

Montauban *Cathédrale Notre-Dame-de-l'Assomption*

NOTICE STRUCTURE POUR CONFORTATION DE LA FAÇADE ET DES TRAVÉES ADJACENTES DE LA NEF

DOSSIER N°24-102

APS - 2ÈME VERSION

IND. 0 - 20/01/2025

MAÎTRISE D'OUVRAGE

Opérateur du patrimoine et des projets immobiliers de la Culture (OPPIC)

30 rue du Château des Rentiers

CS 61336 – 75647 Paris Cedex 13

MAÎTRISE D'ŒUVRE

ARCHITECTE MANDATAIRE

Pierre-Yves CAILLAUT

Architecte en chef des monuments historiques

1, rue Bénard, 75014 Paris

Tél. 01 53 90 20 40

acmh@agencecaillault.com

BET STRUCTURE

BMI Patrimoine

30 rue Charles-de-Gaulle

94140 Alfortville

Tél. 01 42 77 17 18

contact@bmi-patrimoine.fr

ECONOMISTE

Cabinet COEFFICIENT

26, rue Bénard, 75014 Paris

Tél. 01 42 66 56 21

coefficient@coefficient.fr

BET GEOTECHNIQUE

GEOLIA

119-131, avenue René Morin, 91420 Morangis

Tél. 01 69 34 73 04

contact@geolia-conseil.com



HISTORIQUE DES MODIFICATIONS

| | | | |
|--------|------------|--|-------|
| Ind. 0 | 20/01/2025 | 2 ^{ème} version de l'APS - première diffusion | AL |
| | | | |
| | | | |
| | | relecture | PR/JB |

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION 3

I. CONTEXTE 3

 A. Nomenclature et plan de l'édifice 3

 B. Nivellement et altimétries 3

 C. Sources 3

 D. Références normatives 3

 E. Préalables aux vérifications 4

 1. Sismique 4

 2. Arrêtés de reconnaissance de catastrophe naturelle 4

 3. Argiles 4

 4. Inondations 4

II. HYPOTHÈSES DE CALCUL 5

 A. Hypothèses générales 5

 B. Descentes de charges 5

 1. Cas du massif occidental 5

 2. Cas des travées de la nef 5

 C. Vérification des ouvrages en maçonnerie 5

 1. Généralités 5

 2. Résistance à la compression des maçonneries de fondations 5

 3. Vérification des systèmes de voûtement 5

 D. Vérification de ouvrages de confortation des fondations 5

 1. Hypothèses béton armé 5

 2. Déformations ELS 6

 E. Dimensionnement armatures forcées et tirants passifs 6

 1. Hypothèses matériaux 6

 2. Actions à reprendre 6

III. INVESTIGATIONS EN PHASE CONCEPTION 7

 A. Investigations sur fondations 7

 B. investigations en superstructure 7

 C. Mesures de surveillance 7

 1. Conservation de l'instrumentation existante 7

 2. Instrumentation complémentaire 7

 D. Autres investigations 7

IV. TRAVAUX PRÉPARATOIRES 8

 A. Investigations complémentaires en début de chantier 8

 B. Ouvrages provisoires de chantier 8

 1. Étais provisoires 8

 2. Ouvrages de protections 8

 3. Dépose d'ouvrages 8

V. TRAVAUX DE FONDATIONS 9

 A. Généralités 9

 1. Micropieux 9

 2. Préparation des massifs de fondation existants 9

 3. Ouvrages de connexion en béton armé 9

 4. Vérinage 9

 B. Reprise du massif occidental 10

 1. Localisation 10

 2. Micropieux 10

 3. Préparation des massifs de fondation existants 10

 4. Radier béton armé 11

 5. Cas spécifique de l'avant-corps central 11

 6. Autres ouvrages 11

 C. Reprise des piles du vaisseau central 12

 1. Localisation 12

 2. Micropieux 12

 3. Préparation du massif de fondation existant 12

 4. Longrines et radier béton armé 12

 D. Reprise des murs-piles des chapelles 12

 1. Localisation 12

 2. Micropieux 12

 3. Préparation du massif de fondation existant 12

 4. Longrines et radier béton armé 12

 5. Précautions particulières liées aux retables et caveaux 13

VI. TRAVAUX EN SUPERSTRUCTURE 14

 A. Remarques importantes – phasage 14

 B. Reprise des fissures et régénération des maçonneries 14

 C. Tirants passifs 14

 1. Caractéristiques 14

 2. Méthodologie 14

LISTE DES DOCUMENTS JOINTS AU RAPPORT 15

INTRODUCTION

La présente notice est rédigée dans le cadre de la mission conduite par l'agence d'architecture Pierre-Yves CAILLAULT, A.C.M.H. actuellement en phase d'Avant-projet Sommaire, portant sur la reprise en sous-œuvre de la partie occidentale de la Cathédrale Notre-Dame de l'Assomption de Montauban (82).

Une première version de l'APS a été rendue le 09 décembre 2025.
La présente notice constitue la deuxième version de l'APS qui annule et remplace la première version mentionnée ci-dessus.

Cette notice est accompagnée en annexe des documents suivants :

- BMI, APS 2ème version – carnet de plans structure, ind.0, 20/01/2025, 12 planches + cartouche

En l'absence de ces documents, cette copie du rapport n'est pas complète.

Remarque : sauf indication contraire, les clichés et les schémas présents dans ce rapport ont été réalisés par nos soins. Les clichés sont ceux réalisés au cours de notre visite sur place du 29/03/2022.



Figure 1 - Plan de localisation - Source : Géoportail

I. CONTEXTE

A. Nomenclature et plan de l'édifice

Dans la suite de ce rapport, nous utiliserons la nomenclature établie par l'architecte en chef des Monuments Historiques. Cette nomenclature est donnée sur la Figure 2.

Le lecteur se reportera également aux repérage des files sur les plans en annexe pour la localisation des ouvrages.

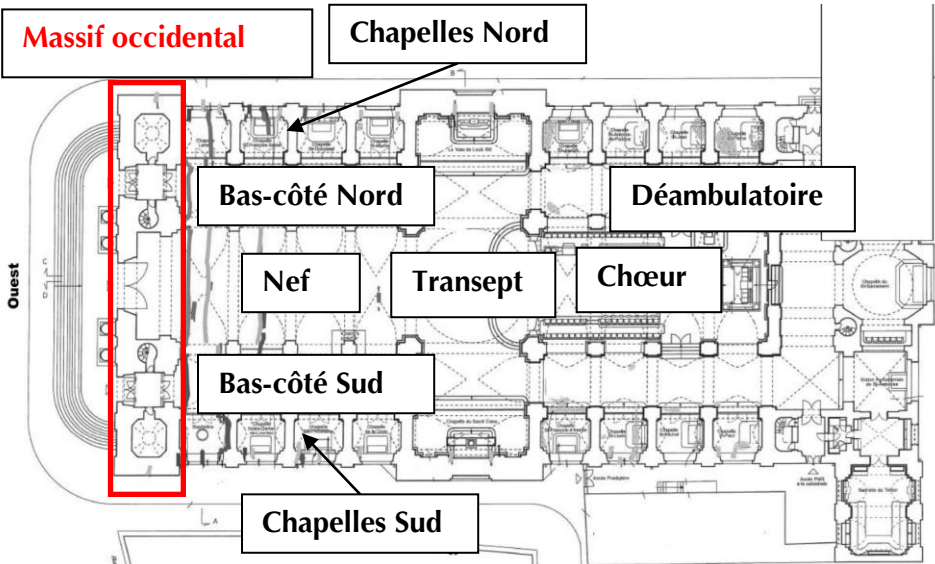


Figure 2 – Nomenclature de l'Edifice

B. Nivellement et altimétries

En l'absence de nivellement NGF à disposition de BMI à ce stade des études, les conventions et hypothèses ci-dessous ont été adoptées dans la présente notice et ses planches graphiques afin de simplifier le repérage altimétrique des ouvrages :

- Niveau de référence (0) au niveau du terrain actuel de la fouille RF4, correspondant au niveau fini du parvis de la cathédrale, au pied du perron (cf. Figure 3 ci-dessous et repérage sur planches graphiques) ;
- Niveau des rues autour de la cathédrale considéré uniforme à la cote +0,00 m ;
- Niveau intérieur de la cathédrale considéré uniforme à la cote +1,58 m (compris dernière marche du perron).

Par conséquent, l'ensemble des altimétries seront à confirmer ou corriger en phase ultérieure sur la base d'un relevé altimétrique précis (cf. investigations complémentaires).



Figure 3 : vue de la fouille RF4 dans son contexte – photo GEOLIA

C. Sources

Nous avons eu accès et utilisé les documents suivants pour réaliser cette étude :

- Rapport GEOLIA Ind B du 12 mars 2024 d'analyse du rapport de M. Yves Baduel et mise à jour du programme des travaux
- Notre rapport « 23-121-Montauban-cathedrale ND de l'Assomption-MAJ Complément de diagnostic-Ind0-240531 »

D. Références normatives

Sauf indication contraire, les normes utilisées dans le cadre de cette étude sont les suivantes (liste non exhaustive) :

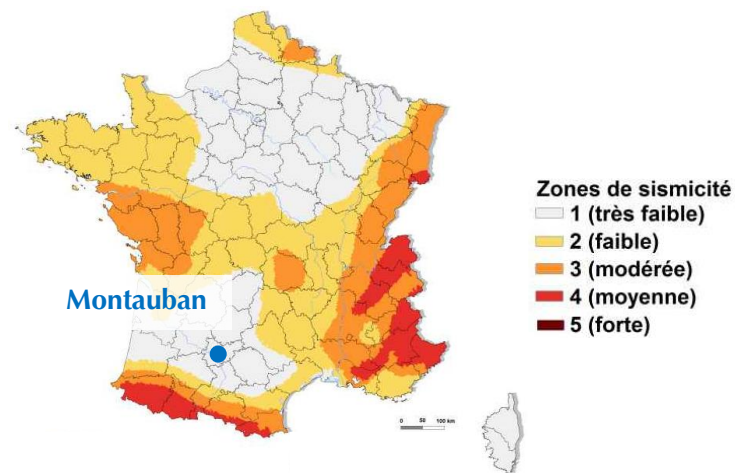
- NF EN 1990 - Eurocodes structuraux - Bases de calcul des structures
- NF EN 1991-1-1 - Eurocode 1 - Actions sur les structures - Partie 1-1 : actions générales - poids volumiques, poids propres, charges d'exploitation des bâtiments
- NF EN 1992-1-1 - Eurocode 2 - Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments
- 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

E. Préalables aux vérifications

1. Sismique

Montauban est située en zone 1 vis-à-vis du risque sismique (niveau d'aléa très faible). Il n'est pas nécessaire de prévoir d'intervention particulière vis à vis du risque sismique.



2. Arrêtés de reconnaissance de catastrophe naturelle

La commune a été reconnue en état de catastrophe naturelle pour :

- Inondations et coulées de boue (1988, 1994, 1996, 2003, 2006, 2013, 2014, 2015, 2017)
- Mouvements de terrains consécutifs à la sécheresse (1989, 1991, 1992)
- Mouvements de terrains différentiels consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols (1993, 1995, 1997, 1998, 2002, 2003, 2006, 2009, 2011, 2012, 2015, 2016, 2017, 2018)
- Inondations, coulées de boue et mouvements de terrain (1999)
- Inondations, coulées de boue et effets exceptionnels dus aux précipitations (2021)
- Tempête (1982)

3. Argiles

La cathédrale est a priori à cheval entre une zone d'aléa fort et moyen pour les aléas concernant le retrait/gonflement des argiles.

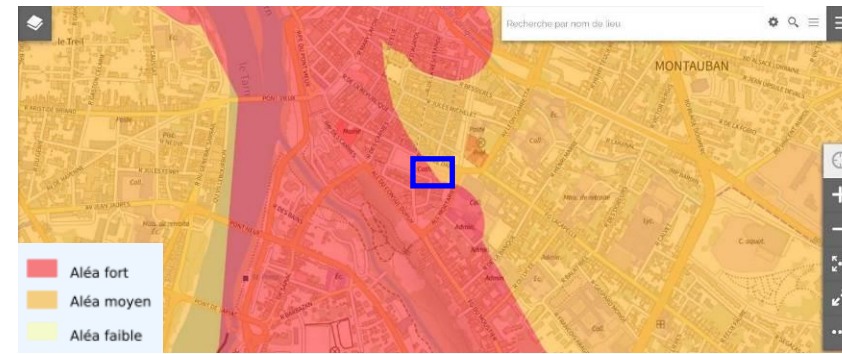


Figure 5 – Carte d'aléa des argiles
Source : Géorisques

4. Inondations

La commune de Montauban est soumise à un PPRI. La commune est également soumise à un Territoire à Risque important d'Inondation, mais la cathédrale est située hors des zones impactées.



Figure 6 – Carte des Territoires à Risques importants d'Inondations
Source : Géorisques

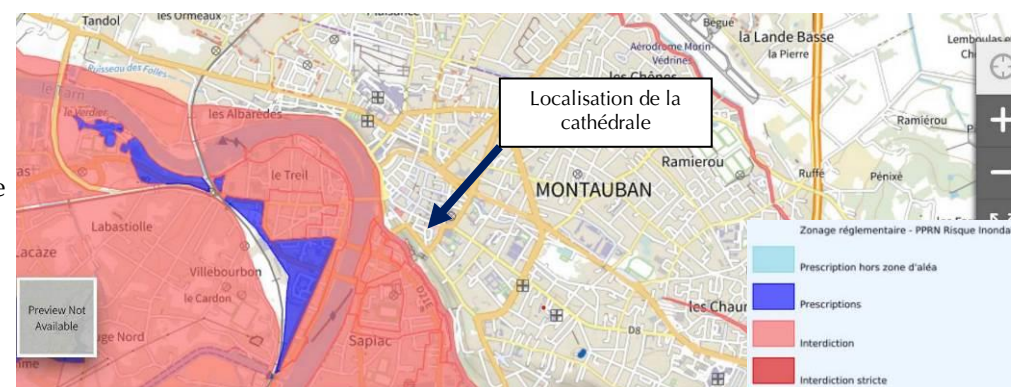


Figure 7 – Carte des Plans de Prévention Naturel Inondations
Source : Géorisques

II. HYPOTHÈSES DE CALCUL

A. Hypothèses générales

Il est à garder en mémoire que les résultats des vérifications structurelles décrits ci-après ne sont valables que dans le cadre des hypothèses effectuées pour cette étude.

Nous considérons que l'état sanitaire des maçonneries (éléments en pierre, briques et mortier) est bon.

B. Descentes de charges

Les résultats des descentes de charges sont reportés sur les plans de repérage en annexe.

IMPORTANT : les descentes de charges ne comprennent :

- ni le poids propre des fondations
- ni le poids propre des ouvrages de connexion en béton armé (barrettes, longrines, radiers, etc.)

Les deux données ci-dessus dépendent des choix de principes effectués en cours de phase APS et varient d'un ouvrage de confortation à l'autre (dimensions de coffrage, altimétrie des ouvrages, volume de fondation concerné par les RSO, etc.).

Les deux données ci-dessus ont toutefois été prises en compte pour le prédimensionnement des ouvrages de confortation des fondations.

1. Cas du massif occidental

Charges permanentes

Porteurs verticaux et voûtes :

- murs brique pleine épaisseur : 1800 daN/m³
- murs brique + parement pierre de taille : 1900 daN/m³
- éléments massifs en pierre de taille : 2200 daN/m³

Planchers et toitures :

- terrasse sommitale clochers : 1000 daN/m²
- planchers bois divers : 200 daN/m²
- couverture + voliges : 10 daN/m²
- sections de charpentes : 750 daN/m³

Autres ouvrages :

- sculptures et ornements pierre massive : 2200 daN/m³
- ouvrages bois divers (abat-son, etc.) : 750 daN/m³
- orgue (valeur forfaitaire à confirmer) : 10 000 daN

Des sondages seront à prévoir pour confirmer les masses volumiques des pierres et briques employées (cf. partie suivante)

Charges variables

Il n'a pas été pris en compte de charges variables (vent, neige, surcharge d'exploitation, etc.) sur le massif à ce stade des études; les effets des charges gravitaires étant considérés prépondérants.

2. Cas des travées de la nef

Les descentes de charges dans les travées de la nef sont issues des vérifications des systèmes de voûtement effectuées en phase diagnostic (cf. ci-dessous) et reprennent les hypothèses de ces modèles.

Cette démarche permet de prendre en compte l'effet des poussées de voûtes sur les charges ramenées au niveau des fondations (excentrement et efforts horizontaux).

C. Vérification des ouvrages en maçonnerie

1. Généralités

- les fondations ont été reconnues en maçonneries de briques,
- les porteurs verticaux et voûtements en superstructure sont en maçonnerie :
 - brique pour la plupart des ouvrages (murs porteurs, arcs boutants, arcs non apparents, etc.)
 - pierre de taille pour les piles, les arcades et arcs apparents, ainsi qu'une partie des parements extérieurs et intérieurs.

À noter que le cœur des ouvrages n'a pas été reconnu à ce stade et fera l'objet d'investigations complémentaires en phase APD (cf. III), susceptibles de conduire à la mise à jour des présentes hypothèses.

2. Résistance à la compression des maçonneries de fondations

En l'absence de tests en laboratoires pour identifier les origines et les caractéristiques mécaniques des briques et mortiers employés, la résistance de calcul à la compression de la maçonnerie est retenue égale à 1,00 MPa à l'ELU, en fondation comme en superstructure.

Toutefois, compte-tenu des charges en présence et des surfaces d'emboîtement parfois limitées (pour des questions de faisabilité technique), il n'a pas toujours été possible, à l'APS, de limiter la contrainte ELU à 1MPa à l'interface maçonnerie/béton armé.

Par conséquent, un affinage des calculs sera à prévoir en phase APD sur la base d'essais mécaniques à réaliser sur les maçonneries existantes (cf. III).

3. Vérification des systèmes de voûtement

La vérification des systèmes de voûtement dans les travées de la nef a été effectuée en phase diagnostic au moyen du calcul à la rupture.

Ces modèles sont régis par un jeu d'hypothèses spécifiques concernant les matériaux, les actions et la géométrie des ouvrages.

Le lecteur se référera au diagnostic structurel joint en annexe pour ces hypothèses et les résultats des modèles.

D. Vérification de ouvrages de confortation des fondations

NOTA : les caractéristiques ci-dessous ne concernent que les ouvrages de connexion en infrastructure : radiers, longrines, barrettes; réalisés en béton armé.

Les micropieux possèdent leurs d'hypothèses spécifiques, cf. notice géotechnique G2 APS de GEOLIA.

1. Hypothèses béton armé

- Classe de la structure : S4
- Classe de résistance : C30/37
- Classe d'exposition :
 - Ouvrage en contact avec le sol : XC2 - Humide, rarement sec;
 - classification à confirmer selon les résultats des investigations complémentaires (agressivité du sol et des eaux souterraines, cf. cf. III)
- Pour mémoire :
 - Béton de propreté et gros béton : X0
 - Ouvrage intérieur : XC1
 - Ouvrage en contact avec le sol : XC2
 - Ouvrage béton extérieur :
 - XC3 ou XC4 - Humide modéré ou Alternativement humide et sec
 - XF1 - Saturation modérée en eau sans agent de déverglaçage
- Armatures : HA acier type B500 A ou B
- L'enrobage pris en compte est, en première approche $C_{nom}=35\text{mm}$ pour les longrines et radiers ;
- ratio d'aciers pris en première approche à 80 kg/m³; à confirmer en phase ultérieure d'étude.

2. Déformations ELS

Hypothèses à préciser en phase APD en tenant compte du vérinage des micropieux.

Les tassements différentiels entre points d'appuis devront être limités à L/500 pour éviter l'apparition de désordres dans les maçonneries sus-jacentes.

E. Dimensionnement armatures forées et tirants passifs

1. Hypothèses matériaux

Caractéristiques indicatives (à adapter selon type d'armature et la solution retenue au chantier) :

- Armatures : acier HA type B500 A ou B,
- Scellement chimiques à la résine époxydique :
 - Contrainte de cisaillement résine/pierre : 23 daN/cm² (1,0 MPa)
 - Coefficient de sécurité résine : 3,5

2. Actions à reprendre

Armatures scellées dans les massifs de fondation existants

Ces armatures assurent la reprise des efforts de cisaillement entre :

- la surface de fondation existante située hors aplomb des empochements (p.ex. cœur des massifs),
- et la surface de fondation existante en appui sur les empochements (parements des massifs).

Les efforts à reprendre par les armatures sont estimés à partir des descentes de charge, au prorata des deux surfaces mentionnées ci-dessus.

Armatures forées en superstructure pour reconstitution de chaînage

Le dimensionnement est effectué en tirants passifs afin de créer des chaînages comparables aux ouvrages des normes actuelles dans les murs neufs en maçonnerie. Il prend en compte :

- Spécifications NF EN 1996-1-1+A1 (partie 8.5.1) concernant les chaînages hors zone sismique :
 - attaches de chaînage supportant un effort de calcul en traction minimum de 45 kN,
 - section minimale d'armature 150mm² dans le cas d'acier FeE500, correspondant à effort ELU de 75 kN,
 - chaînages disposés au droit de chaque niveau de plancher ou toiture; dans le cas de la cathédrale de Montauban, ce raisonnement a été appliqué aux voûtements et arcades générateurs de poussées horizontales sur les murs,

- Effort de poussées des voûtes et arcades issus des modèles d'analyse limite.
 - Pour le massif de façade épaulant la première travée de la nef, poussée dimensionnante à 11t ELS

III. INVESTIGATIONS EN PHASE CONCEPTION

Pour mener à bien la suite des études de conception, des investigations complémentaires sont à effectuer sur l'édifice, au niveau des fondations et des ouvrages en superstructure. La présente partie en donne la description sommaire.

Les résultats des investigations complémentaires seront à prendre en compte dès la phase APD compte-tenu de leurs conséquences éventuelles sur l'estimation financière.

A. Investigations sur fondations

- Pour rappel, les investigations sur fondations doivent être conduites sous la supervision des services archéologiques compétents ;
- Ces investigations seront à réaliser en coordination avec GEOLIA.
- Pour description détaillée, Cf. AGENCE P.-Y. CAILLAULT, cahiers des charges pour investigations structurelles complémentaires, janvier 2025

- Reconnaissances de fondations (désignation dans le cahier des charges : RF16, RF17 et RF18) :
 - Dans la chapelle Saint-Théodard, associant :
 - pied de retable pour caractérisation du mode de fondation (profondeur en particulier) et affinage de la méthodologie d'intervention,
 - périmétrie (partielle) d'un caveau pour confirmation des dimensions (plan et altimétries) et des modes constructifs des parois si existantes (pourtour et fond) ; à combiner avec passage géoradar préalable ;
 - pied de mur de typologie 4A, non reconnue ;
 - Dans le massif occidental pour validation/adaptation du principe de radier décrit au projet (présence de masses enterrées détectée par les prospections géophysiques de 2021 (cf. rapport ANALYSE-GC en annexe), susceptibles d'impacter significativement la solution technique retenue au projet)
 - compris essai au pénétromètre dynamique en fond de chaque fouille (désignation dans le cahier des charges : PD16, PD17 et PD18),

- 4 carottages dans la maçonnerie des fondations reconnues (désignation dans le cahier des charges : CTF12, CTF16, CTF17 et CTF18) :
 - Pour reconnaissance des principes constructifs dans l'épaisseur des massifs (homogénéité; nature de la maçonnerie du cœur; présence de vides, etc.) ;
 - Pour caractérisation de la résistance en compression de la maçonnerie : prélèvement d'échantillons de brique/pierre/mortier pour réalisation d'essais mécaniques en laboratoire
- Caractérisation de l'agressivité du sol et des eaux souterraines vis-à-vis des bétons : prélèvement d'échantillons et essais en laboratoire (cf. notice G2 APS GEOLIA)

B. investigations en superstructure

Pour description détaillée : Cf. AGENCE P.-Y. CAILLAULT, cahiers des charges pour investigations structurelles complémentaires, janvier 2025.

- 4 carottages dans la maçonnerie porteuse (désignation dans le cahier des charges : CTS1 à CTS4) pour reconnaissance des matériaux constitutifs et de leurs épaisseurs respectives (parement, fourrure, cœur de piles, etc.) ; à répartir sur :
 - massif de façade,
 - pile du vaisseau central (type repère 5C),
 - murs-piles des chapelles (type repères 5A-5B),
- 2 percements à la mèche à travers les voûtes (désignation dans le cahier des charges : PCM1 et PCM2), diamètre 20 à 30 mm env; pour mesure de l'épaisseur de ces dernières et identification des matériaux constitutifs;
- 2 sondages ponctuels type dépose de maçonnerie en brique (désignation dans le cahier des charges : M1 et M2) pour préciser la composition et le poids volumique des murs mixtes pierre de taille-brique;
- Optionnel : sondages ponctuels sur un retable (désignation dans le cahier des charges : R1), type dépose de revêtement/habillage sur les différents éléments de la structure du retable (piédestaux, colonnes, frontons), pour identification et caractérisation des modes constructifs (matériaux, harpage éventuel dans les murs-gouttereaux, etc.);

C. Mesures de surveillance

1. Conservation de l'instrumentation existante

L'instrumentation mise en place à la suite du sinistre sera à conserver pendant la durée des études et du chantier.

En particulier, la conservation des inclinomètres est à prévoir car ces derniers permettent l'obtention de mesures absolues pour le comportement du massif (angle d'inclinaison) en complément des mesures relatives obtenues par les fissuromètres (déplacement relatif entre les lèvres des fissures instrumentées).

Lors du chantier, ces informations seront utiles pendant toutes les étapes de la reprise en sous-œuvre, en particulier lors de la réalisation des empochements, et plus encore pour le vérinage.

2. Instrumentation complémentaire

Une surveillance étendue de l'édifice est prévue pour suivre son comportement en globalité lors de la réalisation des travaux de confortement, bien que ces derniers restent délimités à la façade et aux premières travées de la nef.

Par conséquent, une instrumentation complémentaire sera à prévoir pour inclure le reste de l'édifice (chœur et transept, et tout particulièrement les chapelles sud du chœur).

En concertation avec le MOa, la diffusion du cahier des charges de l'instrumentation complémentaires a été convenue pour le démarrage de la phase APD.

D. Autres investigations

- Relevé géomètre pour confirmation des altimétries intérieures et extérieures de la cathédrale. Pour faciliter la conception du projet, il conviendrait de positionner les points de mesure le long des files 1 à 5, en extérieur et en intérieur.

IV. TRAVAUX PRÉPARATOIRES

A. Investigations complémentaires en début de chantier

Les entreprises prévoiront leurs propres investigations lors du chantier pour adapter leurs solutions techniques dans les détails.

En particulier (liste non exhaustive) :

- **Préalablement aux étalements provisoires : investigations géophysiques, type passages géoradar**, sur les emprises des étalements pour adapter si besoin leurs dispositions d'appui (présence de vides/cavités sous le dallage intérieur, cf. cf. rapport ANALYSE-GC en annexe) ;
- **Préalablement aux reprises en sous-œuvre des fondations** (cf. partie V.A.2) :
 - **investigations géophysiques, type passages géoradar** sur les maçonneries de fondations exhumées lors des passes ;
 - **forage pour passages caméra** dans les maçonneries de fondations.

B. Ouvrages provisoires de chantier

1. Étalements provisoires

Généralités

La stabilité de la structure lors des opérations de reprise en sous-œuvre nécessite la mise en place d'étalements provisoires. **Le lecteur se reportera à la notice architecte pour la description détaillée des étalements :**

- cintres et étrépillons bois ;
- en appui sur tours d'étalement en métal pour limiter l'encombrement au sol et faciliter la manœuvre des engins de chantier ;
- compris platelage de répartition au sol ;
 - **Pour rappel, les appuis des tours et le platelage seront à adapter en fonction des anomalies détectées sous le dallage** (présence de cavités repérées en 2021). Des passages géoradar seront à prévoir en début d'intervention (cf. IV.A ci-dessus).
- compris visites de contrôle et remplacement des éléments défectueux ;
- compris dépose et repli en fin d'opération.

Les étalements seront installés en intégralité en début de phase chantier et resteront en place jusqu'à la fin des opérations de vérinage.

Ouvrages concernés

Massif ouest et 3 premières travées de la nef, compris collatéraux et chapelles :

- arcs doubleaux et grandes arcades
 - compris doubleau de grande voûte file 2 – à adapter à la présence de l'orgue
 - compris doubleau sous la tribune de l'orgue
- arcs diaphragmes dans les combles ;
- arcs boutants ;
- volées d'escaliers des tourelles nord et sud (localement, pour forage de tirants métalliques) ;
- baies et passages (étrésillonnage) :
 - ensemble du massif ouest (prévoir adaptations type portique pour circulation de la foreuse, cf. croquis p. suivante) ;
 - ensemble des baies hautes de la nef ;
 - baie de la 1^{ère} chapelle Nord (entre repères 2A et 3A) ;
- avant-corps de la façade, compris piédestaux des colonnes,
 - en appui provisoire sur les micropieux définitifs, pour dépose des fondations de l'avant-corps (cf.V.B.5) ;
 - adaptation pour dépose de tambour des colonnes C et D lors du forage des tirants ;
- piles angulaires et balustrades des tours-clochers (ceinturage léger pour intervention à la nacelle avec cordistes) ;
- statues et des pots à feu (type sanglage) ;
- retables des chapelles, compris chevêtre métallique pour support de l'étalement en partie inférieure (cf.V.D.5).

2. Ouvrages de protections

Se référer à la notice architecte pour la description exhaustive et détaillée des protections. En particulier, il sera prévu :

- platelage de circulation pour les foreuses. **L'aire de circulation en fonction des anomalies détectées sous le dallage** (cf. cf. IV.A) :
 - par évitement dans la mesure du possible,
 - ou par renforcement du platelage afin de ponter les anomalies.
- Filets pare-gravois sous l'ensemble des voûtes de la nef et des bas-côtés. Fixation par scellement dans la maçonnerie existante sans intéresser les étalements provisoires pour garantir l'indépendance structurelle des deux systèmes

3. Dépose d'ouvrages

Se référer à la notice architecte pour la description exhaustive et détaillée des protections.

En particulier, la reprise en sous-œuvre de la façade occidentale nécessitera la dépose partielle du perron pour ouverture des fouilles :

- emmarchements et dallage,
- forme remblayée

La zone déposée sera limitée à l'emprise des fouilles blindées uniquement.

À noter la présence d'infrastructures en brique reconnues dans la fouille RF5 qui ne semblent pas directement appartenir au système de fondations de la façade et de son avant-corps (cf. Figure 8 ci-dessous) et seront à déposer avec le perron.



Figure 8 (sup. et inf.) : vues de la fouille RF5 au pied de l'avant-corps de la façade, avec repérage d'infrastructures en brique ne semblant pas appartenir au système de fondations de l'avant-corps (flèche jaune) – photo GEOLIA

V. TRAVAUX DE FONDATIONS

A. Généralités

1. Micropieux

Réalisation de micropieux de type III comprenant (cf. notice G2-AVP version 2 GEOLIA) :

- Essais préalables et essais de contrôle ; les résultats des essais préalables permettront d'affiner les paramètres de sol pour :
 - optimiser le dimensionnement des micropieux (diamètre, profondeur, etc.) ;
 - évaluer le comportement des micropieux (estimation des tassements) ;
 - adapter et optimiser le principe et la méthodologie de vérinage (voir ci-dessous) ;
- Préparation, amenée et repli du matériel (dont mise en station de la foreuse) ;
- **Forage pour ancrage dans les molasses compactes** suivant préconisation du rapport G2-AVP version 2 ;
- **tubage systématique afin de préserver l'intégrité des couches archéologiques et de maîtriser les injections (présence de cavités) :**
 - profondeur 8m en file 5
 - profondeur 4 partout ailleurs
- Injection sous pression (type III)
- Enregistrement continu papier et informatique des paramètres de forage et injections ;
- Manutention et évacuation des déblais de forage ;
- Receptage des micropieux ;
- Platine de répartition en tête de micropieux ;

2. Préparation des massifs de fondation existants

Ces opérations ont pour objectif d'améliorer la cohésion des massifs de fondation existants pour assurer la diffusion des charges vers les ouvrages de RSO. En particulier lors du vérinage et pour le cœur des appuis de forte section dont la surface ne peut être intégralement intéressée par les empochements.

Prévoir :

- Recherche systématique des vides dans la maçonnerie en début d'intervention sur le massif :
 - passage géoradar ;
 - carottages faibles diamètre, verticaux et obliques, tous les 50 à 80 cm max, pour inspection caméra ;
- En cas de détection de vides, injection de coulis de régénération dans les carottages :

- coulinage à effectuer gravitairement en progressant par passes horizontales du bas vers le haut, hauteur 1m ;
 - les coulis devra être compatible chimiquement avec les maçonneries existantes,
- Renforcement par armatures scellées dans la maçonnerie des massifs pour reprise des efforts de cisaillement entre le cœur et le parement :
 - armatures HA acier B500 (résistance caractéristique $f_{yk} = 500$ MPa) ;
 - scellement au mortier ou résine compatible chimiquement avec la maçonnerie ;
 - compris coupleurs si nécessité ;
 - compris essais d'arrachement.

Ces dispositions seront à adapter selon résultats des investigations complémentaires (phase conception et phase chantier).

3. Ouvrages de connexion en béton armé

Les ouvrages de connexion (longrines et radiers) seront réalisés par passes alternées pour éviter tout risque de déstabilisation des superstructures existantes lors de la RSO :

- Préparation, amenée et repli du matériel (dont engins d'excavation) ;
- Fouilles blindées (puits ou tranchée ; à confirmer en phase ultérieure) ;
 - largeur des passes : 1m maximum ;
 - profondeur de fouille à adapter pour garantir une hauteur de travail d'environ 1m lors de la réalisation d'empochements/refouillements profonds ;
 - largeur de fouille à adapter pour garantir une largeur de travail suffisante ;
- Les terrassements seront effectués manuellement à l'approche des ouvrages de maçonneries, canalisations, réseaux divers, etc. ;
- Selon le cas, refouillement de la maçonnerie des fondations ou du sol d'assise sous l'arase inférieure ; compris toute sujétion d'étalement provisoire (type tabourets métalliques p.ex.) ;
- Le cas échéant, prévoir dévoiement des réseaux existants ;
- Manutention et évacuation des déblais ; compris foisonnement des terres ;
- Remblai pour comblement de fouille ; compris compactage par couches successives.

Pour la réalisation des longrines, radiers et empochements :

- Caractéristiques béton et armatures : cf. hypothèses de calcul ;

- Compris coupleurs si nécessité pour assurer la continuité du ferrailage entre les passes ; à confirmer selon le phasage entreprise ;
- Compris réservations pour passages divers, à adapter en particulier selon la méthodologie de vérinage (p.ex. passage de flexibles ; cf §4 ci-dessous).

- **En aucun cas les fondations ne devront être déchaussées, en dehors des passes blindées en cours d'exécution ;**
- **L'enchaînement des passes devra tenir compte du temps de prise du béton ;**
- **La réalisation des ouvrages devra impérativement être effectuée avec un accompagnement archéologique des services de l'état compétent.**

4. Vérinage

Mise en charge de la totalité des micropieux par vérinage pour assurer le transfert des efforts des fondations existantes vers les ouvrages de reprise et limiter au maximum les tassements résiduels après intervention.

La reprise est étendue aux trois premières travées de la nef de manière dégressive pour éviter autant que possible l'apparition de « points durs » en assurant une continuité de comportement entre les parties reprises et non reprises. **Ratio de reprise des charges existantes :**

- **100% sous les appuis de la file 1 (massif façade côté parvis) ;**
- **80% sous les appuis de la file 2 (massif façade côté nef) ;**
- **50% sous les appuis de la file 3 (nef) ;**
- **40% sous les appuis de la file 4 (nef) ;**
- **30% sous les appuis de la file (nef) 5.**

Le type de vérin ainsi que le phasage et la méthodologie de vérinage seront à préciser en phase ultérieure d'étude. Il a été retenu à ce stade :

- **vérins disposés sur chaque tête de micropieux** ; puissance et course à adapter en fonction de la descente de charge individuelle sur chaque micropieu (phase ultérieure d'étude) ;
- adaptation des chemises de micropieux pour autoriser les **mouvements relatifs avec les longrines lors du vérinage** ;
- **réservations dans les longrines** pour passage des flexibles et accès éventuel aux vérins lors des opérations ;

La faisabilité technique d'un vérinage simultané de l'intégralité des micropieux sous la cathédrale n'est pas confirmée à ce stade des études. Il conviendrait que le vérinage intègre, dans sa conception, sa méthodologie et son phasage, la possibilité d'une mise en charge en plusieurs étapes (pour chaque vérin) et d'une réversibilité pour permettre des ajustements en cours d'opération.

B. Reprise du massif occidental

1. Localisation

- ensemble des appuis des files 1&2 (repères 1A ; 2A ; 1B ; 2B ; etc.)
- compris colonnes de l'avant-corps central (col.C ; col.C' ; col.D ; col.D')

2. Micropieux

Prévoir 140 micropieux de type III; diamètre 250 mm.

Profondeur suivant carnet de plans structure BMI (planches 4 et 5) et notice G2 APS-version 2 GEOLIA.

Forage depuis :

- L'intérieur de la cathédrale au niv. +1,58 m ;
- Le cas particulier de l'accès de la foreuse aux salles octogonales (tours RDC) nécessite l'agrandissement en hauteur des passages voûtés reliant les tours aux chapelles attenantes (entre repères 2A-2B et 2E-2F; cf. fig. ci-contre) :
 - protections et/ou déposes préalables suivant préconisations architecte ;
 - dépose du remplissage brique existant ;
 - décaissement du sol dans les salles octogonales et les chapelles pour garantir un gabarit de passage suffisant sans impacter les voûtes (gabarit 2m50 min) ;
 - si nécessaire, dépose partielle de maçonnerie de fondation dans l'emprise du passage pour atteindre la hauteur suffisante ;
 - profondeur d'agrandissement vers le bas estimée : env. 80 cm ; à confirmer en phase ultérieure après relevé
 - compris toutes sujétions d'étalement provisoire des voûtes des passages si nécessité
 - vigilance particulière vis-à-vis des anomalies repérés dans la salle Sud par les prospections géophysiques de 2021 (mention de tombes, cf. rapport ANALYSE-GC en annexe)
- sol extérieur de la rue au niv. +0,00 m (altimétrie variable à confirmer)
 - compris dépose partielle préalable du perron (cf. IV.B.3)
 - compris toutes sujétions d'impact sur la circulation piétonne et automobile



Figure 9 : vue du passage entre repères 2A-2B



Figure 10 : vue du passage entre repères 2E-2F

3. Préparation des massifs de fondation existants

En raison des désordres observés sur les maçonneries dans la fouille RF4 (fig. ci-dessous), des remaçonnerges locaux et ponctuels seront à prévoir sur les massifs, en substitution des maçonneries disloquées. Leur localisation sera fonction des observations de l'entreprise pendant les travaux.



Figure 11 : Dislocation de la maçonnerie des fondations observée localement en fond de fouille RF4

Le coulage et le forage des armatures seront à effectuer **après les remaçonnerges** mentionnés ci-dessus. Cf. Généralités §V.A.2 :

- recherche systématique des vides dans la maçonnerie et coulage,
- renforcement par **126 barres HA 32** réparties sous l'ensemble du massif (cf. plan de repérage) :
 - scellées dans les massifs en brique (cf. détails D02 et D03 sur planches graphiques en annexe ; à confirmer selon résultats des investigations complémentaires) ;
 - le cas échéant, disposition en deux lits croisés ; altimétries respectives niv. -0,40 cm et -0,80 m ;
 - diamètre de forage indicatif : 52 mm

Le phasage de l'ensemble des opérations citées ci-dessus devra tenir compte de la **méthodologie d'intervention spécifique sous l'avant-corps central (colonnes C, C', D et D') ; cf. V.B.5**

4. Radier béton armé

Radier béton armé réalisé sous l'arase inférieure de la fondation existante, reconnue dans la fouille RF4 aux environs du niv - 1,00 m.

- ép. 120 cm
- as. radier : niv. -1,00 m

Compris réhausse brique ou béton armé (définir en concertation avec architecte) sous l'avant-corps central et les statues aux repères 2C-2D.

Réalisation par passes alternées (cf. généralités) après dépose du perron. En particulier :

- L'affouillement horizontal du sol sous l'épaisseur de la fondation existante sera limité à 1m environ ;
- Par conséquent, prévoir intervention des deux côtés des murs pour réalisation d'un radier filant (cf. représentation schématique des passes sur plans en annexe) ;
- à l'interface mi-épaisseur, prévoir coupleurs en attente pour continuité des armatures.

5. Cas spécifique de l'avant-corps central

La présence de l'avant-corps central appelle une adaptation des interventions.

Étant donné les charges élevées redescendues par la façade, il est nécessaire de réaliser des empochements sous cette dernière (ie. sous les repères 1C et 1D). L'accès à ces ouvrages est toutefois interdit par la présence des fondations de l'avant-corps (repères col. C ; C' ; D et D' ; voir également les figures ci-dessous et ci-contre).

Par conséquent, il est nécessaire de déposer provisoirement les fondations de l'avant-corps pour reprendre en sous-œuvre la façade. Pendant cette phase provisoire, la reprise de l'avant-corps est assurée en totalité par son étalement provisoire.



Figure 12 : vue générale de la fouille RF5 – photo GEOLIA



Figure 13 : fondations de l'avant-corps central observées dans la fouille RF5 – photo GEOLIA

Prévoir (cf. numéros reportés sur Figure 14 ci-contre) :

- (1) dépose partielle préalable du perron
- (2) forage des micropieux sur le pourtour des ouvrages
- (3) appui de l'étalement provisoire de l'avant-corps sur les micropieux,
- (4) adaptation de l'étalement pour RSO des colonnes (carottages et passage de fers en sous-œuvre des piédestaux) ;
- (5) démolition des fondations de l'avant-corps, en recherche des fondations de la façade proprement dite (repères 1C et 1D) ;
- (6) réalisation du radier sous la façade et à l'aplomb des colonnes ; connexion aux micropieux ;
- (7) à l'aplomb des colonnes, réhausse du radier jusqu'au niveau d'arase inférieure des piédestaux ; à réaliser en brique ou béton armé (à définir en concertation avec architecte) ;
- (8) déchargement des étalements provisoires pour transfert de charge sur la réhausse susmentionnée
- (9) mise en charge définitive des micropieux par vérinage.

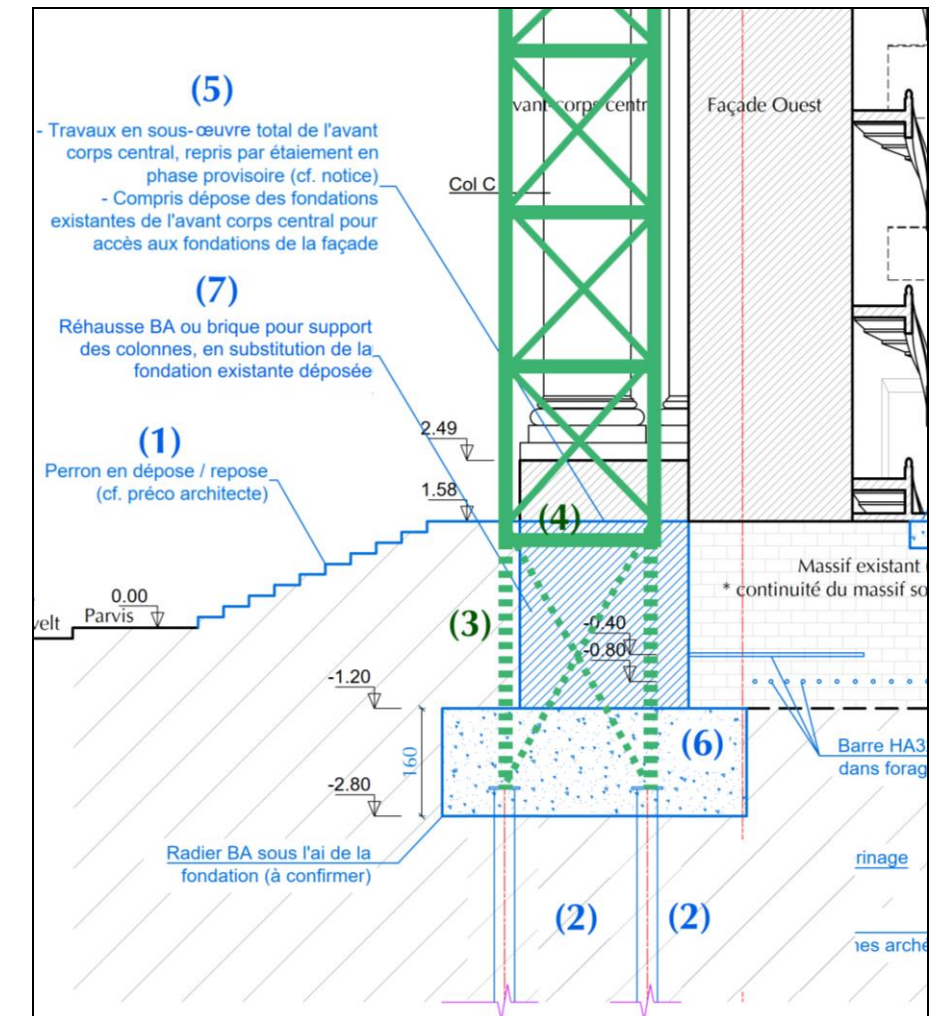


Figure 14 : méthodologie d'intervention en sous-œuvre de l'avant-corps central

6. Autres ouvrages

Prévoir longrine BA en sous-œuvre des noyaux des escaliers pour transfert des charges du noyau vers les murs périphériques (situés à l'aplomb des empochements du radier).

- section 30*40ht cm
- as. niv. 1,58 m

Compris saignée dans le massif de fondation si ce dernier file sous l'escalier ;

Compris empochements dans les murs périphériques ;

Compris sommiers d'appui dans les empochements ;

Compris dépose locale des marches avec étalement provisoire de volée pour réalisation de la longrine en sous-œuvre.

C. Reprise des piles du vaisseau central

1. Localisation

6 piles concernées en **file C** (3C à 5C) et **file D** symétrique (3D à 5D)

2. Micropieux

Pour chaque pile, 4 micropieux type III; diamètre 200 mm.

Profondeur suivant carnet de plans structure BMI (planches 4 et 5) et notice G2 APS-version 2 GEOLIA.

Forage depuis le sol intérieur de la cathédrale, compris toutes sujétions pour circulation de la foreuse entre les étalements provisoires.

Nota : vu en coupe transversale, le cheminement des charges n'est pas centré sur l'axe de la pile en raison des poussées des voûtes. **Par conséquent, la disposition des micropieux est volontairement asymétrique afin d'homogénéiser la répartition des charges entre micropieux** (dans la mesure du possible).

3. Préparation du massif de fondation existant

Cf. Généralités ; pour chaque pile :

- recherche systématique des vides dans la maçonnerie et coulinage,
- **renforcement par 4 barres HA 32 :**
 - scellées dans les assises en pierre de taille (cf. détail D01 sur planches graphiques en annexe ; à confirmer selon résultats des investigations complémentaires) ;
 - disposition en deux lits perpendiculaires, soit 1 lit pas assise ;
 - diamètre de forage indicatif : 52 mm

Le phasage de ces opérations devra tenir compte de la **présence des « longrines existantes longitudinales » en brique présumées le long des files C et D**, repérées dans la **fouille RF9** (cf. plan de fondation) : leur démolition préalable est à prévoir pour libérer la périmétrie des massifs.

4. Longrines et radier béton armé

Radier béton armé empoché dans le massif de fondation en brique et pierre de taille (cf. détail D01 sur planches graphiques en annexe)

- ép. 70 cm ;
- as. env. 30cm sous le niveau fini du dallage intérieur

D. Reprise des murs-piles des chapelles

1. Localisation

6 murs-piles concernées :

- **Files A & B : piles 3A à 5B ;** compris murs de remplissage entre les piles ;
- **Files E & F (symétriques) : piles 3E à 5F ;** compris murs de remplissage entre piles.

2. Micropieux

Pour chaque mur-pile, 8 micropieux type III; diamètre 200 mm.

Profondeur suivant carnet de plans structure BMI (planches 4 et 5) et notice G2 APS-version 2 GEOLIA.

Forage depuis :

- sol intérieur des chapelles au niv. +1,58 m ; 6 micropieux ; compris toutes sujétions pour circulation de la foreuse entre les obstacles (étalements, caveaux, retables ; voir ci-dessous),
- sol extérieur de la rue au niv. +0,00 cm (altimétrie variable à confirmer) ; compris toutes sujétions d'impact sur la circulation piétonne et automobile.

3. Préparation du massif de fondation existant

Cf. Généralités ; pour chaque mur-pile :

- recherche systématique des vides dans la maçonnerie et coulinage,
- **renforcement par 2x2 barres HA 32 :**
 - scellées dans les massifs en brique (cf. détail D01 sur planches graphiques en annexe ; à confirmer selon résultats des investigations complémentaires) ;
 - diamètre de forage indicatif : 52 mm
 - niveau +0,80 m (à confirmer en phase ultérieure selon résultats des investigations complémentaires)

Le phasage de ces opérations devra tenir compte de la **présence des « longrines existantes longitudinales » en brique présumées le long des files B et E**, repérées dans la **fouille RF8** (cf. plan de fondation) : leur démolition préalable est à prévoir pour libérer la périmétrie des massifs.

4. Longrines et radier béton armé

Réseau de longrines et barrettes en béton armé empochées dans les massifs de fondation en briques :

- ép. 70 cm ;
- **as. variable suivant détail D01 du carnet de plans structure (planche 09) afin de limiter les profondeurs de fouille :**
 - en files A/F : env. 30cm sous niveau fini rue ;
 - en files B/E : env. 30cm sous le niveau fini du dallage intérieur.

Le réseau de longrines et barrettes en béton armé sera étendu sous les murs-gouttereaux (files A et F) afin d'assurer la reprise des charges rapportées par ces derniers (allège et remplissage des baies pour l'essentiel) et d'assurer la continuité du système de reprise sans formation de « point dur ».

5. Précautions particulières liées aux retables et caveaux

Les ouvrages ci-dessous appellent une adaptation des interventions (cf. repérage sur plan) :

- **Retables adossés aux murs gouttereaux** dans les chapelles Saint-Théodard, files [4A-5A] et Sainte-Philomène, files [4F-5F] ;
- **Caveaux d'évêques** dans la chapelle Saint-Théodard, files [4A-4B] et [5A-5B].

Cas des retables

Pour éviter d'engendrer des désordres sur les décors fragiles, prévoir (cf. numéros reportés sur Figure 15 Figure 14 p; suivante) :

- Sondages préalables, en phase MOe, sur les retables proprement dits et leur système de fondation (cf. III.A)
- Dépose des emmarchements et autels (cf. préconisation architecte),
- **(1)** Étalement provisoire et encoffrement des retables adossés aux murs,
- **(2)** Appui de l'étalement provisoire sur chevêtre métallique perdu, empoché dans les murs séparatifs des chapelles et le mur gouttereau ; principe et altimétrie à adapter selon résultats des sondages préalables ;
 - Ainsi, en phase provisoire, la reprise du retable est assurée en totalité par son étalement provisoire sur chevêtre ;
- **(3)** Réalisation des longrines et barrettes en sous-œuvre de l'étalement provisoire ;
- **(4)** Réalisation d'une réhausse béton armé ou brique (à définir en concertation avec architecte) permettant l'assise des retables sur les longrines sous-jacentes.

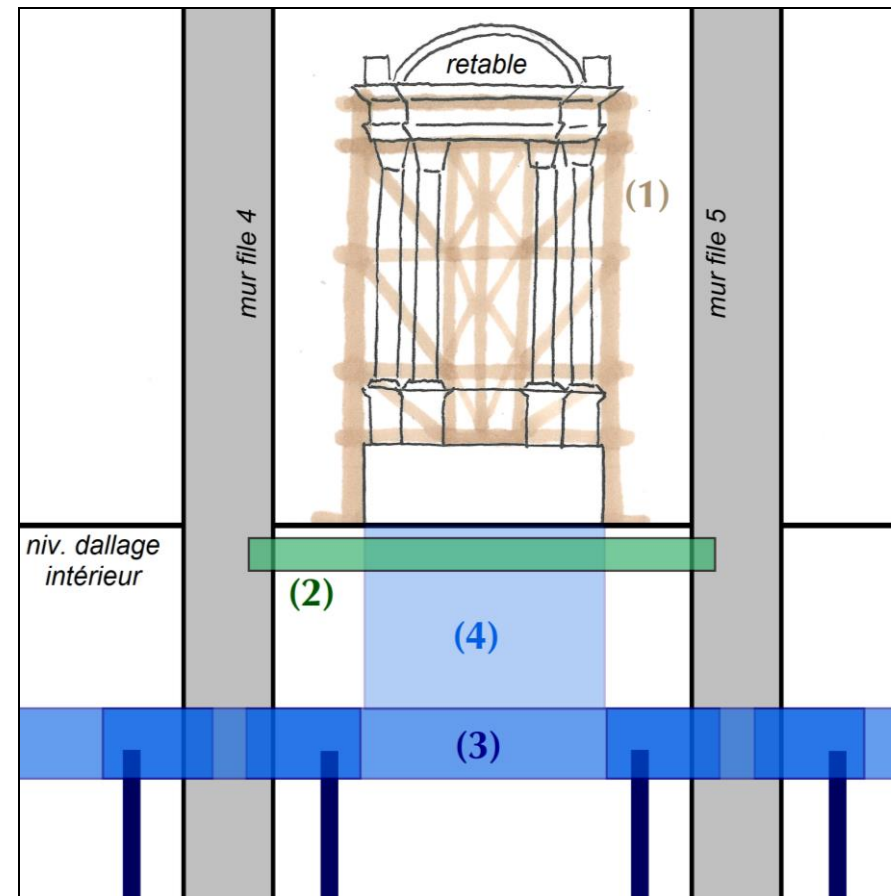


Figure 15 : méthodologie d'intervention en sous-œuvre des retables

Cas des caveaux

Les travaux ne prévoient pas d'exhumation des corps ; les caveaux des évêques seront maintenus en place pendant toute la durée du chantier. **Par conséquent, les travaux ne devront pas impacter le volume des caveaux :**

- prévoir sondages préalables pour reconnaissance des dimensions des caveaux et de leurs modes constructifs (cf. III.A),
- prévoir évitement des caveaux par les ouvrages de fondations (micropieux et longrines), à adapter suivant résultats des sondages préalables :
 - si une intervention en sous-œuvre des caveaux est possible (nature et altimétrie du fond de caveau à confirmer), réalisation de longrines filantes sous les caveaux, dito file 3, compris toutes sujétions d'étalement des caveaux en phase provisoire (périmétrie et fond de caveau) ;
 - dans le cas contraire, prévoir contournement des caveaux par les longrines, compris toutes sujétions d'intervention par empochements et passes alternées depuis l'autre côté du mur ;
- prévoir le **pontage des pierres tombales par platelage de circulation renforcé** par poutrelles métalliques, pour permettre la circulation de la foreuse dans les chapelles ;
- Une attention particulière sera portée au **blindage des fouilles adjacentes aux caveaux pour éviter toute ouverture accidentelle** pendant les travaux. Prévoir fretage complémentaire des parois du caveau (type sangles + couchis).

VI. TRAVAUX EN SUPERSTRUCTURE

A. Remarques importantes – phasage

- **Les interventions de reprise en sous-œuvre devront impérativement avoir été réalisées préalablement à toute intervention de reprise sur la superstructure.** Dans le cas contraire, il y a risque que les désordres existants réapparaissent après intervention ou que de nouveaux désordres se manifestent.
- **Le phasage des interventions en superstructure (confortation d'ouvrages) et sur le second œuvre (restauration) devra tenir compte des préconisations du géotechnicien (délais minimaux à respecter après réalisation des RSO).**

B. Reprise des fissures et régénération des maçonneries

Selon les ouvrages concernés, des préconisations spécifiques sont émises par l'architecte. **Le lecteur se réfèrera au descriptif architecte pour la description complète des travaux de reprise des fissures et de régénération des maçonneries.**

Prévoir reprise des fissures et régénération des maçonneries affectées par les désordres pour restituer leur cohésion.

La régénération des maçonneries comprendra :

- Remaillage des fissures importantes et restitution du harpage,
- Relancis des pierres fendues selon nécessité,
- Refichage et rejointoiement des joints ouverts ; un soin particulier sera accordé aux ouvrages en pierre de taille ainsi qu'aux joints des ouvrages clavés (arcs, plates-bandes, etc.) afin de garantir leur remise en compression,
- Coulinage des vides détectés dans les maçonneries pour restitution de leur cohérence ; à exécuter gravitairement depuis le bas vers le haut, par bandes horizontales de 1m00 de haut,
- Remaçonage des vides selon nécessité,
- Etc.

Les mortiers, enduits et coulis utilisés devront être compatibles avec la maçonnerie existante et devront présenter des caractéristiques identiques ou similaires au mortier d'origine, à savoir :

- **compatibilité chimique** avec les maçonneries existantes (mortiers, moellons et pierres, et tout autre composant qui

pourrait donner lieu à des réactions chimiques indésirables ou pathologies spécifiques) ;

- **résistance mécanique** équivalente à celle des mortiers existants ;
- comportement similaire vis-à-vis des **actions environnementales**
- **fluidité des coulis** adaptée pour le coulinage.

Localisation : Ensemble des superstructures en maçonnerie impactés par les désordres géotechniques.

C. Tirants passifs

Prévoir **réalisation d'armatures forées dans la maçonnerie formant tirants passifs**. Ces tirants ont pour rôle :

- Solidarisation du massif occidental et la première travée de la nef afin d'assurer :
 - le maintien en contact des voûtes et arcades de la nef avec le massif qui les épaula,
 - le couturage des fissures d'interface entre le massif et la nef,
- Complément de chaînage horizontal au sein du massif occidental, divisé sur toute sa hauteur par le vide des cages d'escalier.

1. Caractéristiques

Prédimensionnement

Prévoir 6 tirants ; cf. repères **TP** sur carnet de plans structure :

- **armature acier inoxydable A2** ;
- **diamètre armature : 25 mm** ;
- **diamètre forage : 31 mm minimum** ;
- **longueur de scellement : 2m30** dans les maçonneries (voir détail ci-dessous) ;
- **compris coupleurs**.

Scellement

Les caractéristiques mécaniques des scellements dépendent de plusieurs facteurs inconnus à ce stade des études :

- propriétés intrinsèques des résines, qui varient suivant les fournisseurs,
- résistance à l'arrachement des pierres de taille/maçonneries dans lesquelles sont réalisés les scellements,
- méthodologie de mise en œuvre du scellement (méthodologie généralement imposée par le fournisseur de la résine pour garantir sa bonne adhérence).

En conséquence, l'entreprise devra prévoir :

- **toute intervention et/ou sondage** qui pourrait être nécessaire au dimensionnement des scellements dont elle aura la charge de la mise en œuvre,
- **compris essais d'arrachement**, pour déterminer la résistance du système tirant/résine/maçonnerie,
- quel que soit le principe retenu, l'emploi d'une **résine ou d'un coulis compatible chimiquement** avec la maçonnerie.

L'ensemble des indications de mise en œuvre du fournisseur de la résine de scellement devront être respectées (type de forage, nettoyage du trou de forage, soufflage, inspection à l'aide d'un endoscope, temps de prise, etc.).

2. Méthodologie

Préparation préalable des maçonneries

L'état de l'ensemble des maçonneries intéressées par les tirants devra être vérifié avant leur mise en place.

Si nécessité, et préalablement à la mise en place des tirants, les maçonneries feront l'objet d'une régénération suivant les préconisations données précédemment.

Forage

Forage réalisé depuis la façade extérieure ou dans les ébrasements de baies (TP-A1 et TP-F1) sous réserve de faisabilité technique.

Prévoir dépose de pierres suivant préconisations architecte (tambour de colonne, etc.) ; compris étalements provisoires (remplacement des étalements RSO, cf. partie étalement).

Prévoir foreuse adaptée par sa taille et son poids : intervention en hauteur ; dans l'encombrement des étalements provisoires, des baies, etc.

Afin de contrôler, vérifier et s'assurer de la bonne exécution du forage, l'entreprise utilisera tout moyen nécessaire (suivi radar, pachomètre, cf. investigation en début de chantier partie IV.A).

LISTE DES DOCUMENTS JOINTS AU RAPPORT

Cette notice est accompagnée en annexe des documents suivants :

- BMI, APS 2ème version – carnet de plans structure, ind.0, 20/01/2025, 12 planches + cartouche


En l'absence de ces documents, cette copie du rapport n'est pas complète.

À Alfortville, le 20 janvier 2025

NOTA : Les préconisations décrites dans ce document ne peuvent en aucun cas être considérées comme des études abouties pouvant servir d'études d'exécution. Elles sont définies dans le cadre d'une mission de maîtrise d'œuvre pour établir un avant-projet sommaire (APS) et sont estimation financière.

Ordre des planches

- Planche 01 - Localisation de la zone d'intervention
- Planche 02 - Etat existant - Fondations - Descente des charges
- Planche 03 - Extrait des relevés GEOLIA
- Planche 04 - RSO radiers, longrines et micropieux
- Planche 05 - Prédimensionnement des micropieux
- Planche 06 - Armatures scellées dans les fondations existantes
- Planche 07 - Armatures forées en superstructure - vue plan
- Planche 08 - Armatures forées en superstructure - vues façades
- Planche 09 - Détail 01
- Planche 10 - Détail 02
- Planche 11 - Détail 03 RSO
- Planche 12 - Détail 03 Tirants



BMI
Bureau d'étude structure spécialisé
Monuments Historiques & Réhabilitation
30, rue Charles de Gaulle - 94140 ALFORTVILLE
63-75 av. Roger Salengro - 13003 MARSEILLE
Tél : 01.42.77.17.18 - Fax : 01.42.77.17.89
Mail : contact@bmi-patrimoine.fr

Cathédrale Notre-Dame de l'Assomption
Montauban

MAÎTRISE D'OUVRAGE

Opérateur du Patrimoine et des Projets Immobiliers de la Culture (OPPIC)
30 rue du Château des Rentiers
CS 61336 - 75647 Paris Cedex 13

MAÎTRISE D'ŒUVRE

ARCHITECTE : Agence Pierre-Yves CAILLAULT
1, rue Bénard, 75014 Paris
Tél : 01 53 90 20 40
Mail : acmh@agencecaillault.com

BET Structure : B.M.I PATRIMOINE
30, rue Charles de Gaulle
94140 Alfortville
Tél : 01 42 77 17 18
Mail : contact@bmi-patrimoine.fr

BET GEOTECHNIQUE : GEOLIA
119-131, avenue René Morin, 91420 Morangis
Tél : 01 69 34 73 04
Mail : contact@geolia-conseil.com

ECONOMISTE : Cabinet COEFFICIENT
26, rue Bénard, 75014 Paris
Tél : 01 42 66 56 21
Mail : coefficient@coefficient.fr

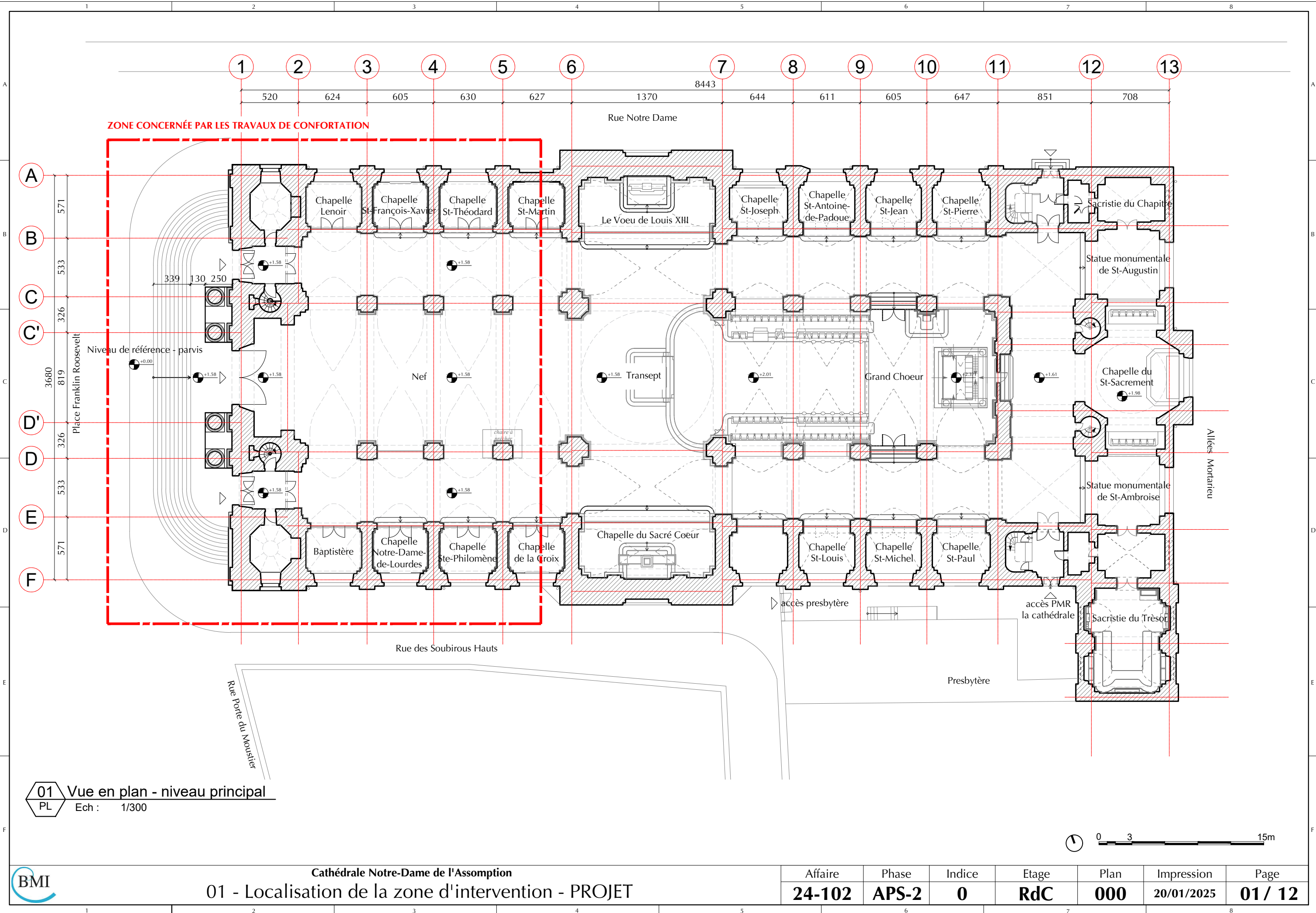
ENTREPRISES

APS 2^{ème} version - carnet de plans structure

Nombre de pages : 12 + Cartouche = 13

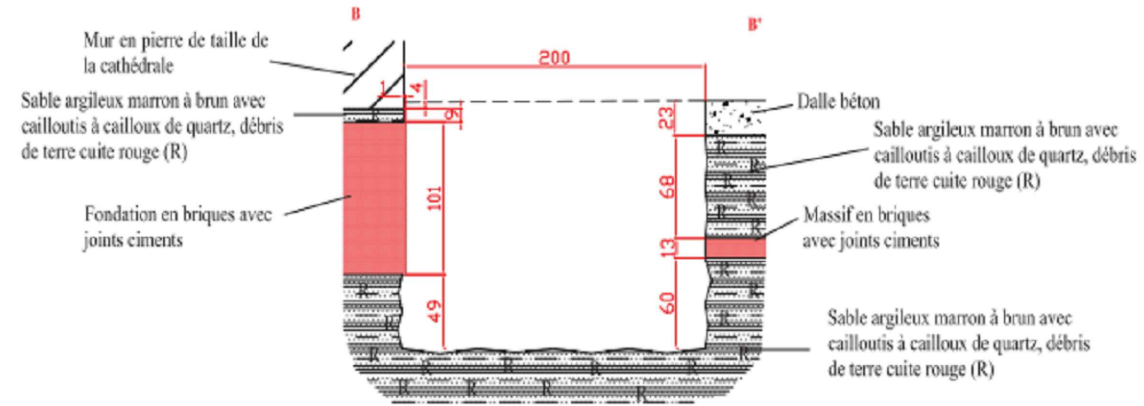
| Indice | Date | Observations | Dessiné par: | Chef de projet: |
|--------|------------|--|--------------|-----------------|
| 0 | 17/01/2025 | 2ème version de l'APS - première diffusion | MN | AL |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

| Affaire | Type | Phase | Indice | Localisation | Plan | Impression |
|---------|------|-------|--------|--------------|------|------------|
| 24-102 | PL | APS-2 | 0 | - | 000 | 20/01/2025 |

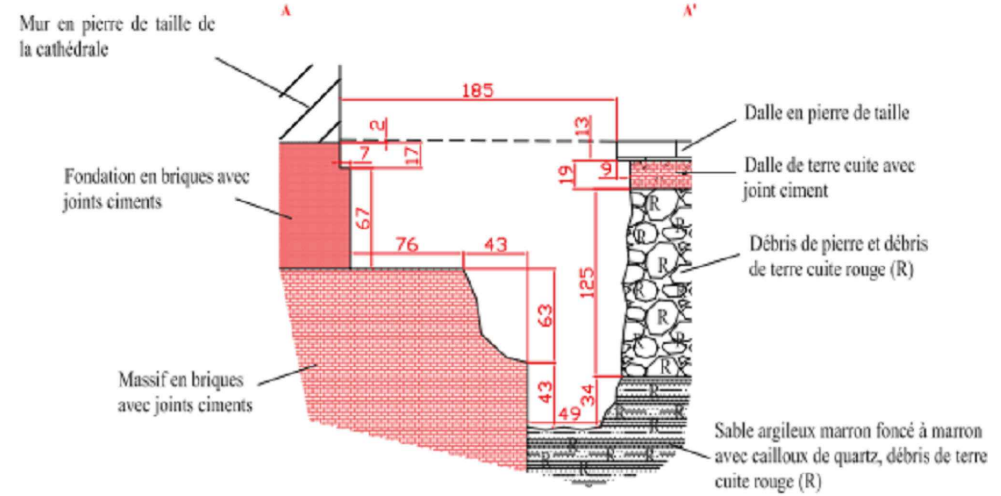


01
PL
Vue en plan - niveau principal
Ech : 1/300

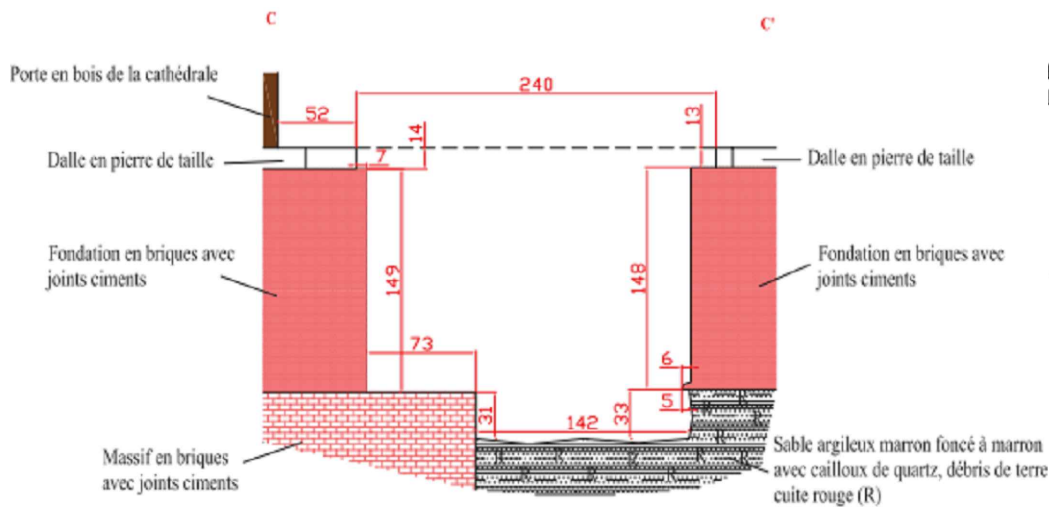




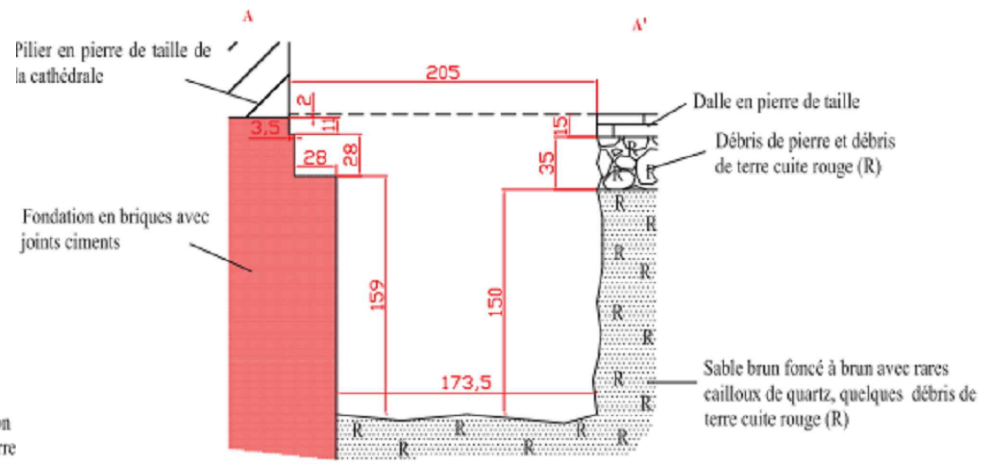
RF4 - Coupe BB'
sans échelle / cf. étude G5 page 136



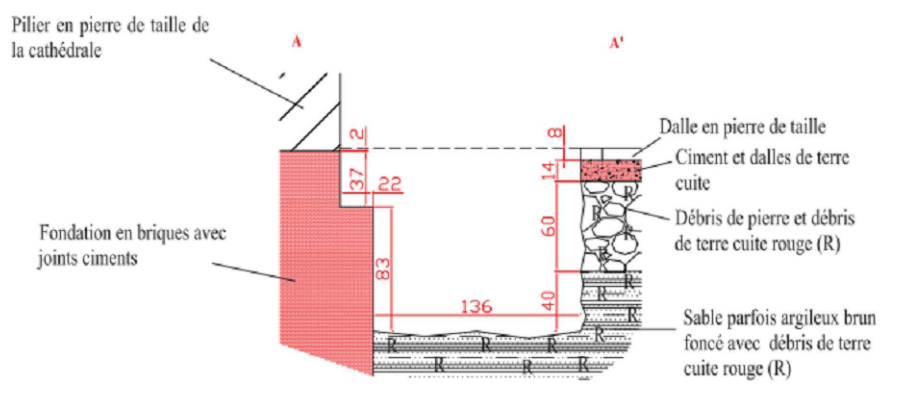
RF5 - Coupe AA'
sans échelle / cf. étude G5 page 139



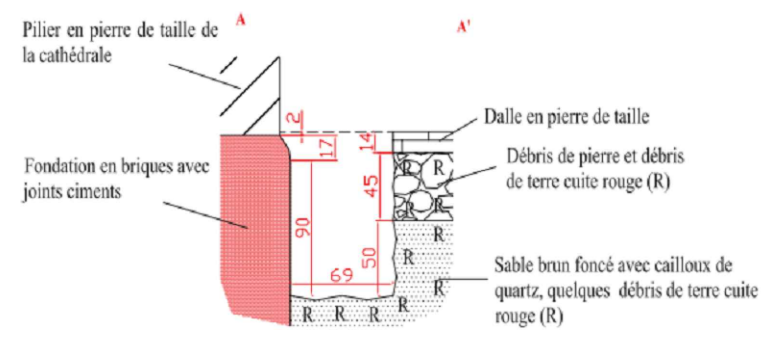
RF6 - Coupe AA'
sans échelle / cf. étude G5 page 143



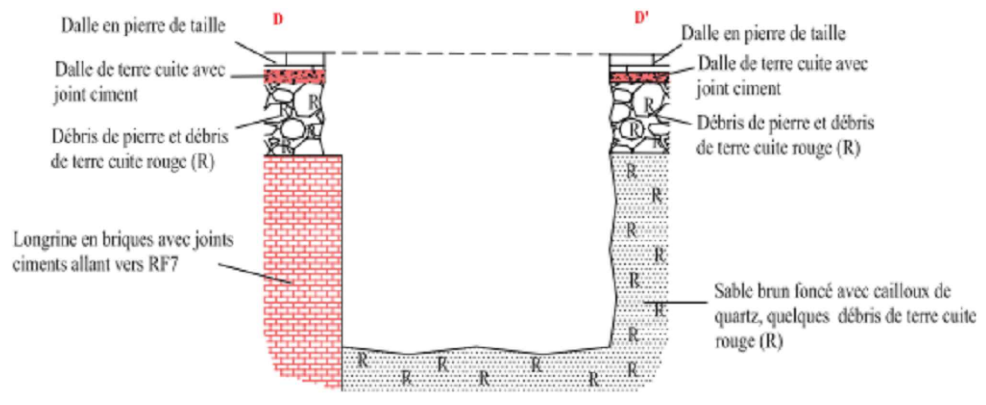
RF7 - Coupe AA'
sans échelle / cf. étude G5 page 145



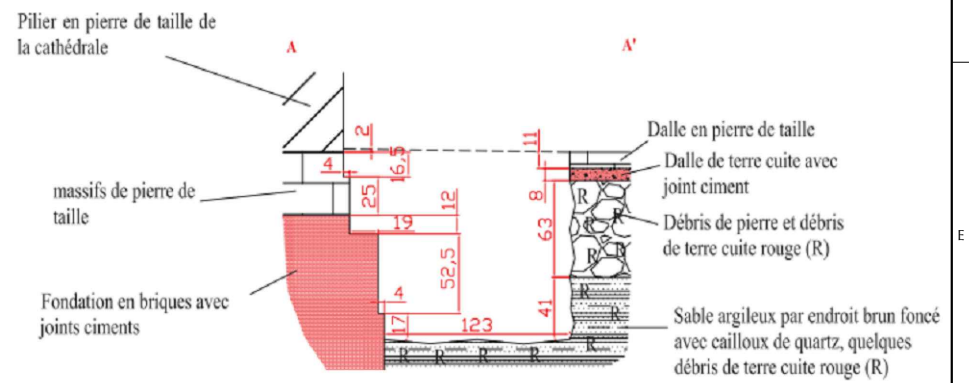
RF5 - Coupe CC'
sans échelle / cf. étude G5 page 141



RF8 - Coupe AA'
sans échelle / cf. étude G5 page 148



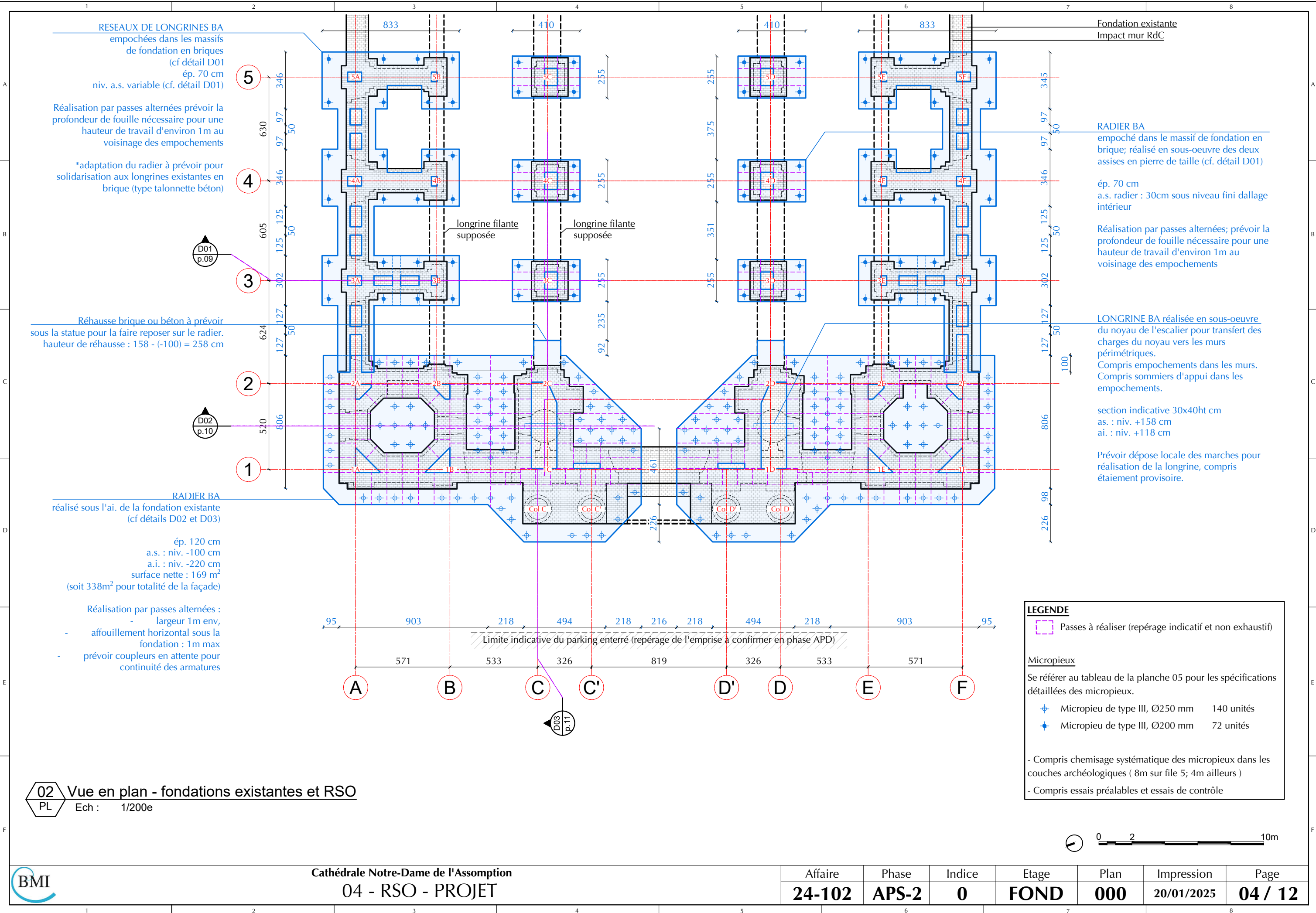
RF8 - Coupe DD'
sans échelle / cf. étude G5 page 151



RF9 - Coupe AA'
sans échelle / cf. étude G5 page 153

SOURCE :
Rapport géotechnique n° G220600 de 28.09.2022 ind. B - Missions G5 + G2 AVP + G2 PRO





02 Vue en plan - fondations existantes et RSO
PL Ech : 1/200e

LEGENDE

Passes à réaliser (repérage indicatif et non exhaustif)

Micropieux

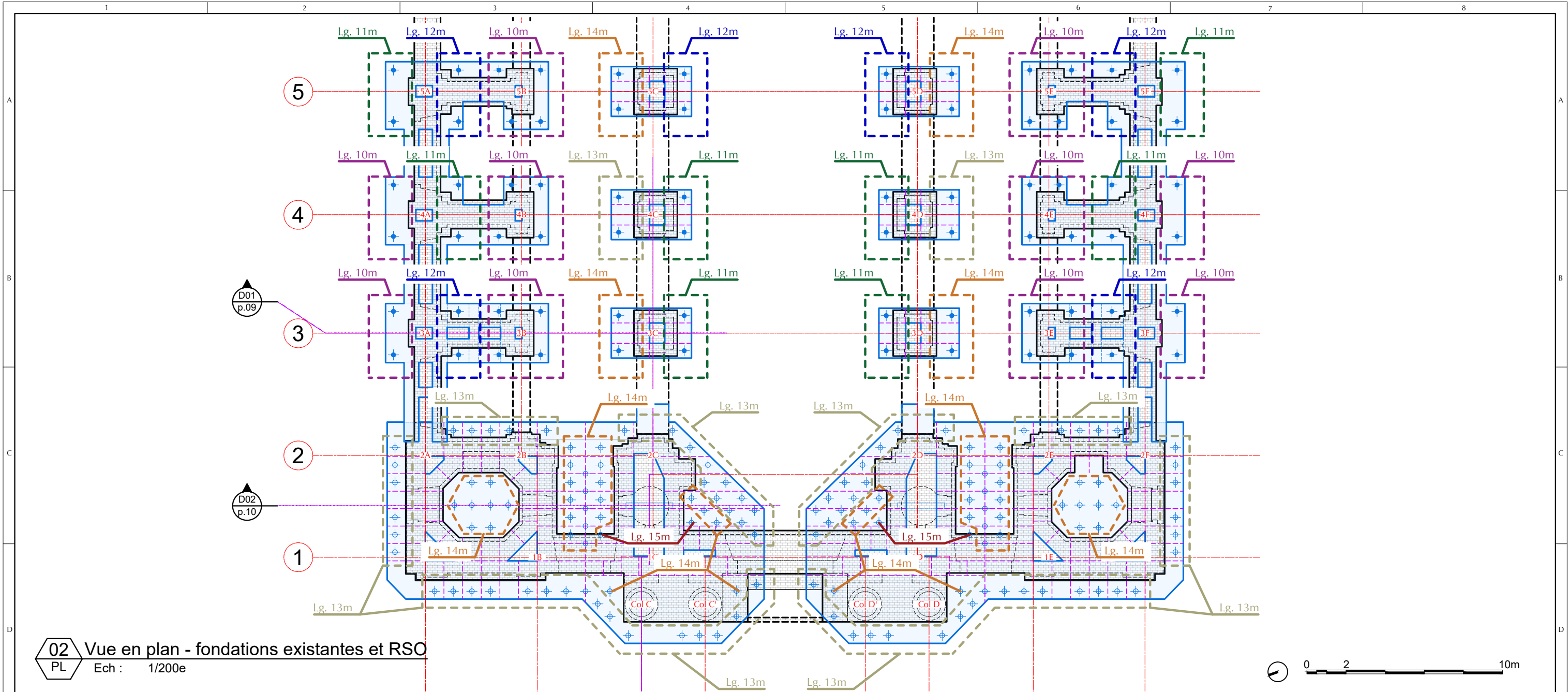
Se référer au tableau de la planche 05 pour les spécifications détaillées des micropieux.

- Micropieu de type III, Ø250 mm 140 unités
- Micropieu de type III, Ø200 mm 72 unités

- Compris chemisage systématique des micropieux dans les couches archéologiques (8m sur file 5; 4m ailleurs)

- Compris essais préalables et essais de contrôle





02 Vue en plan - fondations existantes et RSO
PL Ech : 1/200e



TABEAU DE SYNTHESE - MICROPIEUX

Les longueurs de ce tableau sont données dans la convention de l'étude G2-AVP de GEOLIA (p/r cote 103,20 NGF - cote indicative du sol fini intérieur, correspondant au niv. BMI +1,58m).
Les valeurs de portance ELS sont indicatives; se référer à la notice G2-AVP de GEOLIA.

| | Type III - diamètre 200 mm - tubage 4m | | | | | | Type III - diamètre 250 m - tubage 4m | | | | | | TOTAL |
|--|--|------|------|------|------|------|---------------------------------------|------|------|------|------|------|-------|
| longueur / cote 103,20 NGF (m) | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 212 u |
| portance ELS carac (t) (valeur indicative) | 32,1 | 45,5 | 51,9 | 58,2 | 64,5 | 70,9 | 49 | 56,9 | 64,9 | 72,8 | 80,7 | 88,6 | |
| nb. d'unités - massif occidental (files 1-2) | | | | | | | | | | 78 | 58 | 4 | 140 u |
| nb. d'unités - 1ère travée (file 3) | 12 | 4 | 4 | | 4 | | | | | | | | 24 u |
| nb. d'unités - 2ème travée (file 4) | 12 | 8 | | 4 | | | | | | | | | 24 u |
| nb. d'unités - 3ème travée (file 5) | | | | | | | | | | | | | 0 u |
| | Type III - diamètre 200 mm - tubage 8m | | | | | | Type III - diamètre 250 m - tubage 8m | | | | | | |
| longueur / cote 103,20 NGF (m) | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | |
| portance ELS carac (t) (valeur indicative) | 18,3 | 24,6 | 31 | 37,3 | 43,7 | 50 | - | - | - | - | - | - | |
| nb. d'unités - 3ème travée (file 5) | 8 | 4 | 8 | | 4 | | | | | | | | 24 u |

LEGENDE

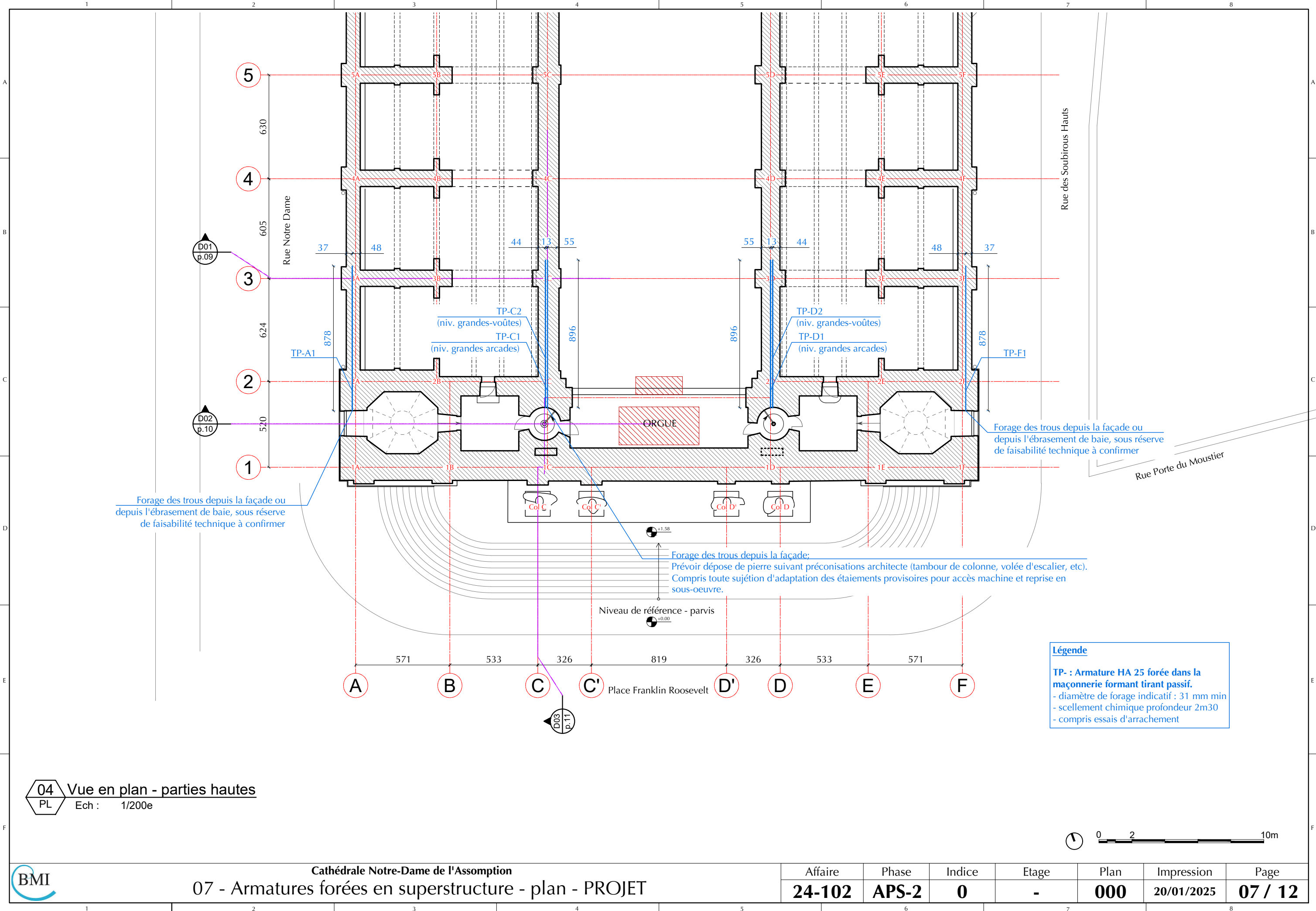
Passes à réaliser (repérage indicatif et non exhaustif)

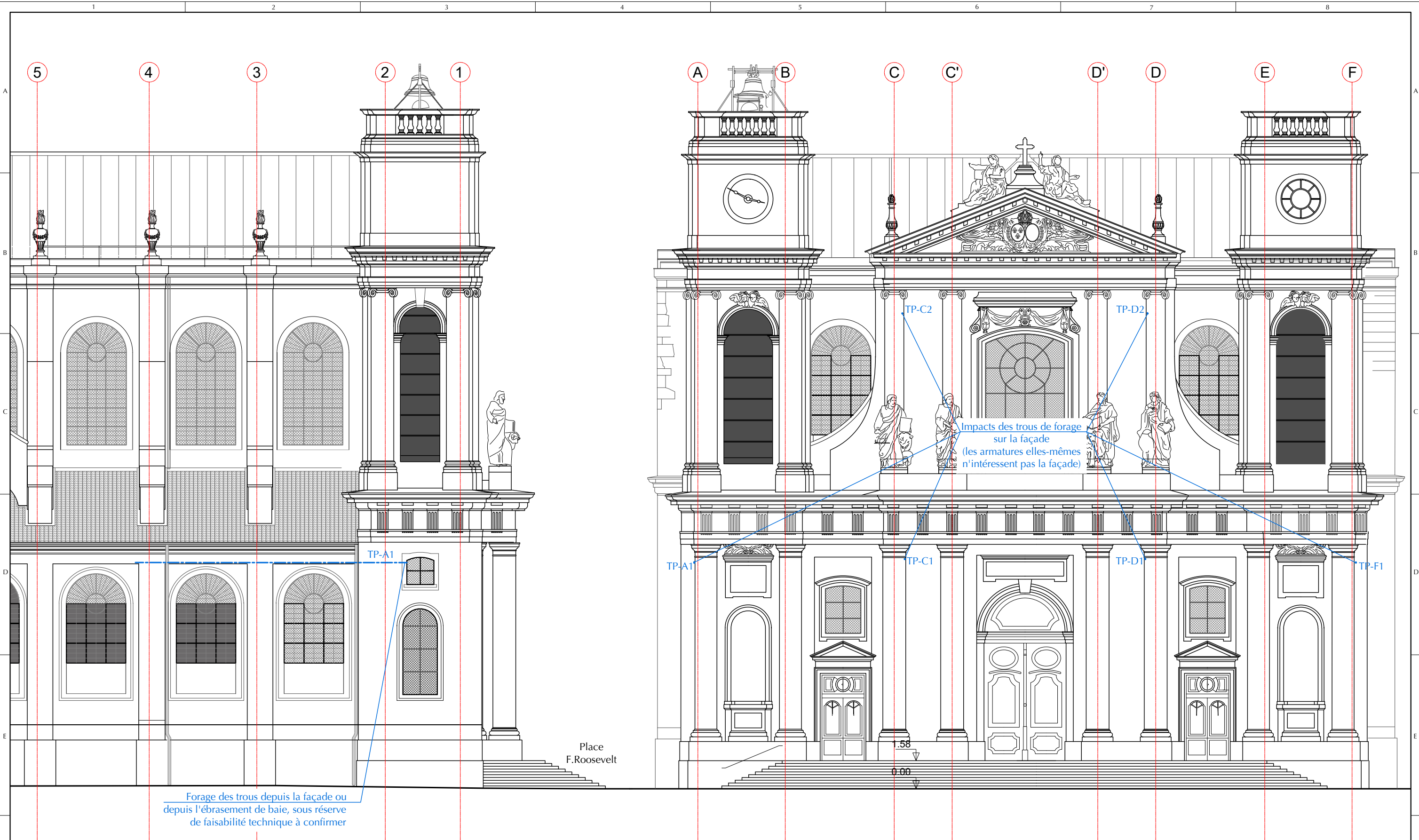
Micropieux

Se référer au tableau de la planche 05 pour les spécifications détaillées des micropieux.

- Micropieu de type III, Ø250 mm 140 unités
- Micropieu de type III, Ø200 mm 72 unités

- Compris chemisage systématique des micropieux dans les couches archéologiques (8m sur file 5; 4m ailleurs)
- Compris essais préalables et essais de contrôle





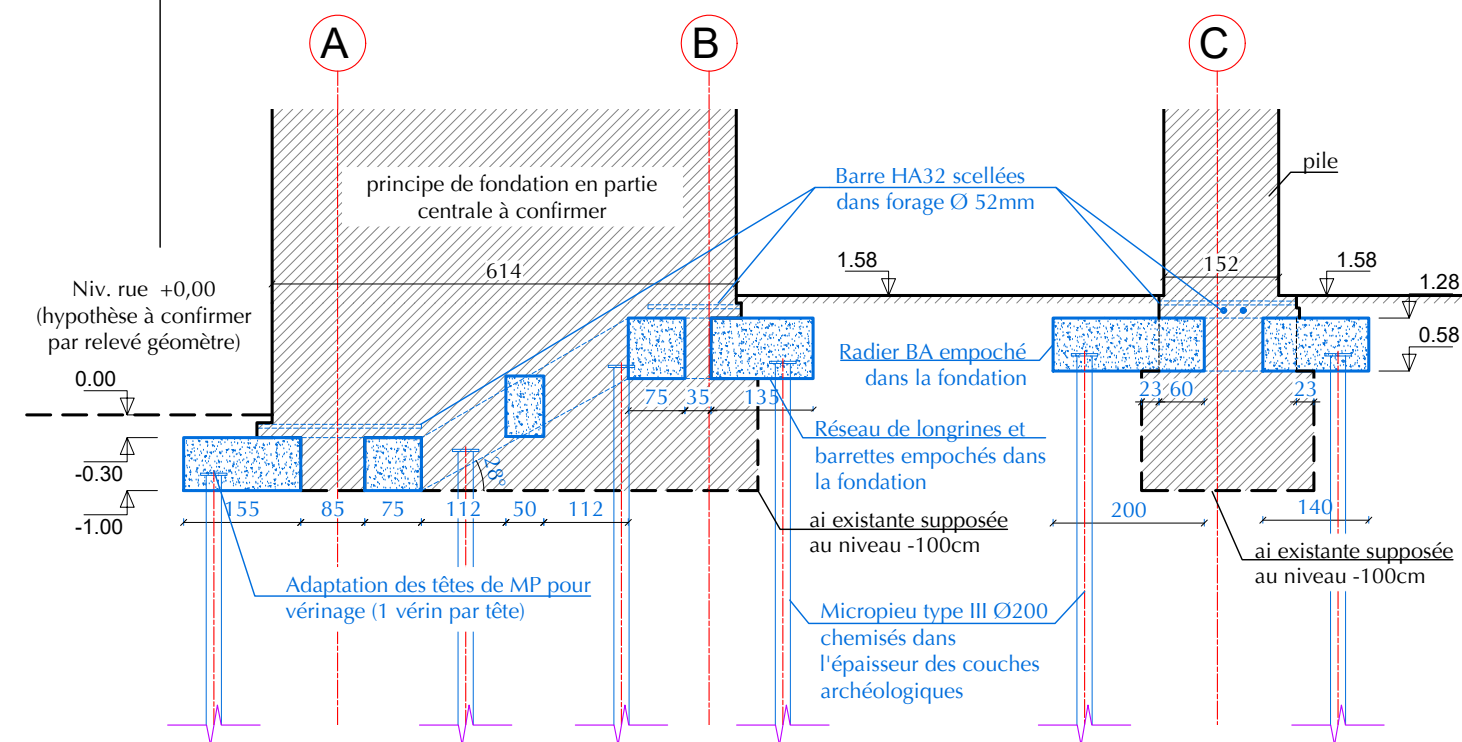
N Elévation Nord
ELE Ech : 1/200e

O Elévation - façade occidentale
ELE Ech : 1/200e

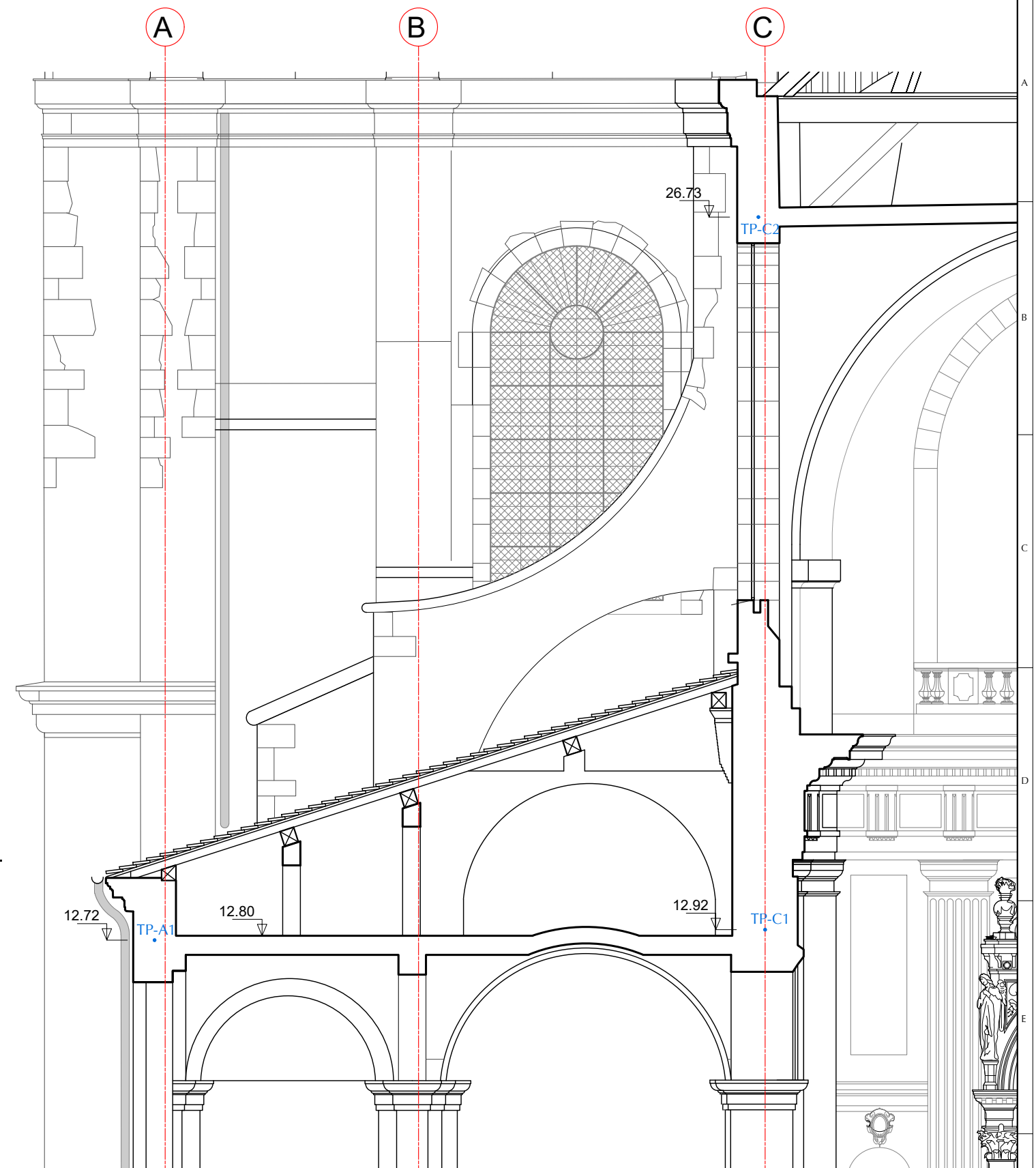
01 Détail D01 - Vue en coupe
DE Ech : -

Nota: principe à adapter à la déclivité des rues côtés Nord et Sud

- côté Nord: différence de niveau env. 40cm entre files 1 et 5
- côté Sud: différence de niveau env. 50cm entre files 1 et 5
(en montée vers file 5)



01-A Détail D01 - Zone A RSO
DE Ech : 1/100e



01-B Détail D01 - Zone B Tirants
DE Ech : 1/100e



