

Estimer la solidité des voûtes de Notre-Dame après l'incendie

Publié: 2 août 2022, 22:09 CEST

Stéphane Morel

Professeur des Universités, Université de Bordeaux

Frédéric Dubois

Ingénieur de recherche au CNRS, Université de Montpellier

Jean-Christophe Mindeguia

Maître de Conférences en génie civil, Université de Bordeaux

Maurizio Brocato

Professor, École Nationale Supérieure d'Architecture (ENSA) Paris-Malaquais – PSL

Paul Nougayrede

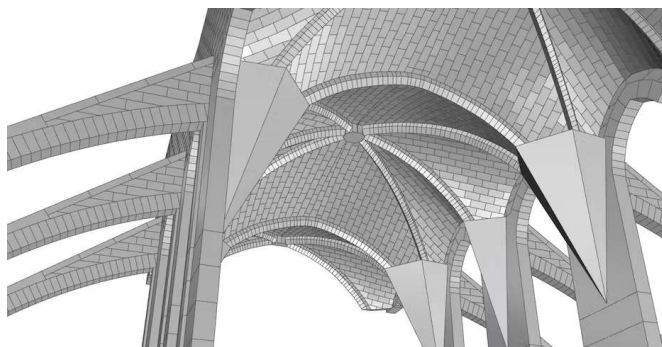
Doctorant en architecture, École Nationale Supérieure d'Architecture (ENSA) Paris-Malaquais – PSL

Pierre Morenon

Ingénieur et chercheur en Génie Civil au sein de la division transfert de technologie du LMDC. Spécialiste des méthodes de calculs numériques de structures., INSA Toulouse

Thomas Parent

Maître de Conférences en Génie-Civil, Université de Bordeaux



Structure en pierres de taille d'un ensemble voûte/arcs-boutants du chœur de Notre-Dame. Ici, le maillage utilisé dans certaines simulations. Maurizio Brocato et Paul Nougayrede, GSA Paris-Malaquais, Fourni par l'auteur

Catastrophe patrimoniale, l'incendie de Notre-Dame en 2019 permet aussi d'accroître nos connaissances : les débris de la célébrissime cathédrale sont autant de précieux témoins du passé ! Cette série suit le chantier scientifique de Notre-Dame, où bois carbonisés et pièces en métal révèlent leurs secrets. Après de premiers épisodes sur la charpente et l'origine des bois, on s'intéresse à la structure de la cathédrale et, dans ce 4^e volet, à ses maçonneries.

En avril 2019, au lendemain de l'incendie ayant frappé la cathédrale Notre-Dame, le CNRS et le ministère de la Culture ont mis en place le « chantier scientifique Notre-Dame » pour fédérer et organiser les initiatives émanant de la communauté scientifique française.

Notre groupe de travail « Structures » s'intéresse à l'évaluation mécanique des structures porteuses de la cathédrale – maçonneries et charpentes notamment. Nous avons très rapidement été sollicités par la maîtrise d'œuvre du chantier de restauration, afin d'évaluer la stabilité actuelle des voûtes hautes de la cathédrale affectées par l'incendie.

À lire aussi : Les sciences au chevet de Notre-Dame

Si certaines parties des voûtes se sont effondrées au cours du sinistre, notamment à cause des impacts avec des éléments de la flèche ou de la charpente, la grande majorité des voûtes est restée en place. Ce n'est pas étonnant, car les voûtes étaient pensées à l'origine comme un système de protection incendie en faisant obstacle à la chute d'éléments en feu ! Elles ont bien rempli leur rôle, mais leur stabilité conditionne la sécurité du site.

De plus, les voûtes constituent aujourd'hui un véritable chef-d'œuvre architectural du style gothique – elles font bien sûr l'objet d'une conservation maximale.

Malheureusement, aucune méthode de calcul moderne n'est aujourd'hui disponible en bureau d'études techniques pour modéliser fidèlement le comportement mécanique de telles structures afin d'évaluer la sécurité du site et l'efficacité des mesures de soutènement mises en place par la maîtrise d'œuvre.

C'est pourquoi le recours à l'expertise scientifique s'avère ici nécessaire... et devant des mécanismes très complexes, notre groupe de travail a dû développer de nouvelles approches.

Joyau de maçonnerie, défi pour les modélisateurs

Au XX^e siècle, la construction de grands édifices a progressivement délaissé la maçonnerie au profit de la construction métallique et du béton armé ; l'effort de calcul/modélisation s'est alors porté sur ces matériaux modernes.

[Près de 70 000 lecteurs font confiance à la newsletter de The Conversation pour mieux comprendre les grands enjeux du monde. Abonnez-vous aujourd'hui]

Par ailleurs, le comportement mécanique d'une structure maçonnée s'avère extrêmement complexe à appréhender : une maçonnerie en pierres de taille appareillées comme celle de la cathédrale Notre-Dame se rapproche d'un matériau composite, anisotrope (matériau dont les propriétés mécaniques varient en fonction de la direction considérée dans le matériau) et hétérogène, constitué de blocs de pierres de taille assemblés par des joints minces de mortier de chaux, dont l'interface pierre-mortier constitue une zone de faiblesse mécanique.

Ainsi, l'endommagement d'une maçonnerie en pierres de taille appareillées se localisera préférentiellement au niveau des interfaces pierre-mortier et, en conséquence, la fissuration de la maçonnerie se produira selon des plans parfaitement identifiés.

Stabilité et souplesse de la construction

Notre-Dame est, grâce à ce mode constructif, dotée d'une forte stabilité mécanique, caractérisée par une grande souplesse : les déplacements relatifs entre blocs sont permis par la fissuration aux interfaces pierre-mortier, ce qui induit une capacité importante à dissiper l'énergie mécanique via les frottements au niveau de ces plans de fissuration.

C'est la fissuration aux interfaces pierre-mortier qui confère à la maçonnerie toute la richesse de son comportement mécanique, et qui rend dans le même temps complexe sa modélisation mécanique précise.

Si la modélisation du comportement mécanique des maçonneries fait aujourd'hui l'objet de nombreux développements, aucune des méthodes développées à ce jour ne peut se prévaloir de fournir une description exhaustive du comportement de ce matériau hétérogène.

Les études menées par notre consortium scientifique se sont donc appuyées sur la mise en parallèle de différentes méthodes de modélisation mécanique complémentaires, afin d'obtenir une estimation fiabilisée du comportement mécanique post-incendie des voûtes hautes de Notre-Dame.

simulation du comportement mécanique de Notre Dame

Déplacements subis par l'ensemble voûte/arcs-boutants lors d'une sollicitation horizontale, appliquée au niveau des murs gouttereaux et dirigée vers l'intérieur du vaisseau central (valeurs des déplacements multipliées par 50), obtenus par simulation numérique du comportement mécanique. Sur cette image, on peut remarquer l'extrême finesse des voûtains du cœur de Notre-Dame. Maurizio Brocato et Paul Nougayrede, GSA Paris-Malaquais, Fourni par l'auteur

Ces méthodes s'appuient :

- soit sur une approche « continue » : la maçonnerie est modélisée comme un matériau continu unique doté de propriétés élastiques et de ruptures équivalentes à celles du matériau composite maçonnerie ;
- soit sur une approche bloc à bloc ou « discrète » : les interactions entre blocs décrivent le comportement mécanique conféré par les joints de mortier et leurs interfaces.

Le caractère divisé du comportement de la maçonnerie, conféré par l'assemblage de blocs et l'influence morphologique de l'appareillage, seront plus naturellement et rigoureusement appréhendés par l'approche discrète comparée à l'approche continue, mais au prix de temps de génération de maillages et de calcul des modèles plus importants. En revanche, l'approche discrète échouera à décrire la rupture des blocs alors que l'approche continue la décrira précisément.

Ces deux exemples illustrent la complémentarité des approches discrète et continue ; la mise en parallèle de ces approches permet en définitive de cerner plus précisément les réponses mécaniques simulées des ouvrages modélisés.

Quelles différences avant et après l'incendie ?

Une évaluation avant incendie a tout d'abord été réalisée afin de quantifier l'évolution de la stabilité des voûtes après le passage du feu.

Ce premier travail a permis de donner des éclairages quant aux étapes de construction des voûtes et des arcs-boutants. Les modélisations avant incendie ont également révélé que les différences morphologiques constatées entre les voûtes fines du chœur (12 à 15 centimètres d'épaisseur) et les voûtes plus épaisses de la nef (19 à 25 centimètres d'épaisseur) entraînent une poussée des voûtes inférieure à celle des arcs-boutants dans le chœur, et inversement dans la nef.

Les modélisations de l'incendie ont quant à elles conduit à identifier le phénomène physique responsable de la majeure partie des désordres post-incendie constatés sur la cathédrale : les dilatations thermiques.

En effet, le « gonflement » des matériaux à cause de l'augmentation de leur température au cours de l'incendie semble être un facteur plus prépondérant que la diminution des propriétés mécaniques des matériaux en elle-même (cette diminution est liée à l'élévation de température et à la saturation des matériaux par l'eau d'extinction de l'incendie).

Simuler les techniques de confortement

Sur cette base, la solution de confortement des voûtes incendiées retenue par la maîtrise d'œuvre a pu être simulée, afin d'évaluer le rapport bénéfice-risque conféré par cette solution et les adaptations possibles permettant d'augmenter son efficacité (par exemple, en ce qui concerne le module d'élasticité et l'épaisseur de la chape ou le comportement du complexe voûte-chape sous sollicitations mécaniques).

Les travaux du groupe de travail « Structures » doivent se poursuivre jusqu'en 2024, date qui devrait voir la fin des travaux de restauration de la cathédrale. En parallèle, les membres du groupe développent un outil de modélisation hybride des maçonneries, consistant en l'utilisation simultanée des approches discrète et continue.

Frédéric Dubois (LMGC-Montpellier), Paul Taforel (MiMeTICS engineering, spin-off du LMG), Pierre Morenon (plateforme TTT du LMDC-Toulouse), Maurizio Brocato et Paul Nougayrede (GSA-Paris), Jean-Christophe Mindeguia, Thomas Parent et Stéphane Morel (I2M-Bordeaux, coordination des études) sont co-auteurs de cet article.