

**SCIENCES //** Depuis l'incendie de 2019, 175 experts se relaient au chevet de l'édifice. Leurs recherches auront des répercussions sur la connaissance du climat, de la pollution au plomb, de l'acoustique...

# Le chantier de Notre-Dame : un trésor pour les scientifiques

Jacques Henno  
@jhennoparis

**A** la base des colonnes des cathédrales gothiques, les bâtisseurs avaient glissé une semelle de plomb de quelques centimètres d'épaisseur. « Ces coussins en plomb ont permis aux édifices d'encaisser de légers mouvements de terrain », explique Sophie Ayrault, chercheuse au LSCE (Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement) et spécialiste de la pollution au plomb. Depuis le drame du 15 avril 2019, elle n'est pas entrée dans Notre-Dame, mais elle a eu accès aux poussières de cet incendie pour tenter d'évaluer sa part dans la pollution au plomb à Paris (voir encadré). D'autres scientifiques ont pu effectuer des prélèvements à des endroits inaccessibles en temps normal (les fameux coussins en plomb, mais aussi le scellement des agrafes métalliques qui relient les pierres des voûtes, en partie effondrées). Là, il s'agit de comprendre d'où venait le plomb utilisé au Moyen Âge...

Sophie Ayrault et ses collègues font partie des 175 experts qui auscultent le bâtiment depuis la catastrophe. Coordonné par le CNRS, ce gigantesque chantier scientifique constitue une formidable occasion d'en apprendre davantage sur ce monument, mais aussi d'approfondir les connaissances que l'on a en acoustique, en climatologie, etc. « De ce drame, nous allons pouvoir tirer des enseignements positifs », résume Valérie Daux, spécialiste des paléoclimats et elle aussi chercheuse au LSCE. Autre spécificité de ce chantier : il est interdisciplinaire (lire ci-contre). « C'est le "miracle" – et je le dis sans aucune connotation religieuse – de Notre-Dame : des chercheurs de tous horizons se mettent spontanément et avec une facilité déconcertante à collaborer », constate Yves Gallet, professeur d'histoire de l'art du Moyen Âge, qui coordonne le groupe de travail « pierre », composé de plus de trente scientifiques.

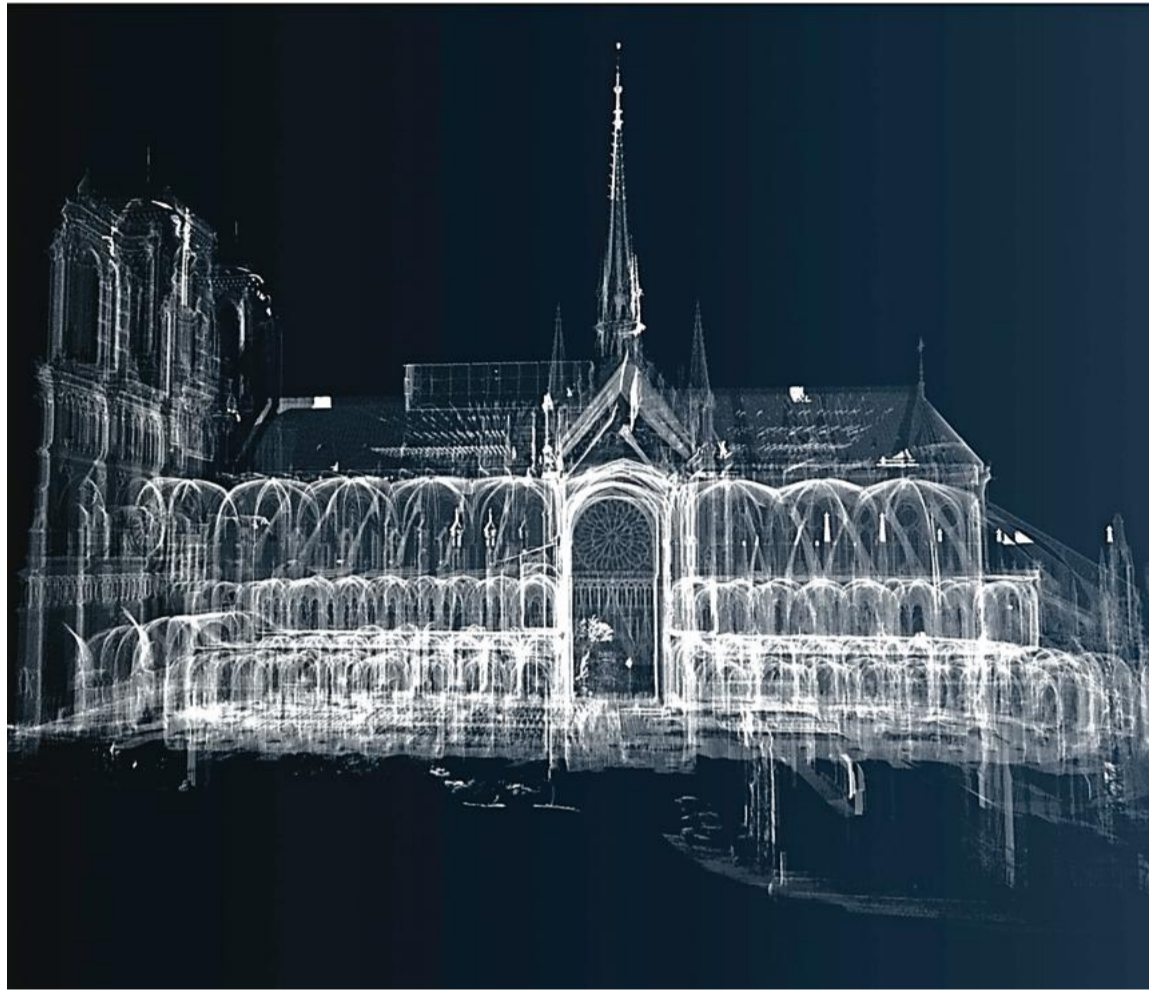
Passage en revue de trois études aux retombées souvent inattendues.

## ● L'ACOUSTIQUE DE NOTRE-DAME ET LES JEUX VIDÉO

« La commande qui nous a été passée a pour but d'aider à retrouver l'acoustique de Notre-Dame avant l'incendie », décrit Mylène Pardoën, archéologue du paysage sonore et coordinatrice avec Brian Katz, acousticien, du groupe de travail « acoustique ». L'objectif est d'établir une maquette sonore de l'édifice, laquelle permettra de tester numériquement différents aménagements intérieurs et de s'assurer que l'orgue ou les chœurs retrouveront leurs repères acoustiques. Pour élaborer cette maquette, les chercheurs peuvent s'appuyer sur des captations réalisées en 1987, en 2015 et cet été. Mylène Pardoën a également réalisé des enregistrements de bruits typiques (cloches, véhicules hippomobiles...) pour reconstituer l'environnement sonore de la cathédrale à différentes époques. « Nous avons encore un énorme travail de traçage, de traitement et de stockage de toutes ces données, reconnaît-elle. Mais nos recherches pourront alimenter une réflexion plus générale sur le bruit dans les villes et participer à la conservation du patrimoine sonore de certains métiers. » Les méthodes de calcul acoustiques développées pourront également servir à développer des mises en situation sonores très réalistes pour des jeux vidéo ou des salles de réalité virtuelle.

## ● LA CATHÉDRALE ET SON DOUBLE NUMÉRIQUE

« Dans les semaines qui ont suivi l'incendie d'avril 2019, tous les vestiges – bois, pierres, clous, etc. – sortis de la cathédrale ont fait l'objet d'un protocole d'inventaire », relate Maxime L'Héritier, historien et responsable du groupe de travail « métal ». Tous ces vestiges ont été photographiés à l'endroit où ils ont été trouvés, sur le godet du robot qui les a



Nuage de points 3D à partir de la face sud de la cathédrale Notre-Dame de Paris. Photo Andrew Tallon/Vassar College/Chantier Scientifique Notre-Dame de Paris/Ministère de la culture/CNRS

## Un chantier hors norme

- Le 15 avril 2019, la cathédrale Notre-Dame de Paris était endommagée par un grave incendie
- En parallèle à la restauration s'est ouvert un chantier scientifique
- Huit groupes de travail ont été constitués : « bois », « numérique », « structure », « métal », « pierre », « verre », « émotions patrimoniales », « acoustique »
- Y participent des archéologues, historiens, historiens de l'art, anthropologues, physiciens, ingénieurs, informaticiens...
- Certains chercheurs développent des outils pour caractériser les dépôts (poussières remontant au XIX<sup>e</sup> siècle, suie due à l'incendie...) qui recouvraient les vitraux. Une façon de pouvoir analyser d'autres dépôts en d'autres lieux, en cas d'accident industriel par exemple.
- D'autre étudient les agrafes de fer des pierres de voûte, afin de déterminer quelles températures ont été supportées par ces dernières et de retracer ainsi la propagation de l'incendie...

ramassés, sur la palette où ils ont été transférés... « Cinquante mille clichés horodatés et localisés en 3D par des méthodes de vision artificielle ont été réalisés lors de ces opérations de tri », calcule Livio De Luca, architecte, informaticien et coordinateur du groupe de travail « données numériques ». Grâce à l'intelligence artificielle, toutes ces photographies ainsi que les objets qu'elles représentent vont automatiquement alimenter une maquette virtuelle de Notre-Dame.

Ce double constitue une immense base de données, au sein de laquelle chaque scientifique peut déposer ses connaissances. « En croisant les informations disponibles avant et après l'incendie, nous sommes théoriquement capables d'estimer la position de chaque débris avant sa chute », ajoute Livio De Luca. « On peut même le remettre en place numériquement, comme dans un immense puzzle, s'enthousiasme Thierry Zimmer, directeur adjoint du LRMH, le Laboratoire de recherche des monuments historiques. Cette technologie sera d'un grand secours pour l'anastylose – la reconstruction des monuments tombés en ruine ou détruits par une catastrophe naturelle. »

## ● LA CHARPENTE CALCINÉE, MAIS DES POUTRES ENCORE BIEN UTILES

De la charpente de Notre-Dame, mise en place entre 1220 et 1240, il ne reste que des débris calcinés. Le cœur de certaines poutres, lui, n'a pas été touché par les flammes. Les dendrochronologistes sont capables, à partir des anneaux de croissance des bois, de dater ces vestiges. « Pour ma part, je vais extraire un milligramme de cellulose et déter-

miner la composition isotopique de l'oxygène et du carbone présents », décrit Valérie Daux, du LSCE. Les isotopes ? Ils correspondent à la variation du nombre de neutrons dans le noyau des atomes : l'oxygène 16 comporte huit protons et huit neutrons, l'oxygène 18 huit protons mais dix neutrons. La proportion entre l'oxygène 16 et l'oxygène 18 dans la cellulose varie en fonction du climat et en particulier des températures estivales qui ont accompagné la croissance des arbres.

## Intact, le cœur de certaines poutres va permettre de reconstituer l'évolution des températures aux XI<sup>e</sup> et XII<sup>e</sup> siècles.

« Nous allons ainsi pouvoir reconstituer l'évolution des températures aux XI<sup>e</sup> et XII<sup>e</sup> siècles », poursuit Valérie Daux. Une période qui correspond à une partie de l'optimum climatique médiéval, caractérisé par une longue série d'étés secs et vraisemblablement chauds – une situation assez proche de ce que nous connaissons aujourd'hui, mais pour d'autres raisons. « Les spécialistes pourront alors appliquer leurs modèles de simulation du climat à ces données du passé pour voir si les causes de variabilité qu'ils ont sélectionnées fonctionnent », espère Valérie Daux. Et si ces modèles s'appliquent correctement au passé, il y a de fortes chances qu'ils puissent prédire l'avenir. ■

## Les dangers de la pollution au plomb

« Je ne veux pas diaboliser l'éventuel choix du plomb pour rebâtir à l'identique la toiture de Notre-Dame, mais questionner cette décision, qui n'est pas encore définitive », explique Sophie Ayrault, chercheuse et membre du groupe de travail « métal » du chantier scientifique de Notre-Dame. Cette spécialiste de la pollution au plomb a pu analyser de nombreux prélèvements à Notre-Dame. Ces échantillons ont permis de tracer l'éventuelle contribution du plomb de la cathédrale à la pollution de l'environnement parisien. En effet, le plomb pollue exceptionnellement lors d'un incendie, mais aussi les jours de pluie, dans la mesure où le ruissellement emporte à chaque fois quelques particules du plomb des toitures.