

# Projet Voûtes

Chantier scientifique Notre-Dame

GT Pierre, 07/06/2020

# Projet Voûtes

## Introduction

Pour tenir compte des besoins et demandes exprimés par la MOE, ainsi que des difficultés d'accès à l'édifice, le GT Pierre a entrepris de réorienter son approche de la cathédrale Notre-Dame.

Plutôt qu'une étude systématique de l'édifice fragmentée entre différentes spécialités, nous proposons, de manière plus pragmatique, une approche ciblée d'une partie de la cathédrale, à aborder sous l'éclairage croisé des spécialités réunies au sein du GT Pierre.

Il est souhaité que cette approche permette un travail commun avec le GT Structure (étude de fonctionnement mécanique sur une travée courante) et le GT Numérique (modélisation de la voûte), en articulation avec les expertises en cours au LRMH, par le biais d'une harmonisation des protocoles d'analyse.

Le projet d'étude concerne les travées doubles 3 et 4 de la nef (voûtes 29-32 et 25-28), qui ont le plus souffert de la chute de la flèche lors de l'incendie, et ont donc produit un lapidaire abondant. Le voûtain oriental de la double travée 3 et le voûtain occidental de la double travée 4 se sont effondrés, le voûtain nord-est de la travée 3 a été percé : le lapidaire récupéré au sol et entreposé sous les barnums peut fournir des informations directement utiles à la MOE.

## 1. OBJECTIFS EXPERTISE MOE

L'étude du lapidaire issu des effondrements (claveaux de l'arc doubleau entre les travées 3 et 4, pierres des voûtains) servira à dresser une carte d'identité technique de la voûte et de sa mise en œuvre, c'est-à-dire :

1. identification de la nature géologique et de l'origine des pierres, qui permettra une détermination de leur résistance élastique (opération entamée par le LRMH et à poursuivre de manière exhaustive sur tous les blocs récupérés).
2. étude des dimensions : permettra de déterminer si les blocs sont parallélépipédiques ou non, et donc si la courbure du voûtain est acquise par le matériau pierre ou bien par la variation d'épaisseur des joints ; étude du calibre ou module : permettra de percevoir l'utilisation (ou non) de calibres standardisés, et d'éventuelles variations de calibre en fonction des niveaux de la voûte.
3. étude des technologies de mise en œuvre (taille, pose) : permettra de distinguer les blocs restaurés des blocs médiévaux ; permettra aussi de reproduire dans la restauration les techniques de construction d'origine, dans la perspective d'une restauration de l'épiderme de l'intrados de la voûte conforme au dernier état connu ; permettra également de comprendre la chronologie de la mise en œuvre des voûtains (systèmes de coffrage), dans l'objectif de reproduire non seulement la surface pelliculaire sous sa forme finale, mais aussi le processus même de construction.
4. en complément des analyses qui n'ont pas pu être menées dans le temps du chantier, analyse de l'état des claveaux, dans la perspective d'un réemploi : certains claveaux peuvent avoir été abîmés par la chute, mais des traces de bûchage peuvent aussi provenir de la présence de couchis placés à l'extrados des nervures...
5. étude des liaisons entre blocs : analyse des restes de liant adhérent encore aux blocs, détermination de la nature des liants (mortier, plâtre, éventuellement ciment de Portland) dans l'hypothèse d'une restauration à l'identique, caractérisation/composition des mortiers, géométrie de l'épaisseur des joints (au cas où les blocs seraient parallélépipédiques), analyse de l'interface

pierre/liant (piquetage, etc.) et prise d’empreinte à l’aide d’un profilomètre laser si cela s’avère opportun.

6. analyse de l’épiderme des claveaux et des pierres des voûtains à l’intrados : traitement du surfacage, traces d’outils, granulométrie et rugosité des mortiers, traitement des joints (beurrés, tirés au fer...), caractérisation des couleurs par spectrophotomètre (référentiel CIELAB) ; permettra, dans la restauration, de reproduire un épiderme respectueux de l’aspect d’origine en termes de surface, d’effets (les microreliefs accrochant la lumière et créant des ombres), de couleur.
7. description des formulations (compositions) des mortiers utilisés ; description mécanique des mortiers de jointoiment grâce à la fabrication en laboratoire de copies des mortiers historiques (résistance en compression simple et en flexion, approche de la valeur du module de Young et du coefficient de Poisson, masses volumiques / taux d’humidité, variations dimensionnelles) ; caractérisation de ces propriétés au cours du temps en fonction de l’hygrométrie de l’environnement de conservation/de mise en œuvre (Hygrométrie relative proche de 95% et HR=50% par exemple) ; il s’agira de permettre, pour la restauration, d’évaluer précisément le temps nécessaire au séchage/durcissement des mortiers et d’évaluer le moment de décintrement des voûtes.
8. reconstitution du séquençage des claveaux de l’arc doubleau du XIIIe siècle séparant les travées 3 et 4, en retrouvant l’emplacement de chaque claveau au sein de l’arc à partir de photos HD antérieures à l’incendie et avec l’aide du projet Repérage (GT Numérique/LRMH), pour définir la position des blocs qui pourront être réemployés dans l’arc lors de sa reconstruction.

Ultérieurement, ou en même temps si les données numériques le permettent, l’étude des travées 3 et 4 autorisera, en complément, une caractérisation de la morphologie de la voûte :

1. description précise de la voûte et des irrégularités du bâti intégrant les dissymétries des élévations nord/sud, mesure de l’épaisseur de la voûte depuis les pieds de gerbe jusqu’à la clé.
2. description précise de l’appareil des voûtains (en particulier, étude de calibre / de module des blocs en fonction des niveaux de la voûte), étape essentielle pour l’élaboration d’un modèle numérique (GT Numérique) permettant des

simulations du fonctionnement mécanique de la voûte par la méthode des éléments discrets (GT Structure) et des simulations de résistance résiduelle (bureaux d'étude).

3. en vue de la modélisation de la voûte, détermination de la position des joints, opération qui ne peut se faire de manière automatisée à partir d'une vue scannographique (perturbation possible par l'existence de faux-joints).

Les informations attendues pourront aider directement la MOE dans les choix à opérer pour la restauration, et indirectement en fournissant au GT Structure des informations précises qui permettront d'élaborer des simulations fiables (modélisation par éléments discrets, en complément de la modélisation par éléments finis) du fonctionnement mécanique et de la résistance résiduelle de la voûte en fonction de l'agencement des blocs, en préalable à la restauration.

## 2. OBJECTIFS RECHERCHE

À partir de l'étude d'une partie réduite de la cathédrale, les objectifs sont de :

- réunir des informations détaillées sur la matérialité d'une cathédrale gothique : en effet, rares sont encore les cathédrales des XII<sup>e</sup> et XIII<sup>e</sup> siècles à avoir bénéficié d'investigations détaillées sous cet angle (Auxerre, Chartres) ; l'étude matérielle permettra également d'approcher, malgré l'absence de sources écrites (comptabilités, marchés, contrats, etc.), l'économie et l'organisation logistique d'un grand chantier de construction du Moyen Âge.
- mieux comprendre les techniques de mise en œuvre de l'époque gothique : taille et pose de la pierre (innovations technologiques, usage de modules standardisés, processus d'uniformisation/rationalisation du travail), fabrication des mortiers (optimisation du choix du type de liant et des compositions aux contraintes mécaniques et/ou environnementales ? – régularité des mélanges, y compris au cours du temps ?), modes de construction (types d'échafaudages utilisés, dispositifs de cintrage, etc.) ;
- mieux connaître les pratiques de restauration des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles, et préciser comment le *temps artisanal* des XII<sup>e</sup> et XIII<sup>e</sup> siècles voit ses technologies transformées et ses gestes, « rationalisés », à l'entrée dans la société industrielle : augmentation du nombre et densité des impacts, régularisation

des gestes, choix des matériaux (pierre adaptée au sciage ?), cales en bois (joints), ciselures...

- trancher des questions encore non résolues de chronologie : datation absolue (les voûtes datent-elles de la fin du XII<sup>e</sup> siècle, ou seulement d'après 1218 ?), datation relative (campagnes de construction, mise en place des voûtes par rapport à la pose de la charpente, décintrement/décoffrage des voûtes en fonction du degré de séchage et de durcissement des mortiers, simultanéité – ou non – du décintrement des voûtes et de la mise en compression des arcs-boutants...).
- comprendre, par une étude des élévations complémentaire de celle de la voûte, comment a été assuré l'équilibre d'un édifice dont la voûte, si elle date bien du XII<sup>e</sup> siècle, est portée d'un seul coup à la hauteur record de 32 m, alors que les édifices de la même génération (cathédrale de Sens, cathédrale de Laon) ne dépassent pas 24 m : rôles respectifs des tribunes et des arcs-boutants, choix des matériaux, méthodes de conception et gestes de chantier, etc.

Certaines de ces questions sont déterminantes pour cerner plus précisément la place qu'occupe Notre-Dame de Paris dans l'histoire de l'architecture gothique.

### 3. COMPOSITION DE L'ÉQUIPE

Membres de l'équipe (GT Pierre) :

- Élise Baillieux, maître de conférences, Université de Lille, IRHiS - UMR 8529
- Olivier de Châlus, doctorant, Université Paris 1, LAMOP - UMR 8589
- Andreas Hartmann-Virnich, professeur, Aix-Marseille Université, LA3M - UMR 7298
- Sarah Janvier, maître de conférences, Université de Lorraine, IJL - UMR 7198
- Jean-Michel Mechling, maître de conférences HDR, Université de Lorraine, IJL - UMR 7198
- Cédric Moulis, ingénieur d'études, Université de Lorraine, HisCant-MA - USR 3261
- Bruno Phalip, professeur, Université Clermont Auvergne, CHEC - EA 1001
- Arnaud Ybert, maître de conférences, Université de Bretagne Occidentale, CRBC - EA 4451

Coordination :

- Yves Gallet, professeur, Université Bordeaux Montaigne, Ausonius - UMR 5607.

#### 4. ACTIONS PROPOSÉES

- Coordination avec le GT Structure, le GT Numérique et le LRMH :
  - modélisation des voûtes 29-32 et 25-28 (GT Numérique). Contact : Antoine Gros. Réunions déjà tenues (en visio) le 29/04/2020 et le 20/05/2020. Entretien GT Pierre / GT Numérique le 15/05/2020.
  - étude du fonctionnement mécanique d'une travée courante (GT Structure). Contacts : Stéphane Morel (coord.) et Thomas Parent. Réunion en visio le 05/05/2020.
  - rencontre LRMH. Contacts : Aline Magnien, Thierry Zimmer, Véronique Vergès, Lise Leroux, Jean-Didier Mertz. Réunion en visio le 14/05/2020. Visite sur place programmée fin juin.
  
- à la levée du confinement, visite et expertise du lapidaire des barnums, en plusieurs passages (sur la base de 5 AR/participant du projet jusqu'à la fin 2020) :
  - examen général des blocs
  - étude archéologique des blocs et étude des mortiers (fiches d'analyse déjà élaborées, cf. exemple p. 8, protocole en cours d'harmonisation avec le LRMH).
  
- établissement d'un référentiel (visite de dépôts lapidaires d'Ile-de-France)
  
- organisation d'un séminaire de travail à la cathédrale de Laon (juillet 2020) :
  - participants : équipe du Projet Voûtes, GT Numérique (Antoine Gros), GT Structure (Stéphane Morel, Thomas Parent)
  - objectifs : étude d'une voûte contemporaine de celles de Notre-Dame de Paris. Au-delà de l'intérêt d'apprendre à travailler ensemble, l'objectif est de voir au plus près une voûte de la seconde moitié du XIIe siècle, dans toutes ses irrégularités, et de discuter collectivement de tous les aspects à prendre en compte dans son étude.
  - organisation : visite des parties hautes et des combles de la cathédrale, possibilité de visite des carrières locales, sur deux journées complètes.
  
- Projet « 24/32 » (intitulé provisoire) : sur 2020-2021 et les années suivantes, à des fins de comparaison entre la voûte de Notre-Dame, portée à une hauteur de 32 m, et les voûtes d'édifices contemporains, d'une hauteur standard de 24 m, modéliser et étudier le fonctionnement mécanique d'une travée courante de la

cathédrale de Sens (système d'équilibre avec arcs-boutants mais sans tribunes voûtées) et de la cathédrale de Laon (système d'équilibre avec tribunes voûtées mais sans arcs-boutants) avec le concours des GT Structure et Numérique. Réflexion sur la possibilité de répondre à un AAP de type ANR.



# Carte d'identité / Fiche descriptive Bloc

Site	Travée	N° d'inventaire	Lieu de conservation
Cathédrale Notre-Dame, Paris			

Type de la pierre	Nature	Etage géologique	Carrière
<input type="radio"/> Claveau <input type="radio"/> Pilier <input type="radio"/> Clef de voûte <input type="radio"/> Culot <input type="radio"/> Sommier <input type="radio"/> Corniche <input type="radio"/> Voutain <input type="radio"/> Parement <input type="radio"/> Chapiteau <input type="radio"/> Blocage <input type="radio"/> Autre :	<input type="radio"/> Calcaire <input type="radio"/> Grès <input type="radio"/> Granite <input type="radio"/> Schiste <input type="radio"/> Marbre <input type="radio"/> Autre :	<input type="radio"/> Danien <input type="radio"/> Priabonien <input type="radio"/> Serravalien <input type="radio"/> Selandien <input type="radio"/> Rupélien <input type="radio"/> Tortonien <input type="radio"/> Thanétien <input type="radio"/> Chattien <input type="radio"/> Messinien <input type="radio"/> Yprésien <input type="radio"/> Aquitainien <input type="radio"/> Zancéen <input type="radio"/> Lutétien <input type="radio"/> Burdigalien <input type="radio"/> Gelasien <input type="radio"/> Bartonien <input type="radio"/> Langhien <input type="radio"/> Pleistocène	<input type="radio"/> Site <input type="radio"/> Site <input type="radio"/> Site <input type="radio"/> Site <input type="radio"/> Site <input type="radio"/> Site

Dimensions en cm	Traces de taille					
longueur : <input style="width:100%;" type="text"/> largeur : <input style="width:100%;" type="text"/> hauteur : <input style="width:100%;" type="text"/>	<b>Equarrissement</b> <input type="radio"/> Chasse <input type="radio"/> Pic <input type="radio"/> Têtu <input type="radio"/> Polka	<b>Dégrossissage</b> <input type="radio"/> Pic <input type="radio"/> Broche <input type="radio"/> Ciseau (ciselure) larg. : <input style="width:50%;" type="text"/>	<b>Finition</b> <table style="width:100%;"> <tr> <td style="width:33%;"> <input type="radio"/> Laie  <input type="radio"/> Bretture  <input type="radio"/> Gradine  <input type="radio"/> Grain d'orge  <input type="radio"/> Boucharde  <input type="radio"/> Ripe           </td> <td style="width:33%;"> <input type="radio"/> oblique  <input type="radio"/> croisée  <input type="radio"/> chevron  <input type="radio"/> gerbe  <input type="radio"/> désordonnée  <input type="radio"/> parallèle           </td> <td style="width:33%;">           longueur : <input style="width:50%;" type="text"/>            largeur : <input style="width:50%;" type="text"/>            nb de dents : <input style="width:50%;" type="text"/>            larg. dents : <input style="width:50%;" type="text"/> </td> </tr> </table>	<input type="radio"/> Laie <input type="radio"/> Bretture <input type="radio"/> Gradine <input type="radio"/> Grain d'orge <input type="radio"/> Boucharde <input type="radio"/> Ripe	<input type="radio"/> oblique <input type="radio"/> croisée <input type="radio"/> chevron <input type="radio"/> gerbe <input type="radio"/> désordonnée <input type="radio"/> parallèle	longueur : <input style="width:50%;" type="text"/> largeur : <input style="width:50%;" type="text"/> nb de dents : <input style="width:50%;" type="text"/> larg. dents : <input style="width:50%;" type="text"/>
<input type="radio"/> Laie <input type="radio"/> Bretture <input type="radio"/> Gradine <input type="radio"/> Grain d'orge <input type="radio"/> Boucharde <input type="radio"/> Ripe	<input type="radio"/> oblique <input type="radio"/> croisée <input type="radio"/> chevron <input type="radio"/> gerbe <input type="radio"/> désordonnée <input type="radio"/> parallèle	longueur : <input style="width:50%;" type="text"/> largeur : <input style="width:50%;" type="text"/> nb de dents : <input style="width:50%;" type="text"/> larg. dents : <input style="width:50%;" type="text"/>				

Signe lapidaire	Levage	Pose	Scellement
<input type="radio"/> Marque de tâcheron <input type="radio"/> Marque de montage <input type="radio"/> Marque de pose <input type="radio"/> Marque de hauteur d'assise <input type="radio"/> Graffiti <input type="radio"/> Epure	<input type="radio"/> Trous de pince <input type="radio"/> Trou de louve <input type="radio"/> Tenons <input type="radio"/> Sans trace	<input type="radio"/> Délit <input type="radio"/> Stigmates de pose	<input type="radio"/> Trou d'agrafe <input type="radio"/> Trou de goujon <input type="radio"/> Abreuvoyer <input type="radio"/> Mortier

Liant associé	Moulure
Nature <input type="radio"/> Mortier <input type="radio"/> Ciment <input type="radio"/> Joint sec <input type="radio"/> Autre : <input style="width:50%;" type="text"/> Composition <input type="radio"/> Sable <input type="radio"/> Argile <input type="radio"/> Chaux <input type="radio"/> Charbon <input type="radio"/> Galet <input type="radio"/> Végétal <input type="radio"/> Terre cuite <input type="radio"/> Éclat de pierre <input type="radio"/> Incl. métalliques <input type="radio"/> Autre : <input style="width:50%;" type="text"/> Couleur <input style="width:50%;" type="text"/>	<input type="radio"/> Chanfrein <input type="radio"/> Bandeau <input type="radio"/> Réglet <input type="radio"/> Baguette <input type="radio"/> Tore circulaire <input type="radio"/> Tore en amande <input type="radio"/> Tore à bec <input type="radio"/> Tore à listel <input type="radio"/> Quart de rond <input type="radio"/> Scotie <input type="radio"/> Cavet <input type="radio"/> Doucine

Enduit initial	Décor sculpté
<input type="radio"/> Non <input type="radio"/> Oui Décor <input type="radio"/> Uni <input type="radio"/> Végétal <input type="radio"/> Faux joints <input type="radio"/> Autre <input type="radio"/> Indéterminé	<input type="radio"/> Feuille d'acanthé <input type="radio"/> Crochet <input type="radio"/> Autre décor végétal <input type="radio"/> Scène historiée <input type="radio"/> Grottesque <input type="radio"/> Animalier <input type="radio"/> Héraldique

Remploi	Ragrage	Observations
<input type="radio"/> Non <input type="radio"/> Oui, fonction primaire <input style="width:50%;" type="text"/> fonction secondaire <input style="width:50%;" type="text"/>	<input type="radio"/> Non <input type="radio"/> Oui <input type="radio"/> enduit : <input style="width:50%;" type="text"/> <input type="radio"/> outil : <input style="width:50%;" type="text"/>	

Date de rédaction  Rédacteur