



Des capteurs enregistrent les fréquences de résonance des clochers d'églises.

Archéosismologie : des bâtiments historiques comme sismomètres

La faible sismicité dans l'Hexagone ne favorise pas la caractérisation des plus forts séismes du passé. Une solution originale consiste à prendre pour témoins les bâtiments historiques restés sur pied qui ont enregistré ces séismes dans leurs murs. Identifier leurs réparations post-sismiques permettrait-il d'en déduire les mouvements du sol des séismes passés ? L'ASNR évalue ces méthodes, dites « d'archéosismologie quantitative », depuis les années 1990.

[CONTEXTE]

Chaque installation nucléaire est conçue pour résister au pire séisme historique de la région. Mais comment évaluer les caractéristiques de ce séisme ? Cela suppose de remonter à l'activité sismique à l'échelle de plusieurs siècles... Le sujet est particulièrement d'actualité dans le contexte de construction de nouvelles centrales nucléaires.

À l'ASNR, tout commence en 1991, au Bureau d'évaluation des risques sismiques pour la sûreté des installations (BERSSIN) : Agnès Levret, sismologue, fait partie des pionniers qui ont l'intuition qu'il serait possible de caractériser l'activité sismique passée d'une région à partir des désordres observés sur les bâtiments anciens. Avec des chercheurs d'autres disciplines, elle a exploré cette approche dans le cadre de groupes d'échanges inédits. Dans cette même voie, depuis une dizaine d'années, grâce aux progrès des moyens de calcul, un nouveau champ des possibles s'est ouvert. Et les travaux ont pris une nouvelle dimension en 2017, avec la thèse d'Arnaud Montabert : il propose alors une démarche concrète qui interroge les bâtiments comme témoins des séismes passés. Quel séisme a secoué ce mur ? Comment les hommes l'ont-ils réparé ? En croisant ces indices, il espère révéler l'activité sismique passée d'une région.

Pour mettre en application cette démarche scientifique, la première étape a consisté à identifier un monument historique portant les stigmates de séismes passés sans avoir été détruit, et pour lequel des archives historiques sont disponibles. L'église médiévale Sant'Agata del Mugello, au cœur des

Apennins toscans, en Italie, est idéale. Implantée dans le bassin sédimentaire de Mugello, encadré par deux grandes failles actives, elle a subi deux des plus puissants séismes régionaux connus : ceux de 1542 (magnitude 6) et de 1919 (6,3). Surtout, la région stratégique où elle se trouve, entre Florence et la plaine du Pô, sous l'influence des Médicis, possède huit siècles d'archives méticuleuses, décrivant dommages et réparations depuis 1300, dont des écrits de religieux érudits comme Tolomeo Nozzolini qui, au XVII^e siècle, correspondait avec Galilée.

La première étape a consisté à réaliser une maquette numérique de cette église sur la base de deux types de mesures : les dimensions du bâtiment, relevées par scanner laser, et l'évaluation des principaux modes de vibrations de la structure. Ces derniers décrivent les fréquences propres et la forme des vibrations d'une structure (comme une corde qui vibre). Elles ont été déterminées en auscultant la réponse de l'église et de son clocher (quelques micromètres) aux vibrations non perceptibles de la Terre, ce qu'on appelle le « bruit de fond sismique ». À cette fin, des capteurs sismiques ultrasensibles ont été placés pendant plusieurs heures dans l'église, disposés selon une géométrie

régulière de points de mesure. Il a fallu pour cela introduire une nacelle dans ce monument historique classé ! Une semaine de grande tension pour les chercheurs concernés.

Comment, ensuite, faire « voyager dans le temps », jusqu'aux séismes passés, la maquette de l'église dans son état actuel ? Pour cela, l'idée clé était d'identifier et de classer les réparations et désordres structuraux, notamment ceux liés aux deux grands séismes historiques. C'est ce qu'a rendu possible la thèse d'Arnaud Montabert, aujourd'hui maître de conférences à l'École normale supérieure. En procédant à une analyse stratigraphique détaillée – une méthode d'archéologie – il a retracé l'histoire sismique du bâtiment, identifié 80 phases de réparation et distingué 13 techniques de construction différentes. Le croisement de ces informations avec les archives écrites a ensuite permis de faire une chronologie des événements pour proposer plusieurs modèles structurels de l'église, autant de « versions » à différentes époques. Le défi scientifique ne s'arrêtait pas là. Il s'agissait ensuite de solliciter ces maquettes historiques avec des accélérogrammes – des signaux numériques décrivant l'accélération du sol pendant un séisme – jusqu'à reproduire précisément les dégâts observés. « *Nous espérons remonter, par cette modélisation inverse, aux caractéristiques du mouvement sismique ayant causé ces dégâts, éclairant ainsi la nature des tremblements de terre passés* », précise Maria Lancieri, sismologue à l'ASNR.

Un projet d'envergure

Ces premières études prometteuses ont livré des résultats sur les accélérations du sol maximales induites par le séisme de 1919, qui n'a pas endommagé l'église. Elles ont également ouvert de nouvelles perspectives dans le but d'affiner les analyses. La première consiste à étendre l'étude à plusieurs monuments dans et autour du même bassin sédimentaire ; la seconde, à conduire des campagnes géophysiques pour caractériser le bassin et son impact sur le mouvement sismique. Le soutien de la population a été fondamental pour le repérage des nouveaux sites. Il existe de nombreux documents paroissiaux, administratifs, des témoignages, des peintures, des photos de ce patrimoine auquel les citoyens sont très attachés. « *En 2019, nous leur avons présenté nos résultats et les futures recherches*, précise Maria Lancieri. *Ce fut un franc succès !* »

La chercheuse coordonne ce nouveau projet, soutenu par l'Agence nationale de la recherche. D'une tout autre envergure, il mobilise une quinzaine de chercheurs aux compétences variées (sismologues, géologues, archéologues de la construction, historiens, spécialistes du génie civil, pétrologues) issus de cinq instituts français (ASNR, université PSL, ENS Paris-Saclay, Cerema, CentraleSupélec) et de quatre partenaires italiens (Institut national de géophysique

et de volcanologie, université de Sienne et un laboratoire du Conseil national de la recherche). Le projet a démarré en mars 2021 mais, confinement oblige, ce n'est qu'en juillet que toute l'équipe a enfin pu aller sur le terrain ! Les pétrologues accompagnent alors les archéologues dans les clochers où ils font des prélèvements de quelques millimètres cubes de mortier. Les analyses optiques de ces échantillons en révéleront la composition minéralogique et la granulométrie : deux éléments liés à l'époque de fabrication des mortiers, une information précieuse en complément de l'analyse stratigraphique des clochers. La démarche développée sur l'église de Sant'Agata est redéployée pour chaque clocher par un nouveau doctorant, Rodrigo Yanez Chura qui a soutenu sa thèse en décembre 2025. Il élabore, cette fois, trois modèles structurels de chaque clocher : dans leur état actuel, tels qu'ils étaient en 1919 et en 1542. Objectif : calculer leur comportement dynamique face aux secousses des séismes de 1542 et 1919.

Des milliers de simulations

Rodrigo Yanez Chura calcule ainsi des milliers de simulations de déformations des clochers afin d'établir des relations entre les différents niveaux de dommages et les mouvements du sol. Il s'appuie pour cela sur des mouvements du sol sélectionnés à partir de bases de données mondiales pour des séismes similaires à ceux du centre de l'Italie. Résultat : sur la base des niveaux de dommages observés, les accélérations maximales du sol – un paramètre utilisé pour décrire l'aléa sismique – lors des séismes de 1542 et 1919 vont globalement de 0,4g à 0,8g (g étant l'accélération terrestre). À partir de 0,3g, une personne ne tient pas debout et les structures vulnérables sont endommagées et à 0,8g, des structures plus résistantes le sont aussi. « *Les résultats sont encore entachés de fortes incertitudes mais ils confirment que la démarche est prometteuse !* » se réjouit Maria Lancieri.

La principale incertitude concerne la présence du bassin sédimentaire et son impact sur les mouvements subis par les clochers, ce qu'on appelle « l'effet de site ». Cet effet augmente la durée et l'amplitude des mouvements du sol (*voir Pour la Science n° 524, 2021*). Afin de le quantifier, les sismologues de l'ASNR ont conduit des campagnes d'auscultation du bassin de l'été 2021 jusqu'à 2025. Ces mesures sismiques ont permis d'affiner les données des collègues italiens, notamment au sujet de la profondeur du bassin et de la vitesse des ondes sismiques. Ces informations sont aujourd'hui utilisées par Christine El Khoury, ingénieure à l'ASNR, pour simuler les mouvements engendrés par la rupture des failles bordant le bassin et la propagation des ondes dans le milieu. « *Ce travail, encore en cours, présente de multiples défis*, relève Maria Lancieri : *la faille en cause dans les séismes est encore en débat, on connaît mal la profondeur à laquelle ils ont eu lieu, et les*

Cahier partenaire réalisé avec



Depuis le 1^{er} janvier 2025, l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) et l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) se sont réunis pour devenir l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR).

RÉFÉRENCES

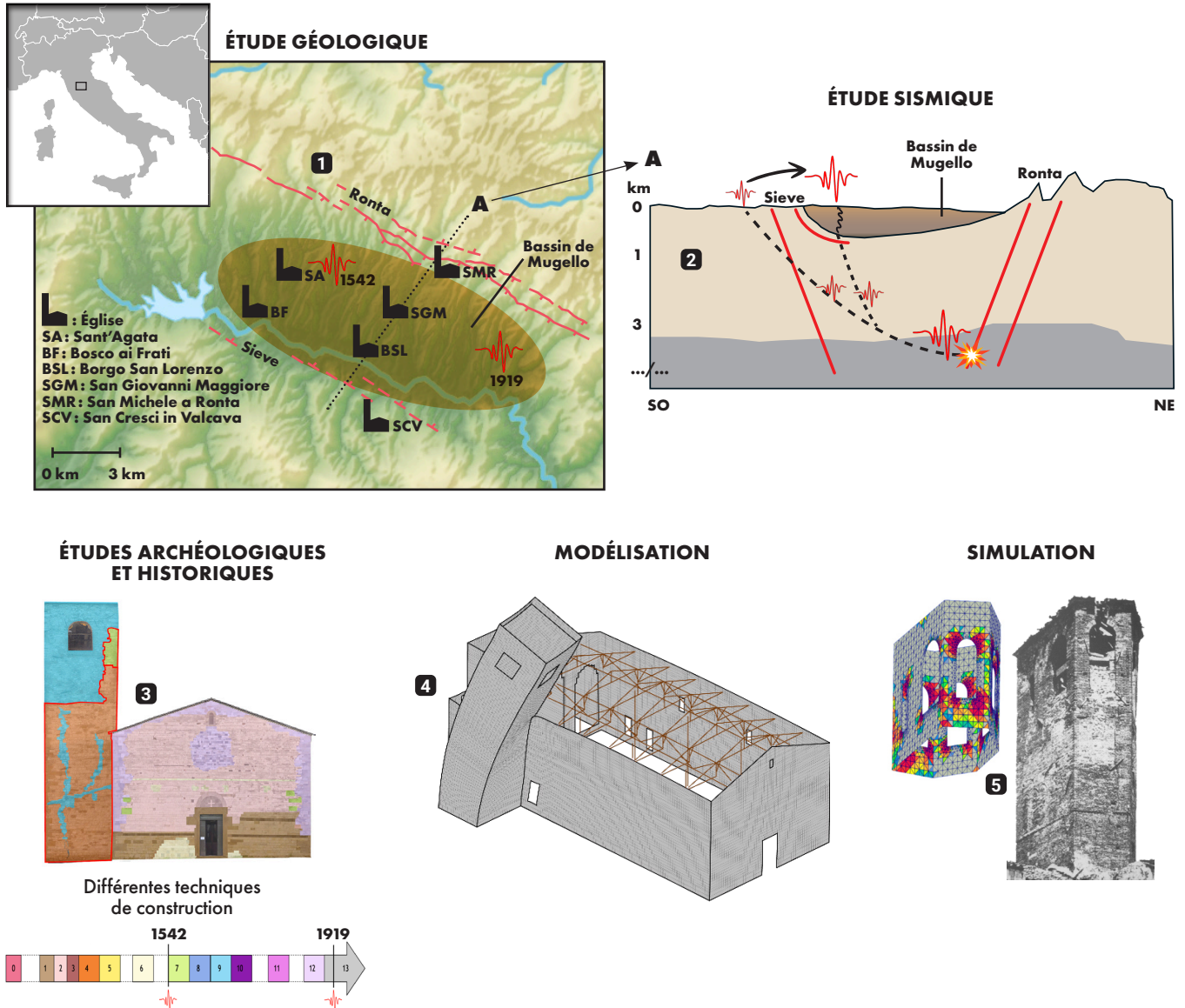
- A. Montabert *et al.*, High resolution operational modal analysis of Sant'Agata del Mugello in light of its building history, *Engineering Structures*, 2022.
- A. Montabert *et al.*, An open database to evaluate the fundamental frequency of historical masonry towers through empirical and physics-based formulations, *Buildings*, 2023.
- E. D. Mercerat *et al.*, dynamic characterization of five historical bell towers in the Mugello basin (Italy), in *Proceedings of the 10th IOMAC*, lecture notes in civil engineering, 2024.

techniques numériques à développer sont particulièrement complexes.»

Même si ces résultats, inédits et prometteurs, restent très préliminaires, le fait que la démarche soit validée sur six sites aux histoires différentes, avec parfois des dégâts sismiques effacés, laisse espérer qu'elle pourra être déclinée dans d'autres contextes où il manque des données archéologiques, historiques

ou sismiques. À terme, la méthode pourra être utilisée pour conforter les évaluations d'aléa sismique dans l'Hexagone, par exemple pour les installations nucléaires de la vallée du Rhône en étudiant des bâtiments du riche patrimoine architectural de la région comme le pont du Gard. Une chose est sûre : en 2026, l'ASNR est toujours un acteur majeur de l'archéosismologie. ■

UNE DÉMARCHE MÊLANT DE NOMBREUSES DISCIPLINES



L'étude archéosismologique a porté sur cinq églises dans le bassin sédimentaire de Mugello et une à proximité, toutes affectées par les deux séismes majeurs locaux, en 1542 et 1919, avec des niveaux de dégâts différents **1**. Le bassin est bordé par deux grands systèmes de failles (Ronta et Sieve). Des études sismiques sont en cours pour calculer le mouvement du sol prenant en compte « l'effet de site » lié au bassin **2**. En parallèle, des analyses archéologiques et historiques ont permis de reconstituer la structure des clochers à travers les âges, comme ici pour l'église de Sant'Agata **3** : à chaque couleur de la frise chronologique correspond une technique utilisée à une période donnée pour construire ou réparer l'église. À partir d'un modèle de la structure actuelle fondé sur ses fréquences propres de vibrations, il a été possible de concevoir des modèles structurels des bâtiments à différentes époques et de simuler leurs déformations **4**. Selon les témoignages, la majorité des dégâts sismiques des clochers a eu lieu dans la chambre des cloches (**5** à droite). Ce qui est confirmé par les simulations numériques (**5** à gauche).