

Accompagnement scientifique de la restauration de la Flèche Saint-Michel de Bordeaux

Taforel P.¹, Morel S.², Vigoureux O.³, Cheval N.⁴, Santangelo A.⁵, Dubois F.⁶, Mindeguia J.-C.², Parent T.²

¹ MiMeTICS engineering

² Université de Bordeaux, I2M (UMR 5295 CNRS)

³ Agence GOUTAL, Architecture et Patrimoine

⁴ Equilibre Structures (BET)

⁵ Service Bâtiments Culturels et Culturels, Bordeaux Métropole

⁶ Université de Montpellier, LMGC (UMR 5508 CNRS)

RESUME La flèche Saint-Michel de Bordeaux, clocher indépendant en pierre, qui est le point culminant et emblématique de la ville de Bordeaux, sort d'une période de restauration lancée par la ville de Bordeaux en 2021-2022 ; l'objectif de cette opération étant notamment de conforter entre autres la partie supérieure de l'ouvrage présentant une fissuration importante et sévère en partie haute. Compte tenu de la difficulté à caractériser avec exactitude les phénomènes pathologiques à l'origine des désordres observés et de proposer une solution de confortement la plus adaptée, la MOA a décidé, en accord avec la MOE et son BET, de faire appel à une expertise complémentaire en s'appuyant sur un consortium scientifique spécialisé dans l'évaluation structurale des maçonneries. L'objet de cet accompagnement scientifique est de mettre en œuvre des approches de modélisation avancées permettant de donner des éclairages numériques sur les mécanismes mécaniques à l'œuvre et de tester des solutions de confortement en regard de ces mécanismes.

Mots-clefs accompagnement scientifique ; modélisation numérique ; approches discrètes

I. INTRODUCTION

La flèche Saint-Michel (FSM - Figure 1), propriété de la ville de Bordeaux (Maître d'Ouvrage - MOA) est un clocher indépendant de la basilique du même nom, constitué d'une tour hexagonale surmontée d'une flèche. Cet ouvrage a été construit entre le X^{IV}e et X^{VI}e siècles par l'architecte Jean Lebas et reconstruit dans sa forme actuelle (dodécagone) par l'architecte Paul Abadie au X^{IX}e siècle (1865) suite à la destruction de la flèche originelle par plusieurs événements climatiques et à son démontage à la fin du X^{VIII}ème siècle. Protégée par classement au titre des Monuments Historiques en 1846, la flèche a rejoint la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO en 1999 en tant que site des Chemins de Saint-Jacques-de-Compostelle.

Si l'ensemble complet de la structure (tour + flèche) culmine à 107 m de hauteur (112 m au sommet de la croix la surmontant), la flèche seule présente une hauteur de 55 m et est intégralement réalisée en pierre de taille (30 cm d'épaisseur en moyenne pour une hauteur régulière de 33cm) montée selon une section dodécagonale. Nervures simples et nervures à

crochets forment les sommets du dodécagone (selon une alternance toutes les 3 assises) tandis que des panneaux de maçonnerie forment les arêtes. En partie basse, les panneaux sont perforés de petits oculi polylobés. En partie supérieure, 3 séries d'ouvertures oblongues courent sur 4 à 5 assises (1,30 à 1,65 m de haut) et occupent plus ou moins la largeur totale des panneaux. La pierre utilisée pour la construction de la flèche est une pierre calcaire dite « bâtarde du Périgord » jointoyée avec un mortier de chaux. La partie sommitale de la flèche est surmontée par un fleuron massif de près de 22 tonnes et une croix maintenue par une enrayure métallique située 13m en dessous du fleuron et scellée dans la maçonnerie.



FIGURE 1. FSM (photo Velvet)

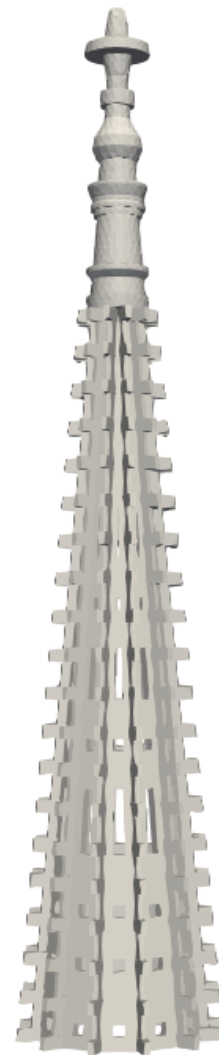


FIGURE 2. Modèle Discret

II. PATHOLOGIE ET OPERATION DE RESTAURATION

L'opération de restauration de la flèche a été lancée par la ville de Bordeaux en 2021-2022 (sous le pilotage du Service Bâtiments Culturels et Culturels (Bordeaux Métropole)) s'appuyant sur une MOE formée par l'Agence Goutal, Architecture et Patrimoine et le BET Equilibre Structures. Les travaux mis en œuvre visent à restaurer la partie tour, sur laquelle on note des altérations classiques de la maçonnerie, et à conforter la partie supérieure de l'ouvrage (la flèche) présentant une fissuration importante et sévère en partie haute sur le quart Nord-Est. Trois fissures principales de 13 à 14 m de hauteur et plusieurs fissures secondaires sont ainsi localisées à proximité des nervures (face externe) ; l'une d'entre elles traversant jusqu'à la face interne sur 3 à 4 m de hauteur.

Les analyses menées par le BET sur l'origine de cette fissuration ont permis d'éliminer des sources potentielles de désordre comme les efforts de vent qui, même si conséquents pour un ouvrage de grande hauteur, ne sont pas en mesure d'entraîner la fissuration observée ; les conséquences liées à un tassement d'appuis ou encore à une sollicitation de type vibratoire ont également été écartées.

Le BET a formulé l'hypothèse que la fissuration de la flèche était la conséquence (i) des chargements thermiques journaliers imposés à l'ouvrage (moteur de la fissuration) et à l'effet « cliquet » (impossibilité de re-fermeture des fissures causée par l'accumulation de débris de pierre dans ces dernières accentuée par l'angle du parement externe de la flèche (jouant le rôle de catalyseur dans la fissuration)) et (ii) la corrosion de l'enrayure du mât de la croix (initiation de la fissuration). Une difficulté majeure pour la MOE et le BET était dès lors de se baser sur cette hypothèse qui n'avait pu être complètement validée pour définir une solution de confortement adaptée en optant pour la mise en œuvre d'un chaînage actif ou passif pour pallier les phénomènes de fissuration observés ; tout en cherchant à évaluer la pertinence de ces solutions sur le comportement de l'ouvrage.

Consciente d'atteindre les limites des outils et approches pouvant être mis en œuvre par le BET et la MOE pour caractériser le phénomène pathologique à l'origine des désordres observés et in fine pour proposer une solution de confortement de la structure la plus juste possible, la MOA a décidé, en accord avec la MOE et son BET, de faire appel à une expertise complémentaire en s'appuyant sur un consortium scientifique spécialisé dans l'évaluation structurale des maçonneries.

III. ACCOMPAGNEMENT SCIENTIFIQUE (CONVENTION R&D)

Une convention de Recherche & Développement a été mise en place entre la ville de Bordeaux (MOA) et un consortium scientifique (CS) constitué par la société MiMeTICS *engineering, spin-off* du laboratoire LMGC (Université de Montpellier) et le laboratoire I2M (Université de Bordeaux) ; la convention R&D étant directement inspirée de l'expérience des membres du consortium acquise lors de la mise en place sur l'opération de restauration de Notre-Dame de Paris d'une convention du même type entre l'Etablissement Public en charge de la Restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris et un consortium issu du groupe de travail Structures du chantier scientifique CNRS/Ministère de la Culture Notre-Dame dont MiMeTICS et I2M sont membres.

Les travaux du consortium sont menés en s'appuyant sur la connaissance éclairée de la MOE et de son BET. Une étape de concertation forte avec la MOE et le BET permet de définir les contours de l'étude scientifique, les hypothèses sur lesquelles se base le travail de modélisation avancé du consortium et les limites mêmes de l'étude. S'en suit un suivi régulier de l'avancée des travaux menés par le consortium par la MOE et le BET. L'objectif est ici de maintenir une interaction permanente entre MOE et BET et le consortium afin de familiariser la MOE et le BET avec les approches mises en œuvre par le consortium d'une part et d'échanger sur les résultats produits au jour le jour par le consortium d'autre part et ainsi permettre la réorientation éventuelle de l'étude en fonction des résultats. Ce suivi, cette appréciation et cette appropriation des résultats par la MOE et son BET est d'autant plus importante que MOE et BET restent seuls décideurs des travaux à mener sur l'ouvrage ; les travaux réalisés, mêmes s'ils s'appuient tout ou partie sur les éclairages scientifiques fournis par le consortium, engagent uniquement la responsabilité juridique de la MOE et son BET.

IV. ETUDE SCIENTIFIQUE / TRAVAUX MENES PAR LE CONSORTIUM

Les travaux menés par le CS se veulent pragmatiques car la structure est de grande taille (temps de simulation longs) alors que le calendrier est très contraint (étude menée en phase travaux). La flèche n'est pas étudiée dans son intégralité mais par tronçons en se basant sur une modélisation discrète bloc à bloc avec le logiciel LMGC90 (approche DEM-NSCD (Dubois et al. 2018)) afin de simuler la réponse thermomécanique de la structure. La modélisation respecte la géométrie de la flèche et sa stéréotomie : le modèle bloc à bloc (Figure 2) s'appuie sur les plans de calepinage et relevés de l'entreprise des Compagnons de Saint Jacques en charge de la restauration de la maçonnerie. Le modèle met en œuvre les derniers modèles de Zones Cohésives Frictionnelles décrivant le comportement mécanique des interfaces bloc-joint et tenant compte de l'élasticité des joints (Boukham et al. 2024). La flèche bénéficiant d'un suivi métrologique, les données disponibles (températures aux quatre cardinaux, trajectographie par pendule laser, fissuromètres) sont utilisées pour estimer les sollicitations thermiques subies par l'ouvrage et qualifier la réponse du modèle discret.

Les principaux résultats émanant de ces travaux et *les décisions prises par suite sur les travaux de restauration* sont synthétisés ci-après :

- identification d'un scénario de températures journalières plausible susceptible d'engendrer une fissuration localisée dans quart nord-est,
- mise en évidence de l'impact de la corrosion de l'enrayure sur l'initiation des fissures (*enrayure déposée / nouvelle enrayure en inox*),
- mise en évidence d'un effet diaphragme de l'enrayure néfaste (*la nouvelle enrayure désolidarisée des parois de la flèche*),
- modélisation des chaînages passifs afin d'évaluer leur impact sur le comportement de la flèche : les travaux ont permis de *dimensionner les chaînages* afin que le comportement mécanique des joints verticaux soit renforcé tout en préservant la rigidité globale initiale des assises,

- modélisation de la structure chaînée : vérification de la capacité des chaînages à enrayer/limiter la propagation de fissures,
- définition du cahier des charges du suivi métrologique de la flèche post-restauration.

Ces travaux n'ont été possible que grâce à un dialogue très riche entre l'ensemble MOE/BET et le consortium scientifique. Des travaux restent en cours : après :

- modélisation du comportement mécanique de la flèche sous efforts de vent
- étude de la cinématique annuelle / journalière sous sollicitations thermiques et estimation d'indicateur de désordres structuraux sur base cinématique

Ce dernier point est particulièrement important puisqu'il doit permettre la finalisation d'un modèle numérique sur la base duquel pourront potentiellement être exploitées de manière efficace les données issues de la métrologie (jumeau numérique).

CONCLUSION

Ce type d'étude scientifique s'inscrit en complément des expertises de l'ensemble MOE et BET sans aucunement s'y substituer. Ces études permettent de gagner en pertinence sur les diagnostics et l'évaluation des pathologies complexes frappant des structures aussi complexes que celles rencontrées sur la flèche Saint-Michel ou sur les voûtes de Notre-Dame. L'expertise scientifique apportée par le consortium scientifique permet de dé-risquer les opérations de restauration pour les MOE, les BET (et les MOA) en particulier en cas de pathologies complexes.

Ce type d'accompagnement scientifique a trouvé un cadre administratif et juridique. Il est directement tiré de l'expérience Notre-Dame. Il consiste à proposer une convention de R&D partagée entre un consortium scientifique et une MOA. Si la convention n'inclut pas la MOE pour des questions d'indépendance du CS, MOE et BET doivent être pleinement associés aux travaux scientifiques pour qu'ils puissent être probants : les échanges constructifs et sereins entre le CS et la MOE sont un gage de leur succès.

Si les travaux scientifiques ont été réalisés durant la phase travaux sur la flèche Saint Michel, il aurait été préférable qu'ils aient été menés plus en amont en phase diagnostic. Les approches scientifiques mises en œuvre s'appuient en effet sur des outils de recherche. Leur mise en œuvre est complexe et rentre dans un processus itératif (démarche essai/erreur) incompatible avec un calendrier contraint.

Si l'apport du consortium sur les opérations de restauration semble avéré, l'inverse est complètement vrai également. La réalisation de ce type d'étude permet aux scientifiques de déterminer les pistes d'amélioration des modélisations mécaniques et les développements scientifiques nécessaires à une compréhension plus précise du comportement mécanique des structures maçonnées et de leurs confortements.

Si ce type de travail collaboratif entre MOA-MOE/BET et consortium scientifique a été créé suite à l'incendie de Notre-Dame, les travaux sur la Flèche Saint-Michel ont permis de confirmer la pertinence de ce type de partenariat. Cela a également été très bien compris par les institutions. Un nouveau Réseau Thématique CNRS/MC MAESTRO va prendre la suite du chantier scientifique Notre-Dame et sera adossé aux opérations de restaurations des Monuments

Historiques relevant du Ministère de la Culture. Il permettra au besoin d'accompagner scientifiquement les MOA et MOE lors des opérations de restauration en sollicitant des expertises scientifiques complémentaires à celles de leur BET.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Patrick Della-Libera, chargé de mission patrimoine historique, Direction Maitrise d'Ouvrage et Patrimoines Culturels de la Ville de Bordeaux, en tant que responsable de la convention R&D pour la MOA.

REFERENCES

Dubois F., Acary V., & Jean M. (2018). The Contact Dynamics method: A nonsmooth story. *Comptes Rendus Mécanique, The legacy of Jean-Jacques Moreau in mechanics / L'héritage de Jean-Jacques Moreau en mécanique* 346, 247–262. <https://doi.org/10.1016/j.crme.2017.12.009>

Boukham, A., Venzal, V., Parent, T., Morel, S., Dubois, F., Solbes, B. (2024). 3D hybrid modelling approach combining the finite and discrete element methods: Validation based on masonry shear wall tests. *International Journal of Solids and Structures* 289, 112638, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2023.112638>