

Journée Technique "Les techniques de maçonnerie face aux séismes, de l'Antiquité à nos jours : perspectives d'études pluridisciplinaires"

Cette journée technique consacrée à l'étude du comportement des maçonneries soumises à une sollicitation sismique s'est déroulée le 29 octobre 2017 au Laboratoire de Géologie de l'Ecole Normale Supérieure de Paris. Ce workshop international organisé par l'Ecole Normale Supérieure, l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire et l'Association Française de génie Parasismique a regroupé des spécialistes de nombreuses disciplines en lien avec l'étude des séismes : ingénieurs des structures, architectes, archéologues, géologues et sismologues. Ce fut également une opportunité exceptionnelle d'échanger sur l'avenir de cette thématique.

Première partie : Introduction

La journée d'étude a été scindée en quatre parties de l'observation archéologique de terrain aux techniques de modélisation. Dans le cadre de l'introduction, Hélène Dessales a présenté le cadre du programme ANR RECAP dont l'objectif est de déterminer les techniques de constructions mises en place dans Campanie romaine à travers le cas particulier de Pompéi. Le projet implique une approche particulièrement pluridisciplinaire associant archéologie de la construction, sociologie, modélisation numérique, ingénierie des structures, et géologie.

Dans un second temps, Didier Combescure a rappelé les activités de l'AFPS (Association Française de génie Parasismique) particulièrement impliquée dans l'étude post-sismique des dégâts observés sur des bâtiments courants et historiques conçus en maçonnerie. L'AFPS a déjà été à l'initiative de journées d'études consacrées à l'étude du bâti historique en contexte sismique. Ce fut également l'occasion de rappeler les travaux de l'APS (Archéologie, Pathologies, Sismicité), association ayant déjà menée de nombreuses études interdisciplinaires sur l'impact des séismes sur le bâti en contexte archéologique.

Seconde partie : Interprétations archéologiques et textuelles

La première partie du workshop est consacrée à la collecte d'information qu'elle soit de nature archéologique ou textuel. La première présentation a été proposée par le docteur Andrea Arrighetti de l'université de , spécialiste en archéologie de la construction. Cet exposé illustre les techniques d'investigation mises en place sur le terrain. Tout d'abord, une forte importance est accordée au rappel du rôle que présente l'archéologie de la construction pour une meilleure compréhension du risque sismique et du comportement de différentes techniques de construction. Les objectifs d'une telle approche consistent à développer une méthodologie pour l'analyse systématique des bâtiments historiques dans des régions sismiques. Elles consistent également à proposer des bases de données concentrant des données issues d'archives historiques ou d'études ingénieriques étudiant les processus de construction et de reconstruction des bâtiments à l'échelle d'une région, dépassant ainsi l'échelle du bâtiment. Le premier cas d'étude abordé est celui de Mugello. Après avoir rapidement rappelé le contexte sismique de la région environnante et des séismes historiques particulièrement nombreux qui s'y sont produits, les critères de sélection des bâtiments historiques sont présentés. L'Église de Sant' Agata est ainsi retenue pour cette étude. La photogrammétrie et

micro-photogrammétrie sont les méthodes principalement retenues dans le cadre des prospections. Les orthophotos permettent une analyse des principales déformations le long des parois de la structure. L'exposé s'enchaîne sur la présentation de la méthodologie utilisée pour les lectures stratigraphiques du bâti permettant l'identification des différentes phases d'endommagement et de reconstruction du bâtiment. Les études épigraphiques permettent l'identification des sources d'endommagement. En effet des inscriptions peuvent persister sur des vestiges historiques ou au sein de textes historiques. Un travail important consiste alors à concilier les observations stratigraphiques et les données textuelles. Différents scénarii sont alors proposés pour expliquer la répartition des dommages. Dans le cas de Mugello, les bâtiments endommagés semblent s'organiser autour d'un système de failles bien connu.

La deuxième présentation est proposée par Héléne Dessales (ENS, AOROC), Agnès Tricoche (CNRS, labex TransferS) et Yacine Benjalloun (doctorant ISTerre). Cette présentation illustre les moyens qui sont développés pour l'enregistrement et l'organisation des données. Trois bases de données ont été présentées. Ces bases de données proposent la caractérisation des techniques de réparations en contexte post-sismiques grâce à trois bases de données. Un exemple d'utilisation est proposé dans le cas du site de Pompéi et de celui d'Iznit. La base ACOR (Atlas des Techniques de la Construction Romaine) caractérise chacune des techniques de construction existantes dans le monde romain. Les bases OPUR (Outils Pour Unité de Réparation) et OPUS (Outils Pour Unité Stratigraphique construite) permettent à la fois la localisation et la description précise de ces techniques de réparations (un lien avec l'Atlas AcoR est systématiquement fait). A titre d'exemple, les réparations repérées durant la mission RECAP en 2017 de la région VII de Pompéi ont été systématiquement identifiées dans les deux bases OPUR et OPUS en faisant références à des techniques de construction caractérisées dans le catalogue AcoR. Cette exercice a également été mené à Iznik (l'antique Nicea romaine) notamment pour l'étude de l'aqueduc de la cité antique. Une quinzaine d'unités stratigraphiques ont ainsi été identifiées permettant alors de discriminer 9 phases de construction dont les événements sismiques pourraient être l'origine.

La troisième présentation a été proposée par Hervé Jomard, géologue et ingénieur (IRSN) sur la base de données SisFrance. Cette présentation correspond à nouveau à la gestion de base de données mais se distingue de la présentation précédente puisqu'elle se concentre sur les données textuelles. La base de données SisFrance a pour origine le développement du programme nucléaire français au cours des années 1970, imposant alors une meilleure connaissance de la sismicité historique sur le territoire. Les sources des données sont très variées. Elles proviennent principalement du catalogue de Rothé (1977) ou des travaux menés par le BCSF au cours du 20ème siècle. Cependant les catalogues souffrent d'une analyse des textes souvent jugée insuffisante, d'une absence récurrente des sources, et d'une confusion systématique de différents événements catastrophiques rassemblés sous la bannière du tremblement de terre. Un travail important est alors mené pour une meilleure analyse des sources, une critique systématique des documents, une évaluation de l'intensité des événements (échelle MSK-64) et, si possible, la proposition d'une possible localisation de l'épicentre. L'intensité est directement déterminée à partir des dommages reportés dans les textes. De manière générale, la répartition des événements sismiques corrobore les cartes sismiques contemporaines issues de l'enregistrement instrumentale. En ce qui concerne la description du comportement des maçonneries, si certains textes proposent une description des dommages, il faudra attendre la naissance de la photographie pour permettre un enregistrement plus quantitatif des informations.

En conclusion, bien que la base soit une des plus complètes d'Europe, un travail important reste à mener sur l'identification des sources. Elle présente également des faiblesses dans son interrogation. On note également une absence des documents iconographiques dans la base.

Troisième partie : Caractérisation *in situ* et modélisation

Cette troisième partie débute avec une présentation proposée par Maria Rosa Valluzzi (Université de Padoue). Cette présentation concerne la contribution de l'ingénierie des structures dans les opérations de conservation des sites archéologiques. L'exposé porte aussi bien sur les techniques d'analyse des structures, que sur les outils de modélisation déployés. Les paramètres indispensables pour la modélisation des structures (module d'Young, masse volumique, ...) sont directement issus des mesures sur le terrain. Une attention particulière est accordée aux zones sensibles de certaines structures. Chacun des éléments de la structure est alors modélisé. La méthode de modélisation retenue est la discrétisation.

Dans la cinquième présentation Joao Guedes (Université de Porto) propose une présentation sur la vulnérabilité de structures existantes et des mesures afin d'améliorer la compréhension du comportement des structures. Cette présentation est divisée en deux parties distinctes : une première partie sur les essais en laboratoire afin de caractériser le comportement de la structure, puis une seconde concernant les interventions sur des structures en maçonnerie afin de prévenir des dégâts d'origine sismique. L'étude des maçonneries est complexe aussi bien par la diversité des matériaux qui la constitue que par les techniques de constructions qui sont utilisées. Dans cette présentation le comportement de structure typique en granite ou en basalte est directement testé en laboratoire. Les tests sont réalisés en compression uniaxial, diagonal, et en cisaillement, De ces expériences, les courbes de comportements, la résistance aux forces de cisaillement, la capacité de la structure à dissiper l'énergie et les modes de ruptures sont connus. Les expériences sont menées à la fois en laboratoire et en grandeur nature. Les interventions réalisées sur le terrain consistent à lier mécaniquement les éléments tels que les poutres ou les planchers à la structure, ou à renforcer la maçonnerie par injection de matériaux tels que de l'acier, des fibres dans le mortier ou du polypropylène (...)

Quatrième partie : Modèles de calcul, essais en laboratoire

Cette quatrième partie concentre une étude autour des modèles de calcul et des essais en laboratoires réalisés dans différents instituts.

Dans cette partie, une première présentation est donnée par Andrea Prota (Université de Naples). Dans un premier temps, la présentation revient sur les missions de prospections menées dans le cadre du programme ANR RECAP à Pompéi. En particulier, une étude mécanique complète de la villa de Diomède a été menée dans le cadre d'une thèse réalisée par Giusi De Martino (Docteur de l'Université de Naples). Les structures ont été modélisées par la méthode des macroéléments en vue de tester leur résistance aux sollicitations sismiques, bien qu'aucun signal accélérométrique ne semble avoir été utilisé. Une évolution des techniques de construction a été observée sur le terrain et semble démonstrative de l'adaptation des bâtisseurs romains à un risque sismique récurrent.

La deuxième présentation sur les méthodes de modélisations mécaniques est proposée par le Professeur Frédéric Ragueneau (LMT de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan). La présentation

se concentre sur les différents travaux menés par le laboratoire en matière de modélisation du comportement des structures de génie civil. Les motivations d'un tel programme sont les récentes expositions des bâtiments historiques aux séismes, et un besoin important d'engager un premier diagnostique sur un héritage culturel très abondant en France. Un premier travail consiste à proposer une classification des structures, par typologie, mais également par matériaux. L'analyse de la vulnérabilité est alors étendue à cette notion de classe. La compréhension du comportement des structures passe systématiquement par un relevé aussi bien qualitatif que quantitatif des dommages observés. La difficulté majeure reste l'expérimentation du comportement des structures. Le développement de tests virtuels permet d'outrepasser cette limite. Les modélisations proposées se font sur la base du principe des éléments finis. De nombreux modèles prenant en compte l'interaction (cohésion, contact, ...) entre les particules ont été développés, et peuvent être appliqués à l'étude du comportement des maçonneries.

Pour des cas d'études, le protocole se déroule de la manière suivante. Dans un premier temps, les données concernant une structure particulière sont récoltées (durée de vie,...). Des missions de terrains permettent de mener différents relevés qualitatifs et quantitatifs (photogrammétrie, ...). Des mesures *in situ* du bruit ambiant permettent de déterminer les fréquences principales de la structure, et ainsi les modes de vibrations principaux. La reproduction du comportement de la structure par les modèles semble correspondre assez précisément le comportement réel (une corrélation de 0,98 est ainsi annoncée dans un cas d'étude). Cette étude s'étend également sur l'analyse du comportement non linéaire de la structure. Si la méthode permet théoriquement de rendre compte plus précisément du comportement de la structure, les temps de calculs sont encore excessivement long. Pour alléger les temps de calculs, un découpage en macroélément est proposé et la réponse non-linéaire de la structure est estimée *via* un chargement de type « push-over ». Les résultats d'une telle méthode sont jugés satisfaisants pour des séismes de tailles faibles à moyennes. Les perspectives sont optimistes. Elles prévoient une étude plus approfondie du comportement des maçonneries. Les hypothèses sur les magnitudes proposées pour les séismes historiques pourront alors être testées, validées, ou infirmées.

Le Professeur Sergio Lagomarsino (Université de Gênes) a clôturé cette quatrième partie en revenant sur les aspects juridiques concernant la conservation mécanique des bâtiments historiques. La sauvegarde des maçonneries anciennes est fondamentale, d'une part à des fins de conservations du patrimoine historique, et d'autre part pour la sécurité des usagers. L'expérience faite des derniers séismes (séisme de l'Aquila en 2009, d'Amatrice/Norcia de 2016) a largement démontré la vulnérabilité de la maçonnerie. Un point crucial qu'il convient désormais de franchir est le passage d'une démarche qualitative à une démarche quantitative pour tester, et valider les comportements alors prédits. La structure conférée par les éléments d'une maçonnerie est très faible à cause de leur faible résistance en traction, de leur détérioration au cours du temps et de l'absence de connexion entre les différents éléments. De telles structures peuvent cependant être renforcées en particulier suite à de forts tremblements de terres. Un des moyens pour évaluer le renforcement des structures et la possibilité de les modéliser. Cette capacité à modéliser les structures est bien sûr limitée, en effet les données sont souvent indisponibles ou insuffisantes. La résistance d'une structure est majoritairement évaluée par la méthode du « push-over ». Ces nouvelles méthodologies seront par ailleurs utilisées pour la réévaluation de l'Eurocode 8. Encore une fois, les différentes structures pourront être regroupées par typologies. Ces typologies sont alors modélisées et testées dynamiquement afin d'en déduire une loi de comportement type. La modélisation des structures se fait alors par découpage du modèle en macroéléments.

Discussion

Des séances de discussions ont eu lieu entre les différentes parties. On rappelle ici les principales remarques qui ont été discutées. La notion d'échelle d'observation est une question fondamentale. En effet les travaux de mécanique exposés démontrent clairement une dépendance des résultats à cette même échelle questionnant ainsi le réalisme des lois de comportement pour la caractérisation de la structure. On note ainsi différentes écoles de modélisation. Certains choisissent une description fine des éléments quand d'autres proposent une subdivision de la structure en macroélément. Un compromis est nécessairement fait entre le coût en temps de calcul et la qualité de la description.

Une seconde remarque concerne la représentation de la sollicitation sismique. En effet, si la capacité de modélisation fine de la structure est précise, on constate que la caractérisation du séisme est réduit à un PGA ou à un vélocigramme. De plus la sollicitation de type « push-over » reste préférentiellement utilisée Cette simplification résulte d'un coût important en temps de calcul lorsque les calculs sont menés en dynamique non-linéaires.

En conclusion, cette journée a permis un état de l'art de l'étude du comportement de la maçonnerie. Le potentiel et les limites de chacune des disciplines ont été explorés. La collaboration entre les différentes disciplines semble être prometteuse et doit se poursuivre afin d'approfondir les méthodes exposées. Cette journée d'étude a également profité à l'initiation d'une thèse qui a pour but d'aborder ces différents aspects. Initiée en ce début d'automne, elle rassemble une équipe interdisciplinaire constituée des membres ayant proposé ce workshop.