NOTRE DAME DE PARIS, CINQ ANS APRÈS L'INCENDIE

Prévue en décembre 2024, la réouverture de Notre Dame remet sur le devant de la scène ce monument de structure gothique, étudié par Paolo Vannucci, chercheur au Laboratoire de mathématiques de Versailles.

Le 15 avril 2019, Notre Dame s'embrasait pendant une quinzaine d'heures, sous les yeux médusés des touristes et parisiens. Malgré l'intervention des pompiers, sa charpente, sa toiture et sa flèche étaient détruites.
Prévue en décembre 2024, la réouverture de Notre Dame remet sur le devant de la scène ce monument de structure gothique. Paolo Vannucci, chercheur au Laboratoire de mathématiques de Versailles (LMV-UVSQ/CNRS) a mené à partir de 2015, en collaboration avec l'Université de Florence, des travaux de modélisation mécanique pour la conservation et la compréhension du patrimoine monumental, en particulier sur le Panthéon de Rome et Notre Dame de Paris.
Objets atypiques, les monuments patrimoniaux suscitent un fort intérêt dans le domaine de la mécanique, discipline à la croisée des mathématiques, de la physique et de l' ingénierie. Deux motivations sont à l'origine de ces recherches : étudier la vulnérabilité des monuments aux actions extrêmes telles que les vents ; comprendre la pensée constructive des anciens bâtisseurs.

Concernant Notre Dame de Paris, ce projet a réuni une équipe internationale et multidisciplinaire (UVSQ, Université de Florence, Arts et Métiers (ENSAM)) visant à déterminer les actions du vent sur la cathédrale Notre-Dame de Paris, afin d'évaluer de façon fiable la sécurité structurale de l'édifice.
L'équipe a étudié les actions des vents extrêmes qui ont un effet sur le bâti. En 1999, par exemple, les vents ont atteint 169 km/h en plein cœur de Paris. Or, les cathédrales gothiques sont particulièrement exposées, de par leurs dimensions et les éléments caractéristiques qui les structurent : les piliers, les voutes d'arêtes, les charpentes, les arcs-boutants, et les contreforts. La charpente, notamment, revêt un rôle fondamental dans l'équilibre de la cathédrale. Les arcs-boutants de Notre Dame, avec une portée de 12 mètres, sont parmi les plus grands du monde. La question se pose de savoir quel vent est capable de causer la ruine structurale d'une cathédrale gothique.
À cet effet, un modèle numérique à l'échelle 1/200e a été réalisé à partir d'un relevé laser 3D. L'expérimentation a été menée dans une soufflerie de l'Université de Florence, en faisant varier l'intensité et la direction du vent avec un modèle muni de 1200 capteurs de pression pour évaluer la pression du vent et l'influence de l'environnement.
Les chercheurs ont constaté que les monuments pouvaient s'adapter au vent, et que l' équilibre subsistait, jusqu'à un certain stade, en se déplaçant. Toutefois, pour une vitesse de vent de 222 km/h à 10 mètres du sol, il n'y a plus d'équilibre et le bâti s'écroule. Les effets de l'incendie du 15 avril 2019 ont entrainé des modifications dans le modèle de la structure de Notre Dame. Ainsi, la structure est devenue vulnérable aux vents supérieurs à 90 km/h.
Du domaine de l'expérimental, la recherche sur la distribution de la pression du vent sur une cathédrale gothique était encore un problème ouvert, qui a été abordé dans la recherche faite par l'UVSQ en collaboration avec l'ENSAM et l'Université de Florence.

La structure de Notre Dame est composée de charpentes datant de trois époques différentes, celle du chœur construite de 1225 à 1230, celle de la nef, de 1230 à 1240, et celle du transept, en 1843. Ces charpentes à chevrons formant ferme, se rapportant à une période précise et limitée, présentent une répétition d'une unité structurale et pouvaient être réalisées avec des arbres de dimensions moyennes. Les simulations faites sur la charpente disparue montrent que ce type de structure est la solution trouvée par les bâtisseurs en réponse à un problème écologique lié à la déforestation en France au Moyen Âge : la pénurie d'arbres de grandes dimensions.
La mécanique et ses outils de simulation sont aujourd'hui incontournables pour étudier le

patrimoine, préserver les monuments, et favoriser leur mise en sécurité. En outre, le calcul tridimensionnel permet de comprendre toute la conception profonde de la structure, surtout pour ce qui concerne les structures gothiques, un sujet d'étude qui laisse encore beaucoup à découvrir.

INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES

En savoir +
Crédit photo : Carlos Delgado
Crédits vidéo : ENSAM, AGP
> Laboratoire de mathématiques de Versailles (LMV-UVSQ/CNRS)
> Université de Florence
> ENSAM