

SISMICITÉ

TEXTE : ANNE-SOPHIE GOUYEN

S'INSPIRER DU VERNACULAIRE

Fortement influencées par le contexte local, faisant appel aux matériaux disponibles sur place et mettant en œuvre des techniques traditionnelles, les architectures vernaculaires sont les résultantes des expériences et des savoirs ancestraux contextualisés ; elles sont les produits du réemploi et de l'usage des matériaux biosourcés et géosourcés. À titre d'exemple, nous pouvons citer : La Bhunga house en Afrique subsaharienne et en Inde, la Gilan house en Iran, la Conical Hut au Timor, la Gaiola house en Grèce, la Himis house en Turquie, la Pombaline house au Portugal, la Casa Barracata en Italie... Ces exemples prônent l'usage du bois, associé à la terre ou à la pierre. Documenter ces typologies architecturales, dont la majorité d'entre elles est encore habitée, nous éclaire sur les essences des bois, leurs mises en œuvre, leurs hybridations tout au long de l'évolution des usages et des modes de vie. En effet, bien que ces références architecturales sont des architectures adaptées aux sollicitations sismiques et bioclimatiques, elle témoignent chacune à sa façon des contraintes techniques et économiques, mais aussi des influences culturelles de leurs contextes historiques et géographiques.

Milo Hofmann est auteur d'une thèse qui part du postulat qu'une compréhension approfondie des principes qui régissent la résilience les bâtis anciens contribuerait à réduire la vulnérabilité des populations. Il invite à « considérer l'architecture traditionnelle parasismique comme une source d'inspiration technologique pour la création architecturale contemporaine »¹, à travers plusieurs systèmes en ossature en bois, combinés avec de la maçonnerie qui peuvent être réinterprétés et adaptés. « On a toujours utilisé du mortier de terre, ou de chaux, qui a une résistance au cisaillement plus faible que le mortier en ciment. C'est un système qui s'appuie notamment sur le principe de la dissipation par frottement entre les différents éléments, et qui permet à la construction de bouger dans son ensemble, ce qui constitue un avantage énorme en cas de tremblement de terre. » Il met notamment en lumière deux systèmes traditionnels :

Le Bhatar (Pakistan), basée sur une ossature en bois avec remplissage, l'ossature en bois étant plutôt mince, à la différence du colombage.

Le Dhajji (Inde), repose sur une maçonnerie en pierres, en briques de terre crue ou de terre cuite, renforcée par des poutres horizontales encastrées dans le mur. En 2020, cinq étudiants en 2^e année de master « Génie civil » de l'Université de Grenoble-Alpes, spécialisés en construction en matériaux biosourcés et encadrés par leur enseignant-chercheur Yannick Sieffert, ont également participé à la construction de trois prototypes en maçonnerie de terre crue à échelle 1/2, testées sur les tables vibrantes du FCBA (table vibrante de 6 m x 6 m avec accélération horizontale et table avec accélération horizontale et verticale, permettant de reproduire la quasi-totalité des séismes qui peuvent avoir lieu à travers le monde). Le projet de recherche s'est poursuivi dans le sujet de thèse du doctorant Santosh Yadav², permettant de mettre en lumière le rôle des éléments horizontaux dissipateurs (en bois ou béton armé), afin de diminuer la vulnérabilité sismique de ces constructions vertueuses, d'un point de vue environnemental et sociétal.

> *Merci à Sarra Kasri, docteure en architecture, enseignante chercheuse, experte en gestion des risques à l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Paris Belleville et Yannick Sieffert, maître de conférence à l'Université de Grenoble-Alpes*



LA SISMICITÉ DANS L'HEXAGONE

La thématique de la construction en zone sismique est un enjeu fort de la filière construction bois, puisqu'une large partie du territoire est concernée par ce risque. Le bois apparaît comme un matériau performant pour répondre aux enjeux de sismicité, grâce à sa grande ductilité, mais aussi à son poids léger, et ainsi apporter le même niveau de sécurité et de fiabilité que tout autre mode constructif. La forme allongée des parois cellulaires du bois lui confère une grande résistance parallèlement au fil du bois, et lui permet d'être un matériau qui supporte une large déformation jusqu'au moment de sa

rupture. Les choix constructifs en bois pour répondre à ce risque sont variés, et parfois mixtes : exosquelette, contreventement par murs en panneaux CLT, noyaux et stabilité uniquement en béton, portiques métalliques noyés dans les ouvrages bois... « Néanmoins, on constate un retard notable en termes de précisions et de complétions des normes pour ce qui est des modes constructifs bois. Un fait est assez révélateur : là où le chapitre des règles particulières pour les bâtiments en béton comporte plus de quarante pages, le chapitre pour les bâtiments en bois n'en fait que cinq ! Bien sûr, cela va être amélioré avec les futures mises à jour de l'Eurocode 8³, que l'on attend pour 2026-2027, mais d'ici là, un certain nombre d'études sont menées pour affiner les connaissances techniques et scientifiques, et bénéficier de retours d'expérience concluant », explique Xavier Davy, ingénieur chez Egis, spécialisé en structure, référent construction bois, et co-animateur de l'atelier Structures de la commission technique ADIVBois avec Jordi Cornudella. Ce dernier, chef de projet en structures complexes et construction bois chez Setec, ajoute : « ce qui est certain, c'est qu'à l'heure actuelle, il n'y a pas de solution unique qui émerge et tendrait à se généraliser, mais bien des réflexions approfondies sur chaque opération ». Pour Xavier Davy, « l'atelier Structures d'ADIVBois a constitué alors un lieu d'échanges privilégié pour les experts, où il est possible de faire remonter des difficultés ou des bonnes pratiques, qui se prolonge maintenant au sein des comités techniques de la filière bois ».

L'atelier a davantage travaillé sur l'amortissement des ouvrages vis-à-vis du vent (phénomène d'accélération inconfortable en tête d'un bâtiment bois de grande hauteur), sur le fluage en compression des éléments bois, et sur la résistance et le comportement en rigidité des assemblages de grosse dimension. L'enjeu étant d'apporter assez de rigidité, sans surdimensionner les structures, tout en répondant à toutes les prérogatives du projet : sécurité incendie, acoustique, coût, disponibilité de la ressource bois, compétences et savoir-faire des entreprises ou encore évolution des technologies de construction.

Ces dernières années, de nombreux projets de construction bois ont fait l'objet de justifications sismiques : l'ilot Sensations à Strasbourg, la tour Hypérion à Bordeaux ou le projet le Haut Bois à Grenoble. Encore en cours de construction, la tour Silva de 18 étages à Bordeaux et la tour Carmelha de 8 étages à Monaco font l'actualité. Les deux réalisations sont conçues par le même bureau d'études, Egis, sur un mode constructif similaire d'exosquelette, mais cette der-



nière a la caractéristique d'avoir un noyau entièrement en bois.

Vincent Ballion, chef de projet chez Bellecour pour la tour Carmelha, interrogé à ce sujet, explique : « les retours d'expérience issus des essais sismiques réalisés sur la tour Silva ont été assez révélateurs de la capacité d'un exosquelette à bien absorber ce type de efforts. Cela autorise un certain élanement, mais nécessite de prendre en compte la souplesse de ce type de structure pour limiter ses déplacements sous l'effet d'autres efforts, notamment le vent ». Pour les deux projets, il a été choisi de réaliser des études en souffleries : pour Silva⁴ car c'est un bâtiment conséquent, et pour Carmelha⁵ parce que le projet est en zone maritime. Les effets sont aussi accentués par la présence des bâtiments environnants relativement hauts, créant des effets venturi difficiles à approcher sans essais de ce type. « Ils ont permis d'affiner le dimensionnement de la structure et des assemblages permettant d'absorber les efforts liés à la sismicité, tout en assurant la rigidité nécessaire pour limiter les déplacements en tête et assurer le confort des occupants. Cela a aussi permis de déterminer les zones de dépression sur la façade, pour anticiper les phénomènes d'arrachement ». Concernant les assemblages, le groupement d'entreprises qui se charge de la partie structure bois en clos couvert⁶ a développé un système de broches, fixées avec de la résine à l'intérieur des éléments structurels bois, sans boulonnages apparents, une véritable innovation, compte tenu des justifications de tenue au feu qui étaient exigées. Par ailleurs, le Gouvernement Princier de la Principauté de Monaco, maître d'ouvrage du projet, s'est emparé, par le biais de son AMO, des différents sujets de risques (hydrogène, sismiques, incendies...). L'un des enjeux pour la structure bois était le risque d'eau en phase chantier. La solution choisie fut d'utiliser, pour la 1^{re} fois en Europe, le système développé par Upbrella, inventé au Canada : une sorte de parapluie géant qui permet d'élever les structures et les façades à l'abri. « Lorsqu'on relève d'un niveau,

on est en clos-couvert, hors d'eau et hors d'air (à raison de 4 à 5 semaines par étage). Cela nous a permis de nous passer de grues, dans ce secteur urbain très dense. » Le système permet aussi de maîtriser l'ambiance de travail et de protéger les riverains du bruit (à Monaco, il existe une réglementation sur le bruit généré en chantier, qui oblige à trouver des systèmes pour y pallier). Selon lui, s'il existe d'autres types de risques (en conception, risques opérationnels, ou de gestion à long terme), et « si c'est la sismicité qui vient à l'esprit en premier, c'est finalement le vent qui est plus le dimensionnant sur les ouvrages de moyenne et grande hauteur ».

RÉSILIENCE PARTAGÉE À L'ÉCHELLE MONDIALE

En France, l'innovation actuellement en phase de recherche par le FCBA⁷ est un système d'amortissement des vibrations, inspiré des suspensions de Formule 1, de trains, ou d'avions. « L'inertier » génère une masse par effet inertiel pour s'opposer aux déplacements du bâtiment et amortir les vibrations, sans apporter de contraintes supplémentaires, dans un bâtiment très léger. C'est un système à pignons, avec des engrenages et une roue d'inertie, dont de nombreuses recherches pour le bâtiment existent, sans application concrètes à ce jour.

Au Japon, qui connaît des séismes sans commune mesure avec ce que l'on a en Europe (8 séismes magnitude 7 à 9 dans les 15 dernières années), l'enjeu principal est de lever les freins technologiques d'ici 2041, pour les différents systèmes déjà utilisés : hybrides bois-acier (lamellé collé avec une poutre en I acier au cœur, qui permet plus de rigidité et une protection feu de l'acier ou poteaux-poutres acier et contreventement en CLT, qui permet à l'acier de reprendre les efforts de compression, mais de diminuer les hauteurs de planchers) hybride bois-béton (structure béton sur les premiers niveaux puis structure bois dans les étages) ou encore structure bois posée sur plots parasismiques, afin d'éviter la transmission des vibrations



du sol au bâtiment. Enfin, au Canada et aux États-Unis, le système constructif dominant dans la construction moyenne et grande hauteur est le CLT, avec une réglementation très avancée sur le sujet. Les essais du Nheri TallWood Project, (sur table sismique de Dan Diego, avec maquette échelle 1 de 10 étages), ont été réalisés au printemps 2022. « C'est un projet ambitieux dont les résultats seront très certainement instructifs et utiles pour le développement et la définition des dispositions constructives attendues pour les constructions parasismiques de grande hauteur en bois. D'autant que sur ces essais, la structure et le contreventement sont 100 % en bois, sans même un noyau béton. Mais les particularités et différences entre le code américain et l'Eurocode, feront certainement que les conclusions ne soient pas directement applicables », concluent Xavier Davy et Jordi Cornudella.

1. Tracés n°137, Reconstruire II (2011) : interview de Milo Hofmann, par Anna Hohler et Cedric van der Poel, auteur de la thèse « Le facteur séisme dans l'architecture vernaculaire : un décryptage entre déterminants culturels, types de structures et ressources cognitives parasismiques » (2015) - 2. « Analyse expérimentale de la vulnérabilité sismique des structures en maçonnerie de terre crue renforcées par bande horizontale » (2021) - 3. L'Eurocode 8 (EN 1998) s'applique au dimensionnement et à la construction de bâtiments et d'ouvrages de génie civil en zone sismique - 4. Bellecour architectes & ArtBuild, essais sur table sismique, sur maquette 1/3 (financés par le maître d'ouvrage Kaufman & Broad et l'expérimentation portée par le FCBA) - 5. Bellecour architectes, Gabriel Viora en phase EXE, livraison prévue pour février 2024 - 6. l'entreprise monégasque de couverture associé à Simonin - 7. Pour plus d'info : Webinaire Woodrise : risque sismique et résistance des structures

Page 26, en bas, de gauche à droite, - Maquette d'une Casa Baraccata, issue du travail de DSA Risque Majeur de Flore Bernigaud, Léna Desfossez, Angéline Fontaine, Fanny Phan

Page 27, en haut, la tour Carmelha en construction grâce au système Upbrella ©Tomatoki