoire de faible dimension, constitué d'un à 2 éléments, le parafoudre de tête de type 1, protège également le TGBT des courants partiels de foudre véhiculés par les liaisons BT vers l'extérieur.

**Pour le site, l'ARF amène à une protection de l'arrivée BT de l'édifice par parafoudre de type 1 situé au niveau du presbytère, pour un niveau IV de protection ainsi que par la protection des armoires divisionnaires de la cathédrale pour un niveau I de protection. Ces parafoudres devront être adaptés au régime de neutre présent sur l'installation (TN)**

Le contenu de ce document est la propriété exclusive de la société FRANKLIN France, il ne peut être communiqué ou reproduit sans autorisation de notre part

Siège social : 13, Rue Louis Armand – B.P.106 – 77330 OZOIR-LA-FERRIERE Tél : 01 60 34 54 44 - Fax 01 64 40 35 43 - [www.franklin-france.com](http://www.franklin-france.com)  
SA AU CAPITAL DE 299 200 € SIREN 319747085 APE 2712Z

Agence Centre-Est : 14 rue de la Grange Saint Pierre – 71850 CHARNAY LES MACON. Tél : 03 85 344 78 81 – Fax : 03 85 34 94 79 – [centre.est@franklin-france.com](mailto:centre.est@franklin-france.com)

Conformément à l'arrêté du 19 Juillet 2011, les travaux de protection foudre devront être réalisés par une entreprise **compétente et qualifiée Qualifoudre**.

De plus pour la protection contre les effets indirects, les protections suivantes doivent être mises en œuvre (l'installation de protection par parafoudres devra être **COORDONNEE** dans sa **TOTALITE**)

## Pour rappel :

- Le Courant impulsionnel du parafoudre unipolaire peut être calculé. Il est fonction du niveau de protection, du nombre de lignes électriques et du nombre de conducteurs par ligne avec en accord avec la NF C 15-100, un limp mini de 12,5 kA :

$$I_{limp} = I \times 0.5 / (m \times n)$$

Où :

m : nombre de lignes électriques (à l'exclusion des lignes de télécommunications) et de canalisations métalliques connectées au système de protection.

n : nombre de conducteurs par ligne électrique + canalisations métalliques.

L'intensité du courant de foudre utilisé pour les calculs est proportionnelle à la valeur de probabilité issues de l'ARF, suivant le tableau A3 de la norme NF EN 62305-1

Tableau A.3 – Valeurs de probabilité *P* comme fonction du courant de foudre *I*

<i>I</i> (kA)	<i>P</i>
0	1
3	0,99
5	0,95
10	0,9
20	0,8
30	0,6
35	0,5
40	0,4
50	0,3
60	0,2
80	0,1
100	0,05
150	0,02
200	0,01
300	0,005
400	0,002
600	0,001

Pour le presbytère la valeur de probabilité est de 0,05 (Niveau IV de protection)

Pour la cathédrale, sur les lignes d'alimentations depuis TGBT et TGS, la valeur de probabilité est de 0,005 et pour l'éclairage extérieur de 0,001.

- Pour le presbytère, on a 15 lignes d'alimentations vers les différents tableaux divisionnaires.  
Soit  $I_{limp} = 100kA \times 0.5 / (15 \times 4) = \mathbf{0,833 \text{ kA}}$  par conducteur.

Le parafoudre de type 1 devra donc avoir les caractéristiques suivantes : **un courant limp (onde 10/350µs) de 12,5 kA et un Up ≤ 2,5kV. L'organe de protection associé ou amont pourra avoir une tenue d'limp de 0,833 kA. Pour les parafoudres de type I à mettre en œuvre au niveau du TGBT et du TGS**

Le contenu de ce document est la propriété exclusive de la société FRANKLIN France, il ne peut être communiqué ou reproduit sans autorisation de notre part

Siège social : 13, Rue Louis Armand – B.P.106 – 77330 OZOIR-LA-FERRIERE Tél : 01 60 34 54 44 - Fax 01 64 40 35 43 - [www.franklin-france.com](http://www.franklin-france.com)  
SA AU CAPITAL DE 299 200 € SIREN 319747085 APE 2712Z

Agence Centre-Est : 14 rue de la Grange Saint Pierre – 71850 CHARNAY LES MACON. Tél : 03 85 344 78 81 – Fax : 03 85 34 94 79 – [centre.est@franklin-france.com](mailto:centre.est@franklin-france.com)



- Pour la cathédrale, on a 15 lignes d'alimentations pour alimenter les différents tableaux divisionnaires + la ligne d'éclairage extérieurs

Soit  $I_{limp} = 300kA \times 0.5 / (15 \times 4) = 2,5 \text{ kA}$  par conducteur, pour les TD

Et soit  $I_{limp} = 600kA \times 0.5 / (15 \times 4) = 5 \text{ kA}$  par conducteur, pour les lignes d'éclairage extérieurs

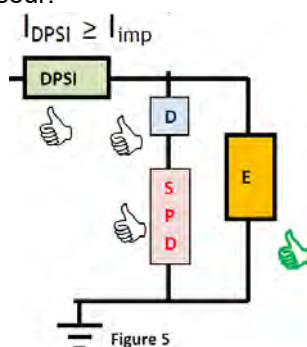
Les parafoudres de type 1 à mettre en œuvre devront donc avoir les caractéristiques suivantes : **un courant  $I_{limp}$  (onde 10/350µs) de 12,5 kA et un  $U_p \leq 1,5kV$ . L'organe de protection associé ou amont pourra avoir une tenue d' $I_{limp}$  de 5 kA. Pour les parafoudres de type I à mettre en œuvre au niveau des TD de la cathédrale**

- En plus de ce parafoudre des parafoudres de type 1 devront également être mis en œuvre sur les câbles (principalement d'éclairage) cheminant en parallèle ou croissant les distances dans le cas où la distance de séparation ne peut être respectées.

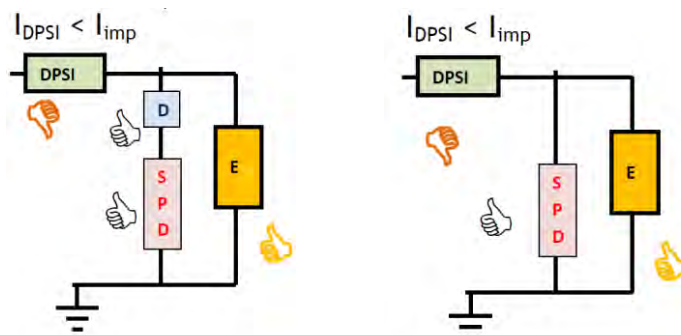
Sur ces différentes alimentations, on retrouve des organes de coupures amont de calibre différent de potentiellement de 400 A (Général TGBT) à 40 A (armoire sono). Les règles de choix de parafoudres ne permettent pas de protéger totalement l'installation pour les disjoncteurs de faible calibre. Le problème est que l'installation n'est pas protégée pour le courant de foudre attendu. Les disjoncteurs de 16 à 63 A en têtes des installations ne pouvant tenir ces courants.

Les équipements finaux seront protégés contre les surtensions, mais il peut y avoir une dégradation des disjoncteurs amont, entraînant une perte de l'alimentation de façon plus ou moins longue en fonction de la dégradation apportée. (Disjonction, ou destruction)

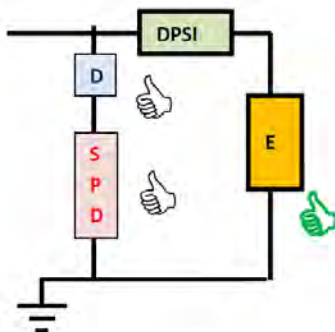
Pour le TGBT on peut placer le parafoudre en aval du disjoncteur principal, avec une protection associée calibrée selon les préconisations du fournisseur.



Pour les autres parafoudres (TD cloches, armoires TC 01, 02, 03...éclairage, Projecteurs flèches, transepts, statue...), on pourra selon les préconisations du constructeur, mettre en œuvre les parafoudres, avec ou sans dispositifs de protection associés (voir figure ci-dessous). Cela limite la continuité de service, tout en ayant une protection correcte.



On peut dans certains cas, pour garder la continuité de service, placer le parafoudre en amont du disjoncteur. Cela n'est pas toujours réalisable.



- La protection sera complétée par la mise en œuvre de parafoudre de type 2 au niveau des équipements servant la sécurité du site :

- Centrale de détection Incendie (Centrale SSI et module déporté)
- Centrale d'alarme Intrusion
- Eclairage de sécurité.
- Système d'extinction automatique sur armoire électrique.
- Transmetteur téléphonique de l'alarme incendie.

Le dimensionnement de ces parafoudres de type 2 est en rapport avec le niveau d'exposition aux surtensions (suivant guide 15-443) suivant la formule :

$$F = Nk(1,6 + 2.L_{BT} + \delta)$$

Avec :

$Nk$  = Niveau céramique local (Pour Paris  $Nk = 15$ )

$L_{BT}$  = longueur en km de la ligne BT aérienne alimentant l'alimentation. (Max 0,5) (Pour les bâtiments étudiés : 0 – Lignes enterrées arrivant au TGBT)

$\delta$  = coefficient de situation de la ligne (Pour la zone 0)

En fonction de la valeur de  $F$ , le parafoudre de type 2 doit avoir un  $I_n$  correspondant au tableau ci-contre.

Valeur de $F$	$I_n$ (kA)
$F < 40$	5
$40 < F < 80$	10
$F > 80$	20

**$F = 31,5$**

**Les parafoudres de type 2 auront donc comme caractéristiques minimales  $I_n$  : 5 kA (onde 8/20 $\mu$ s) et  $Up \leq 1,5$  kV.**

Le contenu de ce document est la propriété exclusive de la société FRANKLIN France, il ne peut être communiqué ou reproduit sans autorisation de notre part

Siège social : 13, Rue Louis Armand – B.P.106 – 77330 OZOIR-LA-FERRIERE Tél : 01 60 34 54 44 - Fax 01 64 40 35 43 - [www.franklin-france.com](http://www.franklin-france.com)  
SA AU CAPITAL DE 299 200 € SIREN 319747085 APE 2712Z

Agence Centre-Est : 14 rue de la Grange Saint Pierre – 71850 CHARNAY LES MACON. Tél : 03 85 344 78 81 – Fax : 03 85 34 94 79 – [centre.est@franklin-france.com](mailto:centre.est@franklin-france.com)

- Protection par parafoudre adapté aux nombres de lignes (paires) et signaux transmis pour la protection du transmetteur téléphonique de l'alarme incendie et de la ligne directe d'appel pompier. Ces parafoudres auront comme caractéristiques minimales  $I_{imp}$  : 1,5kA (onde 10/350µs) et  $U_p \leq 1.5kV$ .

### Travaux à réaliser :

Le tableau ci-dessous, regroupe les différents types de parafoudres à mettre en œuvre. Au niveau des armoires conservées. Les parafoudres existants devront être vérifiés et validés. Au niveau des armoires divisionnaires de la cathédrale, les parafoudres seront de type 1 / type 2.

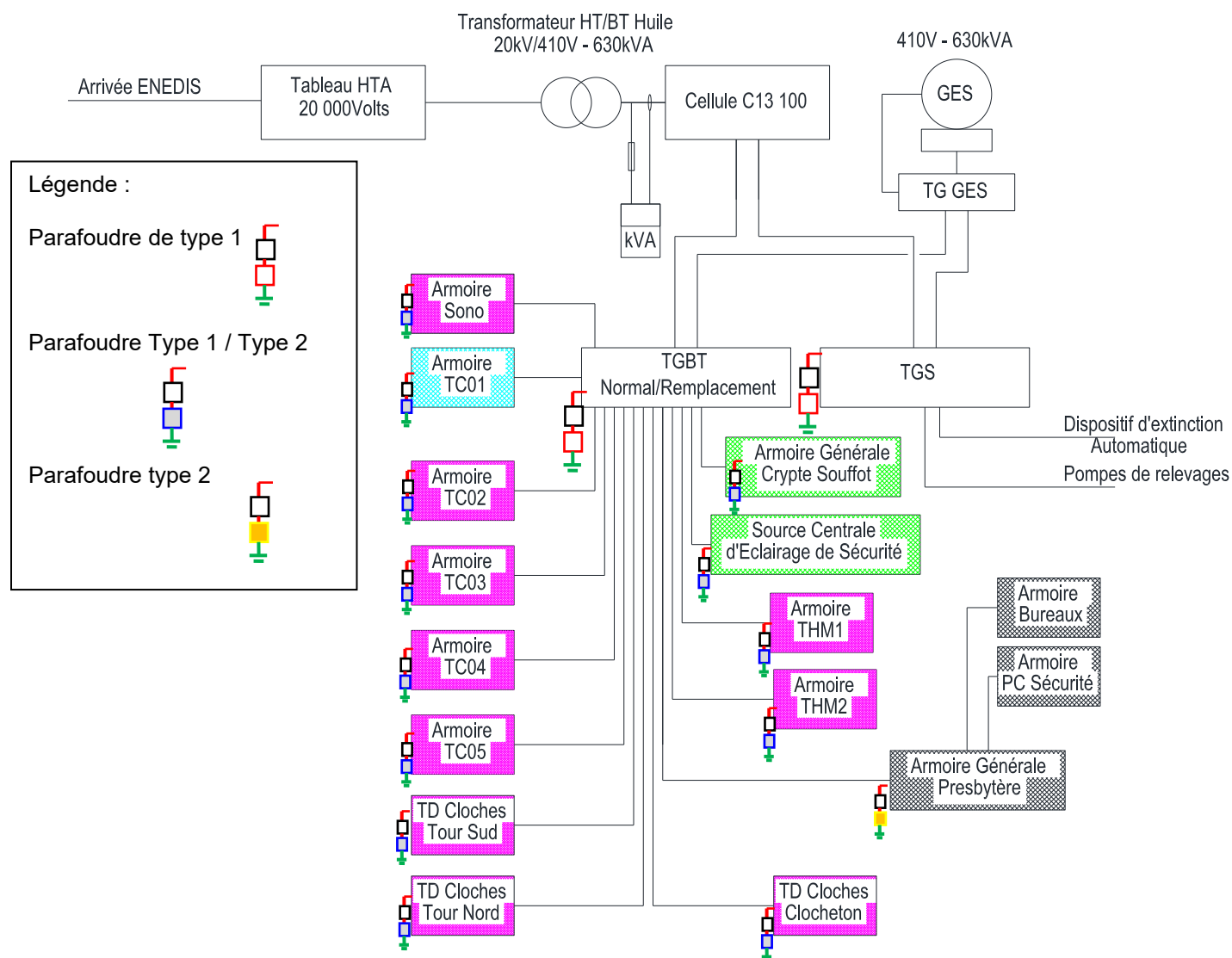
Localisation Référence Armoire, ou tableau	Type (I, II, III) et marque	$U_c$ (V)	$U_p$ (kV)	$I_n$ (kA)	$I_{max}$ (kA)	$I_{imp}$ (kA)	Tenue aux courts- circuits (kA)	Protection associée	Calibre
TGBT Normal/Remplacement	Type 1	264	2,5	10	-	12,5	50	Protection calibrée en fonction des préconisations du fournisseur.	
TGS	Type 1	264	2,5	10	-	12,5	50		
Armoire Sono	Type 1 / Type 2	264	1,5	5	20	12,5	25		
Armoire TC01	Type 1 / Type 2	264	1,5	5	20	12,5	25		
Armoire TC02	Type 1 / Type 2	264	1,5	5	20	12,5	25		
Armoire TC03	Type 1 / Type 2	264	1,5	5	20	12,5	25		
Armoire TC04	Type 1 / Type 2	264	1,5	5	20	12,5	25		
Armoire TC05	Type 1 / Type 2	264	1,5	5	20	12,5	25		
Armoire Générale Crypte Souffot	Type 1 / Type 2	264	1,5	5	20	12,5	25		
Source générale d'éclairage de sécurité	Type 1 / Type 2	264	1,5	5	20	12,5	25		
Armoire THM1	Type 1 / Type 2	264	1,5	5	20	12,5	25		
Armoire THM2	Type 1 / Type 2	264	1,5	5	20	12,5	25		
TD Cloches Tour Sud	Type 1 / Type 2	264	1,5	5	20	12,5	25		
TD Cloches Tour Nord	Type 1 / Type 2	264	1,5	5	20	12,5	25		
TD Cloches Clocheton	Type 1 / Type 2	264	1,5	5	20	12,5	25		
Armoire Générale Presbytère	Type 2	264	1,5	5	20	-	25		
Centrale de détection Incendie	Type 2	264	1,5	5	20	-	25		
Alarme intrusion	Type 2	264	1,5	5	20	-	25		
Système d'extinction automatique	Type 2	264	1,5	5	20	-	25		
Transmetteur téléphonique de l'alarme incendie	Type 2	264	1,5	5	20	-	25		
Ligne alarme Téléphonique et ligne appel directe pompier	Type 1 Parafoudre de type Sucette, éclateur à gaz bipolaire.	170	0,26	5	-	1,5	-	Pas de protection associée sur parafoudre courant faible.	

Le contenu de ce document est la propriété exclusive de la société FRANKLIN France, il ne peut être communiqué ou reproduit sans autorisation de notre part

Siège social : 13, Rue Louis Armand – B.P.106 – 77330 OZOIR-LA-FERRIERE Tél : 01 60 34 54 44 - Fax 01 64 40 35 43 - [www.franklin-france.com](http://www.franklin-france.com)  
SA AU CAPITAL DE 299 200 € SIREN 319747085 APE 2712Z

Agence Centre-Est : 14 rue de la Grange Saint Pierre – 71850 CHARNAY LES MACON. Tél : 03 85 344 78 81 – Fax : 03 85 34 94 79 – [centre.est@franklin-france.com](mailto:centre.est@franklin-france.com)





Extrait arborescence des principaux tableaux électriques. Localisation des parafoudres

**⚠** Toute alimentation d'un équipement extérieur relié équipotentiellement au système de protection contre la foudre devra être équipée d'un parafoudre de type I, dans la mesure du possible, à la pénétration du câble dans le bâtiment.

Cette préconisation sera toutefois complexe à mettre en œuvre, les parafoudres pourront être mis en place dans les armoires divisionnaires concernées.

Les parafoudres devront avoir les caractéristiques suivantes :

Dans le cas d'une distance entre le parafoudre et les EIPS supérieure à 30 m selon le guide 15-443, (10 m selon la norme 61643-12) le parafoudre devra être placé au plus près de l'équipement.

Lors des câblages, il faut respecter les règles suivantes :

- La longueur des conducteurs de raccordement du parafoudre et de son disjoncteur associé doit être la plus courte possible, et en tout cas ne pas dépasser 50 cm au total : Cela dit, nous attirons votre attention sur le fait que la règle des 50 cm convient pour des produits à faible pouvoir d'écoulement (10 kA et jusqu'à 20 kA qui est la valeur maximale utilisée dans le Guide UTE 15-443).

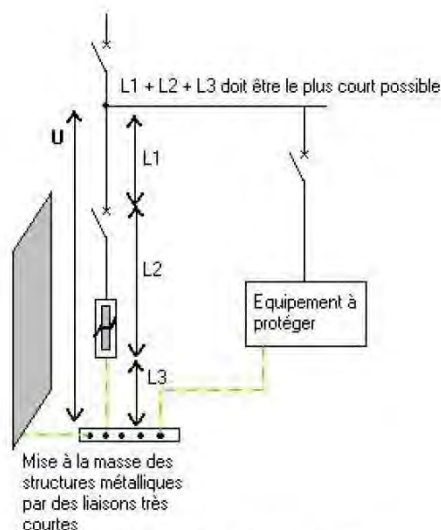


Figure 1 : Règle des 50 cm

- Les dispositions décrites dans la figure suivante limitent au maximum la longueur l(m) des câbles de connexion entre les récepteurs à protéger et la barrette de terre :

Les départs des conducteurs protégés doivent être pris, dans la mesure du possible, aux bornes même du parafoudre et du disjoncteur de déconnexion.

On peut également raccorder, par une liaison très courte, le parafoudre à la tôle ou à la grille qui sert de support aux différents éléments de câblage, en laissant le vert-jaune en parallèle avec la tôle.

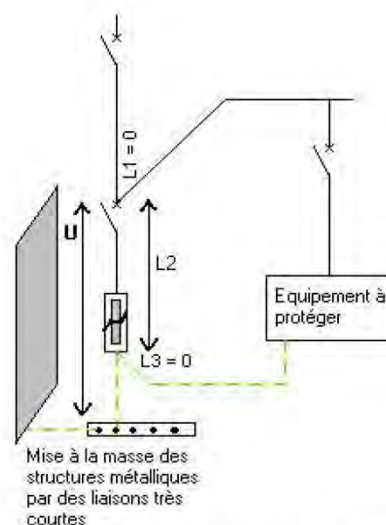


Figure 2 : Limitation des longueurs des câbles de connexion

Il faut que les fils d'arrivée phase, neutre, PE soient couplés étroitement ensemble pour réduire les surfaces de boucles.

- Il faut éloigner les fils d'arrivée au parafoudre des fils de départ pour éviter de mélanger les câbles pollués avec les câbles protégés.
- Il faut plaquer les câbles contre les structures métalliques du coffret afin de minimiser les boucles de masse et de bénéficier ainsi d'un effet réducteur des perturbations ; si le coffret est en plastique et les récepteurs particulièrement sensibles, il faut le remplacer par un coffret métallique.

Le contenu de ce document est la propriété exclusive de la société FRANKLIN France, il ne peut être communiqué ou reproduit sans autorisation de notre part

Siège social : 13, Rue Louis Armand – B.P.106 – 77330 OZOIR-LA-FERRIERE Tél : 01 60 34 54 44 - Fax 01 64 40 35 43 - [www.franklin-france.com](http://www.franklin-france.com)  
SA AU CAPITAL DE 299 200 € SIREN 319747085 APE 2712Z

Agence Centre-Est : 14 rue de la Grange Saint Pierre – 71850 CHARNAY LES MACON. Tél : 03 85 344 78 81 – Fax : 03 85 34 94 79 – [centre.est@franklin-france.com](mailto:centre.est@franklin-france.com)

- Il faut vérifier que les structures métalliques des coffrets ou armoires soient mises à la masse par des connexions très courtes.
- Si des câbles blindés sont utilisés, on supprimera les longueurs inutiles ("queues de cochon") qui diminuent fortement l'efficacité du blindage.

La figure suivante résume les dernières recommandations :

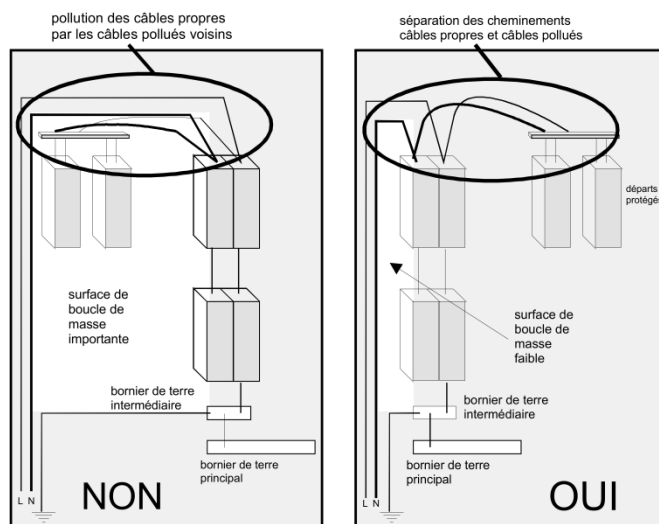


Figure 3 : mode de pose des parafoudres en armoire

En résumé, lors des câblages, il faut respecter les règles suivantes :

- ne pas dépasser 50 cm pour le raccordement du parafoudre,
- les départs des conducteurs protégés doivent être pris aux bornes même du parafoudre et du disjoncteur de déconnexion,
- il faut que les fils d'arrivée phase, neutre, PE soient couplés étroitement ensemble pour réduire les surfaces de boucles,
- il faut éloigner les fils d'arrivée au parafoudre des fils de départ pour éviter de mélanger les câbles pollués avec les câbles protégés.

Pour rappel, avec un parafoudre de type 2 de  $I_n = 5 \text{ kA}$ , un fusible de 25 A suffit comme déconnecteur externe.

### 3.4 Dossier des ouvrages exécutés.

Un dossier des Ouvrages Exécutés doit être rédigé par l'entreprise ayant effectué les travaux de protection foudre. Ce dossier doit comprendre :

le plan des installations telles que réalisées  
les fiches techniques des produits mis en place  
les PV de mesures des réseaux de terre

la révision et modification, s'il y a lieu, de la notice de vérification et de maintenance ci-jointe en annexe

les rapports de vérifications initiales et périodiques



### 3.5 Système d'avertissement.

Un risque pour les personnes subsiste toujours à l'approche d'un orage ou en période orageuse. Il est donc fortement conseillé d'introduire ce risque dans les consignes de sécurité données au personnel du site, mais également à tout intervenant extérieur :

- **interdire les accès en toiture à l'approche d'un orage ou en période orageuse**
- **interdire toute activité dangereuse (risque d'incendie ou d'explosion) à l'approche d'un orage ou en période orageuse**
- **rester confiné à l'intérieur des locaux en présence d'orages**
- **désigner au moins une personne, qui devra après chaque période orageuse, effectuer une vérification visuelle des installations et plus particulièrement des compteurs de coups de foudre : toute incrémentation d'un compteur doit déclencher une visite périodique telle que définie ci-après**

**Aucun système d'avertissement et d'alerte orage n'existe sur le site. Au vu des risques retenus dans l'Analyse du Risque Foudre, un tel dispositif n'est pas nécessaire.**

#### IV. ANNEXES

### Protection Parafoudre Extrait guide 15-443

#### 8 REGLES D'INSTALLATION DES PARAFOUDRES

##### 8.1 Emplacement du parafoudre dans l'installation

Le parafoudre (et ses dispositifs de protection) destiné à protéger une installation doit être installé le plus près possible de l'origine de l'installation.

Le parafoudre complémentaire destiné à protéger un matériel d'utilisation particulièrement sensible est installé à proximité de ce matériel.

##### 8.2 Raccordement des parafoudres dans un tableau électrique

Les conducteurs de raccordement sont ceux reliant les conducteurs actifs au parafoudre et reliant le parafoudre à la liaison équipotentielle ou au conducteur de protection ou au PEN. Ils doivent avoir une section minimale de 4 mm<sup>2</sup> en cuivre.

En cas de présence d'un paratonnerre, cette section minimale est de 10 mm<sup>2</sup>.

**Règle 1 :** Respecter la longueur L ( $L_1 + L_2 + L_3$ ) < 0,50 m (7.4.2 et annexe H) en utilisant des borniers de raccordement intermédiaires si nécessaire.

**Règle 2 :** Réduire la surface de boucle générée par le montage des câbles phases, neutre et PE en les regroupant ensemble d'un même côté du tableau.

**Règle 3 :** Séparer les câbles d'arrivée (en provenance du réseau) et les câbles de départ (vers l'installation) pour éviter de mélanger les câbles perturbés et les câbles protégés. Ces câbles ne doivent pas non-plus traverser la boucle (règle 2).

**Règle 4 :** Plaquer les câbles contre la structure métallique du tableau lorsqu'elle existe afin de minimiser la boucle de masse et de bénéficier de l'effet réducteur des perturbations.

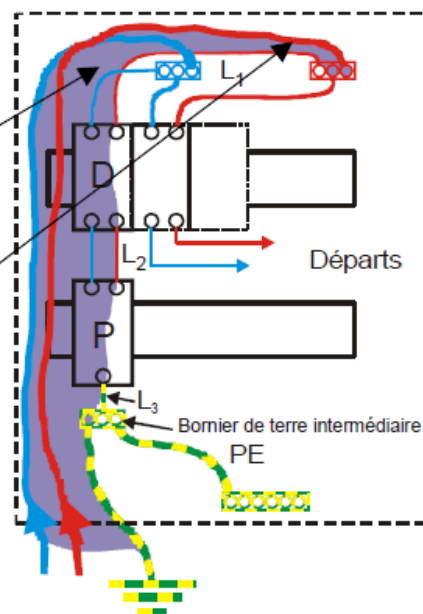


Figure 10 – Exemple de câblage dans un tableau électrique

## ATTESTATION QUALIFOUDRE

PROFESSIONNELS DE LA PROTECTION CONTRE LA Foudre  
CERTIFICAT DE CONFORMITÉ

051168352016 / OZO

L'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS), Etablissement Public à Caractère Industriel et Commercial créé par le décret n° 90-1089 du 7 Décembre 1990, sous la tutelle du ministère de l'environnement, délivre la présente attestation de conformité au référentiel QUALIFOUDRE version 4.0 du 20 janvier 2017, à la Société suivante:

FRANKLIN FRANCE  
13 rue Louis Armand  
BP 106  
77834 OZOIR LA FERRIERE CEDEX

Les moyens mis en œuvre par cette société, après examen et audit (dossier INERIS N°201566), sont reconnus conformes aux spécifications du référentiel QUALIFOUDRE qui portent sur le système de management de la qualité, les méthodes de travail, la qualification et la formation des personnes suivant les rubriques utiles du référentiel indiquées ci-dessous :

Analyses du Risque Foudre  
Fabrications  
Etudes Techniques  
Installations  
Vérifications

Ce certificat est valable jusqu'au 2 juillet 2023.



Verneuil-en-Halatte, le 3 juillet 2020.

Le Directeur Général de l'INERIS,  
Par délégation,  
Le Responsable du Pôle Certification  
D. CHARPENTIER

Ce document ne peut être reproduit que dans son intégralité, annexes comprises.

PROFESSIONNELS DE LA PROTECTION CONTRE LA Foudre  
CERTIFICAT DE CONFORMITÉ

051168352016 / BRI

L'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS), Etablissement Public à Caractère Industriel et Commercial créé par le décret n° 90-1089 du 7 Décembre 1990, sous la tutelle du ministère de l'environnement, délivre la présente attestation de conformité au référentiel QUALIFOUDRE version 4.0 du 20 janvier 2017, à la Société suivante:

FRANKLIN SUD OUEST  
ZI de Cana Ouest  
Rue Jules Bouchet  
19100 BRIVE LA GAILLARDE

Les moyens mis en œuvre par cette société, après examens et audit (dossier INERIS N°201566), sont reconnus conformes aux spécifications du référentiel QUALIFOUDRE qui portent sur le système de management de la qualité, les méthodes de travail, la qualification et la formation des personnes suivant les rubriques utiles du référentiel indiquées ci-dessous :

Analyses du Risque Foudre  
Etudes Techniques  
Installations  
Vérifications

Ce certificat est valable jusqu'au 2 juillet 2023.



Verneuil-en-Halatte, le 3 juillet 2020.

Le Directeur Général de l'INERIS,  
Par délégation,  
Le Responsable du Pôle Certification  
D. CHARPENTIER

Ce document ne peut être reproduit que dans son intégralité, annexes comprises.

Le contenu de ce document est la propriété exclusive de la société FRANKLIN France, il ne peut être communiqué ou reproduit sans autorisation de notre part

Siège social : 13, Rue Louis Armand – B.P.106 – 77330 OZOIR-LA-FERRIERE Tél : 01 60 34 54 44 - Fax 01 64 40 35 43 - [www.franklin-france.com](http://www.franklin-france.com)  
SA AU CAPITAL DE 299 200 € SIREN 319747085 APE 2712Z

Agence Centre-Est : 14 rue de la Grange Saint Pierre – 71850 CHARNAY LES MACON. Tél : 03 85 344 78 81 – Fax : 03 85 34 94 79 – [centre.est@franklin-france.com](mailto:centre.est@franklin-france.com)



CATHÉDRALE  
NOTRE-DAME DE PARIS

TRAVAUX DE RESTAURATION  
POST 2024



ANNEXE PARTICULIERE 5  
PARATONNERRE  
Rapport vérification installation

---

DOSSIER DE CONSULTATION DES ENTREPRISES

**Restauration du chevet**

*Février 2025*



Maîtrise d'Ouvrage :

ETABLISSEMENT PUBLIC CHARGE DE  
LA CONSERVATION ET DE LA  
RESTAURATION DE LA CATHEDRALE  
NOTRE-DAME DE PARIS

Maîtrise d'Œuvre : A.C.M.H.

Philippe VILLENEUVE  
Rémi FROMONT

# **RAPPORT DE VERIFICATION COMPLETE**

## **Concernant le Système de Protection Foudre de la Cathédrale Notre Dame de Paris à Paris (75)**



**RC240203**  
*Indice 02*




## SOMMAIRE

I.	Données générales .....	2
I.1.	Participants à l'élaboration de l'étude .....	2
I.2.	Normes et textes de référence .....	2
I.3.	Description de la vérification.....	3
I.4.	Documents fournis .....	3
II.	Description du Système de Protection Foudre .....	4
II.1.	Installation Extérieure de Protection Foudre .....	4
II.2.	Installation Intérieure de Protection Foudre .....	4
III.	Vérification visuelle .....	5
III.1.	Inspection générale .....	5
III.2.	Conducteur(s) de descente .....	6
III.3.	Compteur(s) d'impacts foudre .....	7
III.4.	Protection(s) contre les surtensions .....	7
III.5.	Liaison(s) équipotentielle(s) .....	8
IV.	Vérification complète .....	9
IV.1.	Contrôle du/des paratonnerre(s) .....	9
IV.2.	Mesure des prises de terre.....	9
IV.3.	Mesure de la continuité électrique des conducteurs non-visible .....	10
V.	Observations.....	11
V.1.	Non-conformité(s) de l'installation .....	11
V.2.	Remarque(s) de l'installation .....	11
V.3.	Conclusion .....	11
VI.	Annexes .....	12
VI.1.	Photo N°1 .....	12
VI.2.	Photo N°2 .....	12
VI.3.	Photo N°3 .....	12
VI.4.	Photo N°4 .....	13
VI.5.	Photo N°5 .....	13
VI.6.	Photo N°6 .....	13
VI.7.	Photo N°7 .....	14
VI.8.	Photo N°8 .....	14
VI.9.	Photo N°9 .....	15



## I. DONNEES GENERALES

### I.1.Participants à l'élaboration de l'étude

Date	Rédacteur	Vérificateur	Approbateur	Indice	Commentaire
06/02/2024	<b>M. TROUBAT</b> QUALIFOUDRE Niveau 3	<b>E. BATARD</b> QUALIFOUDRE Niveau 2	<b>E. BATARD</b> QUALIFOUDRE Niveau 2	<b>01</b>	Création Document
07/02/2024	<b>M. TROUBAT</b> QUALIFOUDRE Niveau 3	<b>E. BATARD</b> QUALIFOUDRE Niveau 2	<b>E. BATARD</b> QUALIFOUDRE Niveau 2	<b>02</b>	Correction référence photos
Signature :					

### I.2.Normes et textes de référence

- **NF EN 62305-3** de décembre 2012
- **NF C 17-102** de septembre 2011
- **NF C 15-100** de décembre 2002
- Série de normes **NF EN 62561** de 2017-2018
- **NF EN 61643-11** de septembre 2002
- **NF EN 61643-21** de Novembre 2001
- **Note interministérielle du 22 Février 2016**
- **Arrêté du 25 Juin 1980** (sécurité dans les ERP)

## I.3.Description de la vérification

Description	Observation
Technicien responsable de la vérification :	Michaël TROUBAT
Date de la vérification :	29/01/2024
Lieu de la vérification :	Paris (75)
Personne présente lors de la vérification :	M. Anthony DUPUY
Structure(s) protégée(s) par le(s) paratonnerre(s) :	Cathédrale
Site classé I.C.P.E. :	NON
Site classé E.R.P. :	OUI
Type d'établissement :	Type V
Date d'installation :	Inconnue
Date de remise en conformité :	2014

## I.4.Documents fournis

OUI	NON	Document	Référence	Conforme	Non Conforme	Sans Objet
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Analyse du Risque Foudre	N°NA20200922-01 de la Société Franklin France	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Étude Technique Foudre	N°NA20201002-01 de la Société Franklin France	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Notice de maintenance et Vérification		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Dossier d'Exécution	D.O.E. 21 mars 2012 et D.O.E. 15 avril 2013 de la Société PRO TECH Foudre	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Carnet de bord		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Rapport de vérification initiale		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Rapport de vérification précédent		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

## II. DESCRIPTION DU SYSTEME DE PROTECTION Foudre

La mission consiste à faire un état des lieux de la protection foudre existante suite à l'incendie de 2019. Un focus particulier est réalisé sur les conducteurs de descente.

Le plan de la protection d'origine est donné en annexe (*Photo N°1*).

### II.1. Installation Extérieure de Protection Foudre

- La cathédrale Notre Dame de Paris à Paris (75) est actuellement protégée contre les effets directs de la foudre par :
  - 2 Paratonnerres à Dispositif d'Amorçage DEFYSTORM ( $\Delta t=60\mu s$ ) du fabricant ADEE situés sur les 2 tours de la cathédrale
  - 1 Paratonnerre à Tige simple installé au-dessus du coq au sommet de la flèche.
- La protection foudre était initialement assurée par 6 paratonnerres. Les 3 autres ne sont à ce jour plus présents.
- 10 conducteurs de descente fixés à raison de 3 attaches par mètre linéaire sont présents (ou partiellement présents). Ils sont :
  - Soit en ruban de cuivre étamé 30 x 2 mm (*Photo N°1*)
  - Soit en rond de cuivre étamé de diamètre 8 mm (*Photo N°2*)
- Au bas de chaque conducteur de descente, un joint de contrôle permet de déconnecter la prise de terre foudre et un fourreau protège le conducteur sur une hauteur d'environ 2. (*Photo N°3*)
- Des compteurs d'impacts foudre IONICOUNT du fabricant FRANCE PARATONNERRES sont fixés sur les conducteurs de descente, au-dessus du joint de contrôle. (*Photo N°4*)
- L'équipotentialité entre les conducteurs de descente et les masses métalliques aux alentours (portails, gouttières, échafaudage,...) est assurée par des liaisons déconnectables en ruban de cuivre étamé 30 x 2 mm.
- L'équipotentialité entre les prises de terre foudre est assurée par une liaison périmétrique déconnectable en rond de cuivre étamé de diamètre 8 mm. (*Plan N°2*)
- Les prises de terre foudre sont de type A et sont réalisées par enterrement de rond de cuivre étamé  $\varnothing$  8 mm associé à des piquets de terre en acier inox.
- Le ceinturage d'équipotentialité (bleu sur la *Plan N°3*) au niveau des coursives n'est plus présent

### II.2. Installation Intérieure de Protection Foudre

- Aucune Installation Intérieure de Protection Foudre ne protège le site.



## III. VERIFICATION VISUELLE

### III.1. Inspection générale

Description	Conforme	Non Conforme	Observation
Protection de l'ensemble du/des bâtiment(s) :	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<b>Manque 3 paratonnerres</b>
Continuité électrique des conducteurs visibles :	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Fixation des différents composants :	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Présence de corrosion :	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<b>Les conducteurs de descente N°3 et N°6 sont oxydés</b>
Distance de séparation :	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Liaison(s) équipotentielle(s) avec les éléments métalliques à proximité :	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Liaison équipotentielle entre les prises de terre foudre :	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Conformité des composants du Système de Protection Foudre :	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

## III.2. Conducteur(s) de descente

N° Descente	Localisation	Nature conducteur	Attaches	Conforme	Non Conforme	Observation
1	Voir Plan N°5	Rond cuivre étamé Ø8mm	3 par mètre	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2	Voir Plan N°5	Rond cuivre étamé Ø8mm	3 par mètre	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	Voir Plan N°5	Ruban cuivre étamé 30x2mm + Rond cuivre étamé Ø8mm	3 par mètre	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<b>Conducteur coupé en partie haute (&gt;15m) et oxydé en partie basse</b>
4	Voir Plan N°5	Rond cuivre étamé Ø8mm	3 par mètre	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5	Voir Plan N°5	Ruban cuivre étamé 30x2mm	3 par mètre	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	Voir Plans N°4 et N°5	Ruban cuivre étamé 30x2mm	3 par mètre	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<b>Conducteur oxydé</b>
7	Voir Plan N°4	Ruban cuivre étamé 30x2mm	3 par mètre	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
8	Voir Plan N°4	Rond cuivre étamé Ø8mm	3 par mètre	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9	Voir Plan N°4	Ruban cuivre étamé 30x2mm	3 par mètre	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<b>Conducteur coupé</b>
10	Voir Plan N°4	Rond cuivre étamé Ø8mm	3 par mètre	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

## III.3. Compteur(s) d'impacts foudre

N° Compteur	Localisation	Affichage	Nombre d'impact(s) comptabilisé(s)	Conforme	Non Conforme	Observation
1	Descente N°1	01	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2	Descente N°2	01	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	Descente N°3	01	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	Descente N°4	03	2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5	Descente N°5	01	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	Descente N°6	01	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
7	Descente N°7	01	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
8	Descente N°8	01	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9	Descente N°9	01	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
10	Descente N°10	01	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Nombre total d'impact(s) enregistré(s) :			2			

**Nota :** Les compteurs sont livrés en sortie d'usine incrémenté à 01

## III.4. Protection(s) contre les surtensions

- Les protections parafoudres n'ont pas été contrôlées lors de notre visite puisque les tableaux sont en cours de travaux



## III.5. Liaison(s) équipotentielle(s)

Localisation	Section	Conforme	Non Conforme	Observation
Liaison PDT 1 à PDT 2	50mm <sup>2</sup>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Liaison PDT 2 à PDT 3	50mm <sup>2</sup>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Continuité non assurée
Liaison PDT 3 à PDT 4	50mm <sup>2</sup>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Liaison PDT 4 à PDT 5	50mm <sup>2</sup>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Liaison PDT 5 à PDT 6	50mm <sup>2</sup>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Continuité non assurée
Liaison PDT 6 à PDT 7	50mm <sup>2</sup>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Continuité non assurée
Liaison PDT 7 à PDT 8	50mm <sup>2</sup>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Continuité non assurée
Liaison PDT 8 à PDT 9	50mm <sup>2</sup>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Liaison 8 à 10 existante. Problème au niveau PDT 9
Liaison PDT 9 à PDT 10	50mm <sup>2</sup>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Liaison PDT 10 à PDT 1	50mm <sup>2</sup>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

## IV. VERIFICATION COMPLETE

### IV.1. Contrôle du/des paratonnerre(s)

N° PDA	Localisation	Conforme	Non Conforme	Sans Objet	Observation
1	Tour Nord	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
2	Pignon Nord Transept	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	A remettre en place
3	Pignon Sud Transept	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	A remettre en place
4	Croix chœur	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	A remettre en place
5	Tour Sud	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	Au sommet de la flèche. Au-dessus du coq	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

### IV.2. Mesure des prises de terre

N° PDT	Localisation	Mesure	Conforme	Non Conforme	Observation
1	Voir Plan N°5	12,03 $\Omega$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Résistivité supérieure à 10 $\Omega$
2	Voir Plan N°5	26,8 $\Omega$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Résistivité supérieure à 10 $\Omega$
3	Voir Plan N°5	4,54 $\Omega$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	Voir Plan N°5		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Regard non trouvé Non mesurable
5	Voir Plan N°5	12,38 $\Omega$	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Résistivité supérieure à 10 $\Omega$
6	Voir Plans N°4 et N°5		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Regard non trouvé Non mesurable
7	Voir Plan N°4	9,51 $\Omega$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Prise de terre en partie Hors sol
8	Voir Plan N°4	6,77 $\Omega$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9	Voir Plan N°4		<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Prise de terre HS. Inexistante
10	Voir Plan N°4	7,85 $\Omega$	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Appareil de mesure	Sefram MW 9420 n° 18350165 IM-FP-039
Date d'étalonnage	15/12/2023
Méthode de mesure	<b>Méthode des 62%</b>

## IV.3. Mesure de la continuité électrique des conducteurs non-visible

- Sans Objet



## V. OBSERVATIONS

### V.1. Non-conformité(s) de l'installation

N°	Description	Observation
1	Il manque actuellement 3 paratonnerres	<b>NON CONFORME</b>
2	Le ceinturage au niveau des coursives est inexistant	<b>NON CONFORME</b>
3	Les conducteurs de descente N°3 et N°9 sont coupés sur plusieurs mètres	<b>NON CONFORME</b>
4	Les conducteurs de descentes N°3 et N°6 sont oxydés.	<b>NON CONFORME</b>
5	6 liaisons équipotentielle entre prise de terre sont détériorées	<b>NON CONFORME</b>
6	Les prises de terre N°1, N°2 et N°5 présentent des valeurs résistives supérieures aux 10 Ohms normatif	<b>NON CONFORME</b>
7	Les regards de visites des prises de terre N°4 et N°6 sont introuvables. Les prise de terre sont non mesurables	<b>NON CONFORME</b>
8	La prise de terre N°9 est complètement coupée	<b>NON CONFORME</b>

### V.2. Remarque(s) de l'installation

N°	Description	Observation
1	La prise de terre N°7 est partiellement hors sol (travaux en cours)	Remarque
2	La présence de parafoudres sur les installations électriques n'a pu être réalisée.	Remarque

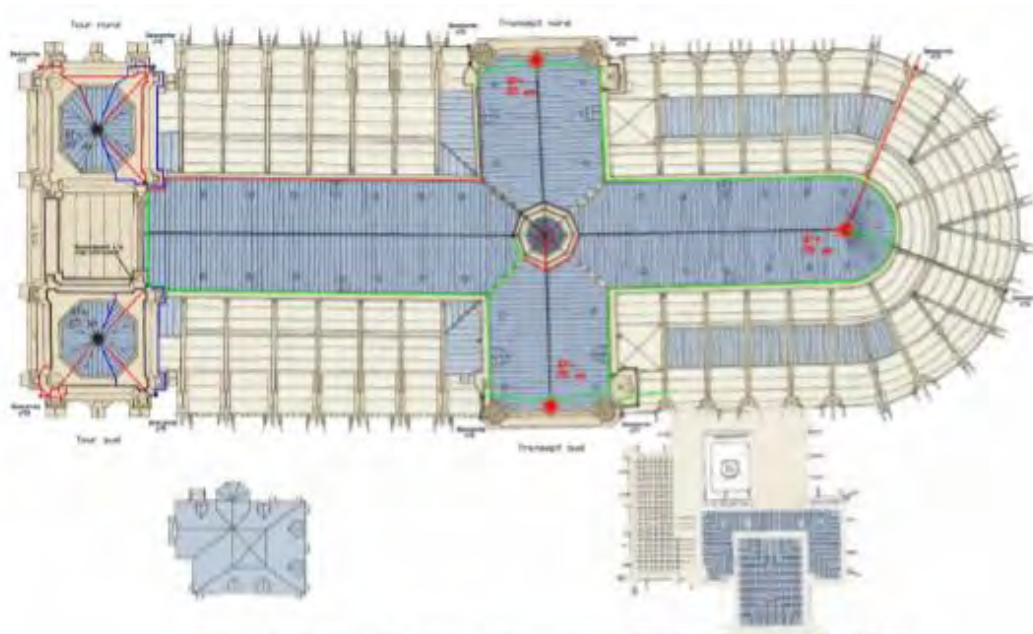
### V.3. Conclusion

L'installation de protection foudre n'est pas conforme à l'Étude Technique Foudre et aux normes et arrêtés foudre en vigueur.

Il est nécessaire de réaliser les modifications citées ci-dessus pour améliorer la protection des biens et personnes sur le site.

## VI. ANNEXES

### VI.1. Plan N°1



Extrait : Plan d'implantation des Paratonnerres et conducteur de descentes n° 457-T\_05.

### VI.2. Photo N°1



### VI.3. Photo N°2



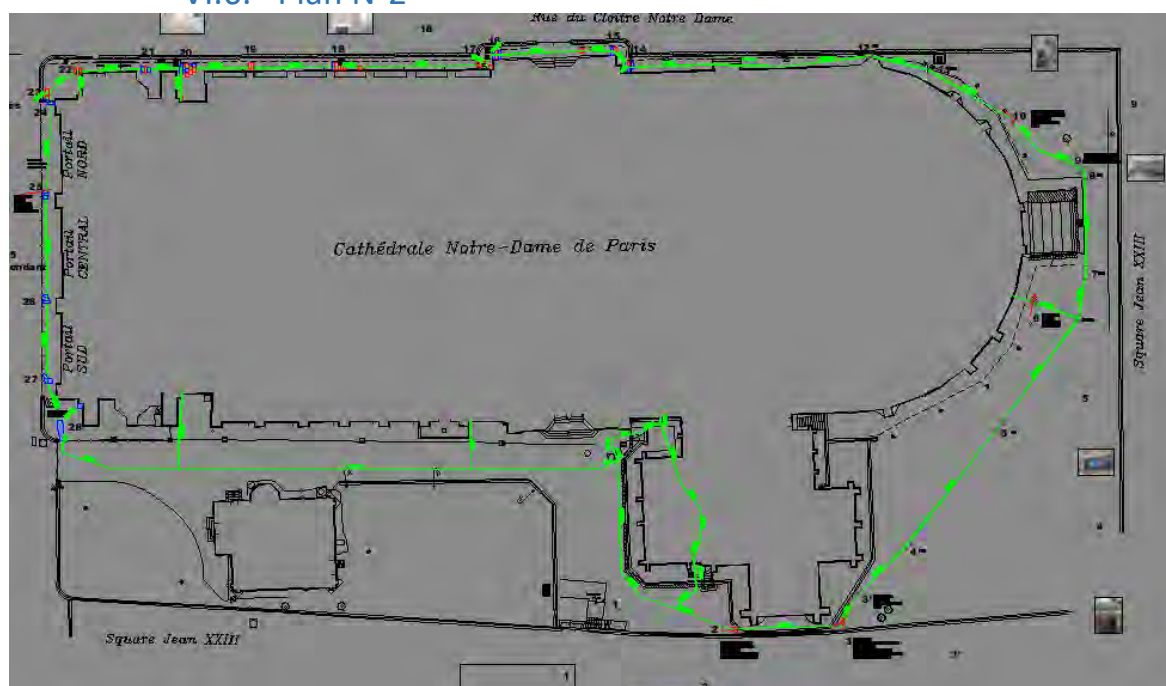
VI.4. Photo N°3



VI.5. Photo N°4

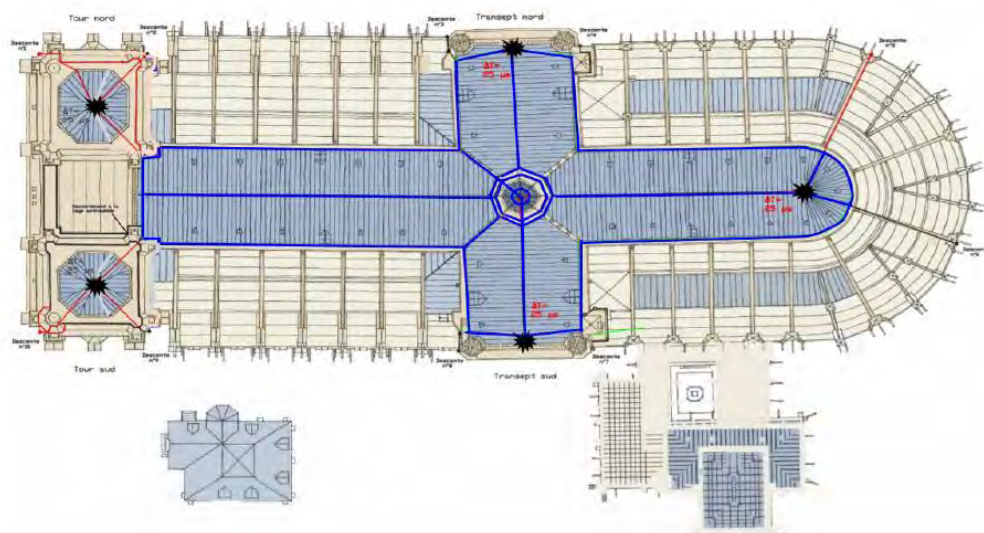


VI.6. Plan N°2

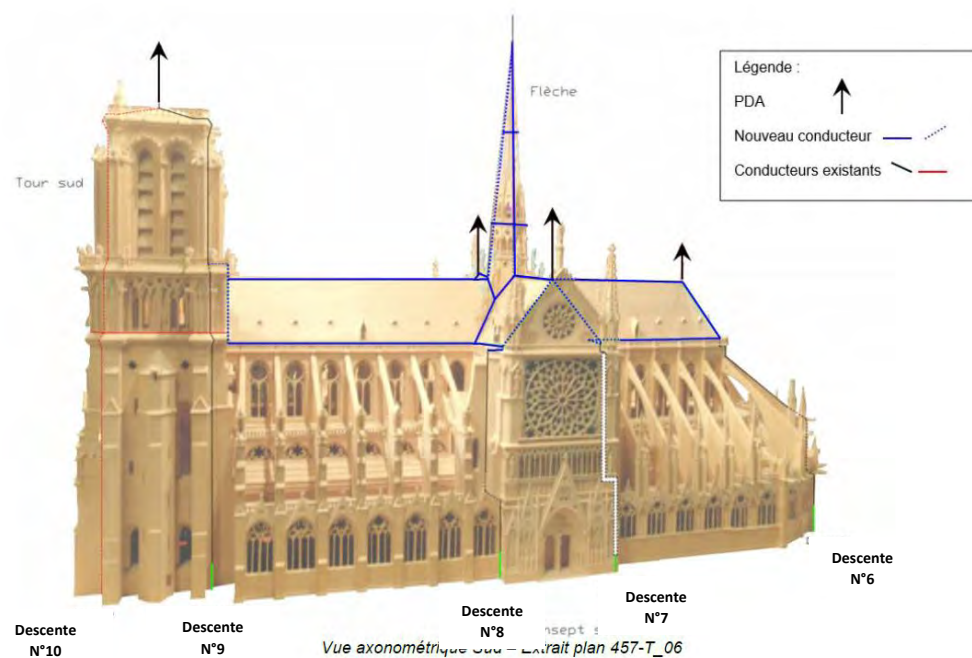




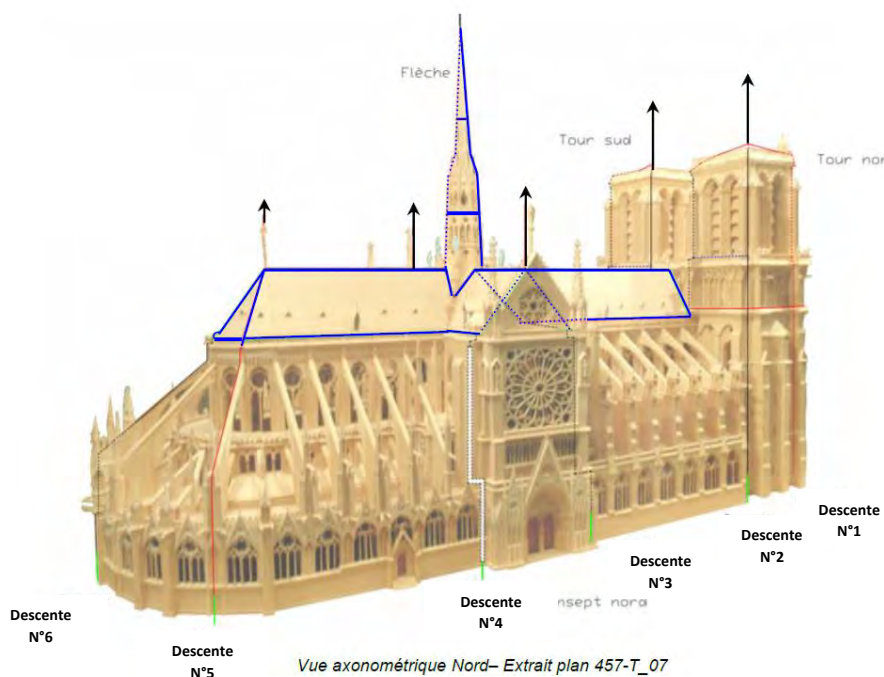
### VI.7. Plan N°3



### VI.8. Plan N°4



VI.9. Plan N°5



CATHÉDRALE  
NOTRE-DAME DE PARIS

TRAVAUX DE RESTAURATION  
POST 2024



## ANNEXE PARTICULIERE 6

# PARATONNERRE – DOE prises de terre

---

DOSSIER DE CONSULTATION DES ENTREPRISES

### **Restauration du chevet**

*Février 2025*



Maîtrise d'Ouvrage :

ETABLISSEMENT PUBLIC CHARGE DE  
LA CONSERVATION ET DE LA  
RESTAURATION DE LA CATHEDRALE  
NOTRE-DAME DE PARIS

Maîtrise d'Œuvre : A.C.M.H.

Philippe VILLENEUVE  
Rémi FROMONT





**NOTRE DAME**  
6 Parvis Notre Dame  
75004 PARIS

---

**DOE (Dossier d'Ouvrages Exécutés)**  
**Prises de Terre Paratonnerres**

---

<b>Réf. CLIENT</b>	Société EIFFAGE ENERGIE SYSTEMES	Monsieur Augusto DE OLIVEIRA Téléphone : 06.37.65.62.78. E-mail : <a href="mailto:augusto.deoliveira@eiffage.com">augusto.deoliveira@eiffage.com</a>
<b>Réf. Rapport</b>	N° 350001534/35001544 – 21/10/2024 Réalisé par : Karen TOURNEUX	Travaux réalisés le : 18/10/2024 et le 23/10/2024

## I. PROTECTION CONTRE LES EFFETS DIRECTS DE LA FOUDRE

Les travaux décrits ci-après ont été réalisés conformément aux normes applicables le jour de l'installation des systèmes de protection. L'étude technique et/ou rapport de vérification ne nous ont pas été fournis.

- Pose d'un bas de descente isolée
- Mesure de 10 prises de terre
- Création de 3 prises de terre

## ATTESTATION DE FIN DE TRAVAUX

Nous soussignés *FRANKLIN ENERGIE* – 13 rue Louis Armand – 77330 Ozoir-la-Ferrière - certifions par la présente que le matériel de protection contre les effets directs de la foudre installé sur le site **NOTRE DAME DE PARIS**, répond aux normes en vigueur :

- Norme NF C 17.102 (Septembre 2011)  
« Protection des structures et des zones ouvertes contre la foudre par paratonnerre à dispositif d'amorçage »
- Série des Normes NF EN 62641 - 1 à 7  
« Composants de protection contre la foudre (CPF) »

La mesure des prises de terre a été effectuée par la méthode de mesure en ligne au moyen d'un contrôleur de marque FRANKLIN FRANCE.

Fait à Ozoir-la-Ferrière, le 29/10/2024

Karen TOURNEUX





**CERTIFICAT DE MESURE DE PRISE DE TERRE**

Nous certifions avoir réalisé pour le compte de EIFFAGE ENERGIE SYSTEMES, les mesures des prises de terre suivantes :

Travaux réalisés	Mesure de 10 prises de terre paratonnerre
Par	Monsieur Daivy MONTRESOR et Monsieur Nicolas VENTURA
Date des travaux	18/10/2024 et le 23/10/2024
	6 Parvis Notre Dame 75004 PARIS
Méthode utilisée	En ligne avec auxiliaires d'injection et de mesure (méthode des deux piquets)
Appareil de mesure	Telluromètre FRANKLIN France
Valeur recherchée	Inférieure ou égale à 10 Ohms (Norme NF C 17-102)
Valeur obtenue	PDT N° 1 = 4,88 $\Omega$
Valeur obtenue	PDT N° 2 = 5,73 $\Omega$
Valeur obtenue	PDT N° 3 = 3,97 $\Omega$
Valeur obtenue	PDT N° 4 = 8,86 $\Omega$
Valeur obtenue	PDT N° 5 = 0,12 $\Omega$
Valeur obtenue	PDT N° 6 = 1,22 $\Omega$
Valeur obtenue	PDT N° 7 = 5,76 $\Omega$
Valeur obtenue	PDT N° 8 = 6,55 $\Omega$
Valeur obtenue	PDT N° 9 = 7,88 $\Omega$
Valeur obtenue	PDT N° 10 = 7,74 $\Omega$

Fait à Ozoir-la-Ferrière, le 29/10/2024

Karen TOURNEUX



## Prises de terre

### Constitution des prises de terre paratonnerre

Toute descente de paratonnerre est reliée à une prise de terre. Son rôle est d'écouler le courant de foudre en terre.

La prise de terre doit avoir une valeur d'impédance d'onde la plus faible possible et une résistance inférieure à 10 Ohms. Une borne de mesure intercalée sur la descente à deux mètres au-dessus du sol permet la mesure de la prise de terre.

Conformément à la norme NFC 17-102, les prises de terre peuvent être constituées, pour chaque conducteur de descente, par :

- Des conducteurs en cuivre étamé 50 mm<sup>2</sup>, longueur 8 mètres, disposés en **patte d'oie** et enfouis horizontalement à au moins 50 cm de profondeur
- Un ensemble de plusieurs piquets de terre verticaux disposés **en ligne ou un triangle**, espacés de 2 mètres environ et reliés entre eux par un conducteur en cuivre étamé 50 mm<sup>2</sup>.



Patte d'oie



Piquets alignés



Piquets triangulés

### Piquet auto-allongeables

Piquet rond en acier haute résistance, galvanisé à chaud.

Système d'emmanchement permettant un emboîtement direct sans manchon.

Pour les terrains à teneur élevée en chlorure, les piquets en acier inoxydables sont recommandés.

Référence	Matériau	Dimensions
CATU	Acier galvanisé	L 1 m / Ø 20 mm



### Collier de raccordement

Permet le raccordement des électrodes horizontales de type feuillard ou conducteur rond avec les électrodes verticales.

Jusqu'à 3 conducteurs de type feuillard cuivre étamé peuvent être connectés avec une électrode de terre.

Référence	Matériau	Dimensions
AFK 0020 RP	Cupro alu	54 x 42 x 20 mm



## Bas de descente isolée

## Fiche technique: Conducteur CUI



## CUI L 20 GR 3.5M (830 208)



Illustrations sans engagement

Type	CUI L 20 GR 3.5M
Référence	830 208
Matériau - conducteur	Cu
Matériau - isolant	vPE
Tenue à la tension de choc (1,2/50 µs)	100 kV
Diamètre Ø conducteur	20 mm
Normes	NF EN 62561-2
Couleur - conducteur	gris clair *
Section de l'âme	50 mm²
Longueur totale	3500 mm
Poids	2,6 kg
Numéro tarifaire (Nomenclature Combinée EU)	85389099
GTIN (Numéro EAN)	4013364106116
UC	1 pièce(s)

Pour l'intégration des progrès de la technique, nous réservons la possibilité d'effectuer des modifications de forme, de caractéristique et des dimensions, poids et matériaux. Les illustrations sont données sans engagement.



CATHÉDRALE  
NOTRE-DAME DE PARIS

TRAVAUX DE RESTAURATION  
POST 2024



ANNEXE PARTICULIERE 7

Synthèse des sculptures monumentales  
déposées après incendie – Fleurons chevet

---

DOSSIER DE CONSULTATION DES ENTREPRISES

**Restauration du chevet**

*Février 2025*



Maîtrise d'Ouvrage :




ETABLISSEMENT PUBLIC CHARGE DE  
LA CONSERVATION ET DE LA  
RESTAURATION DE LA CATHEDRALE  
NOTRE-DAME DE PARIS

Maîtrise d'Œuvre : A.C.M.H.

Philippe VILLENEUVE  
Rémi FROMONT

## SYNTHÈSE DES ELEMENTS SCULPTES ET MOBILIERS DEPOSÉS APRÈS INCENDIE

	Nomenclature	Localisation	Lieu de stockage	N° de recensement	Photos
NOTA : Neuf fleurons se trouvent dans le dépôt lapidaire, probablement déposés avant incendie. Leur emplacement n'étant pas connu, il conviendra de procéder à un repérage ultérieurement.					
FLEURONS CHEVET	F03	Tribune - Abside	Saint-Witz	F03	
	F04	Tribune - Abside	Saint-Witz	F04	
	F06	Tribune - Abside	Saint-Witz	Cf. Nota	Cf. Nota
	F09	Tribune - Abside	Saint-Witz	F09	
	F10	Tribune - Abside	Saint-Witz	F10	
	F11	Tribune - Abside	Saint-Witz	Cf. Nota	Cf. Nota
	F13	Tribune - Nord	Saint-Witz	F13	
	F14	Tribune - Sud	Saint-Witz	F14	

	Nomenclature	Localisation	Lieu de stockage	N° de recensement	Photos
FLEURONS CHEVET	F15	Tribune - Nord	Saint-Witz	F15	
	F16	Tribune - Sud	Saint-Witz	F16	
	F17	Tribune - Nord	Saint-Witz	F17	
	F18	Tribune - Sud	Saint-Witz	F18	
	F19	Tribune - Nord	Saint-Witz	F19	
	F20	Tribune - Sud	Saint-Witz	F20	



CATHÉDRALE  
NOTRE-DAME DE PARIS

TRAVAUX DE RESTAURATION  
POST 2024



## ANNEXE PARTICULIERE 8

### Note scientifique

### « Consolidation – dessalement »

---

DOSSIER DE CONSULTATION DES ENTREPRISES

### **Restauration du chevet**

*Février 2025*



Maîtrise d'Ouvrage :

ETABLISSEMENT PUBLIC CHARGE DE  
LA CONSERVATION ET DE LA  
RESTAURATION DE LA CATHEDRALE  
NOTRE-DAME DE PARIS

Maîtrise d'Œuvre : A.C.M.H.

Philippe VILLENEUVE  
Rémi FROMONT

Le 21 mars 2021

**Objet :** PARIS 4<sup>e</sup> (Paris, 75). Cathédrale Notre-Dame de Paris  
Classée MH, liste de 1862  
Chapelle Notre-Dame de Guadalupe et collatéral attenant, tests de dessalement du 19-03-2021

Fiche demandeur n° 2019-0027

#### NOTE SCIENTIFIQUE P-21-08

A la demande de Pascal Prunet, architecte en chef des monuments historiques, et en concertation avec la société SOCRA, Véronique Vergès-Belmin et Jérémy Hénin sont venus le 19 mars 2021 effectuer des prélèvements et des tests de compresses de dessalement dans la chapelle et le collatéral cités en objet.

Ces tests ont été mis en œuvre pour comparer la facilité de mise en œuvre, l'adhésion au séchage, l'aisance du retrait et la facilité d'élimination des résidus des deux formules de compresses dont la composition figure dans le tableau 1. Des prélèvements par percement (diamètre 5mm) ont été réalisés avant application des compresses à 0-2 cm et 2-4 cm de profondeur. Nous avons également prélevé les ingrédients entrant dans la composition de la compresse SOCRA.

Les deux compresses contiennent du kaolin et du sable, mais de nature et de granulométrie différentes. Le sable de la compresse K/S est un sable naturel exclusivement quartzueux dont les grains ont un diamètre s'échelonnant entre 0.5 et 1 mm. Il s'agit d'un sable tamisé, vendu sur le marché comme sable de filtration pour piscines. Le sable de la compresse C/K/S est un sable artificiel, composé d'un verre siliceux plus fin que le sable précédent, vendu sur le marché comme abrasif pour le nettoyage de la pierre. Les proportions de sable dans chacune des compresses sont également très différentes. La compresse K/S est beaucoup plus riche en sable. Les deux compresses contiennent du Kaolin, mais ce kaolin est d'origine différente. L'une des compresses (C/K/S) contient de la cellulose en poudre, l'autre n'en contient pas.

		Kaolin	Sable	Poudre de cellulose	Eau
<b>K/S</b>  Kaolin/Sable <i>Progr. Rech. européen Desalination</i>	Origine	<b>Imerys :</b> Kaolin Speswhite	<b>Aquasand :</b> Sable quartzueux naturel 0,5-1mm	-	Déminéralisée
	Proportion volumique	0,8	1	0	nd
	Proportion pondérale	1	5	0	1.2
<b>C/K/S</b>  Cellulose/Kaolin/Sable SOCRA	Origine	<b>Céradel :</b> Kaolin A (polwhite KL)	<b>Semanaz</b> Archifine bronze référence 7	<b>Rettenmeier &amp; Söhne</b> BWW40	Déminéralisée
	Proportion volumique	2	10% du mélange sec kaolin/sable	1	-
	Proportion pondérale				

Tableau 1 : Données sur les recettes des deux compresses testées.

Les formulations ont été appliquées sur des zones préalablement nettoyées : (i) aspiraton HEPA, (ii) application d'un pelable Latex Artemundit T1 à une (ou deux ?) reprise(s), (iii) complément de nettoyage sur les joints à l'aide d'un laser pompé diodes (longueur d'onde 1064 nm) de marque EIE commercialisé par la société française ECP de Strasbourg.

La première zone se trouve à 1,5 mètre de haut sur le mur ouest (gauche) de la chapelle, à environ deux mètres des colonnes engagées en bordure sud de la chapelle. Les deux compresses sont été appliquées sur une même pierre, d'apparence saine,

La deuxième zone se trouve sur les colonnes engagées situées en bordure ouest de la chapelle, mais du côté du collatéral, à environ 1,50m de haut également. Les deux compresses ont été appliquées sur une même pierre, moulurée, passablement altérée, située dans une zone apparemment contaminée par les sels,



Figure 1 : Aspect des compresses après application sur le parement ouest et sur les colonnes engagées ouest à l'entrée de la chapelle Notre-Dame de Guadalupe.



Figure 2 : Application des produits : la compresse K/S à gauche) a besoin d'être maintenue quelques secondes au contact du support pour amorcer son adhésion. La compresse C/K/S adhère très bien au jeté et s'étale plus facilement.

Les compresses ont été observées par Amélie Strack le lundi 22 mars 2021, vers 8 heures du matin, c'est-à-dire environ 72 heures après application.

Les observations d'Amélie, transmises oralement à Véronique Vergès-Belmin, figurent ci-après. Sur la zone 1 (pierre plane peu altérée), à son arrivée, la compresse C/K/S était tombée au sol, la compresse K/S était toujours adhérente au support. Sur la zone 2 (pierre moulurée altérée), les deux compresses étaient toujours adhérentes au support, la K/S ne présentait pas de fissures et adhérait bien au support,



la C/K/S présentait un craquèlement mais adhère quand même au support, sauf en bordure au niveau des scotchs. Un fragment de chacune des compresses appliquées en zone 1 a été prélevé pour analyse de la distribution porale. La compresse K/S a nécessité plus d'énergie pour l'élimination. La compresse C/K/S a été plus facile à enlever. Les surfaces ont ensuite été brossées à sec, puis une finition par brossage humide doux (brosse ronde à poils nylon) avec a été entreprise, avec récupération de l'eau au sopalin. Après rinçage, un léger voile, identique d'une compresse à l'autre est observé.

## Conclusion

Dans la mesure où de l'eau a été appliquée sur le support après retrait des compresses, nous ne pensons pas utile de procéder à ce stade à un contrôle du dessalement. Une prestation de contrôle de l'efficacité du dessalement par le laboratoire ERM est de toute façon prévue.

Nous mesurerons la distribution porale des compresses afin de les confronter à celle du support pierre (type banc franc parisien).

Compte tenu des résultats obtenus à ce jour, et du fait d'une intervention en phase chantier, nous conseillons de réaliser une nouvelle formulation de compresse selon la recette suivante, et d'en tester l'adhérence :

		Kaolin	Sable	Poudre de cellulose	Eau
<b>C/K/S</b>	Origine	<b>Céradel</b> : Kaolin A (polwhite KL)	<b>Aquasand</b> : Sable quartzeux naturel 0,5-1mm	<b>Rettenmeier &amp; Söhne</b> BWW40	<b>Déminéralisée</b>
Cellulose/Kaolin/Sable SOCRA	Proportion	0.8 (vol)	1 (vol)	1 (vol)	<b>0.4 fois le poids</b> du mélange C/K/S sec

Tableau 1 : Recette de compresse *cellulose/kaolin/sable* adaptée du programme de recherche européen *Desalination*. Les proportions de kaolin, sable et poudre de cellulose sont données **en volume**, par contre, la quantité d'eau à ajouter **est à calculer**, elle correspond à **0,4 fois le poids du mélange sec cellulose/kaolin/sable**.

Nous avons proposé à Amélie Strack de prendre l'attache d'Olivier Rolland au cas où elle aurait besoin de conseils pour l'élimination du voile de kaolin. En tout état de cause, dans la mesure où les zones dessalées seront recouvertes d'un badigeon à la chaux, il ne sera très probablement pas nécessaire d'éliminer complètement le voile. Nous conseillons cependant de tester la compatibilité entre les surfaces dessalées par compresse et le badigeon de chaux. La littérature (Donchev et al.) mentionne en effet dans une expérimentation de labo la formation d'un silico-aluminate de calcium, la géhlénite ( $\text{Ca}_2\text{Al}[\text{AlSiO}_7]$ ) lorsque de la kaolinite ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) est mise en contact avec de la portlandite, minéral de formule  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  présent dans les badigeons de chaux aérienne. La géhlénite n'est pas un sel,

Nous restons à votre disposition pour tout renseignement complémentaire.

Référence :

Donchev, I., Ninov, J., Doykov, I., Petrova, N., Dimova, L, 2010 On the formation of cement phases in the course of interaction of kaolinite with portlandite. J Univ Chem Technol Metal , Vol - 45

Véronique Vergès-Belmin

