

Cathédrale de Beauvais: les accidents structurels des XIII^e et XVI^e siècles eurent-ils une origine géotechnique? Partie 1: Contexte historique et naturel

Beauvais' cathedral: did the 13th and 16th centuries structural failures have a geotechnical cause? Part 1: Historical and natural context

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 connaît 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 première 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 first part of the article.

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

1 INTRODUCTION

La cathédrale Saint-Pierre de Beauvais (Figure 1) est la plus haute église gothique du monde. Elle marque l'apogée de ce style architectural qui a vu le jour en France dans les années 1140. Eugène Viollet-le-Duc, connu pour son œuvre de restauration de Notre-Dame de Paris au XIX^e siècle, qualifia la cathédrale beauvaisienne de « Parthénon de l'architecture française » (Viollet-le-Duc, 1858-1868, T1, p. 71).

Cependant elle apparaît aujourd'hui comme un monument à la fois composite et inachevé. Cent soixante ans séparent la fin des travaux du chœur et le commencement du transept et sa nef gothique n'a jamais été construite (Murray, 2000). L'interruption des travaux comme leur inachèvement trouvent leur explication dans deux accidents structurels graves. Leur origine fait, encore à notre époque, l'objet de discussions qui incorporent parfois un mécanisme géotechnique (Renault, 2021).



Figure 1. Vue de la cathédrale Saint-Pierre de Beauvais depuis le sud-est, février 2014 (ph. J-D Vernhes).

La cathédrale de Beauvais a bénéficié depuis les années 1980 d'une surveillance car des fissures étaient apparues dans certaines voûtes.

L'objectif de cet article en deux parties n'est néanmoins pas de statuer sur son état actuel mais de tirer parti des données récemment collectées, à la faveur des diagnostics, pour étudier rétroactivement le rôle du système de fondations de l'édifice dans les deux accidents. Cette première partie de l'article porte sur les éléments de contexte utile à la compréhension du problème. Dans la deuxième partie de l'article (Vernhes et al., 2024b) sont exposés l'analyse géotechnique et une proposition de réponses argumentées aux questions posées. Les deux parties ainsi décrites forment un tout considéré comme indissociable.

2 DONNÉES GÉNÉRALES

2.1 Brève histoire des travaux

Dans cette partie, les sources suivantes sont exploitées pour les données générales : Viollet-le-Duc (1858-1868), Leblond (1926), Murray (2000), Bonnet-Laborderie (2006) et Meunier et Bonnet-Laborderie (2006).

2.1.1 Avant 1225: les premières cathédrales

Le centre épiscopal de Beauvais fut occupé dès le Haut Moyen Age par des églises cathédrales. Autour de l'An Mil celle qui existait fut reconstruite en style pré-roman, avec des pastoureaux calcaires (lutétiens) de remploi du rempart gallo-romain. Son transept (?) et son chœur furent agrandis au XII^e siècle mais disparurent par la suite.

En 1225, un incendie endommageait le chœur roman. L'évêque Milon de Nanteuil décida alors de le reconstruire en s'inspirant des plus grandes réalisations de son époque, dans le style *français* (gothique, alors *rayonnant*), tout en conservant provisoirement la nef et le transept romans pour le culte. L'ensemble des trois travées de la nef qui reste aujourd'hui est appelé Basse Œuvre (Figure 2).

2.1.2 1225-1340: nouveau chœur et accident

Les premiers travaux portèrent sur des éléments orientaux du transept, dont l'emprise au sol présentait un intérêt pour stabiliser au mieux l'extrémité ouest des futures parties hautes. La craie dure à silex (coniacienne à campanienne) de la carrière Saint-Pierre près de Frocourt et Bongenoult, à proximité de Beauvais, fut exploitée.

Le système de fondations utilisé n'est pas connu avec précision mais de grands terrassements préparatoires furent nécessaire pour atteindre le « niveau de bon sol » et y construire des puits à base élargie, pratique la plus courante pour les

constructions géantes du Moyen Age, selon Viollet-le-Duc. Le même affirme que les maîtres d'œuvre « (...) ne manquaient jamais de relier entre eux tous les murs et massifs en fondation ; c'est-à-dire que, sous un édifice composé de murs et de piles isolées, par exemple, ils formaient un gril de maçonnerie sous le sol, afin de rendre toutes les parties des fondements solidaires. » (op. cit., T5, p. 525).

Dans l'emprise des futurs chœur et partie est du transept, le remblai de comblement de l'excavation fut élevé environ deux mètres au-dessus du niveau de la rue au XIII^e siècle de telle sorte que leur dallage allait reposer sur un terre-plein.

Dans les années 1250, les deux premiers niveaux de construction étant achevés (grandes arcades et triforium), l'évêque Guillaume de Grès décida apparemment pour le troisième et dernier étage de l'édifice de sortir des proportions prévues originellement en ajoutant quelques mètres (de l'ordre de cinq) aux fenêtres hautes et donc aux voûtes. En 1272, le nouveau chœur put être occupé par le clergé, ce qui permit le lancement d'une phase préparatoire à la poursuite des travaux : sans doute le démantèlement du transept roman après fermeture et étalement provisoire de l'ouest de la Haute Œuvre.

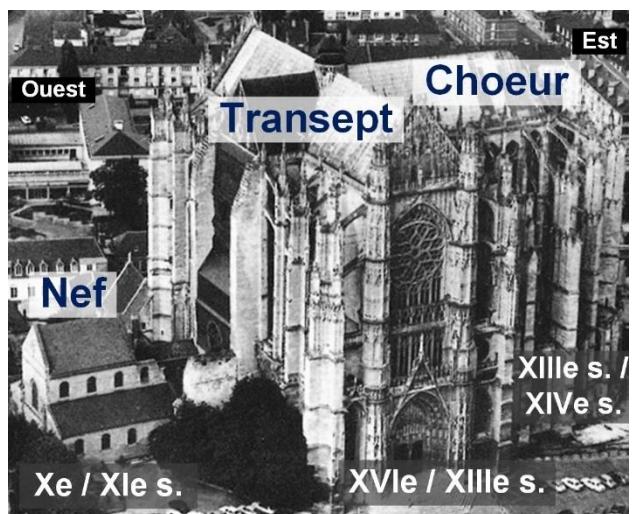


Figure 2. Vue aérienne de la cathédrale, fin des années 1970 (ph. : n. c. ; in : Bonnet-Laborderie, 2006), habillée.

Le 29 novembre 1284, durant cette nouvelle phase de chantier, des voûtains des travées droites du chœur, les plus vulnérables, s'effondrèrent (Figure 3), marquant pour tout l'Occident « la dernière limite à laquelle la construction des grandes églises du XIII^e s. ait pu arriver » (op. cit., T1, p. 71). Le diagnostic nécessaire à la reprise des parties concernées et le chantier qui s'en suivit s'acheva en 1340. « On mit donc plus de temps à réparer le chœur qu'à le construire » (Murray, 2000).

2.1.3 1499-1605: nouveau transept et accident

1340 coïncide en France avec le début d'une période de crise militaire, sanitaire et économique qui eut pour effet d'interrompre presque totalement les grands chantiers en cours, ce qui advint à Beauvais.

L'embellie de la deuxième moitié du XVe siècle remit à l'ordre du jour, dès les années 1480, la poursuite des travaux par la construction des deux vaisseaux manquants du transept, dont le seul en place était resté mal étayé à l'ouest.

En septembre 1499, pendant 23 jours, furent réalisés des sondages derrière le chœur à la considérable profondeur de 10 toises (19 m) et un autre de 32 pieds (10 m) à l'emplacement du futur bras sud du transept ; les premiers pour s'assurer de la fermeté du terrain, le dernier pour obtenir des informations sur les fondations posées au XIIIe siècle (Meunier et Bonnet-Laborderie, 2006).

Le grand architecte Martin Chambiges fut chargé en 1500 de la délicate conception d'une « greffe » en style gothique *flamboyant*, compatible stylistiquement

et mécaniquement avec le haut édifice en place, puis de la conduite des travaux pendant les 32 années qui suivirent, jusqu'à sa mort.

Pour les nouvelles fondations, dont les caractéristiques furent sans doute analogues aux précédentes, il choisit non la craie mais la pierre calcaire (lutétienne) des carrières de Mérard, Mouy et Mello, une trentaine de kilomètres à l'aval hydrographique de Beauvais. Le reste de l'œuvre fut réalisée avec les mêmes approvisionnements de craie qu'au XIIIe s. (*op. cit.*, 2006).

La construction du transept fut achevée après la mort de l'architecte, entre 1537 (bras nord) et 1550 (bras sud). C'est dans cette période que survint le projet de coiffer la croisée du transept d'une tour lanterne à trois niveaux surmontés d'une flèche (Figure 4a), et non d'une simple flèche en bois comme Chambiges avait dû le prévoir (*op. cit.*). La base du transept déjà construite était alors considérée comme capable d'en soutenir le poids, et l'ensemble devait tenir moyennant des modifications des parties hautes qui pouvaient encore être prises en compte.

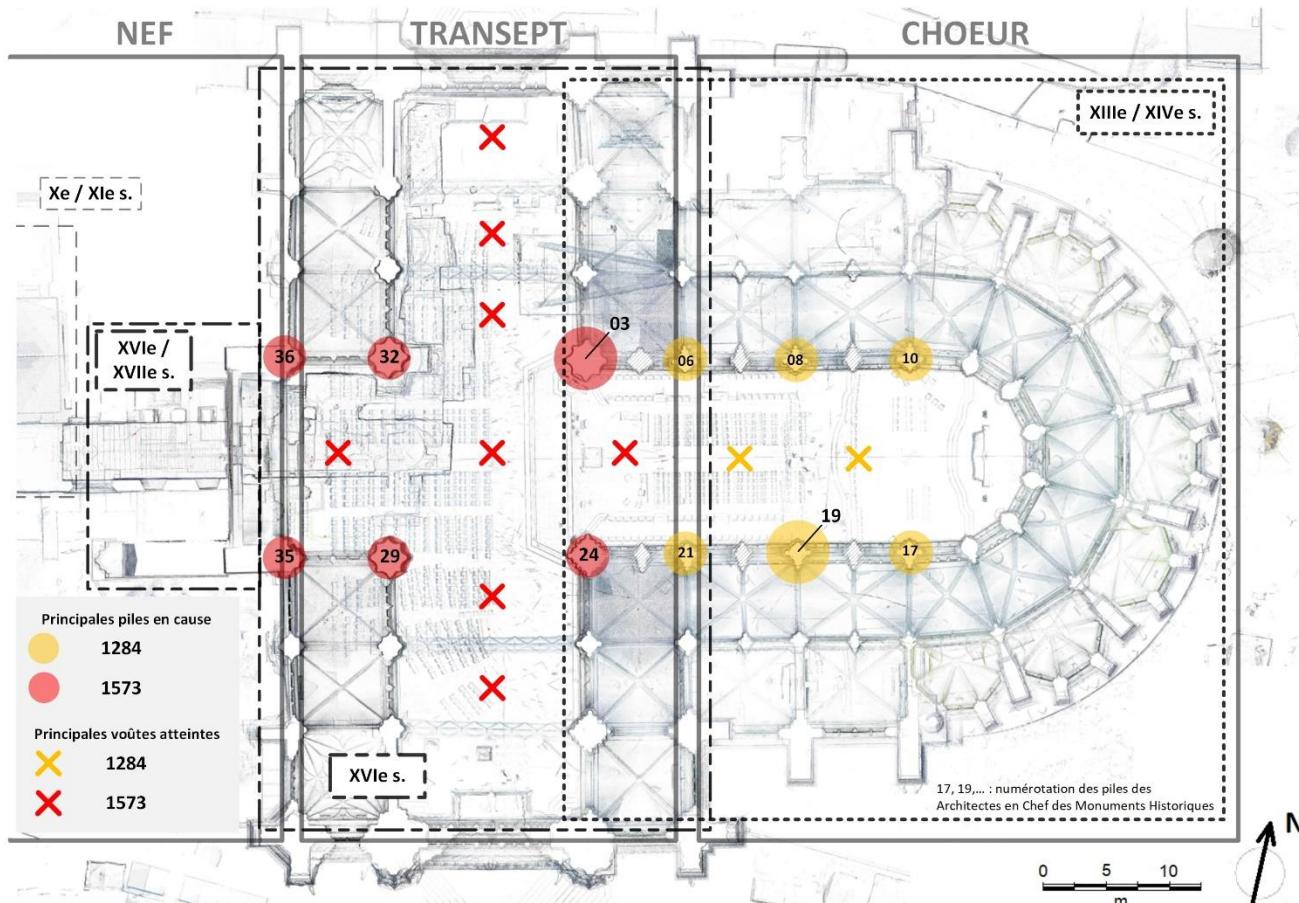


Figure 3. Localisation d'éléments liés aux accidents de 1284 et 1573 (fond de plan Lidar : Martin, 2021 ; habillé).

Ce nouveau projet, dont les pierres furent prélevées dans la carrière de calcaire lutétien de Saint-Leu-d'Esserent (à une quarantaine de kilomètres de

Beauvais) dès 1558, et dont la réalisation s'étendit de 1563 à 1569, reporta la construction des deux premières travées centrales de la nef ainsi que le

démantèlement de nouvelles travées de la Basse Œuvre à 1572 (Lamboleoy, 1993, p. 1 ; Poncelet, 2002).

Après de nombreux signes avant-coureurs, un support de la tour lanterne s'effondra le jour de l'Ascension 1573, un 30 avril, le lendemain de chutes de fragments de pierre. C'est seulement le 16 août qui suivit que les trois supports restants céderent (op. cit., 1993), entraînant avec eux la lanterne, démolissant dans sa chute ou du fait de l'ébranlement toutes les voûtes des travées qui l'entouraient, y compris une du XIII^e siècle, ainsi que la pile n° 3 (Figure 3).

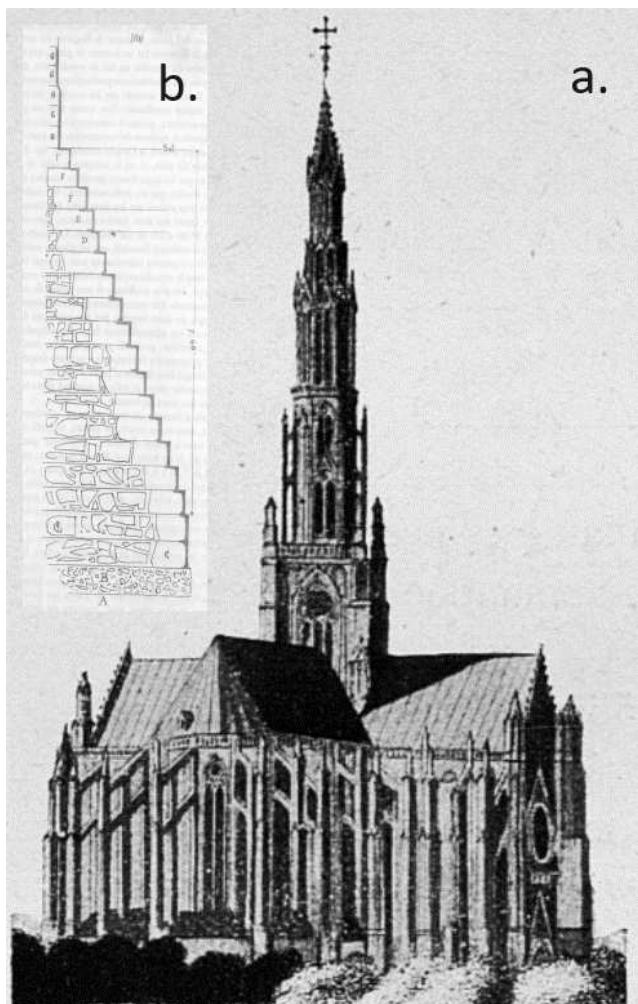


Figure 4. (a.) Vue cavalière de la cathédrale surmontée d'une tour de croisée avec flèche sommitale, en élévation de 1569 à 1573 (in Leblond, 1926, p. 27) ; (b.) En incrustation, coupe verticale d'un puits de fondation maçonné, observé par E.-E. Viollet-le-Duc à la cathédrale d'Amiens (op. cit., T4, p. 176).

Les travaux de réparation, restituant finalement le projet de Chambiges, un peu amoindri, s'étendirent jusqu'en 1605, sans qu'il ne reste assez de moyens pour construire la nef. Le contrebutement que la nef et les tours du massif occidental non construits auraient dû exercer sur le carré du transept pour en bloquer les poussées au vide, fut assuré de façon provisoire

(jusqu'à nos jours) par des murs boutants, à l'emplacement des premières colonnes du vaisseau central de la nef (Figure 3, zone XVI^e / XVII^e s.).

2.2 Géologie du centre historique de Beauvais

Située 60 km au nord de Paris, Beauvais est construite dans une vallée alluviale au socle crayeux. De ces deux données naturelles découlent un ensemble de caractéristiques géotechniques concernant la cathédrale Saint-Pierre.

2.2.1 Topographie et hydrographie

Le centre-ville historique de Beauvais, très plat, se situe à des altitudes situées dans la fourchette 65 à 70 m NGF (Nivellement Général de la France), avec 68/69 m NGF autour de la cathédrale.

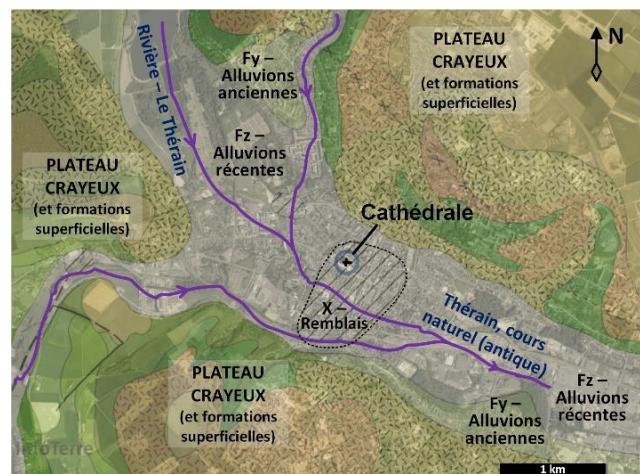


Figure 5. Extrait habillé de la carte géologique vectorisée harmonisée (Blondeau et al., 1974), en transparence sur photo aérienne IGN, via Infoterre (BRGM, 2023).

Beauvais est située dans la vallée alluviale d'un affluent de l'Oise, le Thérain (Figure 5), très canalisé depuis l'Antiquité et dont le cours le moins artificiel passerait aujourd'hui au sud du centre-ville, en moyenne vers 63 m NGF.

2.2.2 Stratigraphie

L'altitude dans le quartier cathédrale devait être à peine à 65 m NGF avant les aménagements de l'époque gallo-romaine. La ville connut alors une surélévation artificielle par remblaiement de craie damée, le processus continuant avec l'accumulation de débris d'occupation urbaine au Moyen Age, des remblais anthropiques globalement notés X sur la carte géologique (Figure 5).

Au-dessous de ces remblais se trouvent les dépôts du Thérain en deux ensembles bien contrastés, Fz et Fy selon la terminologie du BRGM. Ce sont les alluvions récentes et anciennes, respectivement fines

(argile, limon et éventuellement tourbe), et grossières (sables et graviers de silex). Cette succession corrélant fortement âge et granularité s'explique par le dernier épisode d'eustatisme et ses conséquences en termes de régime hydraulique des rivières et donc de transportabilité des matériaux d'érosion, phénomène gouverné par le changement climatique entre pléistocène et holocène (Lebret *et al.*, 1991). Ces dépôts sont donc en principe relativement homogènes et leur interface assez franche.

Sous les alluvions se trouve la craie, roche tendre et gélive, datée du campanien. En fond de vallée, où est située la cathédrale, la craie a subi un rabotage de l'ordre de 50 m de hauteur, correspondant au dénivelé moyen avec le plateau picard. Ce processus, accentué par la gélification des âges glaciaires, a dégradé, dans ses premiers mètres supérieurs, la craie en place.

2.2.3 Hydrogéologie

Il existe deux nappes intéressantes le fond de la vallée du Thérain à Beauvais, la nappe alluviale bien sûr, mais également celle de l'aquifère de la craie qui y trouve un exutoire continu.

Ces deux nappes sont en continuité hydraulique car les deux aquifères (craie à fissuration ouverte et alluvions anciennes) ne sont pas séparées par un niveau imperméable.

2.3 Reconnaissances *in situ*

Entre septembre 1499 et juin 2001, il ne semble pas qu'il y ait eu dans la cathédrale ou à ses abords immédiats de reconnaissances de sol, si ce n'est un sondage signalé par la BSS (BRGM, 2023), réalisé en 1967 « au pied d'un bénitier » dans le croisillon nord du transept, mais trop peu profond et surtout mal documenté pour être intéressant. Il faut cependant mentionner aussi deux bases de sismique réfraction réalisées par la Compagnie Générale de Géophysique en 1992, au nord et à l'est de la cathédrale, mais dont on a que les résultats interprétés (Lambole, 1993).

En 2001 sont réalisés 4 sondages destructifs au pied de chaque pilier du carré du transept (BS Consultants, 2001), suivi en juin 2021 d'un sondage carotté dans le croisillon nord du transept également pour une reconnaissance de fondation de pile (Mazet et Marcie, 2021), sondages intéressants pour les questions soulevées dans cet article.

Pour étayer le modèle géotechnique global leur ont été adjointes les données de sondages localisés dans le centre-ville, cinq issus de la BSS (BRGM, 2023 ; ancienne nomenclature : 01024X0167PZ22, 01024X0093S, 01024X0111F, 01024X0124F.PAC, 01024X0095PIEU1) et une cinquantaine d'autres

réalisés pour un projet immobilier (Arnassalon et Geisler, 2012).

2.3.1 Sols et eau, enseignements

Depuis la surface, l'ensemble des sondages consultés donnent des résultats convergents : la base des remblais est le plus souvent autour de 65 m NGF ; celle des alluvions modernes, variables en épaisseur, de 61 à 63 m NGF, altitudes qui sont également celle du toit des alluvions anciennes. Leur base est encore plus variable, de 55 à 59 m NGF, mais leur épaisseur ne semble jamais inférieure à trois mètres, typiquement quatre mètres sous la cathédrale.

La craie apparaît bien comme altérée dans les premiers mètres sous les alluvions anciennes, à tel point que ces dernières sont mécaniquement plus compétentes qu'elle. Vers 50 m NGF, la craie devient plus dure, c'est-à-dire à peu près 20 m sous le niveau de la cathédrale, profondeur atteinte par le sondage de 1499.

La compétence mécanique des horizons décrits est bien corrélée aux retours d'expérience : faible dans les remblais et alluvions modernes (q_c ou E_M typiques de 2 ou 3 MPa), quatre à sept fois plus élevée dans les alluvions anciennes mais seulement deux fois plus dans la craie altérée.

L'eau phréatique est une question plus délicate à traiter car son niveau moyen et ses variations actuelles peuvent difficilement être associés avec certitude à ceux de 1225 ou 1499. Mais, la nappe étant à la fois alimentée par une rivière régulée depuis l'époque gallo-romaine et bénéficiant d'un appoint constant d'approvisionnement par l'aquifère de la craie, on peut raisonnablement émettre l'hypothèse que les hauteurs piézométriques observées dans les dernières années présentent un intérêt rétroactif.



Figure 6. Photographie d'une caisse de carottes dans la zone de contact entre maçonnerie et sol support pour la pile n° 83 (Mazet et Marcie, 2021) habillée.

Il apparaît alors que le niveau d'eau dans le sol de la ville est assez stable au long de l'année, typiquement autour de 62/63 m NGF, avec un battement métrique. Cela veut dire que ce niveau est proche de l'interface entre les deux types d'alluvions, avec possible mise en

charge, modérée, des récentes, de perméabilité de l'ordre de grandeur de 10^{-6} m/s. Celle-ci contraste avec celle des alluvions anciennes et de la craie altérée, toutes deux proches de 10^{-4} m/s.

2.3.2 Fondations, enseignements

Les cinq sondages de reconnaissance de 2001 et 2021, concentrés sur le transept, ont trouvé des bases de fondation de piles à des cotes de 60,5 à 62,5 m NGF, bases reposant sur les alluvions anciennes (Figure 6), c'est-à-dire le « bon sol ».

Il est très vraisemblable que toutes les fondations de la Haute Œuvre (au XIII^e comme au XVI^e siècle) ont été réalisées suivant le même principe. Ce qui reste beaucoup moins clair est la largeur d'empattement à leur base et leur caractère jointif à la base si l'empattement est important.

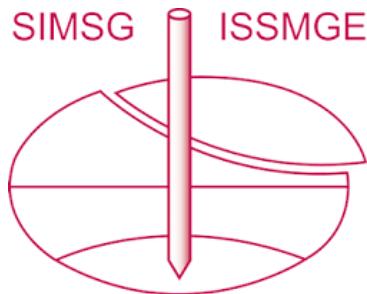
Taupin (1992) a considéré qu'elles étaient toutes liées à leur base, aboutissant à un cas de « radier général » du point de vue de la portance du terrain, suivant peut-être en cela (à défaut de les avoir vues) un exemple bibliographique issu des observations à la cathédrale d'Amiens, dans la même aire géographique que Beauvais et historiquement concordant (Figure 4b). Un fait est qu'avec un tel empattement, ces fondations sont très grandes à leur base, d'une largeur d'au moins cinq mètres, peut-être jusqu'à huit ou neuf.

Cela clôture la description des données nécessaires à l'analyse des accidents structurels de la cathédrale. Celle-ci se trouve dans la partie 2 du présent article.

RÉFÉRENCES

- Arnassalon, V. et Geisler, J. (2012). Beauvais - Place du Jeu de Paume - Construction d'un centre commercial - Mission géotechnique de projet G2 - Dossier n°09P-0070-b01 - Note de synthèse géotechnique, bureau d'études FUGRO Geoconsulting SA, Nanterre, France, rapport 09P-0070-b01.v2.
- Blondeau, A., Pomerol, B. et Pomerol, Ch. (1974). Carte géologique de la France à 1:50 000, n°102, Beauvais. Bureau de recherches géologiques et minières, Orléans, France.
- Bonnet-Laborderie, Ph. (2006). La cathédrale Saint-Pierre de Beauvais. Tome I – Les premières cathédrales. GEMOB (éd.), Beauvais, France.
- BRGM (2023). BSS : Banque de données du Sous-Sol [en ligne], accessible sur <http://infoterre.brgm.fr/viewer/MainTileForward.do>, dernière consultation le 23/10/2023.
- BS Consultants Bureau d'études [auteur non précisé] (2001). Cathédrale de Beauvais, reconnaissance géotechnique, Courtabœuf, France, rapport R010551.
- Lamboley Bureau d'études [auteur non précisé] (1993). Beauvais, cathédrale Saint-Pierre, diagnostic technique et pilotage des investigations, Lyon, France, rapport D724P02.
- Leblond, V. (1926). La Cathédrale de Beauvais. Henri Laurens (éd.). Paris.
- Lebret, P., Halbout, H., Clet, M., Huault, M.-F., Lautridou, J.-P., Lecolle, F., Levant, M., Van Vliet-Lanoë, B. (1991). Le quaternaire dans le Val-d'Oise. Centre de Géomorphologie du CNRS, Caen, France, pp. 237-239.
- 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).
- Mazet, Th. et Marcie, C. (2021). Beauvais - Cathédrale Saint-Pierre - Rapport de mission géotechnique G5 - Pile n° 83, bureau d'études GEOLIA, Morangis, France, rapport G210527.
- Meunier, F. et Bonnet-Laborderie, Ph. (2006). La cathédrale Saint-Pierre de Beauvais. Tome III – Le transept. GEMOB (éd.), Beauvais.
- 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.
- Poncelet, E. (2002). Beauvais - Cathédrale Saint-Pierre - Etude préalable concernant la résistance des sols au niveau de la croisée du transept [de l'Architecte en Chef des Monuments Historiques].
- Renault, P. (2021). Beauvais - Cathédrale Saint-Pierre - Préconisations structurelles en vue de la dépose des étalements et de la restauration des toitures hautes, bureau d'études BMI, Paris, France, rapport 21-058 ind. B.
- Taupin, J.-L. (1992). Diagnostic technique [de l'Architecte en Chef des Monuments Historiques], 1^{ère} phase.
- Vernhes, J.-D., Renault, P. et Zotna, Y. (2024b). 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. 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.