

Earthquake-Protection. Historic Masonry in Switzerland

Pierino Lestuzzi, EPF Lausanne & Résonance Ingénieurs-Conseils SA, Carouge

ABSTRACT

Historic monuments are, by definition, existing structures and therefore have similar seismic deficiencies as other existing buildings that do not have historic status. Earthquakes pose a significant threat because the force they exert acts horizontally. Given that buildings are designed to withstand vertical loads, such as their own weight, horizontal seismic accelerations can therefore cause considerable damage (see fig. 1–3).

Masonry structures are particularly vulnerable to horizontal seismic action because of the way in which they were built. This situation is further compounded by the presence of special architectural features, such as arches and the like.

The seismic hazard in Northern Europe, which is rated as a moderate hazard area, is much lower than in Southern Europe. Nonetheless, this does not rule out the possibility of a major earthquake in the region, even though it would be an extremely rare event. Due to their age, historic monuments are more likely to be exposed to a catastrophic event than other buildings.

SIA (Swiss Society of Engineers and Architects) standards stipulate how structures in Switzerland should be built. This building code underwent a major review in 2003, leading to the inclusion of many more seismic related specifications. The SIA 2018 technical note contains directives on how to assess the seismic safety of existing structures. However, they do not cover historic buildings. Earthquake-proofing cultural property is a federal responsibility. The Federal Office for Civil Protection (FOCP) and the Federal Office for the Environment (FOEN) fund

and disseminate technical documentation targeted at the professional community involved in the difficult task of carrying out seismic safety assessments and, in some instances, retrofitting historic buildings. Under the aegis of the FOCP, an expert report was carried out in 2004, while the FOEN is currently preparing documentation specifically for civil engineers, architects and historic monument conservators. The aim of this work, which will detail two real-life cases, is to raise awareness and to ensure that all concerned have the same information at their disposal.

Since the introduction of new standards in 2003, several historic buildings in Switzerland have been assessed and retrofitted, where necessary. The experience gathered so far shows that buildings do not necessarily need to undergo invasive interventions to become more earthquake-resistant. In fact, operations of this kind can be scaled down considerably and even completely avoided through the adoption of a multidisciplinary approach which focuses on finding solutions that are commensurate with the specific nature and features of historic buildings. Moreover, examples from the recent past demonstrate the potential benefit of using sophisticated seismic analysis tools and implementing in-situ measures.

Protection sismique des monuments historiques en maçonnerie en Suisse

Pierino Lestuzzi, EPF Lausanne & Résonance Ingénieurs-Conseils SA, Carouge

INTRODUCTION

Pour cerner la difficulté du problème général de la vulnérabilité sismique des constructions, il faut d'abord comprendre la raison pour laquelle les sollicitations sismiques sont si redoutables pour les structures. Un séisme est un événement violent et extraordinaire qui peut provoquer l'effondrement complet des constructions. Cependant, si les secousses sismiques provoquent des catastrophes, c'est surtout parce qu'elles agissent sur les structures de manière horizontale, une façon bien différente de celle des autres charges [1].

Durant un séisme, la base d'une structure est soumise à de brusques accélérations dans toutes les directions. Toutefois, les accélérations sismiques sont principalement horizontales. C'est précisément le caractère horizontal des accélérations sismiques qui est particulièrement néfaste pour les structures, car ces dernières sont prévues pour résister à des charges essentiellement verticales. En effet, les sollicitations auxquelles les structures doivent habituellement faire face sont essentiellement verticales. Dans les bâtiments, c'est le poids propre qui domine.

Etant donné que les charges standards sont principalement verticales, les constructeurs ont toujours été habitués à concevoir et à réaliser les constructions de telle manière à ce qu'elles se comportent bien sous ces charges. A l'instar d'un château de cartes ou d'un empilement de plots en bois, les structures sont alors très vulnérables aux sollicitations horizontales (figure 1). Ce constat s'applique tout particulièrement aux monuments historiques en maçonnerie.

Les sollicitations sismiques causent des dégâts typiques aux structures. Les constructions en maçonnerie sont spécialement vulnérables aux

accélérations sismiques horizontales. En raison de leur mode de construction (rangées de briques empilées), les éléments en maçonnerie offrent peu de résistance hors de leur plan et se ruinent souvent sous l'effet de sollicitations transversales. La maçonnerie de pierre naturelle est également concernée par ce mode de rupture (figure 2). La présence d'éléments de structure particuliers, comme les voûtes par exemple, accentue encore la vulnérabilité sismique des monuments historiques en maçonnerie (figure 2).

Par ailleurs, les dégâts sismiques concernent également les éléments dits secondaires. Pour les bâtiments courants, ces dégâts représentent même la majorité, sinon la totalité, des pertes financières dans le cas d'événements modérés. Dans le cas des monuments historiques, la vulnérabilité sismique du mobilier peut être prépondérante. Il s'agit par conséquent d'accorder une attention particulière à ces éléments dans le cadre de la protection sismique.

En Suisse, la problématique de la protection sismique des monuments historiques est coordonnée par la Confédération. Juste après l'introduction des nouvelles normes de construction en 2003, l'office fédéral de la protection de la population (OFPP) a chargé un groupe d'experts de rédiger un rapport pour faire le point de la situation [2]. Actuellement, l'office fédéral de l'environnement (OFEV) prépare une publication pour formaliser les bases de réflexion de la procédure à adopter. Après un bref rappel du contexte sismique et normatif en Suisse, cet article décrit les principales contributions liées au soutien de la Confédération (documentations et travaux de recherche) et termine sur quelques exemples concrets réalisés. [4] [5].

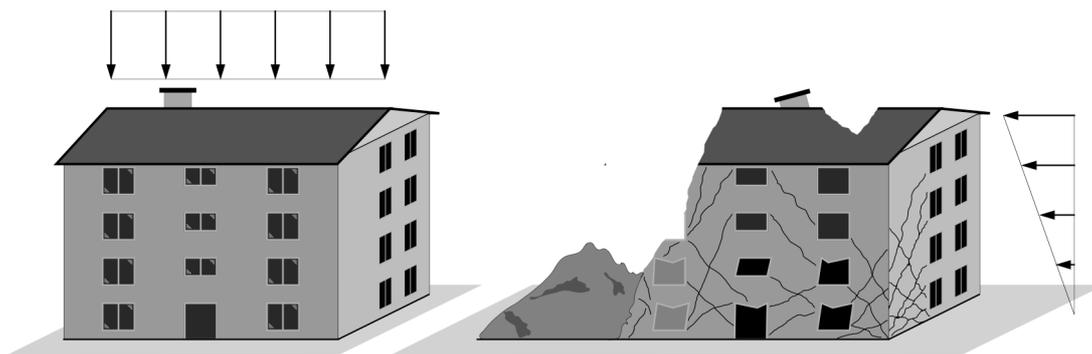


Figure 1 Le caractère horizontal des sollicitations sismiques est véritablement dévastateur pour les structures qui sont traditionnellement construites pour des charges essentiellement verticales [1].



Figure 2 Rupture hors plan du fronton (à gauche) et effondrement (à droite) d'églises en maçonnerie lors du séisme d'Emilie-Romagne en 2012 [photos M. Baur et T. Wenk, mission de reconnaissance SGEB].

ALEA SISMIQUE ET NORMES

D'une manière très générale, les séismes sont essentiellement générés par des ruptures en profondeur dans l'écorce terrestre, principalement liées au phénomène global de la dérive des continents. Ces ruptures brusques engendrent des ondes élastiques qui vont se propager dans toutes les directions et, en atteignant la surface, vont violemment ébranler les constructions [3] [4]. De cette description très succincte, il faut surtout retenir que la prévision un tant soit peu précise de la date d'un séisme est illusoire et que, par essence, il n'est pas possible d'en empêcher le déclenchement. Par conséquent, en matière de protection sismique relative aux ouvrages, la seule solution est la prévention, c'est-à-dire la construction parasismique.

Du point de vue sismique, l'Europe du Nord ne se situe évidemment pas au même niveau que l'Europe du Sud. La sismicité peut y être quali-

fiée de modérée. Cependant, elle n'est pas négligeable [5]. En matière de constructions courantes, l'action sismique est caractérisée par le danger (ou l'aléa) qui représente l'accélération du sol au rocher pour une période de retour de 475 ans. La carte de l'aléa sismique en Suisse, établie par le service sismologique suisse (SED), est représentée à la figure 3 [6]. Cette carte montre que la zone la plus exposée se trouve en Valais. Viennent ensuite la région bâloise, le Chablais et l'Oberland bernois. Puis, on trouve la partie méridionale de la Suisse centrale, l'Engadine et la vallée du Rhin à Saint-Gall. Le reste du pays est moins exposé. Notons que le SED va publier en automne 2015 un nouvel aléa sismique, mais cette adaptation ne va pas entraîner de modifications significatives.

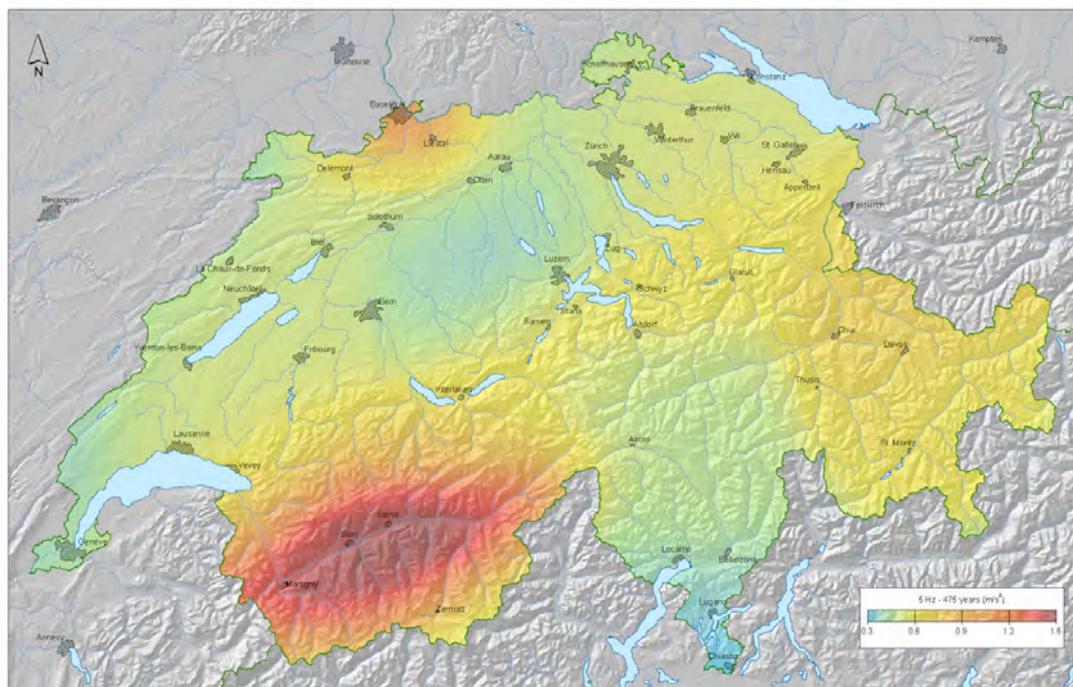


Figure 3 Carte de l'aléa sismique en Suisse représentant la valeur de dimensionnement de l'accélération horizontale du sol au rocher en m/s^2 pour une période de retour de 475 ans [6].

En Suisse, les normes SIA régissent la construction des structures habituelles. Elles sont établies par la Société suisse des Ingénieurs et Architectes (SIA) et ont subi une importante évolution en 2003 pour les rendre compatibles avec les Eurocodes. L'évolution la plus marquée de cette édition concerne le danger sismique qui a été relevé de manière significative. Il faut noter ici que les normes SIA s'appliquent aux structures habituelles et nouvelles comme les bâtiments et les ponts, par exemple. Elles ne concernent pas les bâtiments existants et les monuments historiques [7]. De plus, elles ne s'appliquent pas aux structures spéciales et sensibles comme les barrages ou les centrales nucléaires qui, elles, sont soumises à une réglementation plus stricte.

Pour les constructions existantes, le relèvement du danger sismique de la dernière édition des normes SIA pose un sérieux problème. En plus de l'augmentation significative des sollicitations à considérer, plusieurs régions, comme Bâle et le Bas-Valais par exemple, ont été classées dans une zone de danger sismique supérieure.

Pour les structures existantes, la vérification sismique s'effectue selon le cahier technique SIA 2018: «Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants» [8]. En raison des coûts importants associés à l'application des récentes prescriptions sismiques dans le cas des constructions existantes, une optique différente de celle des ouvrages neufs a dû être formalisée par une approche novatrice basée sur les notions de risque. Par exemple, le niveau de sécurité minimum exigé est défini en relation avec l'acceptation du risque individuel. Notons qu'il est prévu de remplacer prochainement le cahier technique SIA 2018 par une nouvelle norme SIA 269/8 pour l'intégrer dans la collection de normes SIA 269, destinées aux constructions existantes.

DOCUMENTATIONS ET RECHERCHES

Les monuments historiques n'étant pas directement traités dans les normes de construction et leur évaluation sismique devant faire appel à des approches différentes (période de retour du séisme à considérer, par exemple), un rapport d'experts a d'abord été élaboré et publié en 2004 [2]. Ce document regroupe les réflexions

de base relative à la prise en compte du séisme dans les monuments historiques. L'OFPP a également initié et financé ensuite des travaux de recherche à l'EPFL qui ont abouti à la thèse de Mylène Devaux [9].

Dans son travail de recherche, Mylène Devaux a considéré les édifices et les méthodes de construction typiques des monuments historiques de l'Europe du Nord et, plus particulièrement, de la Suisse. Concernant les aspects historiques, une étude exhaustive des églises romanes a été réalisée. Ce travail inclut également une campagne pionnière d'essais statiques-cycliques [10] sur un mur historique en maçonnerie, reconstitué en laboratoire (figure 4). Les pierres utilisées sont des blocs de molasse d'origine provenant de la cathédrale de Lausanne et la construction du mur d'essai a été confiée à une entreprise spécialisée en rénovation de monuments historiques.

Par ailleurs, en collaboration avec le SED ce travail de recherche a permis de répertorier à Visperterminen, les ruines d'une chapelle qui avait été endommagée lors du séisme de 1755 et qui s'est vraisemblablement effondrée à la suite du séisme de 1855 (figure 4). Ce cas n'était pas connu auparavant.

Le produit principal du travail de recherche de Mylène Devaux est l'élaboration d'une méthodologie originale, proposant une évaluation en plusieurs étapes progressivement plus élaborées, associant des méthodes existantes à des développements spécifiques aux monuments historiques. Cette méthodologie permet une meilleure appréciation du comportement sismique de ce type de bâtiments. A l'échelle d'une région ou d'un pays, elle offre les outils nécessaires pour trier les édifices sensibles de ceux présentant une faible vulnérabilité et pour effectuer l'évaluation détaillée des monuments potentiellement vulnérables.

Depuis 2001, la Confédération poursuit ses activités dans la protection contre les séismes (mitigation des séismes) par le biais d'un programme de mesures qui est coordonné par la centrale de coordination pour la mitigation des séismes à l'OFEV. Dans ce cadre, l'OFEV a lancé un projet de promotion qui aborde la vérification de la sécurité sismique des monuments historiques et

son amélioration par des mesures constructives (confortement).

L'objectif principal est l'élaboration d'une documentation à l'intention des ingénieurs civils, des architectes et des conservateurs de monuments afin de leur offrir une base de sensibilisation et d'information commune. En intégrant toutes les disciplines concernées, la documentation va proposer une méthodologie pour la vérification et protection sismique des monuments historiques. L'influence très importante des aspects interdisciplinaires (construction, histoire de l'architecture, recherche de construction, conservation des bâtiments historiques et technologie des matériaux) sur l'élaboration des concepts de confortement sera prise en compte. A titre d'illustration, plusieurs exemples types de bâtiments importants sur le plan culturel et historique y seront traités de manière détaillée de façon à servir d'exemple pour ce type d'analyses en Suisse.

Comme « sous-produit », une documentation technique destinée en premier lieu aux ingénieurs civils est planifiée. Elle traitera les questions et les aspects spécifiques des monuments historiques suivants:

- Relevé de l'état (documentation de sécurité, dossiers, sondages, matériaux etc.)
- Détermination des actions sismiques
- Particularités de la modélisation
- Particularités de l'évaluation de la sécurité sismique
- Mobilier (orgue, par exemple)
- Proportionnalité des mesures de sécurité sismique
- Concepts de confortement



Figure 4 Tests statique-cycliques à l'EPFL de refends en maçonnerie composés de pierres de la cathédrale de Lausanne (à gauche) [9]. Chapelle de Vispeterminen qui s'est probablement effondrée lors du séisme de 1855 (à droite) [photo M. Devaux].

EXEMPLES REALISES EN SUISSE

En Suisse depuis 2003, plusieurs monuments historiques ont été évalués et, le cas échéant, confortés. Sur le plan de la Confédération, on peut citer par exemple les projets de transformation du musée national suisse à Zurich ou celui de la Mannschaftskaserne à Thoune. Dans ce dernier cas, il s'agit d'un bâtiment en maçonnerie de pierre naturelle construit en 1865. Son importance historique réside dans le fait qu'il est le tout premier bâtiment d'instruction de l'armée suisse. Il a subi plusieurs transformations au cours de son utilisation, en particulier une première rénovation en 1965. Dans le contexte d'une nouvelle rénovation complète, une évaluation détaillée intégrant les aspects propres aux monuments historiques a permis de montrer qu'aucune mesure de renforcement spécifique aux aspects sismiques n'était en fait nécessaire.

Pour la préparation de la documentation de l'OFEV (voir ci-dessus), deux exemples typiques ont été traités de manière détaillée. L'exemple de l'Ancien Hôpital à Sion en fait partie et est brièvement décrit ci-après.

Propriété de la ville de Sion, l'Ancien Hôpital est un bâtiment en maçonnerie de pierre naturelle avec des planchers en bois. Il a été construit en plusieurs étapes entre 1766 et 1932. Le bâtiment est en forme de "U" et se compose de trois ailes : les deux ailes parallèles Nord et Sud,

reliées par une aile transversale, l'aile Est (figure 5). La majeure partie du bâtiment comporte quatre niveaux avec des combles et un sous-sol partiel. La structure porteuse est constituée de nombreux murs en maçonnerie de pierre naturelle d'une épaisseur de 70 cm au moins. Les planchers sont en bois, de même que les combles. Le centre de l'aile transversale est occupé par une chapelle dont le clocher domine le reste du bâtiment. La chapelle est classée monument historique d'importance nationale alors que le reste du bâtiment est classé d'importance régionale.

Le contrôle de la sécurité sismique du bâtiment a d'abord été effectué dans le contexte d'un projet initial de transformation qui partait de l'option radicale du remplacement intégral des planchers par des dalles en béton armé. En assurant l'effet diaphragme, cette mesure permet d'atteindre une situation acceptable du point de vue sismique au sens du cahier technique SIA 2018. Suite aux coûts élevés liés à la transformation initialement prévue, une variante moins invasive, consistant à limiter au maximum les travaux de transformation, a été proposée. Dans cette variante, la conservation des planchers en bois implique l'absence d'effet diaphragme et a nécessité une nouvelle étude qui repose sur une modélisation numérique raffinée afin de pouvoir cerner d'une manière suffisamment détaillée et réaliste le comportement sismique hors plan des éléments en maçonnerie (figure 5). Cette étude a

mis en évidence que des effondrements locaux partiels n'apparaissent qu'à partir de sollicitations sismiques deux fois plus élevées que celles prescrites dans la norme SIA. Par conséquent, le bâtiment de l'Ancien Hôpital de Sion est capable de résister aux séismes sans interventions invasives générales. Des mesures locales limitées, comme le contrôle et l'amélioration éventuelle de l'ancrage des poutres des planchers sont suffisantes.

Le récent cas particulier de la transformation de la Tour Bel-Air à Lausanne permet de mettre en évidence le potentiel d'utilisation des mesures in-situ pour le pronostic sismique.

Le complexe Bel-Air Métropole a été construit au début des années 1930 par l'architecte Alphonse Laverrière qui a soigné tous les détails du bâtiment, élaborant même les ferronneries et les menuiseries. La Tour avec ses 16 étages et ses 80 m de haut est le premier gratte-ciel de Suisse. Lors de sa construction, le complexe Bel-Air a suscité une très forte polémique quant au bouleversement du paysage urbain qu'il entraîne. Il est aujourd'hui inscrit comme bien culturel suisse d'importance nationale et la Tour fait actuellement l'objet d'une rénovation majeure. [12]

La structure porteuse de la Tour est calquée sur celle de ses modèles américains, c'est-à-dire une ossature en charpente métallique remplie par des panneaux en maçonnerie de briques. Une première analyse sismique considérant l'ossature métallique uniquement a conclu à l'absence de problèmes sismiques. Cependant, l'hypothèse d'une ossature métallique «nue» n'est pas réaliste et de surcroît trop favorable, car elle conduit à une structure excessivement souple. L'effet des remplissages de maçonnerie sur le comportement dynamique ne peut pas être négligé, mais il n'est pas facile à prendre en compte dans le modèle numérique. En revanche, il est relativement aisé de déterminer la période fondamentale d'une structure existante à l'aide de mesures de vibrations ambiantes. Des mesures in-situ ont donc été effectuées sur la Tour et elles ont montré que la période fondamentale est en réalité environ 4 fois plus petite que celle calculée avec un modèle ne considérant que

l'ossature métallique. Sur le plan sismique, cette différence est significative, car cela implique que les efforts à considérer sont également environ 4 fois plus élevés.

En tenant compte de la participation de la maçonnerie à la résistance, la sécurité sismique de la Tour Bel-Air a malgré tout pu être prouvée. Par ailleurs, les remplissages en maçonnerie sont très vulnérables aux sollicitations hors plan. Toutefois, dans le cas de la Tour Bel-Air l'examen des détails constructifs a montré que les panneaux en maçonnerie sont convenablement retenus latéralement, car leurs extrémités sont enchâssées dans les espaces vides des profilés de l'ossature métallique.

Par conséquent, malgré une configuration réelle apparemment moins favorable qu'admise lors de la modélisation initiale, les analyses approfondies ont montré que la sécurité sismique de la Tour Bel-Air est satisfaisante sans mesures d'intervention spécifiques.

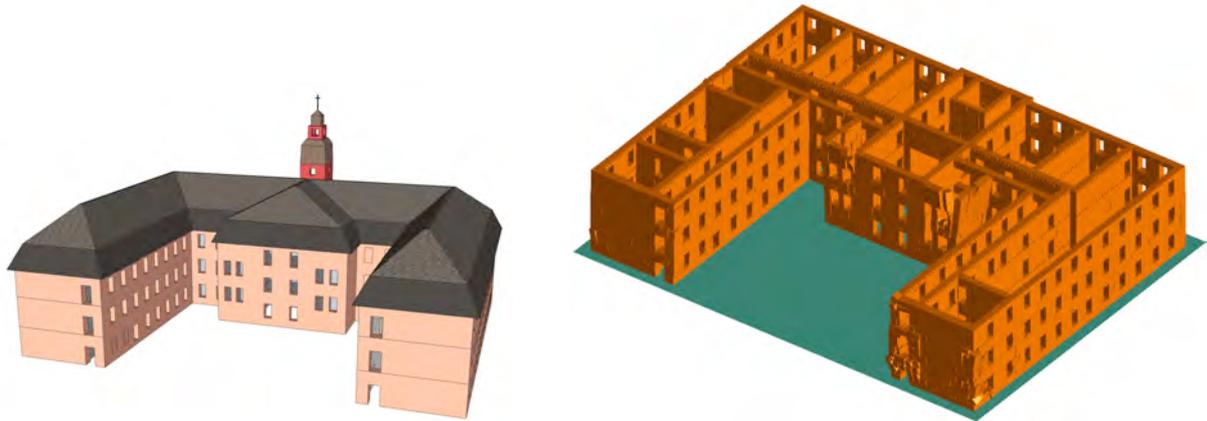


Figure 5 Ancien Hôpital de Sion (à gauche). Modélisation numérique raffinée en éléments finis (à droite). [11]

RÉFÉRENCES

- [1] Lestuzzi, P., Séismes et Construction. Eléments pour non-spécialistes, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, ISBN 978-2-88074-740-4, Lausanne, 2008.
- [2] Laupper, H., Büchel, R., Lateltin, O., Lestuzzi, P., Schüpbach, H., Thurnherr, S., Wenk, T., Zemp, I.: Tremblements de terre et biens culturels, Rapport d'experts, Office fédéral de la protection de la population (OFPP), Section de la protection des biens culturels (PBC), Berne, 2004.
- [3] Smit P.: *Entstehung von Erdbeben*. KGS Forum PBC PCP. No. 4, Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS), Kulturgüterschutz (KGS), Bern 2004.
- [4] Wenk T.: *Erkenntnisse aus Ingenieurssicht*. KGS Forum PBC PCP. No. 4, Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS), Kulturgüterschutz (KGS), Bern 2004.
- [5] Fäh D. et al.: *Historische Erdbeben in der Schweiz*. KGS Forum PBC PCP. No. 4, Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS), Kulturgüterschutz (KGS), Bern 2004.
- [6] Sellami S. et al.: *Seismic hazard map of Switzerland*. Service sismologique suisse (SED), 2002.
- [7] Lestuzzi P.: *Evaluation sismique des monuments du XXe siècle*. In Law and the Conservation of 20th Century Architecture, Edited by R. Grignolo, Mendrisio Academy Press, SilvanaEditoriale, Italy, 2014.
- [8] SIA 2018 (norme): *Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants*. Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA), Zurich 2004.
- [9] Devaux, M.: *Seismic vulnerability of cultural heritage buildings in Switzerland*, Thèse EPFL N°4167, 2008.
- [10] Lestuzzi P.: *Recherche parasismique expérimentale en Suisse*. KGS Forum PBC PCP. No. 4, Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS), Kulturgüterschutz (KGS), Bern 2004.
- [11] Garofano A., Lestuzzi P.: *Evaluation of the Seismic Vulnerability of the "Ancien Hôpital de Sion"*

Using Applied Element Modelling (AEM) and Local Mechanism Analysis. Proceedings of COMPDYN 2015. 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Crete Island, Greece, 25–27 May 2015.

- [12] Valeiras O., Pirazzi C., Perret J.: *Rénovation de la Tour Bel-Air. Structure de la Tour Bel-Air*. Tracés No. 17/2015, Lausanne 2015.