

Cathédrale de Beauvais: les accidents structurels des XIII^e et XVI^e siècles eurent-ils une origine géotechnique? Partie 2: Accidents structurels et rôle de la géotechnique

Beauvais' cathedral: did the 13th and 16th centuries structural failures have a geotechnical cause? Part 2: Structural failures and role of geotechnics

J.D. Vernhes*

Institut Polytechnique UniLaSalle, Beauvais, France

P. Renault

BMI, Alfortville, France

Y. Zotna

Conservation régionale des monuments historiques, Amiens, France

*jean-david.vernhes@unilasalle.fr

RÉSUMÉ: La cathédrale Saint-Pierre de Beauvais est la plus haute de voûte jamais construite au Moyen Age. Elle connut deux accidents structurels célèbres, dans le chœur en 1284 puis à la croisée du transept en 1573. En 2023 coexistent encore plusieurs types d'explications pour donner une origine à ces accidents, avec des causes structurelles, naturelles ou géotechniques. On montre que l'origine géotechnique n'est très vraisemblablement pas à retenir pour 1284. Elle peut être invoquée pour 1573, mais à titre secondaire. Le texte qui suit est la seconde partie de l'article.

ABSTRACT: Saint Peter's cathedral in Beauvais (France) has the highest vaults ever built during the Middle Ages. It was affected by two famous structural accidents, in the choir in 1284, and later at the transept crossing, in 1573. In 2023, there are still several explanations to account for what happened then, structural or natural causes, or geotechnical ones. We here show that nothing appears to justify a geotechnical origin in the 1284 collapse. It may be considered in 1573, nevertheless as a secondary cause. The following text is the second part of the article.

Keywords: Géotechnique et patrimoine; architecture gothique; fondations superficielles.

1 INTRODUCTION

Cet article est la deuxième partie d'un tout indissociable. Dans la première partie (Vernhes et al., 2024a), on trouvera tous les éléments de contexte nécessaires à l'argumentation utilisée dans les lignes qui suivent: éléments historiques, architecturaux, géologiques, hydrogéologiques et géotechniques. Nous conseillons donc au lecteur d'avoir lu le premier article avant d'aborder celui-ci.

2 ACCIDENT DE 1284

2.1 Cause d'après les sources

Il existe trois types d'interprétations pour expliquer l'effondrement partiel de voûtes du chœur en 1284, deux en partie haute de l'édifice, une en fondation.

Il s'agit pour la première de la rupture de colonnettes monolithes solidaires d'une maçonnerie appareillée dont les mortiers auraient progressivement tassé, provoquant la rupture d'arcs-boutants (Viollet-le-Duc, 1858-1868, T4, pp. 177-181; Heyman 1995). La deuxième invoque la mise en résonnance du système culée/arc-boutant au même endroit, et particulièrement au niveau de la pile dite n° 19 (Figure 1) causée par un vent en rafale (Lambole, 1993, sur la base d'un rapport CEBTP de 1987; Murray, 2000).

La troisième suggère l'existence d'un tassement différentiel lent dans les fondations (Lambole, 1993, Heyman 1995), sans localisation précise du phénomène cependant. Pour justifier cela, Lambole s'appuie sur des constats de fissurations dans les soubassements, mais qu'il est allé chercher au transept, où se trouve une fausse crypte, et non dans le chœur. Heyman considère, lui, que la durée de stabilité de 12 ans des parties hautes ainsi qu'une analyse structurelle

théorique exonèrent l'accident de 1284 d'une cause principalement structurelle; d'où il introduit l'idée d'une consolidation du sol en fondation dont la durée typique serait d'une douzaine d'année, celle-ci produisant l'accident.

2.2 Origine géotechnique en 1284?

Tout concours à penser que l'on consacra aux fondations de la cathédrale au XIII^e siècle les moyens nécessaires pour trouver « le bon sol », à une profondeur devenue considérable du fait de la surélévation de plusieurs mètres du niveau de la ville.

Des tassements de plusieurs centimètres pour des pressions estimées au sol de l'ordre de 5 bars (0,5 MPa) se produisirent en cours de travaux, possiblement différentiels, mais compensés par la lenteur des travaux, le suivi géométrique de l'œuvre et la souplesse de toute structure maçonnée. Une fois les travaux terminés en 1272, les tassements postérieurs

restèrent sans doute limités car ni les alluvions anciennes, ni la craie altérée ne se présente comme susceptible de consolidation du fait de leur perméabilité élevée.

L'accident de 1284 est bien documenté comme s'étant produit dans les parties hautes des travées droites du chœur, structurellement les plus vulnérables par rapport au chevet ou à la travée centrale de transept déjà en place. Dès lors, l'hypothèse indémontrable d'un tassement différentiel de fluage venant à bout des systèmes culée-arc-boutant de ces seules travées droites, mais pas du reste de la Haute Oeuvre, est sans grand intérêt.

Qui plus est, on remarquera aussi que les modifications structurelles de 1284 à 1340 n'ont pas inclus de reprises en sous-œuvre d'après l'analyse du bâti effectuée par Murray (2000), et au contraire, ont entraîné un alourdissement de la maçonnerie qui devait bien se reporter sur les fondations existantes, donc jugées dignes de confiance.

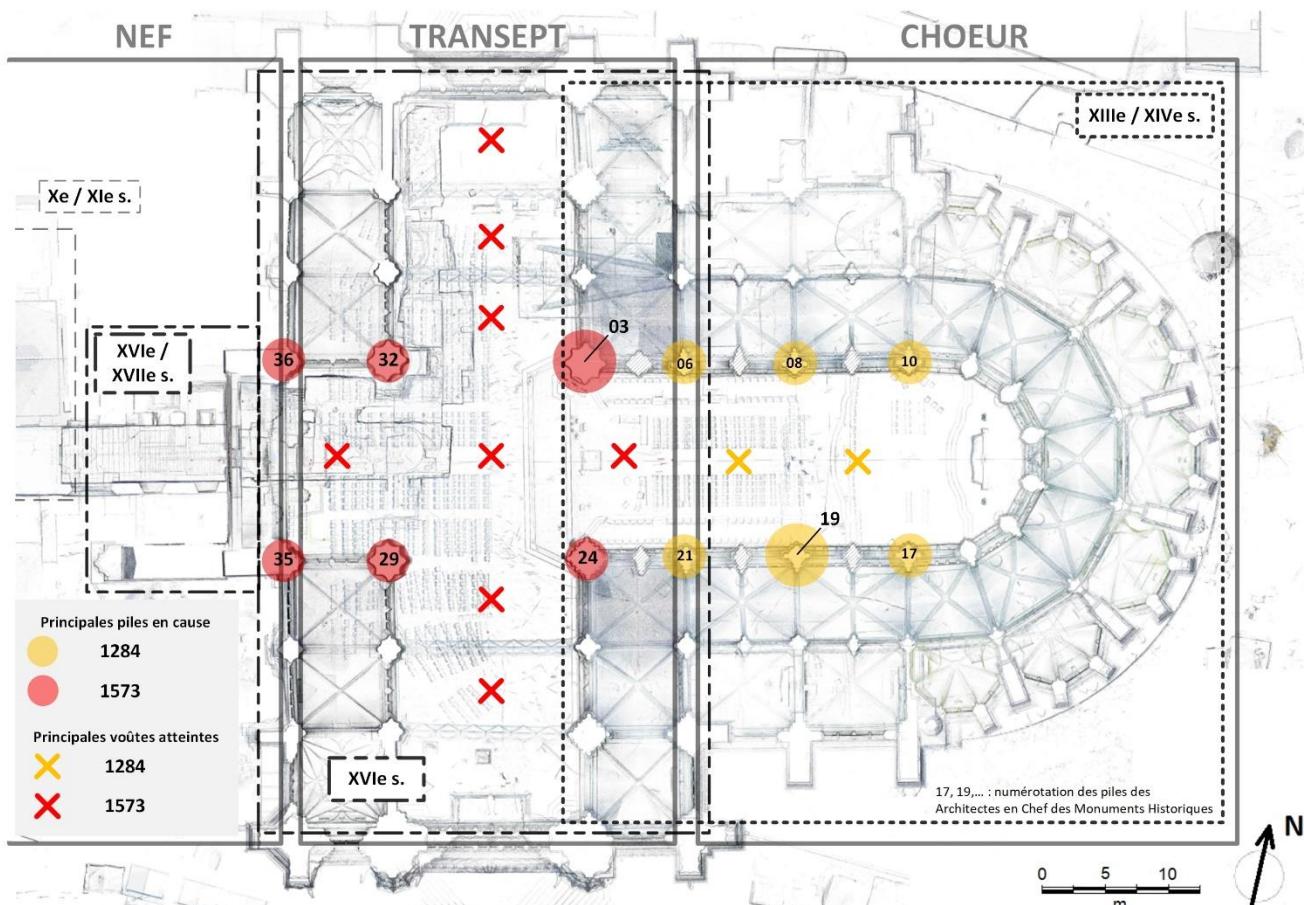


Figure 1. Localisation d'éléments liés aux accidents de 1284 et 1573 (fond de plan Lidar : Martin, 2021; habillé).

Du reste, l'explication la plus simple pour comprendre l'accident consiste à lire en creux les travaux qu'il entraîna : un raidissement généralisé des parties hautes atteintes. Elles s'étaient avérées trop souples, non pas en soi, mais en raison de la décision

en cours de chantier de surélever de plusieurs mètres les voûtes de la cathédrale. Cette décision dû être prise au mépris des dimensions choisies pour les parties sous-jacentes, des proportions éprouvées, devenues inadaptées à contrer durablement le bras de levier

exercé par les nervures des voûtes quadripartites. Des déplacements somme toute très faibles mais permanents purent aboutir après quelques années à une perte de pression entre les claveaux des nervures des voûtes et ce qui s'en suivit.

Ainsi, nous ne souscrivons pas à l'hypothèse d'une origine géotechnique dans l'accident de 1284.

3 ACCIDENT DE 1573

3.1 Cause d'après les sources

La première cause de l'accident de 1573 évoquée dans les sources utilisées est celle d'un basculement de la tour-lanterne entraînée par un défaut de contrebutement à l'ouest, où la nouvelle nef n'était pas encore construite. La tour tout entière portait sur les quatre piliers élancés de la croisée du transept (Figure 1). La charge totale de la tour était de 10 000 tonnes environ, piliers porteurs compris. La charge en pied des piliers porteurs était alors environ trois fois plus importante qu'aujourd'hui. Aussi, cette absence de contrebutement entraînait une poussée au vide des niveaux voûtés et un lent déversement, tandis que la grande hauteur libre des piliers ainsi que le chargement colossal qu'elle subissaient pouvaient provoquer leur flambement.

Bien que la prise au vent de la tour lanterne et sa flèche soit non négligeable, les témoignages écrits des mois et même années précédant l'accident concordent à décrire un mécanisme de ruine lent et visible, donc indépendant du vent, assimilable par nature à une charge instantanée.

La cause première est donc une charge excessive, mais deux sources donnent explicitement un rôle aux fondations dans l'accident, Lamboley (1993) et Heyman (1995); le premier à travers l'insuffisance des fondations, se traduisant par des tassements différentiels prenant leur origine dans la craie molle rencontrée jusqu'à « 24 m de profondeur »; le deuxième évoquant un phénomène de poinçonnement des piliers du carré du transept, avec des tassements, de consolidation encore, de 20 à 30 centimètres d'amplitude, sans plus de détail sur le mécanisme et son lien avec les descriptions de l'époque.

3.2 Origine géotechnique en 1573?

Pour vérifier le rôle des fondations dans l'accident, on peut faire l'hypothèse que les déformations de la structure actuelle, héritées de l'accident et mesurables encore aujourd'hui, donnent la réponse. Or, certaines de ces mesures ont été faites en 1975, 1983 et 1985 et

exploitées par l'Architecte en Chef des Monuments Historiques J.-L. Taupin en 1992 (Lamboley, 1993).

Compte-tenu de la souplesse de la structure, il aurait fallu des tassements différentiels pluri-décimétriques et postérieurs à 1569 pour provoquer le basculement évoqué, traduits par des variations de hauteurs des bases de piliers (36/32/03 et 35/29/24, Figure 1) qu'à ce jour aucune source n'atteste. En revanche, une rotation d'un pilier ou la rotation combinée de piliers dans l'axe ouest-est (Figure 2), même faibles, serait plus lourde de conséquences, d'une part parce que celle-ci entraînerait un excentrement des charges par rapport à l'axe de symétrie de leur support, avec possible divergence du phénomène, d'autre part parce que, comme en 1284, ces mouvements joueraient considérablement sur l'état mécanique des très hautes voûtes et nervures des trois tambours superposés, avec, à la première rupture, des conséquences en chaîne.

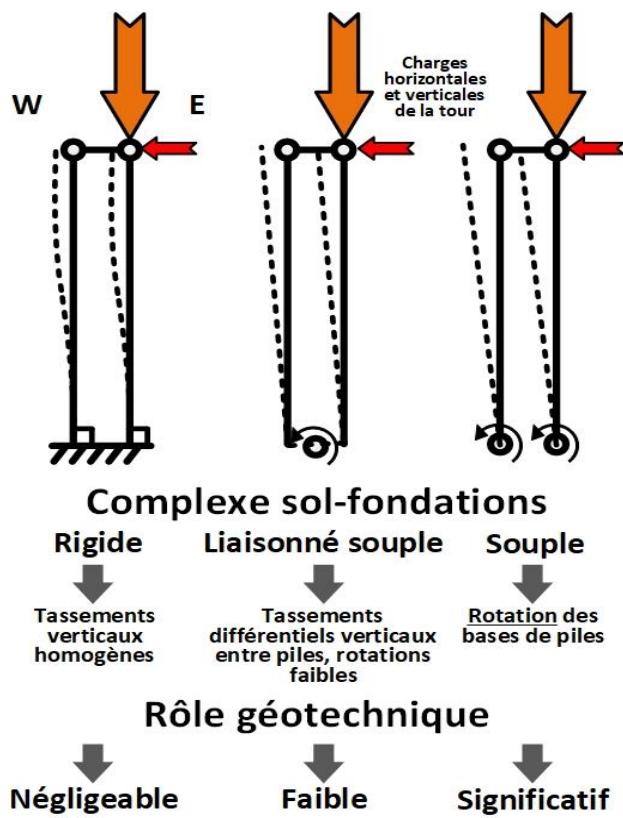


Figure 2. Situations mécaniques théoriques et simplifiées des piles de la travée centrale ouest du transept (voir localisation dans la Figure 3a, cadre en pointillés), soumises aux charges de la tour disparue.

Cela étant posé, la verticalité des bases de piliers attesterait de l'absence de rôle géotechnique dans l'accident de 1573, celui-ci se produisant par le fléchissement des piliers en section courante, singulièrement dans les parties les plus hautes.

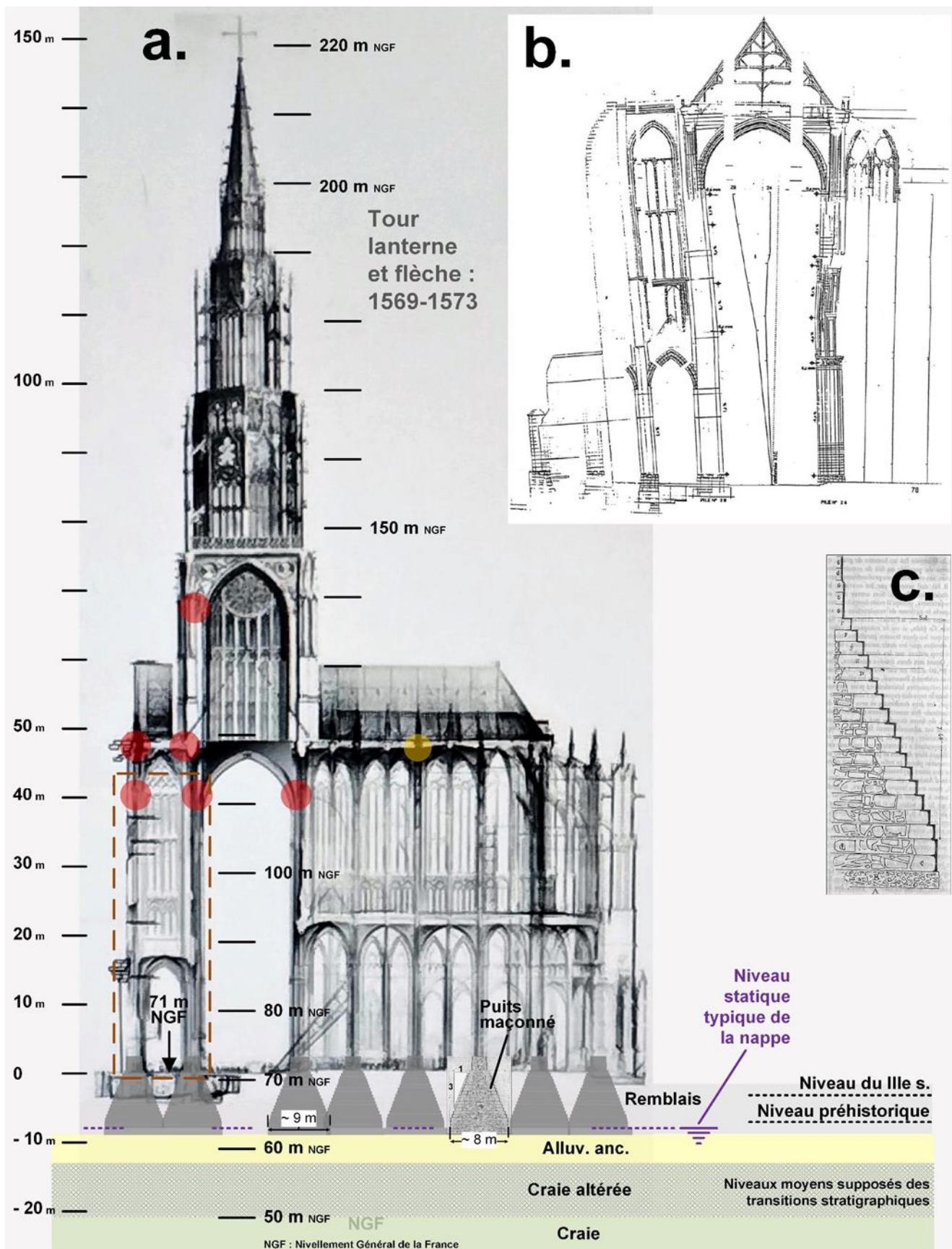


Figure 3. (a.) Coupe axiale ouest-est de la cathédrale avec évocation de sa tour lanterne et de ses fondations; habillée (fond Lidar : Martin, 2021; dessin de la tour : Woillez, E., v. 1838); (b.) Déformées restituées par Taupin, 1992, sur la hauteur des piles sud du carré du transept; (c.) coupe verticale d'un puits de fondation maçonné, observé par E.-E. Viollet-le-Duc à la cathédrale d'Amiens (op. cit., T4, p. 176).

L'extrait de la restitution avec exagération horizontale de Taupin en 1992 montre une combinaison des deux situations envisagées (Figure 3b), avec une rotation visible depuis la base des piliers occidentaux, amplifiée par des déformations des maçonneries elles-mêmes, notamment à la base du triforium. C'est jusqu'à 35 cm de déplacement à 40 m de hauteur qui ont été mesurés, soit une rotation de l'ordre de 1 %.

Nous avons vu précédemment que les fondations, certainement de grande largeur à la base (5 mètres et plus), reposent sur le « bon sol » des alluvions anciennes dont l'épaisseur est en moyenne moindre (4 mètres). Les contraintes diffusées concernent donc de façon significative la craie altérée sous-jacente, dont les quelques mégapascals de module de rigidité typique donnent à l'ensemble fondation / sol support un comportement suffisamment souple pour rendre compte des rotations à la base des piliers. En effet, un excentrement de charge et le développement d'une pression non uniforme sous la fondation entraînerait aisément quelques centimètres de tassement supplémentaires sur le côté plus chargé, ce qui se traduit bien par une rotation de l'ordre du pourcent.

Soulignons cependant avec insistance que les fondations de cette partie de la cathédrale et le sol sur lequel elles reposent ne sauraient être tenus pour responsable de l'accident de 1573. Elles en ont juste, possiblement, accéléré la survenue.

4 CONCLUSIONS

Nous pouvons donc conclure de cet inventaire d'informations disponibles que les accidents structurels de 1284 et 1573 à la cathédrale de Beauvais n'ont pas une origine géotechnique. Nous avons cependant montré que, au XVI^e siècle, l'ensemble fondations / sols porteurs a potentiellement pris une part notable dans le « mécanisme de ruine », contrairement au cas du XIII^e siècle.

Aussi, ces conclusions permettent d'attirer l'attention sur le remarquable travail géotechnique réalisés par les maîtres-maçons des temps considérés,

aussi bien dans la prise en compte du terrain, non exempt de risques, que des formidables descentes de charge qu'il allait subir pour de nombreux siècles.

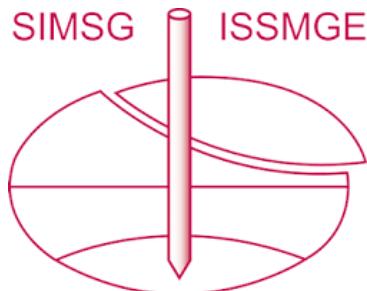
REMERCIEMENTS

Que soit remercié Jean-François Madre, secrétaire de l'Association Beauvais Cathédrale et auteur en 2023 d'un opuscule sur les sculptures figuratives du chœur, qui a joué un rôle au point de départ de cet article. Merci également à Fabrice Reutenuer et François Haaz, du Service Archéologique municipal de Beauvais, pour leur communication de données altimétriques des niveaux archéologique et géologique au droit de l'exèdre à l'est de la cathédrale.

RÉFÉRENCES

- Heyman, J. (1995). *The stone skeleton. Structural engineering of masonry architecture*. Cambridge University Press, Cambridge, England.
- Lamboley Bureau d'études [auteur non précisé] (1993). Beauvais, cathédrale Saint-Pierre, diagnostic technique et pilotage des investigations, Lyon, France, rapport D724P02.
- Martin, R. (2021). Beauvais, cathédrale Saint-Pierre, Restauration des toitures et des voûtes, dépose des étalements, Dossier d'Avant-Projet Sommaire. Plans et élévations, élaboration Martin, R. (ACMH); données brutes Lidar : El Mustapha, M. (Université de Picardie).
- Murray, S. (2000). Le chœur gothique, In : *La cathédrale Saint-Pierre de Beauvais, architecture, mobilier et trésor*, AGIR-Pic. (asso. éd.), Amiens, France, pp. 14-19.
- Taupin, J.-L. (1992). Diagnostic technique [de l'Architecte en Chef des Monuments Historiques], 1^{re} phase.
- Vernhes, J.-D., Renault, P. et Zotna, Y. (2024a). Cathédrale de Beauvais : les accidents structurels des XIII^e et XVI^e siècles eurent-ils une origine géotechnique ? Partie 1 : contexte historique et naturel. *Proceedings of the XVIII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 2024*. Lisbon, Portugal. ISBN 978-9935-9436-1-3.
- Viollet-le-Duc, E.-E. (1858-1868). *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^e au XVI^e siècle*. 10 tomes. B. Bance, Paris (T1 à T6), A. Morel, Paris (T7 à T10).

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 18th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering and was edited by Nuno Guerra. The conference was held from August 26th to August 30th 2024 in Lisbon, Portugal.