

AAPG2023	ALTIOR	PRC
Coordonné par :	Yves GALLET	36 mois
Axe D.6 : « Études du passé, patrimoines, cultures »		

ALTIOR. Les voûtes de Notre-Dame de Paris et la quête de la hauteur dans l'architecture gothique en France, XII^e-XIII^e siècles

I. Contexte, positionnement et objectif(s) de la pré-proposition

- *Description des objectifs et des hypothèses de recherche*

Comment les architectes des cathédrales gothiques ont-ils réussi à construire des voûtes toujours plus hautes ? Comment sont-ils parvenus, en l'espace d'une génération, à passer d'une hauteur d'environ 24 m pour les plus grandes cathédrales des années 1130-1150, à une hauteur de 32 m à Notre-Dame de Paris, entreprise aux alentours de 1160 ? Et comment ont-ils, ensuite, hissé leurs voûtes à 36 m à la cathédrale de Chartres, 37 m à Bourges, 39 à Reims, 43 à Amiens, et jusqu'à 48 m à Beauvais vers 1260-1270 ?

Les historiens de l'architecture médiévale ont depuis longtemps *constaté* la réalité de cette conquête de la hauteur, véritable colonne vertébrale de l'aventure des cathédrales gothiques jusqu'en plein XIII^e siècle. Cependant, ils peinent encore à *expliquer* les procédés techniques et architecturaux qui l'ont rendue possible. Jusqu'à ces dernières années, en effet, la construction et le fonctionnement des voûtes des cathédrales gothiques restaient mal connus, en l'absence de modèles numériques permettant de simuler avec précision le comportement mécanique de structures maçonnées complexes, et en l'absence aussi de données matérielles consistantes : si, par le passé, ces cathédrales ont fait l'objet de nombreuses études formelles et stylistiques, elles ont rarement été abordées dans la matérialité de leur construction, sinon à l'occasion de chantiers de restauration accompagnés d'une étude archéologique du bâti.

De nombreuses questions restent ainsi en suspens. Y a-t-il une corrélation entre la plus grande hauteur des voûtes de Notre-Dame et leur extrême minceur ? Le progrès est-il plutôt dû au choix de matériaux plus adaptés ? Résulte-t-il de la mise au point d'arcs-boutants performants, ou d'autres facteurs ?...

L'incendie survenu à Notre-Dame de Paris le 15 avril 2019 et le chantier de restauration qui s'est ouvert ont replacé au cœur de l'actualité cette question des voûtes des grandes cathédrales gothiques : l'événement a de nouveau attiré l'attention sur la prouesse architecturale qu'elles représentaient, mais aussi sur la fragilité de ces structures et sur leur valeur patrimoniale. L'attente sociétale a imposé avec force cette question dans l'agenda des scientifiques qui étudient aujourd'hui Notre-Dame, comme dans les priorités des architectes chargés de sa restauration.

Le *Chantier scientifique* lancé par le CNRS et le Ministère de la Culture (MC) en parallèle à la restauration offre une opportunité unique d'accès au cœur des structures de la cathédrale, et a permis d'engager des investigations d'une ampleur et d'une précision inédites : c'est ce contexte qui invite, en s'appuyant sur le cas de Notre-Dame, à revenir sur la quête de la hauteur dans l'architecture gothique des XII^e-XIII^e siècles. C'est l'objectif que se fixent les chercheurs réunis au sein du projet ALTIOR, projet dont la force est d'allier SHS, Sciences pour l'Ingénieur (SPI) et sciences du numérique sur la base des technologies les plus avancées.

- *Positionnement du projet par rapport à l'état de l'art*

La hauteur croissante des grands édifices gothiques étant une caractéristique majeure de l'architecture des années 1130-1270, les historiens de l'art se sont depuis longtemps attachés à identifier les monuments clés et à préciser la chronologie du phénomène (Bony 1983 ; Sauerländer 1987 ; Kimpel et Suckale 1990).

Il a souvent été noté qu'au tournant des XII^e-XIII^e siècles, une série de mutations coïncidait avec l'avènement des cathédrales « géantes » du gothique classique, que sont Chartres, Bourges, Reims, Amiens ou Beauvais : systématisation de la voûte d'ogives quadripartite au détriment de la voûte d'ogives sexpartite, abandon du principe de l'épaulement du vaisseau central par des tribunes voûtées, complexité croissante des arcs-boutants. Depuis lors, le rôle et la portée de ces mutations n'ont pas été réinterrogés, alors que certaines d'entre elles, comme l'idée de la disparition des voûtes sexpartites après 1200, s'avèrent discutables (Ybert 2013), tandis que sur d'autres points, l'historiographie a fortement évolué : ainsi l'arc-boutant, longtemps considéré comme n'ayant été inventé qu'à la fin du XII^e siècle, c'est-à-dire une fois seulement les premiers monuments gothiques sortis de terre (Lefèvre-Pontalis 1919), est-il aujourd'hui regardé comme ayant été d'un usage courant dès les débuts de l'architecture gothique (Prache 1976, Henriot 1982, Plagnieux 1992). D'autres paramètres encore, par exemple l'épaisseur des voûtes, n'ont pas été investigués, alors que des moyens novateurs, en termes de mesure (géoradar, scan 3D) ou de modélisation, sont désormais disponibles.

AAPG2023	ALTIOR	PRC
Coordonné par :	Yves GALLET	36 mois
Axe D.6 : « Études du passé, patrimoines, cultures »		

Dans ce récit, Notre-Dame de Paris occupe une place originale. Elle inaugure la quête du gigantisme du gothique classique (Aubert 1920), mais la restitution de son premier système de contrebutement, disparu lors de transformations opérées vers 1300 (Davis 1998) puis de la restauration de Viollet-le-Duc au XIX^e siècle, continue de diviser les spécialistes : de simples contreforts (Erlande-Brandenburg 1991), des arcs-boutants à volées superposées (Prache 1976), à double volée (Bruzelius 1987), à volée simple (Murray 1998), certains spécialistes persistant par ailleurs à penser que l'arc-boutant ne fit son apparition à Notre-Dame qu'au moment de la construction de la nef (Clark et Mark 1987). Notre-Dame a également été, au moment de l'essor de l'informatique, un cas d'étude privilégié pour les premières tentatives de simulation numérique du comportement mécanique des voûtes et du fonctionnement des systèmes de contrebutement (Taylor et Mark 1982 ; Clark et Mark 1984). Leurs conclusions, fondées sur des modélisations rudimentaires liées aux capacités de calcul limitées des ordinateurs des années 1980, doivent cependant être réévaluées à l'aune des capacités des instruments actuels (Parent 2015).

- *Présentation de la méthodologie utilisée pour atteindre les objectifs du projet, description précise des méthodes envisagées en incluant la couverture disciplinaire (mono-trans-inter-disciplinaire)*

La compréhension des méthodes constructives ayant conduit à une élévation de la hauteur des voûtes des cathédrales gothiques convoquera SHS (histoire de l'architecture, archéologie du bâti, archéométrie), SPI (sciences des matériaux/génie civil, auscultation géoradar, calcul de structures) et sciences du numérique, en s'appuyant notamment sur une modélisation numérique performante des structures étudiées, basée sur la méthode des éléments discrets (MED). En effet, ce type de modélisation permet de simuler finement le caractère hétérogène et non linéaire d'une maçonnerie par la prise en compte de l'influence morphologique de l'appareillage ainsi que les interactions entre divers éléments structuraux, notamment celles entre la maçonnerie et les dispositifs constructifs comme les cintres. La MED est à la base des modélisations menées dans le projet ANR DEMMEFI (2021-2024) pour décrire l'état mécanique *actuel* (post-incendie) des voûtes de Notre-Dame de Paris. Les modélisations mécaniques seront donc re-paramétrées afin de comprendre l'état *médiéval* des structures de la cathédrale et leur mise en œuvre.

Le paramétrage se fera sur la base d'une documentation renouvelée, permettant d'établir une carte d'identité des voûtes de Notre-Dame et des structures qui en assurent la stabilité : étude critique des transformations apportées aux élévations et au contrebutement de la cathédrale depuis le XII^e siècle, caractérisation des matériaux des voûtes et de leur mise en œuvre, étude morphologique des voûtes, analyse du comportement mécanique. Les données seront acquises par une étude archéologique du bâti menée depuis l'échafaudage, au plus près du monument, par des campagnes de prélèvement pierre et mortier suivies d'analyses en laboratoire, et par une modélisation numérique des voûtes et de leur système de contrebutement par la MED. Ces données, dont la collecte est engagée depuis 2019, alimenteront une réflexion sur la construction des voûtes (dispositifs de cintrage, processus de décintrage, temps de prise des mortiers...) et sur le phasage du chantier gothique, suivie d'une validation des hypothèses par la modélisation.

Il est attendu que la simulation numérique fasse émerger les éléments pertinents pour mieux comprendre la construction des voûtes de Notre-Dame. Il s'agira ensuite de comparer les caractéristiques de ces voûtes à celles d'un corpus de grands édifices gothiques des années 1130-1270 (Sens, Bourges, Chartres, Amiens), dont la construction encadre celle de Notre-Dame de Paris et qui seront partiellement échafaudés dans les deux prochaines années. L'objectif sera de déterminer les principaux paramètres pouvant avoir joué un rôle significatif dans la conquête de la hauteur aux XII^e-XIII^e siècles : morphologie des voûtes d'ogives (sexpartites, quadripartites), géométrie et portée des voûtes, épaisseur des voûtains, densité de la pierre et résistance à la compression, qualité des mortiers, performance des systèmes de cintrage et de coffrage, efficacité du contrebutement, etc. Pour ces monuments sont prévus une étude historique et architecturale, une caractérisation des matériaux de construction, des campagnes de mesure de l'épaisseur de leurs voûtes par géoradar, une simulation numérique du comportement des voûtes et des dispositifs constructifs associés.

Cette démarche s'appuiera sur un découpage en *workpackages* (WP) décrit ci-après :

WP1 : Coordination (AUSONIUS, Bordeaux). Coordination scientifique et administrative.

WP2 : Notre-Dame de Paris et l'arc-boutant (IRHiS, Lille). Élaboration de propositions de restitution (2D, 3D) du système de contrebutement initial de Notre-Dame, appuyées sur une étude historiographique du monument élargie à l'architecture du premier art gothique autour de Paris et de l'Île-de-France.

AAPG2023	ALTIOR	PRC
Coordonné par :	Yves GALLET	36 mois
Axe D.6 : « Études du passé, patrimoines, cultures »		

WP3 : Étude archéologique des élévations à Notre-Dame de Paris (LA3M, Aix-Marseille). Relevés des modules, traces d'outils, tracés préparatoires, repentirs, reprises et restaurations en sous-œuvre ; couverture ortho-photographique partielle à haute définition ; cartographie des données archéologiques.

WP4 : Étude des matériaux pierre et mortier (IJL, Nancy). Caractérisation des matériaux de construction (pierre et mortier) à Notre-Dame de Paris : caractérisation pétrographique et mécanique des principaux faciès lithologiques, caractérisation physico-chimique et mécanique des mortiers. Étude comparative sur les cathédrales du corpus.

WP5 : Mesure de l'épaisseur des voûtes dans l'architecture gothique (Ausonius / METIS, Paris). Campagne de prises de mesures, par géoradar, d'épaisseur de voûtes dans une série cohérente d'édifices représentatifs des XII^e-XIII^e siècles. Les mesures seront contrôlées sur modèle numérique dans les cathédrales du corpus.

WP6 : Modélisations mécaniques (I2M, Bordeaux). Sur la base des données collectées dans les WP 2 à 5 et des scénarios constructifs discutés au sein du consortium, des simulations mécaniques seront réalisées. Elles s'appuieront sur des modèles géométriques générés à partir de nuages de points acquis par scanner 3D ou photogrammétrie et des relevés des épaisseurs des voûtes. L'impératif d'une représentation bloc à bloc pour rendre compte du caractère discret de la maçonnerie et des scénarios constructifs proposés requiert d'avoir recours à une expertise particulière qui fera l'objet d'une sous-traitance. La procédure décrite ci-dessus sera reconduite sur une travée courante des cathédrales de Sens, Bourges et Amiens.

WP7 : Synthèse et valorisation des résultats (ensemble du consortium). L'ensemble des données seront accessibles à la communauté scientifique, notamment via l'écosystème numérique du *Chantier scientifique* CNRS/MC Notre-Dame, adossé à la TGIR Huma-Num et à l'ERC n-Dame_Heritage. La restitution des résultats et leur valorisation se fera aussi par le canal habituel des communications et publications scientifiques, et par une communication adaptée à destination du grand public (conférences, publications, reportages), dans le respect des principes de la science ouverte.

- *Plus-value du projet en termes d'apport scientifique (objet, problématique, approche méthodologique), et plus-value en termes de production de connaissances*

Le projet ALTIOR porte sur la quête de la hauteur, un aspect fondamental de l'aventure des cathédrales gothiques qui n'a plus fait l'objet de travaux de recherche significatifs depuis les années 1980 : on anticipe par conséquent une forte plus-value en termes de production de connaissances. La méthodologie, parce qu'elle combine approche archéologique de la matérialité et modélisation numérique du comportement mécanique des structures, à l'aide des technologies les plus avancées mobilisées autour du chantier de Notre-Dame de Paris, sera également renouvelée, pour un corpus de cathédrales majeures de cette période en Europe. ALTIOR propose enfin une combinaison peu commune de spécialités relevant de différents domaines (SHS, SPI, sciences du numérique), dans une transdisciplinarité éprouvée puisqu'il fédère des spécialistes en pointe qui ont tous l'avantage d'être à l'œuvre depuis 2019 dans trois des groupes de travail (GT) du *Chantier scientifique* CNRS/MC Notre-Dame de Paris : GT Pierre, GT Structures et GT Données numériques. Autant qu'un gage de cohésion pour le consortium, cette situation augure d'un apport scientifique conséquent : mettre à l'épreuve les théories relatives à la construction des voûtes au Moyen Âge, échafauder des modèles mathématiques nouveaux qui pourront ensuite être étendus à d'autres monuments et objets patrimoniaux.

- *Positionnement du projet par rapport aux enjeux de recherche de l'axe scientifique choisi*

Le projet ALTIOR recouvre plusieurs des champs de recherche ou thématiques qui sont au cœur de l'axe D.6. Parce qu'il prend pour objet d'étude une cathédrale gothique, ce projet touche en premier lieu le domaine du patrimoine architectural ancien. Et parce qu'il porte sur les techniques de construction et de mise en œuvre, il concerne aussi l'histoire des techniques, l'archéologie des gestes, des savoir-faire et des métiers. Parce qu'enfin il aborde ces enjeux avec les outils d'aujourd'hui (de l'archéologie du bâti au calcul de structure et à la modélisation numérique, en passant par le géoradar et les sciences du numérique), il s'inscrit dans la thématique « constitution et exploitation de bases de données, de corpus documentaires, convergence des sources et approche croisée des sciences de l'érudition ».

II. Partenariat (consortium ou équipe)

Le coordonnateur scientifique, Yves Gallet, est Professeur des universités depuis 2015 à l'Université Bordeaux Montaigne, et rattaché au laboratoire AUSONIUS (UMR CNRS 5607). Spécialiste de l'histoire de l'architecture

AAPG2023	ALTIOR	PRC
Coordonné par :	Yves GALLET	36 mois
Axe D.6 : « Études du passé, patrimoines, cultures »		

gothique en France et dans les pays d'Empire, il a consacré sa thèse de doctorat à l'architecture gothique rayonnante au travers de la cathédrale d'Evreux, et son HDR à Matthieu d'Arras, premier maître d'œuvre de la cathédrale de Prague au XIV^e siècle. Depuis 2019, il est coordonnateur du Groupe de travail « Pierre » du Chantier scientifique CNRS / Ministère de la Culture pour la restauration de Notre-Dame de Paris.

Le consortium est composé des cinq partenaires suivants :

- **Ausonius – UMR CNRS 5607, Université Bordeaux Montaigne** : coord. Yves Gallet, PR d'Histoire de l'art médiéval, porteur du projet. Tâches : coordination générale ; histoire de l'architecture gothique.
- **IRHiS – UMR CNRS 8529, Université de Lille** : coord. Élise Baillieu, MCF d'Histoire de l'art médiéval. Tâches : histoire et historiographie de l'architecture gothique ; plan de gestion des données (PGD).
- **LA3M – UMR CNRS 7298, Aix-Marseille Université** : coord. Andreas Hartmann-Virnich, PR d'Archéologie médiévale ; Paul François, IR architecte-infographe. Tâches : relevés architecturaux, archéologie du bâti.
- **Institut Jean Lamour (IJL) – UMR CNRS 7198, Université de Lorraine** : coord. Jean-Michel Mechling, MCF HDR en Génie civil. Tâches : étude archéométrique des matériaux de construction (pierre et mortier).
- **I2M – UMR CNRS 5295, Université de Bordeaux** : coord. Stéphane Morel, PR de Génie civil, coordonnateur du Groupe de travail « Structures » au sein du *Chantier scientifique* CNRS/MC Notre-Dame ; Thomas Parent, MCF en Génie civil, porteur du projet ANR DEMMEFI. Tâches : modélisation numérique du comportement mécanique des structures maçonnées et dispositifs constructifs associés.

Le projet mobilisera en outre des collaborations scientifiques qui apporteront dans les différents WP une expertise complémentaire :

- **archéologie du bâti** : Bruno Phalip, PR ém., Université Clermont-Auvergne, USR 3550 CHEC ; Cédric Moulis, IE, Université de Lorraine, UR 1132 HisCAnt-MA
- **caractérisation de la pierre** : Xavier Brunetaud, MCF HDR, et Kevin Beck, MCF HDR, Université d'Orléans, UR 7494 LaMé ; Lise Leroux, géologue, LRMH, Ministère de la Culture ; Jean-Pierre Gély, géologue HDR, chercheur associé au LAMOP, UMR 8589 Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne
- **prospections géoradar** : Christian Camerlynck, MCF, Sorbonne Université, UMR 7619 METIS
- **histoire de l'art gothique** : Arnaud Ybert, MCF, Université de Bretagne Occidentale, EA 4451 CRBC
- **modélisation numérique** : Frédéric Dubois, IR CNRS, UMR 5508 LMGC, Université de Montpellier ; El Mustapha Mouaddib, PR, MIS (Modélisation, Information & Systèmes), Université Picardie Jules Verne.

III. Bibliographie

- [1] AUBERT Marcel, *Notre-Dame de Paris. Sa place dans l'histoire de l'architecture du XII^e au XIV^e siècle*, Paris, 1920
- [2] BONY Jean, *French Gothic Architecture*, Berkeley, 1983
- [3] BRUZELIUS Caroline, « The Construction of Notre-Dame in Paris », *The Art Bulletin*, 1987, 540-569
- [4] CLARK William et MARK Robert, « The First Flying Buttresses: A New Reconstruction of the Nave of Notre-Dame de Paris », *The Art Bulletin*, 1984, 47-65
- [5] DAVIS Michael, « Splendor and Peril. The Cathedral of Paris, 1290-1350 », *The Art Bulletin*, 1998, 34-66
- [6] ERLANDE-BRANDENBURG Alain, *Notre-Dame de Paris*, Paris, 1991
- [7] FANTIN Mathias, *Étude des rapports entre stéréotomie et résistance des voûtes clavées*, thèse de doctorat, Université de Paris Est, 2017
- [8] HENRIET Jacques, « La cathédrale de Sens au XII^e siècle », *Bulletin Monumental*, 1982, 81-174
- [9] KIMPEL Dieter et SUCKALE Robert, *Gotische Architektur in Frankreich 1130-1270*, Munich, 1985 (trad. fra. 1990)
- [10] LEFEVRE-PONTALIS Eugène, « L'origine des arcs boutants », *Congrès Archéologique de France*, 1919, 367-396
- [11] PARENT Thomas, *Méthodologie de diagnostic de structures maçonnées anciennes*, thèse de doctorat, Université de Toulouse 3, 2015
- [12] PLAGNIEUX Philippe, « Les arcs-boutants du XII^e s. de l'église de Domont », *Bulletin Monumental*, 1992, 209-222
- [13] PRACHE Anne, « Les arcs boutants au XII^e siècle », *Gesta*, 1976, 31-42
- [14] SALET Francis, « Notre-Dame de Paris. État présent de la recherche », *Sauvegarde de l'Art Français*, 1982, 89-113
- [15] SANDRON Dany et TALLON Andrew, *Notre-Dame de Paris. Neuf siècles d'histoire*, Paris, 2019
- [16] SAUERLÄNDER Willibald, *Le monde gothique. Le Siècle des cathédrales 1130-1270*, Paris, 1987
- [17] TAYLOR William et MARK Robert, « The Technology of Transition: Sexpartite to Quadripartite Vaulting in High Gothic Architecture », *The Art Bulletin*, 1982, 579-587
- [18] YBERT Arnaud, *Évolution technique et stylistique de la voûte d'ogives en Picardie de 1140 à 1300*, thèse de doctorat, Université Picardie Jules Verne, 2013.